

Betrachtungen zum Tragverhalten von Seilauffangsystemen zur Gefahrenabwehr für Fenster unter Luftstoßwellenbeanspruchung

Matthias Andrae¹, Jan Dirk van der Woerd^{1,2}, Achim Pietzsch², Matthias Wagner², Norbert Gebbeken^{1,2}

¹Institut für Mechanik und Statik, Forschungsgruppe BauProtect, Forschungszentrum RISK, Universität der Bundeswehr München, Neubiberg

²MJG Ingenieur-GmbH, München

Zusammenfassung: Explosionen stellen eine erhebliche Bedrohung für Gebäude dar, insbesondere für herkömmliche, ungeschützte Fenster. Dieser Beitrag befasst sich mit Seilauffangsystemen, die Bruchstücke des Fensters rauminnenseitig auffangen. Der Aufprall sowie die auftretenden Kräfte und Verformungen in den Stahlseilen werden mit numerischen und analytischen Methoden untersucht und mit Versuchsergebnissen aus Stoßrohrversuchen verglichen. Numerische Simulationen ermöglichen eine detaillierte Abbildung des Aufprallvorganges und eignen sich zur Bemessung von derartigen baulichen Schutzmaßnahmen.

1 Seilauffangsysteme für Fenster unter Explosionslasten

In den letzten Jahrzehnten hat der außergewöhnliche Lastfall Explosion für Tragwerke und Gebäudehüllen an Bedeutung gewonnen. Ursachen sind militärische Konflikte, Bombenanschläge oder Unfälle. Eine besondere Schwachstelle in der Gebäudehülle sind Fenster und Türen, die beim Auftreffen der Luftstoßwelle der Explosion versagen können. Umherfliegende Glasbruchstücke und Bruchstücke des Fensterrahmens können bei Personen schwere Verletzungen wie Schnitt-, Riss- und Quetschwunden hervorrufen. Darüber hinaus dringt die Luftstoßwelle durch die neu entstandene Öffnung in das Gebäude ein.

Für neu zu errichtende Gebäude besteht die Möglichkeit, nach der Festlegung des Bedrohungsszenarios und des gewünschten Schutzniveaus, eine spezielle druckwellenhemmende Gebäudehülle zu planen und auszuführen. In vielen Fällen stehen jedoch bereits existierende Gebäude im Fokus, die nachträglich gegen potenzielle Explosionsgefahren abgesichert werden sollen. Eine Maßnahme besteht darin, Seilauffangsysteme anzuordnen, die dazu dienen, die Bruchstücke des Fensters aufzufangen.

Die Seile können sowohl vertikal im Boden und in der Decke als auch horizontal zwischen den Fensterlaibungen verankert sein. Zusätzlich zu den Seilen ist immer die Anbringung von Splitterschutzfolien auf den Verglasungen notwendig. Durch eine Klebstoffschicht bleiben die Glasbruchstücke an der Folie haften, was verhindert, dass die Bruchstücke unkontrolliert in den Schutzbereich geschleudert werden, sobald sie auf das Seilauffangsystem treffen.

Für die Auslegung und Bemessung von Seilauffangsystemen sind die Seil- und Verankerungskräfte von besonderem Interesse. Im vorliegenden Beitrag werden die maßgebenden Einflussgrößen auf die resultierenden Seil- und Verankerungskräfte untersucht. Die Ergebnisse von Sprengversuchen an Kunststofffenstern mit Seilauffangsystemen werden analysiert. Analytische Überlegungen und eine numerische Methode zur Abbildung des Belastungsszenarios werden vorgestellt. Abschließend werden die experimentellen Messdaten und die Ergebnisse der numerischen Simulation miteinander verglichen.

2 Stoßrohrversuche mit Seilauffangsystemen

Als Fallbeispiel für die Betrachtungen in diesem Beitrag dienen die experimentellen Studien zur Wirksamkeit von Seilauffangsystemen aus Andrae et al. [1], die in der Stoßrohrversuchsanlage Blast-STAR des Fraunhofer Ernst-Mach-Instituts für Kurzzeitdynamik (EMI) durchgeführt wurden. In allen vier Sprengversuchen wurde der Flügel des Kunststofffensters vom Blendrahmen abgerissen und in das Seilauffangsystem geschleudert (Abbildung 1). Im Folgenden wird auf den Versuchsaufbau und die gemessenen Kräfte im Seilauffangsystem eingegangen.

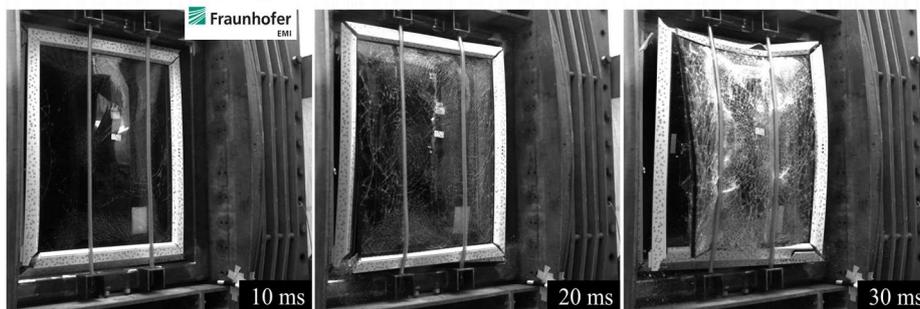


Abbildung 1: Aufprall eines abgerissenen Fensterflügels auf ein Seilauffangsystem (Hochgeschwindigkeits-Videoaufnahme)

Übersicht zum Versuchsaufbau und zur Versuchsdurchführung

In der Versuchsreihe wurden ertüchtigte Kunststofffenster mit Außenabmessungen von 1115 mm x 1365 mm (Breite x Höhe) untersucht. Die Fenster waren mit einer herkömmlichen Zweifach-Isolierverglasung mit 4 mm dicken Glasscheiben aus thermisch entspanntem Flachglas ausgestattet (Abbildung 2a). Auf der Schutzseite der Verglasung (explosionsabgewandt) wurde eine Splitterschutzfolie aufgebracht. Bei den Sprengversuchen zeigte sich jedoch, dass zukünftig sowohl auf der Schutzseite als auf der Angriffsseite Splitterschutzfolien aufgebracht werden sollten, um die Anzahl der weiterfliegenden Glasbruchstücke, vor allem von der Angriffsseite, zu reduzieren [1].

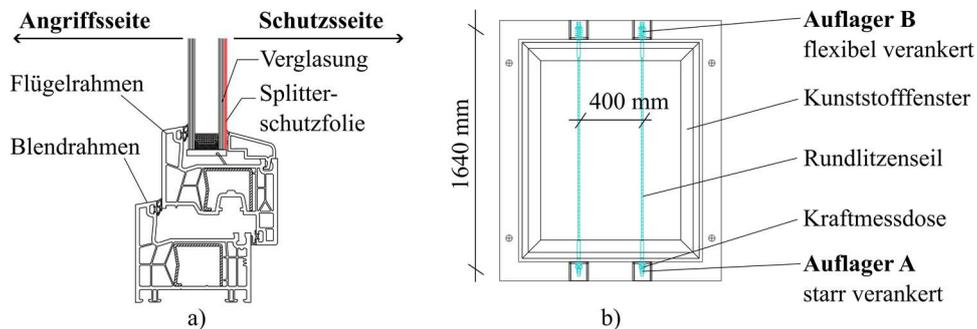


Abbildung 2: a) Querschnitt durch das erprobte Kunststofffenster mit Splitterschutzfolie, b) vor dem Fenster angeordnetes Seilauffangsystem

Das Seilauffangsystem (Abbildung 2b) wurde ebenfalls auf der Schutzseite des Fensters angeordnet. Es bestand aus zwei vertikal ausgerichteten Rundlitzenseilen, mit einer Länge von jeweils 1640 mm. Die Rundlitzenseile hatten einen metallischen Querschnitt von 26,5 mm² (Seildurchmesser 8 mm). Zur Verankerung der Rundlitzenseile wurden M12 Gewindefittings angebracht. Das Seilsystem kann gemäß der Zulassung *ETA-10/0358* eine statische Bruchlast F_{rd} von 21 kN aufnehmen. Die Rundlitzenseile wurden an der Fensterbrüstung (Auflager A, Abbildung 2b) starr (unverschieblich) am Stoßrohr befestigt, am Fenstersturz (Auflager B) erfolgte hingegen eine flexible Befestigung mit Druckfedern. Die eingesetzten Druckfedern hatten eine Federsteifigkeit k_{Feder} von 71 N/mm und konnten einen maximalen Federweg s_{lim} von 15 mm durchlaufen.

Die Eigenschaften des erprobten Seilauffangsystems sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

Seildurchmesser (Querschnitt)	Statische Bruchlast [kN]	Federsteifigkeit [N/mm]		Maximaler Federweg [mm]
		Rundlitzenseil k_{Seil}	Druck-Feder k_{Feder}	
8 mm (26,5 mm ²)	21	1455	71	15

Tabelle 1: Übersicht zu den mechanischen Eigenschaften des Seilauffangsystems

Messtechnische Erfassung der Versuche

Die Einstellungen der Stoßrohrversuchsanlage wurden so gewählt, dass der erzeugte Luftstoß der Prüflast für eine ER1-Klassifizierung nach *DIN EN 13541:2012* entspricht. Der Druck-Zeit-Verlauf der Luftstoßwelle wurde mit zwei Druckmessensoren auf der Höhe des Fensters gemessen. Bei den Versuchen wurde ein mittlerer reflektierter Spitzenüberdruck von 66,7 kPa und ein reflektierter maximaler reflektierter Impuls von 417 kPa ms gemessen. Während diese beiden Messwerte der Prüflast für eine ER1-Klassifizierung entsprechen, wurde eine etwas zu geringe mittlere Überdruckdauer von 18,3 ms erreicht.

Um die Reaktion des Fensters zu erfassen, wurden die Versuche mit zwei Hochgeschwindigkeits-Videokameras von der geschützten Seite aus beobachtet. Die Verschiebungen der Fenster wurden dabei durch digitale Bildkorrelation (DIC) mit dem Verfahren gemäß Schneider et al. [6] bestimmt. Gemessene Verschiebungs- und Geschwindigkeits-Zeit-Verläufe am Flügelrahmen und an der Verglasung sind in Abbildung 3a dargestellt. Die Geschwindigkeit wurde durch numerische Differentiation der

Verschiebungs-Zeit-Verläufe berechnet. Der Mittelwert der gemessenen Aufprallgeschwindigkeiten aus allen vier Versuchen liegt bei etwa 10 m/s.

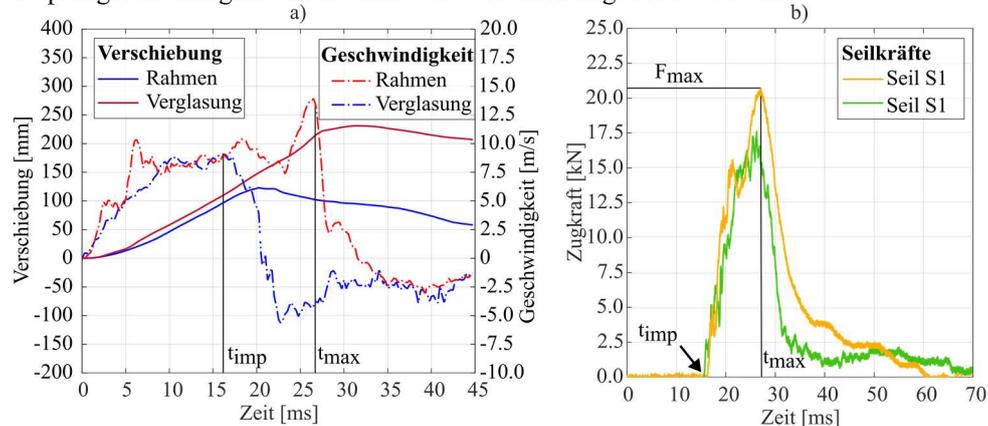


Abbildung 3: a) Verschiebung und Geschwindigkeit der Fensterbruchstücke;
b) gemessene Kräfte im Seilauffangsystem

Beim Aufprall der Bruchstücke des Fensters auf das Seilauffangsystem entstehen Zugkräfte in den Seilen, aus deren Reaktion die Seile gedehnt und die Druckfedern gestaucht werden. Die dynamischen Zugkräfte wurden mit Kraftaufnehmern an den Seilverankerungen am Auflager A gemessen (Abbildung 2b). Abbildung 3b zeigt die gemessenen Kraft-Zeit-Verläufe aus einem der Versuche. Grundsätzlich lassen sich der Zeitpunkt t_{max} der maximalen Seilkraft F_{max} mit dem anschließenden Abbremsvorgang des Fensters in Verbindung bringen (Abbildung 3). Es wurden maximale Seilkräfte von ca. 21,3 kN gemessen. Ein Bruch der Seile trat nicht auf.

3 Analytische und numerische Untersuchung der Tragwirkung von Seilauffangsystemen

Im Folgenden wird auf die Modellierung des Belastungsszenarios eingegangen. Ein analytisches Verfahren zur Lösung wird diskutiert und ein numerisches Modell vorgestellt. Die Simulationsergebnisse werden mit den experimentellen Daten verglichen.

Modellbildung

Zunächst ist zu klären, ob es sich bei dem untersuchten Belastungsszenario um ein reines Aufprallszenario handelt oder ob zusätzlich eine Luftstoßbelastung auf den abgerissenen Fensterflügel einwirkt. Aus der Messung der einwirkenden Explosionsbelastung ist bekannt, dass die positive Druckphase der Luftstoßwelle nach 18,3 ms abklingt. Die Krafteinleitung in die Seile beginnt hingegen erst nach durchschnittlich 16,5 ms (Abbildung 3b). Das untersuchte Belastungsszenario wird daher als reines Aufprallszenario betrachtet, ohne zusätzliche Luftstoßeinwirkung.

Das Aufprallszenario wird durch die Masse, die Geschwindigkeit und die Steifigkeit des auftreffenden Fensterflügels charakterisiert. Die Masse des Fensterflügels beträgt ca. 42 kg und die mittlere Aufprallgeschwindigkeit 10 m/s. Aus den Hochgeschwindigkeits-

Videoaufnahmen der Versuche in Abbildung 1 geht hervor, dass der Glasbruch und der Bruch der Rahmenecken des Fensters bereits vor dem Aufprall auftraten. Der Fensterflügel prallt somit in einem vorgeschädigten Zustand auf das Seilauffangsystem auf. Weiterhin ist folgender Ablauf des Aufpralles erkennbar (Abbildung 4):

- 1) Der relativ steife Flügelrahmen wirkt nahe an den Verankerungen punktuell auf das Seilauffangsystem ein. Das Seil wird an den Aufprallpunkten des Fensterrahmens umgelenkt.
- 2) Die weiche Splitterschutzfolie mit anhaftenden Glasbruchstücken wirkt flächig auf das Seilauffangsystem ein. Die Folie schmiegt sich entsprechend an das Seil an.

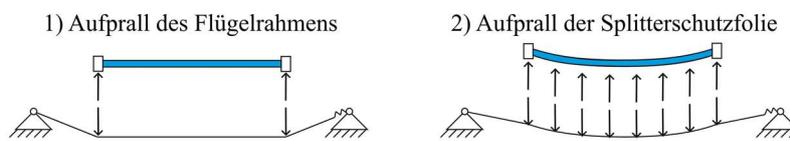


Abbildung 4: Aufprall des Fensterflügels auf das Seilauffangsystem (schematisch)

Die Reaktion des Seilauffangsystems wird bestimmt durch:

- die Anzahl der Auffangseile n ;
- die Länge l , den Querschnitt A und den E-Modul E der Seile; sowie
- die Federsteifigkeit k der Seilendverankerung.

Die angeordnete Druckfeder kann in der ausgeführten Versuchsanordnung nur einen begrenzten Federweg s_{lim} zurücklegen, bis die Feder vollständig zusammengedrückt ist. Die Druck-Feder verhält sich beim Zusammendrücken zunächst linear-elastisch und nach dem Anschlagen annähernd starr. Die nichtlineare Steifigkeit k_{ges} des Seiles bestimmt sich zu:

$$\frac{1}{k_{ges}} = \frac{1}{k_{seil}} + \begin{cases} \frac{1}{k_{feder}} & \text{für } s \leq s_{lim} \\ 0 & \text{für } s > s_{lim} \end{cases} \quad (1)$$

Die entsprechenden Kennwerte der Federsteifigkeit können Tabelle 1 entnommen werden.

Analytischer Lösungsansatz

In der Literatur finden sich zahlreiche analytische Lösungen des Seilmodells unter statischer Belastung, z. B. in Petersen [5]. Der Aufprall des Fensterrahmens stellt jedoch eine dynamische Belastung dar, für die dynamische Effekte wie Massenträgheit berücksichtigt werden müssen. Eine analytische Lösung kann beispielsweise mit einem Einmassenschwinger-Modell gefunden werden (vgl. Biggs [2]).

Bei der analytischen Lösung mit dem Einmassenschwinger-Modell sind nichtlineare Ansätze zu berücksichtigen, wie beispielsweise bei der Ermittlung der Ersatzfedersteifigkeit, die von der Verformung des Seils in Wechselwirkung mit dem Fenster abhängt. Außerdem muss ein geeigneter Kraft-Zeit-Verlauf (z. B. Sinushalbwellen) gefunden werden, der den Aufprallvorgang abbildet. Dies kann sich auf Basis des in Abbildung 4 gezeigten Aufprall-Ablaufes als sehr herausfordernd darstellen. Der Kraft-Zeit-Verlauf ist dabei abhängig von der Steifigkeit des Seilauffangsystems und der Steifigkeit des Fensters.

Im Folgenden wird ein FE-Modell zur numerischen Simulation vorgestellt, mit dem der Aufprallvorgang explizit abgebildet werden kann.

Numerische Simulation des Aufprallvorgangs

Numerische Simulationen bieten die Möglichkeit die Wechselwirkung des Fensterflügels mit dem Seilauffangsystem explizit abzubilden. Die Annahme eines Kraft-Zeit-Verlaufes, der den Aufprall des Objektes wiedergibt, ist dabei nicht erforderlich. Im Folgenden wird knapp auf das in Abbildung 5 gezeigte numerische 3D-Gesamtmodell des Flügelrahmens und des Seilauffangsystems eingegangen.

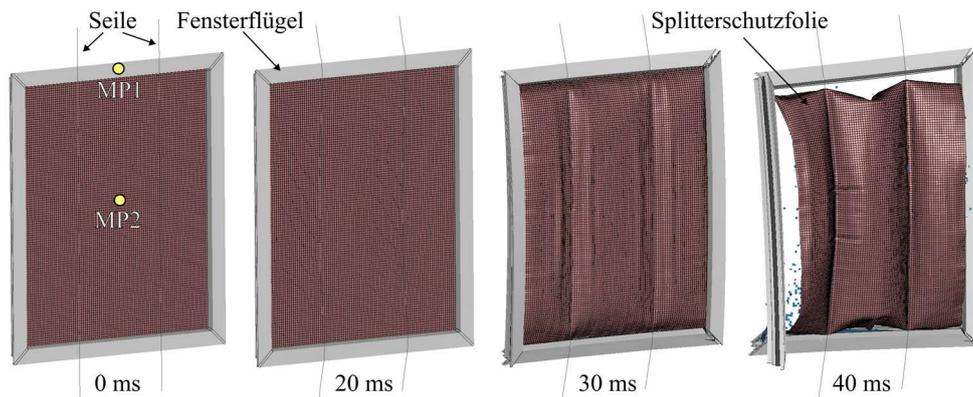


Abbildung 5: FE-Simulation des Aufprallvorgangs

Modellbildung

Das in Abbildung 5 dargestellte 3D-Gesamtmodell setzt sich aus dem aufprallenden Fensterflügel und dem Seilauffangsystem zusammen. Das Seilauffangsystem wird mit Seil- und Feder-Elemente abgebildet. Die Komponenten des Fensterflügels, wie die Rahmenprofile, die Profilverstärkungen, die Verglasung und die Beschlagschiene bestehen aus unterintegrierten Belytschko-Lin-Tsay-Schalen-Elementen. Null-Energie-Verformungen werden mit der Flanagan-Belytschko Formulierung zur Hourglass-Kontrolle vermieden. Die Schutzfolie wird mit Volumenelementen diskretisiert.

Das Werkstoffverhalten der Komponenten wird durch geeignete, teilweise nichtlineare Materialformulierungen beschrieben. Da eine Schädigung ausgeschlossen wird, werden die Seile mit einer elastischen Materialformulierung ($E\text{-Modul} = 90\,000\text{ MPa}$) abgebildet. Die Steifigkeit der Druckfedern wird nach Gleichung (1) berechnet. Es wird berücksichtigt, dass sich die Druckfedern bis zu einer Verformung s_{lim} von 15 mm mit der Federsteifigkeit k_{Feder} linear-elastisch verformen können, bis die Federn vollständig zusammengedrückt sind. Die Fensterrahmen aus Kunststoff (PVC-U) und die Schutzfolien (BO-PET) werden mit entsprechenden elastisch-plastischen Materialformulierungen abgebildet [3, 4]. Das spröde Versagen der Rahmenecken des Flügelrahmens wird über Element-Erosion beschrieben. Zur Modellierung des Werkstoffverhaltens der Glasscheiben wird die LS-DYNA Materialformulierung *MAT_GLAS gewählt. Die Materialformulierung verfügt über ein Schädigungsmodell, mit dem das Nachbruchverhalten und die Rissbildung mit Riss-schließungseffekten abgebildet wird. Ab einer Dehnung von 1% wird Element-Erosion angewendet. Die Schiene des Beschlagsystems und die Profilverstärkungen bestehen aus Edelstahl mit Materialeigenschaften in Anlehnung an *DIN EN 1993-1-4:2015-10*.

Die Wechselwirkung zwischen den Komponenten des numerischen Kunststofffensters und dem Seil während des Aufprallvorgangs wird mit penalty-basierten Kontaktformulierungen abgebildet. Als Initialbedingungen werden alle Elemente des Kunststofffensters mit einer Geschwindigkeit von 10 m/s beaufschlagt.

Vergleich der numerischen Simulation und der experimentellen Ergebnisse

Der in Abbildung 5 gezeigte Aufprallvorgang des Fensterflügels auf das Seilauffangsystem stimmt qualitativ gut mit den Hochgeschwindigkeits-Videoaufnahmen aus Abbildung 1 überein. Zur Validierung der Simulation werden die aufgezeichneten Messdaten aus Abbildung 3 (Verschiebung und Seilkräfte) herangezogen.

Die Verschiebungs-Zeit-Verläufe am Flügelrahmen und an der Verglasung (Abbildung 6a) sowie die Kraft-Zeit-Verläufe in den Seilen (Abbildung 6b) stimmen ebenso relativ gut mit den experimentellen Verläufen überein. Die numerische Simulation überschätzt die maximale Verschiebung aus dem Experiment um ca. 20% (maximal ca. 25 mm). Die auftretenden Seilkräfte werden um ca. 12% geringfügig überschätzt (maximal ca. 5 kN).

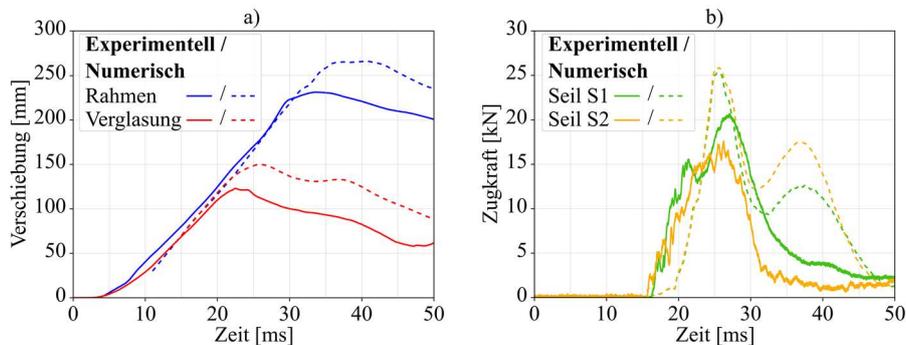


Abbildung 6: Verschiebungs- und Kraft-Zeit-Verläufe aus Experiment und Simulation

Insgesamt zeigt sich, dass die durchgeführte numerische Simulation sehr gut dazu geeignet ist die Wechselwirkungen zwischen dem aufprallenden Flügelrahmen und dem Seilauffangsystem abzubilden. Die dennoch aufgetretenen Differenzen zwischen den experimentellen Werten und den Simulationsergebnissen ergeben sich möglicherweise aus den unterschiedlichen Steifigkeiten des Fensterflügels beim Aufprall. Im Experiment war der aufprallende Fensterflügel bereits vorgeschädigt, beispielsweise an den Rahmenecken und der Verglasung (Abbildung 1). In der Simulation prallte hingegen ein vollständig ungeschädigter Fensterflügel auf das Seilauffangsystem auf. Die höhere Steifigkeit des aufprallenden Fensterflügels in der Simulation könnte zu höheren Seilverformungen und Seilkräften führen als im Experiment.

4 Zusammenfassung und Ausblick

Explosionen stellen eine außergewöhnliche Einwirkung für Gebäude und insbesondere für die Gebäudehülle dar. Eine Möglichkeit zur Minderung der Gefährdung ist die Anordnung eines Seilauffangsystems in Kombination mit Splitterschutzfolien. Dabei ist sicherzustellen, dass die auftretenden Seilkräfte in die angrenzenden Bauteile abgetragen werden können.

Im vorliegenden Beitrag lag der Fokus auf der Untersuchung des Trag- und Verformungsverhaltens eines Seilauffangsystems beim Aufprall eines Fensterflügels. Die Ergebnisse von experimentellen Untersuchungen in einer Stoßrohrversuchsanlage wurden vorgestellt und analysiert. Für die weitere Untersuchung wurde das Belastungsszenario als reines Aufprallszenario betrachtet, da die Luftstoßeinwirkung zum Aufprallzeitpunkt bereits nahezu abgeklungen war.

Ein analytischer Lösungsansatz mit einem Einmassenschwinger-Modell wurde nicht verfolgt, da eine Vielzahl von Annahmen über den Aufprallvorgang und den Kraft-Zeit-Verlauf des Stoßes getroffen werden müssen. Es wurde hingegen gezeigt, dass numerische Simulationen den Aufprallvorgang qualitativ und quantitativ abbilden können, ohne die Annahme eines Kraft-Zeit-Verlaufes als Ersatzlast. Die beobachteten geringfügigen Abweichungen zwischen den simulierten und gemessenen Seilkräften und Verschiebungen, könnten auf Variationen in der nicht erfassten Vorschädigung des Fensterflügels durch die Luftstoßwelle zurückgeführt werden. Für zukünftige Untersuchungen wird empfohlen, diese Einflussfaktoren in das Modell zu integrieren, um eine noch präzisere Abbildung des realen Aufprallgeschehens zu erreichen.

Danksagung

Die Autoren bedanken sich bei der Abteilung II.4 des Bundesamtes für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe für die finanzielle Förderung der Studie. Weiterhin bedanken sie sich beim Fraunhofer Ernst-Mach-Institut für Kurzeitdynamik für die Durchführung der Versuche.

Literatur

- [1] ANDRAE, M., VAN DER WOERD, J.D., PIETZSCH, A., WAGNER, M. und GEBBEKEN, N. Experimental Investigations on the Effectiveness of Anti-Shatter Films and Catcher-Cable Systems on Conventional Windows for Hazard Mitigation during Blast Events, *Buildings*, Vol. 13, (Submitted).
- [2] BIGGS, J.M. *Introduction to Structural Dynamics*, McGraw-Hill Book Company, 1964.
- [3] MOURA, R.T., CLAUSEN, A.H., FAGERHOLT, E., ALVES, M. und LANGSETH, M. Impact on HDPE and PVC plates—experimental tests and numerical simulations, *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 37, Nr. 6 (2010), S. 580–598.
- [4] DE PAUW, S. *Experimental and Numerical Study of Impact on Window Glass Fitted with Safety Window Film*, , Doctoral Thesis Ghent University, (2010).
- [5] PETERSEN, C. *Stahlbau*, Friedrich Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft mbH, 1993.
- [6] SCHNEIDER, J., VON RAMIN, M., STOTTMEISTER, A. und STOLZ, A. Characterization of debris throw from masonry wall sections subjected to blast, *Engineering Structures*, Vol. 203, (2019).