GLAS, STAHL, MAUERWERK: PRAXISTAUGLICHE SICHERHEITSKONZEPTE FÜR FASSADEN

Malte von Ramin¹

¹ Fraunhofer-Institut für Kurzzeitdynamik, Ernst-Mach-Institut Am Klingelberg 1, 79588 Efringen-Kirchen E-Mail: malte.von.ramin@emi.fraunhofer.de

Schlagwörter: Explosionsbelastung, Fassadenmaterialien, Sicherheitskonzept, Ingenieurmethoden, Bauteilanalyse, Gefährdungsanalyse.

Abstract. Als Hülle von Gebäuden werden Fassaden bei horizontaler äußerer Einwirkung primär beansprucht. Explosionsereignisse im Außenraum stellen eine extreme Form einer solchen horizontalen Beanspruchung dar, so dass der Planer bei der Konzeptionierung von Fassaden mit Blick auf mögliche Explosionsbelastungen vor besondere Herausforderungen gestellt wird. Je nach Distanz der Fassade von der Explosionsquelle und je nach Fassadenmaterial sind unterschiedliche Analysemethoden sinnvoll, um die Bauteilreaktion auf die dynamische Belastung zu beschreiben, wobei je nach Ausgestaltung der Fassade wiederum unterschiedliche Versagensmodi relevant sein können. Kommt es zu einem Versagen des Fassadenbauteils unter Explosionsbelastung können die Folgen von weitreichendem Splitter- und Trümmerflug bis zum Verlust der Standsicherheit des Gebäudes reichen – letzteres vor allem bei Fassaden, die am vertikalen Lastabtrag beteiligt sind. Der vorliegende Beitrag charakterisiert zunächst Explosionseinwirkungen und beschreibt Möglichkeiten zur dynamischen Bauteilanalyse. Anschließend wird auf Besonderheiten einzelner gängiger Fassadenmaterialien hinsichtlich möglicher Versagensformen, ihrer Auslegung gegen Explosionsbelastung und auf Ansätze zu möglicher Verstärkung eingegangen.

1 EINFÜHRUNG

Fassaden kommt bei dem Schutz von Gebäuden vor äußeren Einwirkungen eine im Wortsinne "tragende" Rolle zu. Neben der Gestaltung des äußeren Erscheinungsbilds schützt die Fassadenkonstruktion vor Klimaeinflüssen und nimmt horizontale Belastungen auf, um sie an das dahinterliegende Tragwerk weiterzugeben. In der quasi-statischen Bemessung von Gebäuden bildet die Windbelastung die primäre horizontale Druck- und/oder Sogbelastung, die durch die Fassade aufgenommen wird. Die Windlast ist eine dynamische Einwirkung. Zur besseren Handhabung im "üblichen Hochbau" ist es jedoch Stand der Technik, aufbauend auf dem Frequenzspektrum der Windbewegung statische Ersatzlasten zu verwenden [1]. Auch Erdbebenlasten sind übliche dynamische horizontale Belastungen, die häufig über Ersatzlastverfahren betrachtet werden. Allerdings spielt die Fassadenkonstruktion zur Aufnahme von Erdbebenlasten nur eine untergeordnete Rolle, es sei denn, die Fassade bildet gleichzeitig das Haupttragsystem.

Bei kurzzeitdynamischen Extrembelastungen reicht eine quasi-statische Betrachtung unter Zuhilfenahme von statischen Ersatzlasten nicht aus. Neben der dynamischen Reaktion des Bauteils mit seinen Schwingeigenschaften (die Belastungsdauer liegt im Allgemeinen im Bereich der Eigenschwingungsdauer des Bauteils oder darunter) ist auch das meist nichtlineare, dehnratenabhängige Materialverhalten zu berücksichtigen. Für die Auslegung eines effektiven Schutzes durch Fassadenbauteile ist es notwendig, die belastende Energie durch Verformung zu dissipieren und dabei sicherzustellen, dass das Gesamtsystem in der Lage ist, sowohl die auftretenden Kräfte als auch die plastischen Verformungen der betroffenen Bauteile aufzunehmen. Eine quasi-statische Betrachtung im elastischen Bereich der Bauteilantwort wäre hier sehr konservativ. Ferner sind statische Ersatzlasten nicht direkt in der Lage, Belastungen zu repräsentieren, die durch eine signifikante Sogphase gekennzeichnet sind, die häufig mit dem Zurückschwingen des belasteten Bauteils überlagert wird. Hier wäre der Ansatz getrennter Belastungsrichtungen – analog zur Windbemessung – notwendig; nur, dass eben die plastische Bauteilantwort weiterhin unberücksichtigt bliebe. Bei zeitlich komplexen Belastungsverläufen, die mehrere aufeinander aufbauende Druckspitzen aufweisen, greifen Ersatzlasten generell zu kurz. Es folgt, dass Fassadebauteile unter kurzzeitdynamischer Belastung auch dynamisch bemessen werden müssen. Jedoch unterscheiden sich auch hier die möglichen Versagensmodi abhängig von der Art der dynamischen Belastung. Auf die dynamische Belastung und die möglichen Versagensmodi von Fassadenbauteilen wird im Folgenden zunächst eingegangen, bevor unterschiedliche Analysemöglichkeiten aufgezeigt werden und Besonderheiten bei einzelnen Fassadenmaterialien beschrieben werden, die dann letztendlich auch zu möglichen materialspezifischen Schutzkonzepten führen.

2 DYNAMISCHE BAUTEILBELASTUNG AUS EXPLOSIONEN

Wie in der Einleitung erwähnt, beziehen sich die nachfolgenden Abschnitte auf Spezifika kurzzeitdynamischer Belastungen, wobei im Zusammenhang mit den übergeordneten Themen der Bau-Protect hauptsächlich Explosionsbeanspruchungen von Bauteilen beschrieben werden. Abhängig von der jeweiligen Bauteilreaktion sind Belastungen im Nah- und im Fernfeld einer Explosion zu unterscheiden. Um Fassadenbauteile zielgerichtet und effektiv vor Explosionsbelastungen schützen zu können, ist es zunächst notwendig, die Einwirkungsseite näher zu charakterisieren.

2.1 Explosionscharakteristika

Abhängig von der Ausbreitgeschwindigkeit des Reaktionsprozesses werden zwei Explosionsarten unterschieden: Deflagrationen und Detonationen. Deflagrationen entstehen häufig im Zusammenhang mit Gaswolkenexplosionen. Auch schwache Explosivstoffe wie Schwarzpulver setzen häufig deflagrativ um. Deflagrationen beschreiben einen Verbrennungsvorgang, dessen Geschwindigkeit geringer als die Schallgeschwindigkeit innerhalb des verbrennenden Mediums ist. Der Explosionsdruck entsteht durch die Volumenänderung des erhitzten Gases. Vorgänge, die sich schneller als mit der Schallgeschwindigkeit innerhalb des jeweiligen Mediums ausbreiten, werden als Detonationen bezeichnet. Detonationen folgen beispielsweise dem Initiieren von hochexplosiven Sprengstoffen, oder entstehen auch aus Umschlagvorgängen in Gaswolkenexplosionen, in denen die Fortsetzung des Verbrennungsvorgangs durch Verwirbelungen der Flammenfront beschleunigt wird (DDT, "Deflagration to Detonation Transition").

Bei einer Detonation erzeugen die sehr schnell in die Umgebungsluft expandierenden Reaktionsprodukte (Detonationsschwaden) eine Stoßwelle mit nachfolgender Strömung von Luft und Schwaden. Die für Bauteile, bzw. alle exponierten Objekte, belastende Blastwelle bezeichnet das physikalische System aus Stoßwelle und nachfolgender Strömung [2]. Die Entstehung einer Blastwelle kann somit auf die Reaktion in Form einer in kürzester Zeit stattfindenden Umsetzung von chemischer Energie in kinetische, interne und potentielle Energie sowie ihre Freisetzung auf die umgebende Luft und die Reaktionsprodukte zurückgeführt werden. Die umgesetzte chemische Energie hängt sowohl von der Art des Sprengstoffes als auch von den Umgebungsbedingungen ab. Bei der Detonation von TNT, welches häufig als Referenz für die Beschreibung der Wirkung anderer Sprengstoffe verwendet wird, kann eine Energiemenge von ca. 4,68 MJ pro Kilogramm TNT angenommen werden [2]. Nach dem Initiieren eines Sprengstoffes wird er von der Detonationsfront durchlaufen, deren Ausbreitgeschwindigkeit beträgt je nach Art des Sprengstoffes zwischen 1500 und 9000 m/s [3]. Bei TNT beträgt die Geschwindigkeit ca. 7000 m/s [4]. Nachdem die Detonationsfront die Sprengstoffoberfläche erreicht hat, breiten sich die Detonationsschwaden rapide aus. Mit zunehmendem Abstand vom Detonationsort bildet sich eine Stoßfront in der verdrängten Umgebungsluft, nachdem die Schwaden von der Luft getrennt wurden. Abbildung 1 zeigt auf der linken Seite das Druckprofil im Nahfeld der Detonation als Funktion des Abstands bezogen auf den Ladungsradius. Mit zunehmender Distanz zum Initiierungsort nimmt der Abstand zwischen Stoßwelle und Schwaden zu, da sich die Stoßwelle schneller ausbreitet als die Schwaden. Im Fernfeld der Explosion sind Stoßwelle und Schwaden deutlich voneinander getrennt (Abbildung 1, rechts).



Abbildung 1: Druckprofil in Abhängigkeit zum Abstand des Initiierungsorts (normiert über den Ladungsradius). Links, Nahbereich; rechts, Fernfeld [2].

Betrachtet man den zeitlichen Verlauf des sich im Fernfeld ungehindert ausbreitenden Drucks an einem festen Ort, kann der idealisierte Druck-Zeit-Verlauf über eine in Abbildung 2 dargestellte Exponentialfunktion annähernd beschrieben werden [5]. Gegenüber dem vor dem Eintreffen der Stoßfront herrschenden Umgebungsdruck P_0 springt zum Zeitpunkt t_1 der Druck annähernd instantan auf den Spitzenüberdruck P_s an. Über den Zeitraum T_s fällt er anschließend exponentiell wieder ab (positive Druckphase). Nach dem Wiedererreichen des Umgebungsdrucks setzt eine Sogphase ein, während derer die Druckwelle sich wieder zum Explosionsort hinbewegt. Die Sogphase kann länger als die erste Überdruckphase sein, ist von der Amplitude her jedoch weit weniger ausgeprägt. Dennoch, gerade im Zusammenhang mit dem Zurückschwingen eines Bauteils nach der initialen Anregung kann die Sogphase für die Bauteilauslegung kritisch sein. Daher ist es wichtig, bei der Bemessung von Fassaden nicht nur die Überdruckphase, sondern den gesamten Belastungs- und Reaktionsverlauf zu betrachten. Die Intensität der Blastwelle wird nicht allein durch den Spitzenüberdruck P_s sondern ebenfalls durch die Belastungszeit definiert. Dies geschieht über den zugehörigen spezifischen Blastimpuls I als das Integral des positiven Überdrucks über die Zeit T_s .

Trifft die Blastwelle nun auf ein Hindernis, beispielsweise die Fassade eines Gebäudes, wird sie von diesem reflektiert und überlagert sich mit der nachströmenden Luft. Für das Fassadenbauteil ergibt sich so eine sehr deutliche Erhöhung des reflektierten Spitzenüberdrucks P_r gegenüber dem Wert bei ungehinderter Ausbreitung (vorbeistreifender Druck oder "incident pressure") bei ungefähr gleichbleibender Einwirkungsdauer T_s . In analytischen Betrachtungen wird diese Erhöhung häufig durch einen empirisch ermittelten Faktor $C_{R\alpha}$ in Abhängigkeit von Anströmwinkel α und Spitzenüberdruck P_s beschrieben [6].



Abbildung 2: Idealisierter Druck-Zeit-Verlauf nach Friedlander.

2.2 Explosionsreaktionen im Nah- und Fernfeld

Ebenso wie bei den Unterschieden von Blastbelastungen im Nah- oder im Fernfeld, ist auch die Bauteilreaktion auf die Belastung maßgeblich von Ladungsmenge und Ladungsabstand beeinflusst.

Im Nahbereich und bei Kontaktdetonationen können die Spitzenüberdrücke auf das Bauteil in der Größenordnung von mehreren Gigapascal (GPa) liegen, wobei die Belastungsdauer im Bereich von Mikrosekunden sehr kurz ist. Durch den geringen Abstand ist die Beanspruchung sehr lokalisiert und der Versagensmodus ist im Allgemeinen durch ein lokales Materialversagen oder ein Durchstanzen gekennzeichnet. Weiterhin spielen Wellenausbreitungsphänomene innerhalb der Querschnittsgrenzen eine dominierende Rolle.

Im Fernfeld hingegen liegen die Belastungen – je nach Ladungsmenge– im Bereich von Kilopascal und die Belastungsdauer beträgt einige Millisekunden. Weiterhin ist gegenüber der im Nahbereich eindeutig lokalen Beanspruchung die Belastung – durch die Ausbildung einer gleichmäßigen Stoßfront – für das Bauteil maßgeblich flächig, so dass man bei üblichen Fassadenbauteilgrößen von einer über die Bauteilfläche gleichverteilten zeitlich veränderlichen Belastung ausgehen kann. Die Reaktion des Bauteils ist damit über seine zeitabhängige Auslenkung gekennzeichnet und das Versagen entspricht einem Biegeversagen. Dies schließt natürlich nicht aus, dass es an den jeweiligen Auflagern zu einem Versagen kommen kann, welches gegenüber der Biegeauslenkung dominiert. Insbesondere bei punktförmigen Auflagern, etwa bei Glasscheiben oder bei Stahlbauteilen, ist die Auflagerreaktion die maßgebliche Bestimmungsgröße. Stahlbleche weisen beispielsweise eine sehr hohe Duktilität auf, so dass sie unter der Biegung häufig nicht versagen. Stattdessen reißen die Anschlussmittel an den Auflagern aus.

Da nun die Abhängigkeiten von Ladungsmenge, Abstand und Belastungsgröße nichtlinear sind, bietet die Verwendung des skalierten Abstands Z die Möglichkeit einer ingenieurmäßigen Einordnung, ab wann mit welcher Versagensform zu rechnen ist. Um Berechnungen von Druckverläufen, ausgehend von Explosionen mit unterschiedlichen Sprengstoffen vergleichbar zu machen, oder allgemein zur Übertragung von Berechnungs- und Messergebnissen auf veränderte Eingangsparameter, können Skalierungsgesetze angewandt werden [2, 5, 7]. Die Voraussetzung einer Anwendbarkeit von Skalierungsgesetzen ist die Ähnlichkeit der betrachteten Effekte. Bei Blastwellen im Fernfeld einer Explosion – auch bei unterschiedlichen Sprengstoffen Sprengstoffen und Explosionsquellengeometrien gegeben. Der skalierte Abstand Z wird gemäß Gleichung (1) in Abhängigkeit des Abstands *R* zwischen Ladung und Messpunkt und der Ladungsmenge *W*, ausgedrückt in Kilogramm TNT-Äquivalent, definiert.

$$Z = \frac{R}{W^{1/3}} \tag{1}$$

Abhängig von Materialarten und Bauteil können Grenzbereiche für den skalierten Abstand definiert werden, in denen der Versagensmodus von einem Durchstanzen in ein Biegeversagen übergeht. Für Stahlbetonbauteile wurde am Ernst-Mach-Institut der Grenzwert $Z_{lim} \sim 0.5 \text{ m/kg}^{1/3}$ in vielen Versuchsserien beobachtet. Bei Scheiben und Rahmenstrukturen lag der Wert eher bei $Z_{lim} \sim 4 \text{ m/kg}^{1/3}$ [8]. Diese Werte sind statistisch nicht vollständig abgesichert, liefern jedoch einen Anhaltspunkt, wenn es um die Beurteilung und die Wahl der Nachweisführung von Bauteilen geht.

3 DYNAMISCHE BAUTEILANALYSE

Je nach Charakter der Bauteilbelastung – im Nahbereich oder aus dem Fernfeld eine Explosion – bieten sich unterschiedliche Verfahren an, Fassaden hinsichtlich ihrer Explosionsfestigkeit zu bewerten. Dabei ersetzt die Betrachtung der Bauteilreaktion unter der dynamischen Explosionseinwirkung keinesfalls die quasi-statische Bemessung hinsichtlich der Regelbelastungen aus Eigengewicht, Schnee- und Windlasten oder auch Erdbeben, sondern ergänzt diese. Entsprechend sind die Ergebnisse der Betrachtung der Explosionsreaktionen als außergewöhnlicher Lastfall mit den jeweiligen anderen Belastungsarten gemäß den einschlägigen Baunormen zu überlagern [9].

3.1 Biegebauteile

Bauteile, die hauptsächlich auf Biegung beansprucht werden, können in vielen Fällen mit Feder-Masse-Modellen hinreichend genau beschrieben werden [7, 10–12]. Grundannahme der Ein-Massen-Schwinger-Modelle (EMS-Modelle) ist, dass das Biegeproblem auf ein äquivalentes EMS-Modell übertragen werden kann (Abbildung 3), für welches die Bewegungsgleichung (2) gelöst wird.



Abbildung 3: Übertragung eines Biegebauteils (links) auf ein EMS-Modell (rechts).

$$k_m \cdot m \cdot \ddot{x} + k_l \cdot p_s(x(t)) = k_l \cdot p(t) \tag{2}$$

Darin ist x(t) die Bauteilauslenkung in Abhängigkeit der Zeit, p(t) der zeitabhängige Belastungsverlauf, $p_s(x(t))$ die Rückstellkraft und *m* die Masse des Systems. Weiterhin werden Masse- und Lastfaktoren k_m und k_l eingeführt, die eine Äquivalenz hinsichtlich Formänderungsenergie, kinetischer Energie und Arbeit der äußeren Kräfte herstellen, um so die dynamische Gleichheit der Systemantwort zu erhalten [13]. Die Faktoren k_m und k_l sind abhängig von den Auflagerbedingungen, dem elastischen oder plastischen Verformungsbereich, sowie bei plattenartigen Bauteilen vom Stützweitenverhältnis. Ein Dämpfungsterm in der Bewegungsgleichung wird häufig vernachlässigt, da für eine kritische Bruchauslenkung im Allgemeinen die erste Auslenkungsspitze verantwortlich ist. Die einzige nicht direkt vom System gegebene Komponente in Gleichung (2) ist die Rückstellkraft $p_s(x(t))$, die den Widerstand des Bauteils gegenüber der dynamischen Belastung beschreibt. Die Widerstandsfunktion kann als Funktion der flächenbezogenen Steifigkeit c_0 und des statischen Bruchdrucks p_0 gemäß Gleichung (3) beschrieben werden [14–16].

$$p_s(x(t)) = \frac{2 \cdot p_0}{\pi} \arctan\left(\frac{\pi \cdot c_0 \cdot x(t)}{2 \cdot p_0}\right)$$
(3)

Mit Hilfe einer experimentell, beispielsweise an Stoßrohrversuchen, ermittelten Bruchauslenkung x_{Br} kann nun gegenüber der elastischen Bauteilverformung x_{el} nach Gleichung (4) ein Ausnutzungsgrad β_{Br} (Gleichung (5)) bestimmt werden.

$$x_{el} = \frac{p_0}{c_0} \tag{4}$$

$$\beta_{Br} = \frac{x_{Br}}{x_{el}} \tag{5}$$

Für verschiedene Ausnutzungsgrade $1 \le \beta_{crit} \le \beta_{Br}$ lassen sich nun verschiedene Grenzauslenkungen $x_{el} \le x_{crit} \le x_{Br}$ berechnen, für die man die Bewegungsgleichung für eine Vielzahl von Belastungstupeln aus Druck und Impuls lösen und grafisch auftragen kann. Das Ergebnis sind Isolinien, die das gleiche Bauteilverhalten, d.h. die gleiche Grenzauslenkung, bei verschiedenen Druck/Impuls-Kombinationen repräsentieren. Entsprechend wird eine solche Darstellung Druck-Impuls-Diagramm genannt (Englisch "Pressure-Impulse-Diagram", P-I-Diagramm). Definiert man über die unterschiedlichen Ausnutzungsgrade Bauteilschädigungsgrade, so lassen sich so sehr übersichtlich die zu erwartenden Bauteilreaktionen auf eine dynamische Belastung darstellen. Abbildung 4 zeigt ein beispielhaftes PI-Diagramm mit drei Grenzlinien für die Bauteilschädigungsgrade 0 bis 3. Näheres zu Bauteilschädigungsgraden und der Bewertung von Gesamtgebäudeschäden in [10, 17].

Die Verwendung von P-I-Linien ist ein seit Jahren erfolgreich genutzter Berechnungsweg für Biegebauteile unter Explosionsbelastung, der sich eben auch hervorragend zur Dimensionierung von Fassadenbauteilen und der Bewertung möglicher Schutzkonzepte eignet [7, 12, 15–18]. Voraussetzung bei der Konzipierung von Schutzelementen auf Basis von P-I-Linien ist, dass die Elemente sich eben auch wie ein Biegebauteil verhalten und entweder mit dem zu schützenden Bauteil einen Verbund eingehen, oder als eigenständig lastabtragendes Bauteil dienen können.

Für sehr duktile Bauteile werden häufig andere Bewertungskriterien definiert, die weniger auf einem Biegeversagen beruhen, als auf Grenzverformungen, wie Auflagerrotationen oder maximal zulässigen Durchbiegungen. Auch für solche Bauteile können die zuvor genannten Ausnutzungsgrade definiert werden, nur muss das dynamische Bauteilverhalten explizit berechnet werden. Haupteingangsgrößen für die Bewegungsgleichung bleiben aber auch hier die Masse und die nichtlineare Steifigkeit des Systems [17].



Abbildung 4: Darstellung von Isolinien der gleichen Systemantwort bei verschiedenen Belastungskombinationen in einem P-I-Diagramm.

3.2 Bauteile im Nahfeld einer Explosion

Bauteile im Nahfeld einer Explosion können auf Grund der Charakteristika der Schädigungen nicht mit den zuvor beschriebenen P-I-Diagrammen oder anderen Modellen, die auf dem Biegeverhalten des Bauteils beruhen, analysiert oder bemessen werden. Wie eingangs erwähnt, ist die Schädigung bei kleineren skalierten Abständen hauptsächlich lokal und der Schädigungsprozess wird durch die Materialeigenschaften unter der dynamischen Einwirkung dominiert. Als Analysewerkzeug bieten sich hier numerische Simulationen mit Hilfe expliziter Zeitschrittverfahren an, welche die Stoßwellenausbreitung im Material bei einer Auflösung im Bereich von Mikrosekunden beschreiben ("Hydrocodes"). Das typische Ergebnis einer Hydrocode-Berechnung ist eine detaillierte Abbildung der Schädigung des Materials. Abbildung 5 zeigt beispielhaft die Vorder- (links) und Rückseite (rechts) eines Versuchskörpers nach einer Explosion im Nahbereich ($Z \cong 0,09 \text{ m/kg}^{1/3}$) sowie das Ergebnis einer entsprechenden numerischen Simulation. Gut zu erkennen sind die Detailtiefe der Ergebnisse und eben auch die Lokalität der Schädigung.

In Abbildung 6 ist ein vermaßter Schnitt durch den Probekörper dargestellt (oben), der weiterhin mit dem Schädigungsbild (Mitte) und dem Ergebnis einer vereinfachten Berechnung mit Hilfe eines Ingenieurtools [19] (unten) ergänzt wurde. Es wird deutlich, dass mit dem Ingenieurtool nicht die hohe Detailtiefe der numerischen Simulation erreicht werden kann. Dennoch ist das Ergebnis hinreichend genau, und insbesondere konservativ, während die Berechnungszeit nur einen Bruchteil derjenigen der numerischen Simulation beträgt. Wichtig bei der Bauteilanalyse mit Hilfe von Hydrocode-Simulationen sind neben der korrekten Modellierung und Vernetzung die Wahl des korrekten Zeitschritts und der entsprechenden Materialmodelle [20]. Nur bei korrekter Charakterisierung des Materials und der entsprechenden Wahl der Materialparameter kann die Simulation natürlich ein adäquates Ergebnis liefern, welches im besten Fall in wiederholten Experimenten validiert wird.



Abbildung 5: Stahlbetonkörper nach Nahbereichsdetonation (oben) und Ergebnis der numerischen Simulation (unten) [11].



Abbildung 6: Schnitt durch das Simulationsergebnis. Oben und mitte: Hydrocode-Simulation, unten: Ingenieurtool XPLOSIM [19].

4 ASPEKTE BEI DER KONZEPTIONIERUNG VON FASSADENSYSTEMEN

Bei der Konzeptionierung von Fassadensystemen im Hinblick auf mögliche Explosionsbelastungen sind neben dem Widerstand des einzelnen Bauteils weitere Aspekte zu beachten. Welches Fassadenmaterial und –system letzten Endes gewählt wird, hängt selbstverständlich von vielfältigen Faktoren ab, von denen die Explosionssicherheit nur einer sein kann. Dennoch sollten zumindest die folgenden Überlegungen in Betracht gezogen werden:

Die massiven Fassadenmaterialien wie Mauerwerk, Stahlbeton oder auch Sonderbetone (faserverstärkte Betone, DUCON[®]) beteiligen sich – zumindest im niedriggeschossigen Hochbau – häufig am Lastabtrag des Gesamtgebäudes, während Stahl- und Glaskonstruktionen als äußere Hülle ihre Belastungen an das primäre Tragwerk, meist eine dahinterliegende Rahmenstruktur, weitergeben. Damit einher geht dann selbstverständlich, dass bei der Schädigung der "weicheren" Fassadenelemente das Primärtragwerk weniger beansprucht wird und das Risiko eines fortschreitenden Gebäudekollapses verringert wird. Aufgrund ihrer geringen Steifigkeit und Masse kann bei Glas und auch Stahlblechen jedoch davon ausgegangen werden, dass der zu erwartende Schaden an der Fassade großflächiger ausfällt.

Ebenso muss beachtet werden, dass wenn es zu einem Versagen der Fassadenelemente kommt, von den Fassadentrümmern eine erhebliche Gefährdung für Personen im Innen- und Außenraum ausgehen kann, die unabhängig von der primären Gefährdung durch die Blastwelle ist. Auf einige besondere Aspekte einzelner Materialien wird nachfolgend eingegangen.

4.1 Stahlbeton

Stahlbetonfassaden haben den Vorteil, dass sie direkt am primären vertikalen Lastabtrag des Gebäudes beteiligt werden können und gegenüber der horizontalen Explosionseinwirkung sehr robust sind. Sie lassen sich mit den zuvor beschriebenen Ingenieurverfahren bemessen, so dass mit geeigneter Wahl von Bauteildicke, Betonfestigkeit und Bewehrungsgrad häufig ein ausreichendes Sicherheitsniveau erreicht werden kann. Bedingt das geforderte Schutzniveau eine sehr große Bauteildicke, kommen häufig Sonderbetone wie stahlfaserverstärkte Betone, hochfeste Betone oder DUCON[®] zum Einsatz, die auf Grund ihrer höheren Zugfestigkeit und Duktilität gegenüber Explosionseinwirkungen ein sehr günstiges Verhalten aufweisen [16]. Gerade bei Nahfeldbelastungen und Kontaktdetonationen muss jedoch der gefährliche Trümmerwurf beachtet werden, der von Betonbauteilen ausgehen kann. Je nach Belastungsart und –größe können die zwischen wenigen Gramm und mehreren Kilogramm schweren Betonfragmente Geschwindigkeiten bis 1500 m/s oder darüber hinaus erreichen. Zum Schutz des Innenraums bieten sich Liner und mattenartige Schutzplatten auf Kohlenfaserbasis an, die sich ebenso zur Verstärkung von Mauerwerk und Fenstern eignen [21].

4.2 Mauerwerk

Auf Grund seiner sehr geringen (rechnerischen) Biegezugfestigkeit bietet der Verbundwerkstoff Mauerwerk nur wenig Widerstand gegenüber horizontalen Belastungen und damit auch wenig Schutz gegen Explosionsbelastungen. Geeignete Verstärkungsmaßnahmen wie Ausführung bewehrten Mauerwerks oder nachträgliche Ertüchtigung mittels Kohlefaserlamellen können jedoch fehlende Biegezugfestigkeit ersetzen, so dass sich Widerstandniveaus erreichen lassen, die insbesondere im niedrigeren Blastbelastungsbereich, wie er im Umfeld der verfahrenstechnischen Industrie häufig ist, ausreichen [22, 23]. Ebenso eignen sich die zuvor genannten Schutzplatten, den Mauerwerkswiderstand gegenüber Blastbelastung zu erhöhen. Häufig ist es jedoch so, dass diese Maßnahmen zwar den Trümmerwurf nach innen (bei Außenraumexplosion) begrenzen und den Biegewiderstand teilweise erhöhen, dass das Bauteil aber ebenso sehr stark verformt wird. Die Folge ist, dass bei sehr großen Verformungen die dauerhafte vertikale Standsicherheit häufig verloren geht, was insbesondere dann wichtig ist, wenn die Fassade Teil des primären Tragwerks ist.

Das von Mauerwerk unter Explosionseinwirkung ausgehende Gefährdungspotential aus Trümmerwurf wurde in einer Versuchsserie am EMI kürzlich untersucht [24 bis 26]. Demnach sind bei einschaligem Mauerwerk unter einer Belastung von p = 150 kPa und I = 1500 kPa ms noch in Bereichen von über 5 m hinter der Wand letale Verletzungen zu erwarten. Die Bauteilkonfiguration entsprach dem Aufbau, wie er häufig in nichttragenden Ausfachungen in der chemischen Industrie verwendet wird. Abbildung 7 vermittelt einen Eindruck aus der Stereo-Visionsaufnahme eines der Tests. Mit Hilfe der Stereoaufnahme kann der Trümmerflug dreidimensional nachverfolgt werden.



Abbildung 7: Stereoaufnahme EMI-Versuch BS 321, Trümmerwurf einschaliges Mauerwerk bei 205 ms.

4.3 Stahl-Trapezblech

Stahl-Trapezprofile werden häufig als Fassadenverkleidungen im Industrie- und Anlagenbau verwendet. Auf Grund ihrer hohen Verformungsfähigkeit ist der dominierende Versagensmodus das Ausreißen der Verbindungsmittel in Form eines "Ausknöpfens" oder eines Reißens des Bleches. Unter Biegebelastung stellt sich ein lokales Plattenbeulen oder "Knittern" ein, wie in Abbildung 8 gezeigt [27].



Abbildung 8: Ausschnitte aus einer Hochgeschwindigkeitsaufnahme eines Stahl-Trapezbleches unter Blastbelastung [26].

Bei der Auslegung von Fassaden mit Stahltrapezblechen ist besonderes Augenmerk auf das mögliche örtliche Versagen der Verbindungsmittel und die Lastweiterleitung an das primäre Tragwerk, i.A. eine Stahlrahmenkonstruktion, zu richten. Ein häufiges Schadensbild nach Explosionsereignissen in Industrieanlagen ist ein übermäßig verformtes Stahlskelett ohne Bekleidung (Abbildung 9). Ein Versagen der Verbindungsmittel zieht nach sich, dass das gesamte Blech vom Tragwerk losgeschleudert wird und damit zur Gefährdung der Umgebung beiträgt.



Abbildung 9: Gebäudeschaden an einer Stahlhalle nach Gasexplosion im Bouncefield Oil Depot [27].

4.4 Glas

Glas als Fassadenmaterial kommt auf Grund seiner Transparenz und vielseitigen Gestaltungsmöglichkeiten eine besondere Bedeutung zu. Demgegenüber steht die mögliche Gefährdung bei Glasversagen. Entsprechend hoch ist die Anzahl von Untersuchungen von Glassorten und Glaselementen unter Blastbelastung. Schädigungsmechanismen wurden beispielsweise in [28–31] untersucht und beschrieben. Insbesondere den Auflagerbedingungen kommt bei Gläsern eine besondere Bedeutung zu, so adressiert [26] die Untersuchung punktgelagerter Scheiben und deren Analyse mittels Hochgeschwindigkeits-Kameras. Wenn es um Glasfassaden geht, werden wegen der Vielzahl der Möglichkeiten bzgl. Glasart, Laminierung, Auflagerung etc. Produkte für einen vorbestimmten Belastungsbereich häufig experimentell klassifiziert. Dabei ist das Gesamtsystem aus Scheibe, ggf. Rahmen und Auflager der Belastung auszusetzen. Einen Überblick unterschiedlicher Testverfahren auf Europäischer Ebene liefert beispielsweise [32]. Auch hier ist es sinnvoll, mit Hilfe von verformungsfähigen Konstruktionen, z. B. aus Seilverspannungen, möglichst viel der ankommenden Energie durch Verformung zu dissipieren, wobei für die Verspannungen ebenfalls gilt, die gesamte Systemkette bis zur Verankerung im primären Tragwerk in der Modellbildung und Analyse abzubilden.

Wird kein Verbundsicherheitsglas oder keine Laminierungsfolie eingesetzt, geht von splitterbildenden Glasscheiben eine sehr erhebliche Gefährdung selbst bei geringer Belastung aus, vgl. Abbildung 10. Dies gilt insbesondere für beide Belastungsrichtungen, da das Rückschwingen des Bauteils, teils überlagert mit der Sogphase der Belastung (s. Abschnitt 2.1), die Splitter auch nach außen schleudert.

Mitigationsmaßnahmen existieren häufig in Form von Folien, die auf das Glas aufgeklebt werden, wobei diese nur dann wirklich nützlich sind, wenn die Scheibe auch im Rahmen bleibt. Sollen der Rahmen oder die verstärkte Scheibe gehalten werden, bieten sich sogenannte "Catcher Bars" oder Seilhinterspannungen an, die das Fensterelement auffangen. Hier ist die Anzahl der Hinterspannungen wichtig: Um eine in mittlerer Höhe angeordnete Hinterspannung "wickelt" sich die folienbehaftete Scheibe und gibt den sich von der Folie lösenden Splittern eine gezielte Richtung. Entsprechend sollten mindestens drei äquidistante Hinterspannelemente angeordnet werden, um die Glassplitter nicht gebündelt in den Raum zu schleudern.



Abbildung 10: Gefährdungspotential von Glas bei Explosionsereignissen. Links: Glasregen am Regierungsgebäude in Oslo nach dem Anschlag vom 22.7.2011 [33]. Rechts: Gefährdungsanalyse an Einzelscheiben am EMI Stoßrohr (Versuch BS409).

5 ZUSAMMENFASSUNG

Werden Fassaden als Schutzelemente gegen äußere Explosionsbelastungen konzipiert, sind zunächst die Belastungscharakteristika im Nah- und Fernfeld von Explosionen zu unterscheiden. Diese stellen unterschiedliche Anforderungen an die Fassadenbauteile, welche je nach erwartbarem Versagensmodus mit verschiedenen Methoden für die jeweilige Belastung bemessen werden können. Im Nahfeld bieten sich numerische Simulationen an, welche das lokale Bauteil- und Materialverhalten im Detail abbilden. Für Biegebauteile im Fernfeld ist die Verwendung von Druck-Impuls-Diagrammen eine gängige Bemessungsgrundlage.

Abhängig vom gewählten Fassadenmaterial und Fassadenaufbau dominieren unterschiedliche Phänomene das mögliche Versagensbild: Bei massiven Fassaden im Fernfeld einer Explosion ist dies in der Regel ein Biegeversagen des Bauteils, bei leichteren Fassaden wie Glas und Stahl dominiert eher ein Versagen an den Auflagern oder Grenzverformungen das Bemessungsergebnis. Sollte es zu einem Versagen des Fassadenbauteils bei Überbeanspruchung kommen, ist mit unterschiedlichen Gefährdungen zu rechnen. Vor allem der (teilweise) Verlust von Fassadensystemen, die Bestandteil des primären Tragwerks sind, kann weitreichende Folgen für die Gesamtstabilität des Gebäudes haben. Weiterhin ist gerade bei Glas und den massiven Materialien Mauerwerk und Stahlbeton ein gefährlicher Trümmerwurf durch geeignete Schutzmaßnahmen zu verhindern. Stahlbleche reißen in der Regel als einzelnes Bauteil ab, die Flugweite ist wegen des hohen Luftwiderstands häufig geringer als bei den deutlich kleineren massiven Bauteilsplittern und die Auftreffwahrscheinlichkeit, und damit das einhergehende individuelle Risiko, ist durch die geringere Anzahl an Trümmerteilen in der Regel auch geringer.

Forschungsbedarf besteht bei neueren Komposit- und Verbundmaterialien oder in der Entwicklung stehenden natürlichen Materialien (strukturelle Schwämme, 3D-Druck, etc.), deren Verhalten unter Explosionsbelastung sehr von dem gerade nicht "standardisierten" Aufbau abhängt und in vielen Fällen noch nicht ausreichend charakterisiert wurde, um eine verlässliche Aussage zum Verhalten unter kurzzeitdynamischer Belastung machen zu können.

LITERATUR

- [1] R. Höffer und H.-J. Niemann, "Die Windlastnorm DIN EN 1991-1-4 mit Nationalem Anhang und ihre bauaufsichtliche Einführung", *Bauingenieur*, Jg. 86, Okt, S2, 2011.
- [2] A. Klomfass und K. Thoma, "Ausgewählte Kapitel der Kurzzeitdynamik, Teil 1 Explosionen in Luft", Freiburg, Ausgewählte Kapitel der Kurzzeitdynamik 1/97, 1997.
- [3] G. C. Mays und P. D. Smith, *Blast effects on buildings*. Thomas Telford, 2001.
- [4] P. D. Smith und J. G. Hetherington, *Blast and Ballistic Loading of Structures*. Oxford: Butterworth-Heinemann, 1994.
- [5] G. F. Kinney und K. J. Graham, *Explosive Shocks in Air*. Berlin, Heidelberg, New York, Tokyo: Springer, 1985.
- [6] The defense special weapons agency and the departments of the army, air force and navy, "Design and analysis of hardened structures to conventional weapons effects: TM5-855-1", 1997.
- [7] T. Krauthammer, *Modern Protective Structures*. Boca Raton, LA, USA: CRC Press, 2008.
- [8] W. Riedel, "Bewertung des Strukturverhaltens durch Druck-Impuls-Diagramme" in *4*. *Workshop Bauprotect 2010*, S. 59–71.
- [9] Eurocode: Grundlagen der Tragwerksplanung, DIN EN 1990, 2010.
- [10] M. von Ramin, S. Carstens, C. Roller und A. Stolz, "Schadensklassifizierung für Gebäude nach Extremereignissen", *Bauingenieur*, Jg. 92, 01-2017, S. 1–10, 2017.
- [11] W. Riedel, K. Thoma, C. Mayrhofer und A. Stolz, "Engineering and Numerical Tools for Explosion Protection of Reinforced Concrete", *International Journal of Protective Structures*, Jg. 1, Nr. 1, S. 85–101, 2010.
- [12] US Army Corps of Engineers, Protective design center, "Single degree of freedom model, responde limits for antiterrorism design" PDC-TR 06-08 Rev 1, 2008.
- [13] J. M. Biggs, Introduction to Structural Dynamics. New York: McGraw-Hill, 1964.
- [14] C. Mayrhofer, "Grundlagen zu den Methoden der dynamischen Grenztragfähigkeitsberechnung bei terroristischen Ereignissen" in *Bauprotect 2006*, S. 247–262.
- [15] I. Müllers, K. Fischer, A. Nawabi und W. Riedel, "Design against Explosions and Subsequent Progressive Collapse", *Structural Engineering International*, Jg. 25, Nr. 3, S. 319– 325, 2015.
- [16] A. Stolz, K. Fischer, C. Roller und S. Hauser, "Dynamic bearing capacity of ductile concrete plates under blast loading", *Int J Impact Eng*, Nr. 69, S. 25–38, 2014.
- [17] M. von Ramin, B. Esteban, G. Michaloudis und M. Steyerer, "Von der Bauteilschädigung zum Gebäudeschaden" in 7. Workshop Bau-Protect 2016: Gefährdung, dynamische Analyse und Schutzkonzepte für bauliche Strukturen. 15. und 16. November 2016, Merzhausen, Freiburg, S. Hiermaier, N. Gebbeken, M. Klaus und A. Stolz, Hg., Stuttgart: Fraunhofer Verlag, 2017, S. 237–260.
- [18] W. Riedel, A. Klomfass, L. Rüdiger und R. Gündisch, "Effiziente Methoden zur Auslegung und Bewertung baulicher Strukturen in der Vorplanung", *Hiermaier, Stefan (Ed.) et al.: 7. Workshop Bau-Protect 2016: Gefährdung, dynamische Analyse und Schutzkon*zepte für bauliche Strukturen. 15. und 16. November 2016, Merzhausen, Freiburg; Tagungsband. Stuttgart: Fraunhofer Verlag, 2017, pp. 175-192, N-438483, 2017.
- [19] N. Gebbeken, S. Greulich, A. Pietzsch und F. Landmann, "The Engineering-Tool XPLOSIM to Determine the Effects of Explosive Loadings on Reinforced and Fibre Reinforced Concrete Structures", 2004.

- [20] M. von Ramin, A. Stolz, O. Millon und T. Rinder, "ASSESSMENT OF URBAN BUILDING COMPLEXES SUBJECTED TO NATURAL AND MAN-MADE HAZARDS: SP-309-07", ACI Special Publication, SP-309, 7.1-7.20, 2016.
- [21] W. Riedel, "Modeling and validation of a wall-window retrofit system under blast loading", *Engineering Structures*, Jg. 37, S. 235–245, 2012.
- [22] C. Mayrhofer, "Reinforced masonry walls under blast loading", *International Journal of Mechanical Sciences*, Jg. 44, Nr. 6, S. 1067–1080, 2002.
- [23] C. Mayrhofer, M. Romani und K. Thoma, "Study of Masonry Retrofit for Blast Loading with CFRP Strips" in USA, 2005.
- [24] J. M. Schneider, M. von Ramin, A. Stottmeister und A. Stolz, "Structural failure of masonry walls subjected to blast loads: Debris throw characterization", *Engineering Structures*, subm.
- [25] M. von Ramin und A. Stolz, "Debris Throw Model for Accidental Explosions in a Complex Industrial Environment", *Chemical Engineering Transactions*, Nr. 48, S. 85–90, 2016.
- [26] A. Stolz, M. von Ramin und D. Schmitt, "Protection of Buildings and Infrastructure Against Explosion" in *The micro-world observed by ultra high-speed cameras: We see what you don't see*, K. Tsuji, Hg., Cham: Springer, 2018, S. 279–302.
- [27] *Buncefield: Three years and four months... (C) Nigel Cox.* [Online] Verfügbar unter: http://www.geograph.org.uk/photo/1248657. Zugriff am: Sep. 18 2018.
- [28] B. Bermbach und Bermbach, Tim Universität der Bundeswehr, "Konstruktive Durchbildung von Verglasungen zur Erhöhung der Schutzwirkung bei Explosionen" in 7. Workshop Bau-Protect 2016: Gefährdung, dynamische Analyse und Schutzkonzepte für bauliche Strukturen. 15. und 16. November 2016, Merzhausen, Freiburg, S. Hiermaier, N. Gebbeken, M. Klaus und A. Stolz, Hg., Stuttgart: Fraunhofer Verlag, 2017, S. 279– 296.
- [29] T. Bermbach, "Experimental investigation of energy dissipation mechanisms in laminated safety glass for combined blast-temperature loading scenarios", *Glass Structures & Engineering*, Jg. 1, Nr. 1, S. 331–350, 2016.
- [30] M. Larcher, N. Gebbeken und M. Teich, "Verbundsicherheitsglas und Glasfassaden unter Explosionsbeanspruchung" (de), *Stahlbau*, Jg. 81, S1, S. 185–194, https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/stab.201290062, 2012.
- [31] G. Siebert und M. Seel, "Betrachtungen zum Glasversagen" in 4. Workshop Bauprotect 2010, S. 113–124.
- [32] A. Stolz und European Commission Joint Research Centre. Institute for the Protection and the Security of the Citizen Erncip, *A comparison of existing standards for testing blast resistant glazing and windows Thematic group: resistance of structures to explosion effects.*, 2014.
- [33] Norges offentlige utredninger, "Rapport fra 22. juli kommisjonen: 2012:14", 2012. [Online] Verfügbar unter: https://www.regjeringen.no/no/dokumenter/nou-2012-14/id697260/.