



7. Workshop

BAU-PROTECT

Gefährdung, dynamische Analyse und Schutzkonzepte für bauliche Strukturen.



Tagungsband



Wehrtechnische Dienststelle für
Schutz- und Sondertechnik

Unterstützt durch:



BAU-PROTECT

Gefährdung, dynamische Analyse und
Schutzkonzepte für bauliche Strukturen

Prof. Dr.-Ing. habil. Stefan Hiermaier,
Prof. Dr.-Ing. habil. Norbert Gebbeken,
DirWTD 52 Dipl.-Ing. Michael Klaus
Dr.-Ing. Alexander Stolz



Prof. Dr.-Ing. habil. Stefan Hiermaier



Prof. Dr.-Ing. habil. Norbert Gebbeken

Vorwort

Flutkatastrophen, Cyber-Attacken, Terror in Paris, Nizza, Ansbach und München. Niemand musste vom prinzipiellen Eintreten der Ereignisse überrascht sein. Und dennoch war die konkrete Ausprägung in Ort, Zeit und Umfang jeweils nicht vorhersagbar. Dies und die Komplexität der jeweils betroffenen Gesellschaften wie auch der örtlichen Infrastruktur macht die genannten disruptiven Ereignisse zu einem typischen Aufgabengebiet der Resilienzforschung.

Sich vorzubereiten auf das Unerwartete, den „Black-Swan“, ist Kernaufgabe einer Disziplin, die man als die notwendige Erweiterung der Sicherheitsforschung schlechthin sehen kann. Natürlich lernt man aus 9/11, aus Simbach und aus der Explosion in einem Chemie-Konzern, durch „Forensic Engineering“, durch den Blick in die Vergangenheit. Aber eben nicht nur, um Maßnahmen für genau denselben Typ Ereignis parat zu haben. Sondern, um ähnliche Konsequenzen aus vielleicht ganz anderen Auslösemechanismen besser beherrschen zu können. Wir müssen auch in die Zukunft schauen. Was sind zukünftige gesellschaftliche Herausforderungen in Bezug auf Sicherheit? Dazu gehört essentiell die Risikoanalyse und -bewertung. Resilienz-Bildung schließt auch die Entwicklung von Vorbeuge- und Reaktionskräften ein. Und sie mißt sich an der Fähigkeit, die betroffene Infrastruktur schnellst möglich wieder verfügbar zu machen. Sei es das Versorgungs- oder Informationsnetzwerk, die Verkehrs- und Gebäudeinfrastruktur oder die öffentliche Ordnung.

7. Workshop BAU-PROTECT

Vorwort

Der Workshop Bau-Protect stellt im Jahr 2016 wesentliche Komponenten für die Resilienzforschung und deren Anwendung zur Entwicklung von Schutzkonzepten in den Vordergrund. Gefährdung durch hochdynamische Einwirkung war seit Bestehen dieser Tagungsreihe ein zentrales Thema. Mittels quantitativer Risikoanalyse und der Entwicklung schutzgebender Infrastruktur wurden Schutz- und Verhinderungskonzepte in vielerlei Hinsicht behandelt. Der diesjährige Workshop orientiert sich stark an der Anwendung von Analyse- und Bewertungstools für den Ingenieur und an den baulichen Schutz als wesentliche Komponenten einer resilienten Infrastruktur, die planbar und ausführbar sein muss – effektiv und effizient.

Der Verbund der drei Institutionen, Fraunhofer-Institut für Kurzzeitdynamik, Ernst-Mach-Institut, EMI, Universität der Bundeswehr München und der Wehrtechnischen Dienststelle für Schutz- und Sondertechnik (WTD 52) in Oberjettenberg, ermöglicht die zweijährige Austragung des Workshops Bau-Protect, und damit den Austausch und die Diskussion zwischen Vortragenden und Teilnehmern zum aktuellen Stand der Forschung.



Prof. Dr.-Ing. habil Stefan Hiermaier



Prof. Dr.-Ing. habil. Norbert Gebbeken

Inhalt

Session 1 – Bedrohung, Gefährdung, Risiko

EXPERIMENTELLE NACHWEISVERFAHREN ALS GRUNDLAGE DER RISIKOBETRACHTUNG AM BEISPIEL VBIED Michael Steyerer, Malte von Ramin.....	1
VON DER BEDROHUNG UND GEFÄHRDUNG ZUR RESILIENZ URBANER RÄUME Werner Riedel, Kai Fischer, Norbert Gebbeken, Maik Fröchtenicht	31

Session 2 – Außergewöhnliche Einwirkungen erfassen

PHYSIKALISCHES GEFÄHRDUNGSPOTENZIAL BEI EXPLOSIONSEREIGNISSEN Malte von Ramin, Matej Zdrazil	48
VON DER BEDROHUNG ZUR LASTANNAHME Norbert Gebbeken, Torsten Döge, Max Hübner.....	69
NORMATIVE REGELUNGEN/GRENZEN DER ANDWENDUNG BEZÜGLICH EXPLOSIONSSZENARIOEN Norbert Gebbeken, Alexander Stolz, Andreas Bach	99
ANALYSE UND VERGLEICH VON PRÜFNORMEN UND PRÜFVERFAHREN FÜR GLASFASSADEN UNTER EXTREMER EINWIRKUNG Oliver Millon, Christof Haberacker	118

Session 3 – Auswirkungen außergewöhnlicher Einwirkungen

EXPERIMENTELLE NACHWEISMETHODEN Michael Steyerer, Frank Landmann, Oliver Millon	135
EFFIZIENTE METHODEN ZUR AUSLEGUNG UND BEWERTUNG BAULICHER STRUKTUREN IN DER VORPLANUNG Michael Steyerer, Frank Landmann, Oliver Millon	175

7. Workshop **BAU-PROTECT**

Inhalt

SIMULATIONSMETHODEN ZUR DETAILPLANUNG UND BEWERTUNG Norbert Gebbeken, Oliver Millon	193
BEWERTUNG VON WERKSTOFFEN UND BAUTEILEN Norbert Gebbeken, Oliver Millon	213
VON DER BAUTEILSCHÄDIGUNG ZUM GEBÄUDESCHADEN Malte von Ramin, Beatriz Esteban, Georgios Michaloudis, Michael Steyerer.....	237

Session 4 – Schutzkonzepte im Bestand und bei der Planung und Auslegung von Neubauten

ANWENDUNG UND LÖSUNGSANSÄTZE ZUM BAUWERKSSCHUTZ AUS DER ZIVILEN UND MILITÄRISCHEN ANWENDUNG Hans Dirlwanger, Albert Burbach, Malte von Ramin	261
KONSTRUKTIVE DURCHBILDUNG VON VERGLASUNGEN ZUR ERHÖHUNG DER SCHUTZWIRKUNG BEI EXPLOSIONEN Tim Bermbach, Christof Haberacker, Oliver Millon	279
SCHUTZKONZEPTE BEI NEUBAUTEN Norbert Gebbeken, Michael Steyerer, Alexander Stolz	297

Session 5 – Von der Forschung in die Praxis: Beispiele aktueller Themen und Entwicklungen

AKTUELLE FORSCHUNGSERGEBNISSE ZUM BAULICHEN SCHUTZ FÜR GROSSBAUWERKE UND RISIKOMANAGEMENT FÜR KRITISCHE INFRASTRUKTUREN UND STÄDTISCHE BEREICHE Alexander Stolz, Christoph Roller, Tassilo Rinder, Uli Siebold, Ivo Häring	314
SCHUTZ URBANER RÄUME MITTELS BARRIEREN Lars Rüdiger, Michael Steyerer	335

EXPERIMENTELLE NACHWEISVERFAHREN ALS GRUNDLAGE DER RISIKOBETRACH- TUNG AM BEISPIEL VBIED

Michael Steyerer¹, Malte von Ramin²

¹ michaelsteyerer@bundeswehr.org

Wehrtechnische Dienststelle für Schutz- und Sondertechnik (WTD 52),
Oberjettenberg, 83458 Schneizreuth

² malte.von.ramin@emi.fraunhofer.de

Fraunhofer-Institut für Kurzzeitdynamik, Ernst-Mach-Institut, EMI,
Gruppenleiter Gefährdungs- und Risikoanalyse, Am Klingenberg 1,
79588 Efringen-Kirchen

ABSTRACT

Bei Terroranschlägen finden vermehrt mit Fahrzeugen verbrachte Wirkmittel ihren Einsatz. Vor allem die hierbei eingesetzten hohen Sprengstoffmassen stellen die Schutzkonzepte immer wieder vor neue Herausforderungen. Um eine Aussage treffen zu können, welchen Belastungen die Schutzkonzepte standhalten müssen, wurden und werden an der WTD 52 in Oberjettenberg sowie an der WTD 91 in Meppen experimentelle Untersuchungen mit VBIEDs im Maßstab 1:1 durchgeführt. Ziel dieser Untersuchungen ist, neben der Ermittlung der Gefährdung, vor allem die Gewinnung von experimentellen Daten, die in weiterführende und zum Teil softwarebasierende Analysen in Zusammenarbeit mit dem EMI einfließen. Nur eine sinnvolle Raumordnungsplanung in Kombination mit einhergehenden Risikoanalysen für denkbare Szenarien, eine entsprechende Quantifizierung der Gefährdung durch numerische Simulationen und experimenteller Nachweisführung führen zu brauchbaren Parametern, welche für eine anschließende Analyse möglicher Schäden für Personen und Infrastruktur sowie der Entwicklung geeigneter Schutzmaßnahmen unverzichtbar sind.

Keywords: VBIED, numerische Simulation, analytische Beschreibung, experimentelle Untersuchung, Freifeldversuche, Modellversuche, Blast, Trümmer, Trümmerabgangsbedingungen.

1 EINLEITUNG

Behelfsmäßige Sprengvorrichtungen, insbesondere Improvised Explosive Devices (IEDs) und Vehicle Born Improvised Explosive Devices (VBIEDs), stellen eine große Bedrohung für zivile und militärische Einrichtungen dar. Durch das Deponieren des Sprengstoffs in einem handelsüblichen Fahrzeug kann dieses nahezu unbemerkt an den geplanten Anschlagort verbracht und zum gewünschten Zeitpunkt gezündet werden. Die Vielfältigkeit der Anwendungen für IEDs findet dabei kaum Grenzen.

Die Abbildungen 1 und 2 verdeutlichen den derzeitigen Trend. Diese zeigen u. a. das angesprochene Anwendungsspektrum diverser IEDs. Die Anschläge konzentrieren sich dabei nicht nur auf Soldaten oder militärisch relevante Einrichtungen. Vielmehr wird in zunehmendem Maß die Zivilbevölkerung zum Ziel der Attentate.

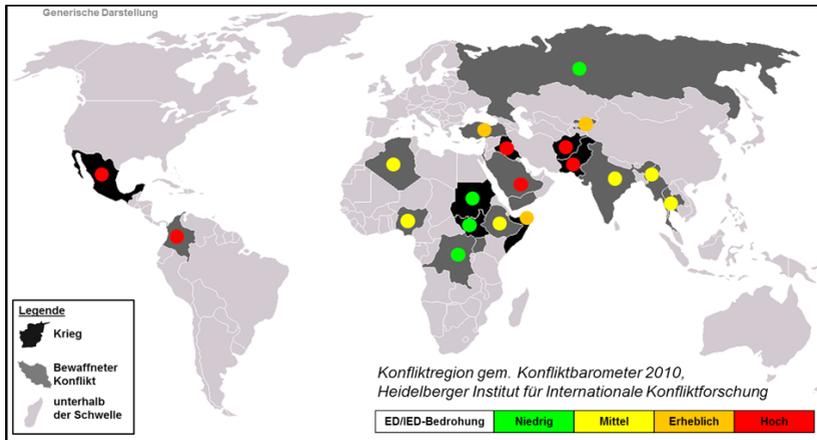


Abbildung 1: Globale Konfliktlage 2010 gem. Heidelberg Institut für Int. Konfliktforschung.

7. Workshop BAU-PROTECT

Experimentelle Nachweisverfahren als Grundlage der Risikobetrachtung am Beispiel VBIED

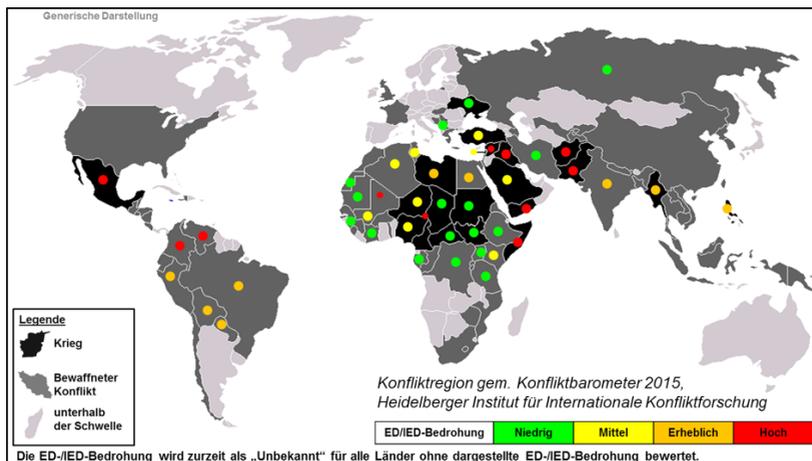


Abbildung 2: Globale Konfliktlage 2015 gem. Heidelberger Institut für Int. Konfliktforschung.

2 BEGRIFFSDEFINITION UND ERLÄUTERUNG

Da IEDs theoretisch jede Größe und Bauform haben und mit verschiedensten Spreng- und Brandstoffen gefüllt werden können, ist eine klare Einordnung nach militärischen Kriterien nur sehr schwer möglich. Die Wirkung von IEDs wird durch die verwendeten Spreng-, Zünd- und Anzündmittel sowie die Größe und Art der Wirkladung bestimmt. Absicht des Täters ist es, das IED

- zum vorgesehenen Zeitpunkt
- am gewünschten Ort und
- mit dem gewollten Effekt

über eine Auslösevorrichtung zur Umsetzung zu bringen. IEDs können ein oder mehrere verschieden wirkende Systeme enthalten. Die Einteilung nach dem Einsatz eines IED (Verbringungsarten z. B. PBIED-Personal Borne IED oder VBIED-Vehicle Borne IED) sowie der Auslösemöglichkeiten in Verbindung mit der Auslösevorrichtung (Auslösearten z. B. VOIED-Victim Operated IED oder COIED-Command Operated IED) macht Sinn. Somit kann eine klare, übergeordnete Einordnung von IEDs erfolgen.

7. Workshop BAU-PROTECT

Experimentelle Nachweisverfahren als Grundlage der Risikobetrachtung am Beispiel VBIED

Eine Unterart der IEDs und damit der Kategorie COIEDs sind demnach die VBIEDs, die in Deutschland umgangssprachlich als „Autobomben“ bezeichnet werden. Dabei handelt es sich um mit Sprengstoff und möglicherweise weiteren splitter- oder brandbildenden Stoffen beladene Fahrzeuge (fahrzeuggebundene IEDs). Im Gegensatz zu den meisten IEDs sind VBIEDs aufgrund ihrer Integration in ein Fahrzeug sehr mobil und können so auch für aggressive Strategien verwendet werden. Bei einem SVBIED wird das KFz als Ladungsträger genutzt. Gezündet wird das SVBIED durch die Person, die sich im KFz befindet (Selbstmordattentäter). SVBIED sind grundsätzlich mobile IEDs. Bei einem Vehicle Borne IED (VBIED) wird das KFz ähnlich dem SVBIED als Ladungsträger genutzt. Das VBIED wird von außen (z. B. mit einem Funkauslösesystem) gezündet. VBIEDs sind grundsätzlich statisch eingesetzte IEDs.

Eine neue Entwicklung im Bereich der fahrzeuggebundenen IEDs stellen die „Large Vehicle Borne IED“ (LVBIED), „Very Large Vehicle Borne IED“ (VLVBIED) und „Massive Vehicle Borne IED“ (MVBIED) dar. Dabei werden enorm große Mengen an Sprengstoffen mittels Fahrzeug verbracht. Bevorzugt werden Kleintransporter oder LKW genutzt, um die Transportkapazität an Explosivmitteln und Wirkungsverstärkern zu maximieren. Seitens Zentrum C-IED des Einsatzführungskommando der Bundeswehr wurde eine entsprechende Klassifizierung nach Tabelle 1 hierzu durchgeführt [1].

Tabelle 1: Einteilung von VBIEDs gem. [1].

Nettoexplosivstoffmasse	IED
0–910 kg 0–2000 lbs	Vehicle Borne (VBIED)
910–4550 kg 2000–10 000 lbs	Large Vehicle Borne (LVBIED)
4550–13 636 kg 10 000–30 000 lbs	Very Large Vehicle Borne (VLVBIED)
13 636 bis ∞ kg 30 000 bis ∞ lbs	Massive Vehicle Borne (MVBIED)

Die Begrifflichkeiten decken sich mit denen der in [2] durchgeführten Analysen bzgl. weltweiter Bedrohung durch VBIEDs.

Da generell die Auslöseart oft nicht bekannt ist, wird im Folgenden die Bezeichnung VBIED/SVBIED als (S)VBIED verwendet.

3 BENÖTIGTE DATEN ZUR BESCHREIBUNG DER GEFÄHRDUNG

Für die Optimierung von Schutzmaßnahmen ist es wichtig, die einwirkende Seite (Waffenwirkung) genau zu kennen. Nur unter Kenntnis aller relevanten Parameter ist es möglich, Schutzmaßnahmen zu planen, zu dimensionieren und letztendlich hinsichtlich ihres Schutzniveaus zu bewerten.

Ein wesentliches Untersuchungsziel ist die Beantwortung der Frage, welche Einflussfaktoren bei einem (S)VBIED wesentlich sind für die Größe und die Form der relevanten Parameter und wie stark sie sich darauf auswirken.

Schäden an Bauwerken und Objekten sowie Verletzungen bei Personal werden in erster Linie durch

- Auswirkungen des Luftstoßes (Blast)
- Trümmer (Primär- und Sekundärtrümmer) sowie Schock
- Penetrationswirkung von Trümmer/Splitter
- gerichtete Waffenwirkungen (z. B. Hohlladungen)
- thermische Wirkung (Hitze), Feuerball
- Kraterauswurf
- Erdstoß

verursacht. In Folge einer Detonation treten meist Überlagerungen der Wirkungsmechanismen auf. Für die Bedrohung durch (S)VBIED ist demnach in einem ersten Schritt zu beurteilen, welche Wirkparameter für die weitere Betrachtung relevant sind.

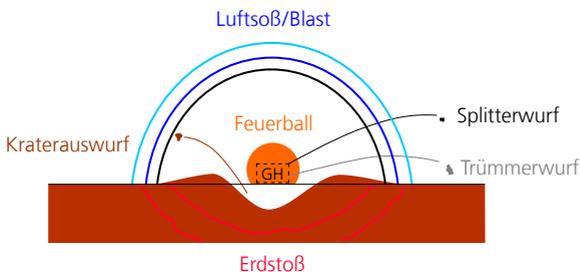


Abbildung 3: Explosionsgefährdung.

3.1 Luftstoß/Blast

Viele Munitionsarten und terroristisch genutzte IEDs basieren auf einer Sprengladung aus Explosivstoffen. Die Umsetzung des Explosivstoffes erfolgt mit Überschallgeschwindigkeit (Detonation \gg ca. 1500–9000 m/s) und ist stark abhängig von der Art des verwendeten Sprengstoffs.



Abbildung 4: Gefährdung durch Blast (50 kg PETN¹; Quelle: WTD 52).

Verschiedene Explosivstoffe erzeugen unterschiedliche Blastparameter. Als Bezugsgröße wird meistens ein entsprechendes TNT-Äquivalent verwendet. Das TNT-Äquivalent gibt die Masse TNT an, die im Vergleich zu der Masse eines betrachteten Sprengstoffs erforderlich ist, einen ausgewählten Blastparameter derselben Größe zu reproduzieren. TNT-Äquivalente werden für unterschiedliche Blastparameter wie z. B. Spitzenüberdruck und Impuls der positiven Druckphase ermittelt. Da viele Daten und Erkenntnisse aus Experimenten mit TNT vorliegen, werden die TNT-Äquivalente für die Übertragung der Ergebnisse auf andere Sprengstoffe verwendet. Verwendete Daten basieren überwiegend auf Ergebnissen, welche im Rahmen von 4 großen Sprengversuchen mit TNT in Kanada zwischen 1959 und 1964 gewonnen wurden [3]. Die Rohdaten aus den Versuchen wurden über Skalierungsbeziehungen und Höhenkorrekturen in Werte umgerechnet, die dem Äquivalent einer 1-Pfund-TNT-Ladung unter atmosphärischen Standardbedingungen entsprechen.

7. Workshop BAU-PROTECT

Experimentelle Nachweisverfahren als Grundlage der Risikobetrachtung am Beispiel VBIED

Nachfolgende Tabelle beinhaltet für ausgewählte Sprengstoffe entsprechende TNT-Äquivalente. Aufgeführt sind TNT und PETN, als überwiegend militärisch genutzte Sprengstoffe, sowie ANFO, welches auch oft in Verbindung mit Anschlägen Verwendung findet.

Tabelle 2: TNT-Äquivalente für die Blastparameter Spitzenüberdruck und Impuls [16].

Sprengstoff	Spitzendruck	Impuls
TNT	1,00	1,00
PETN ¹ /Nitropenta	1,27	1,27
ANFO ²	0,87	0,87

PETN¹ (Pentrit, Pentaerythryltetranitrat), auch Nitropenta
ANFO² (Ammonium Nitrate – Fuel Oil) (Ammoniumnitrat – Kraftstoff)

Fokussierungseffekte, welche z. B. durch die Form des Fahrzeugs, Platzierung des Sprengstoffs (Kofferraum oder Fahrgastzelle) oder durch Reflexionen in der Umgebung der Detonation entstehen können, sind bei der Durchführung von experimentellen Untersuchungen zu berücksichtigen. Für eine experimentelle Versuchsdurchführung sind demnach folgende Daten zwingend zu erfassen:

- Sprengstoffmasse [TNT-Ä in kg]
- Art des Sprengstoffs und mögliche Wirkverstärker
- Platzierung des Sprengstoffs/Wirkverstärker (Kofferraum, Fahrgastzelle)
- Charakteristika des (S)VBIED (Limousine, Kombi, LKW etc.)
- Druck-Zeit-Verläufe (side-on, reflektiert)
- Druck, Impuls, positive Druckdauer.

Dies erlaubt eine Aussage über die wesentlichen Charakteristika der Blastausbreitung (maximaler Überdruck, Impuls und positive Druckdauer) für die entsprechenden Szenarien. Somit lassen sich Widerstandswerte für Schutzmaßnahmen infolge Blasteinwirkung sowie Letalitätswahrscheinlichkeiten für am Szenario beteiligte Personen ermitteln.

7. Workshop BAU-PROTECT

Experimentelle Nachweisverfahren als Grundlage der Risikobetrachtung am Beispiel VBIED

3.2 Trümmer und Schock

Primärsplitter/-trümmer:

Bei der Detonation wird die vorhandene Umhüllung (Fahrzeug in Verbindung mit Wirkverstärkern) zerstört und bildet Splitter/Trümmer mit hohen Abgangsgeschwindigkeiten (> 2000 m/s). Diese werden als Primärsplitter/-trümmer bezeichnet. Die Art des Fahrzeuges und damit die Fahrzeugmasse sind ein entscheidendes Kriterium für die Bewertung von (S)VBIEDs.



Abbildung 5: Gefährdung durch Trümmer (Versuche WTD 52 – VBIED; Quelle: WTD 52).

Von Interesse ist hierbei vor allem der Schutz gegen (S)VBIED-Trümmer sowie die daraus resultierenden Gefährdungsbereiche, da die Splitter/Trümmer üblicherweise neben dem Blast die größte Wirkung haben. Da ein Fahrzeug aus vielen unterschiedlichen Baugruppen (Fahrgestell, Motor, Reifen, Rahmen, Bleche etc.) besteht, ist eine hinreichend genaue Beschreibung des Fahrzeuges vor dem Versuch, und der Trümmer nach der Sprengung, elementar wichtig für eine anschließende Bewertung.

7. Workshop BAU-PROTECT

Experimentelle Nachweisverfahren als Grundlage der Risikobetrachtung am Beispiel VBIED

Maßgeblich für die Gefährdung durch die definierten Sprengvorrichtungen ist die Wurfstückausbreitung, die mit Hilfe von Daten zu den Abgangsbedingungen für Abgangsgeschwindigkeit, Abgangswinkel, Massenverteilung und Formverteilung beschrieben werden kann. Da entsprechende Daten in der Regel nicht verfügbar bzw. analytisch ohne genaue Kenntnis aller Rahmenbedingungen schwer ermittelbar sind, müssen diese im Rahmen von Untersuchungen quantifiziert werden.

Um eine Bewertung bzgl. Reichweite, Richtung und Geschwindigkeit der Splitter/Trümmer durchführen zu können, müssen bei Versuchsdurchführung folgende Daten ermittelt werden:

- Abgangsgeschwindigkeiten der Trümmer
- Abgangswinkel der Trümmer
- Azimutale und elevatorische Verteilung der Trümmer
- Flugweite der Trümmer.

Diese Angaben lassen Rückschlüsse auf wichtige Parameter zu, welche den Gefährdungsbereich beeinflussen.

Nach erfolgter Detonation müssen die entstandenen Fahrzeugtrümmer katalogisiert, deren exakte Position (Entfernung) muss festgehalten und deren Art und Masse müssen bestimmt werden:

- Flugweite >> Position, Entfernung zum Ground Zero (Sprengpunkt)
- Art (z. B. Fahrgestell, Motor etc.)
- Masse der einzelnen Trümmer
- Länge, Höhe, Breite und Form der Trümmer.

Aus der Masse der einzelnen Trümmerstücke sowie aus deren Geschwindigkeit kann die kinetische Energie errechnet werden, welche wesentlich für deren potentielle Letalität ist. Die Einteilung der Trümmer in Massenklassen ermöglicht es, die Fragmentierung des Fahrzeugs bei verschiedenen großen Ladungsmengen, abhängig von dem verwendeten Sprengstoff sowie dem verwendeten Fahrzeug, als potenzielle Primärsplittergefährdung zu quantifizieren.

Ein Vergleich der ursprünglichen Masse des Fahrzeugs mit der aufsummierten Masse der Trümmerstücke, welche um Ground Zero verteilt werden, lässt eine

7. Workshop BAU-PROTECT

Experimentelle Nachweisverfahren als Grundlage der Risikobetrachtung am Beispiel VBIED

quantifizierte Abschätzung der Masse der Trümmer zu, welche im Verlauf einer Modellbildung für die Gefahrenbereichsermittlung durch (S)VBIED relevant sind.

Sekundärtrümmer:

Bei der Bemessung baulicher Schutzmaßnahmen müssen sowohl das lokale Materialversagen als auch das Versagen der Tragfähigkeit der Gesamtstruktur berücksichtigt werden. Auch ist die Überlagerung der Wirkmechanismen einer Detonation (kombinierte Blast-/Splitterbeaufschlagung) insbesondere für den Lastfall (S)VBIED zu berücksichtigen. Dies kann erhebliche Sekundärtrümmer zur Folge haben.

Die Kenntnis dieser Daten ermöglicht es, für den Schutz gegen betrachtete (S)VBIED optimale Maßnahmen auszulegen. Durch geeignete Interpolation/Extrapolation der Daten ist es auch möglich, den Schutz einer beliebigen Gefährdungssituation anzupassen. Grundvoraussetzung hierfür ist allerdings eine vorher definierte Anzahl an Versuchen mit Variation von Ladungsmasse, Abstand zum Schutzbauteil, Ladungsposition im Fahrzeug sowie Variation der Fahrzeugklasse (Masse der Umhüllung).

3.3 Thermische Wirkung (Hitze), Feuerball

Eine Detonation verursacht zumindest im Nahbereich und kurzzeitig eine thermische Belastung exponierter Strukturen. Diese ist stark abhängig von der Ladungsmasse sowie der Art des verwendeten Sprengstoffs in Verbindung mit Wirkverstärkern (z. B. Aluminiumpulver). Bei entsprechender Brandlast ist eine Entzündung mit nachfolgendem Sekundärbrand möglich, auch als Folgebrand bezeichnet. Die Minimierung der Auswirkungen thermischer Belastung durch Detonation ist nur in Form eines vorbeugenden Brandschutzes zu gewährleisten [6]. Beobachtungen von Schadensereignissen nach terroristischen Anschlägen haben zuletzt mehrmals gezeigt, dass Gebäude Anschlägen mit (S)VBIED bzw. Anprallvorgängen standgehalten haben, jedoch später aufgrund von Folgebränden eingestürzt sind. Bei der Auswahl von Brandschutzmaßnahmen erweisen sich solche als vorteilhaft, welche zur Gesamttragfähigkeit von Bauteilen und Tragwerken beitragen.

Durch günstige Werkstoffkombination ist ein darüber hinaus verbessertes Widerstandverhalten sowohl für Extrembelastungen als auch für den Brandfall erzielbar. Ein ergänzender Schutz kann zudem durch anlagentechnischen Brandschutz erzielt werden. Der bauliche Brandschutz auf Tragwerksebene ist ebenso relevant wie der bauliche Brandschutz auf Objektebene. Hauptziel ist jedoch die Verhin-

7. Workshop BAU-PROTECT

Experimentelle Nachweisverfahren als Grundlage der Risikobetrachtung am Beispiel VBIED

derung eines Folgebrandes durch die Initialeinwirkung aus einem (S)VBIED auf zu schützende Objekte innerhalb und außerhalb zu schützender Infrastruktur durch Schutzabstände oder geeignete Schutzmaßnahmen.

Eine Betrachtung der thermischen Wirkung aus dem Lastfall Detonation spielt insbesondere bei den hier zu betrachtenden Explosivstoffmengen eine eher untergeordnete Rolle.



Abbildung 6: Gefährdung durch Feuerball (Versuche WTD 52 – VBIED; Quelle: WTD 52).

4 MÖGLICHKEITEN DER DATENGENERIERUNG

4.1 Numerische Simulation

Für den Nachweis der Widerstandsfähigkeit von Bauteilen/-elementen gegen Waffenwirkung wird unter anderem die Methode der numerischen Simulation eingesetzt. Neben der Verwendung zur Bemessung von Bauwerken gegenüber statischen Lasten ist der Einsatz im Bereich hochdynamischer Anwendungen eine Alternative zu aufwendigen und zeitintensiven Experimenten. [7] gibt hierzu einen Überblick über die Möglichkeiten numerischer Simulation im Bereich hochdynamischer Belastungen und zeigt Chancen und Anwendungsgrenzen dieser auf.

7. Workshop BAU-PROTECT

Experimentelle Nachweisverfahren als Grundlage der Risikobetrachtung am Beispiel VBIED

Für den Lastfall VBIED sind numerische Simulationen aufgrund der Vielzahl in Betracht zu ziehender Parameter nur bedingt geeignet. Zum einen liegt dies an der Vielfältigkeit der in Frage kommenden Fahrzeugtypen, zum anderen an der genauen Kenntnis der Materialeigenschaften eines VBIED sowie der damit verbundenen Aufbruchmechanismen bei einer Detonation bis hin zur Beschreibung der Abgangsbedingungen der Trümmer. Letzteres endet in der Interaktion mit der baulichen Schutzstruktur, welche ebenfalls realgetreu abzubilden ist. Prinzipiell eignen sich numerische Simulationen für den hier zu betrachtenden Lastfall nur für Vorstudien sowie ausgewählte Parameterstudien:

- Blausausbreitung für komplexe Szenarien (urbanes Umfeld sowie Einfahrtsbereiche für Feldlager/Einsatzinfrastruktur infolge VBIED)
- Einfluss von baulichen Schutzmaßnahmen (vereinfacht mit starren Strukturen) für komplexen Blast in Abhängigkeit der Ladungsmasse
- Ermittlung von Letalitätswahrscheinlichkeiten für am Szenario beteiligte Personen infolge Blast
- Charakteristische Abgangsgeschwindigkeiten und Abgangswinkel für VBIED in Abhängigkeit der Ladungsmasse sowie Platzierung der Ladung im Fahrzeug
- Ermittlung von notwendigen Widerstandswerten für infrage kommende Schutzmaßnahmen infolge Blast.

4.2 Analytische Beschreibung

Bei der explosiven Umsetzung von Munitionsartikeln oder IEDs kommt es vor allem zu einer Gefährdung aus Splitter und Blast. Aus diesem Grund ist die Beschreibung der Splitterbildung für Gefährdungs-, Schadens- und Risikobetrachtungen im Rahmen von Analysen beispielsweise für die munitionstechnische Sicherheit oder Kampfmittelbeseitigung maßgeblich. Im Rahmen verschiedener Ansätze, wie z. B. der ESQRA-GE (Explosive Quantitative Risk Analysis – Germany) [8], werden Splittermatrizen zur Beschreibung der Fragmentierung von Munitionsartikeln oder IEDs verwandt. Hierbei geht es hauptsächlich um die Betrachtung „natürlicher Fragmentierung“. Die natürliche Fragmentierung beschreibt die Fragmentierung einer Schale, die keine Sollbruchstellen aufweist. Mit Blick auf (S)VBIEDs beschreibt die „natürliche Fragmentierung“ die Splitterbildung des Karosserieblechs. Um Splittermatrizen zu erstellen, können verschiedene Verfahren angewendet werden. Zum einen können Versuche durchgeführt werden (Verwendung einer Sprengtheke [4]), zum anderen können in gewissem Rah-

men rechnerische Verfahren verwandt werden. Eine Sprengtheke ist eine halb-kreisförmige Arena, von der die Fragmente abgefangen werden. Dabei lassen sich Masse, Geschwindigkeit, Richtung und Form von Fragmenten bestimmen. Rechnerische Verfahren basieren überwiegend auf den analytischen Modellen zur Beschreibung natürlicher Fragmentierung regelmäßiger geometrischer Körper nach Mott, Gurney und Taylor. Eine Zusammenfassung der entsprechenden analytischen Modelle findet sich im Bericht V39/13 des Ernst-Mach-Instituts [9]. Auf Basis dieser Modelle können analytisch Splittermatrizen erzeugt werden. Dies gilt jedoch überwiegend für rotationssymmetrische Gefahrenherde (z. B. Zylinder, Zylinderhüllen), welche auch im Hinblick auf Bomben zum Teil optimiert wurden. Hinsichtlich der Sprengstoffmenge sind hier klare Grenzen gesetzt, da sich die zuvor beschriebenen Modelle nur für kleine bis mittlere Ladungsmengen eignen.

Für den Gefahrenherd VBIED ist dies demnach nur für eine äußerst grobe und einfache Betrachtung heranzuziehen (z. B. Näherungsweise für Tanklastwagen). Da ein Fahrzeug aus vielen unterschiedlichen Baugruppen (Fahrgestell, Motor, Reifen, Rahmen, Bleche etc.) besteht, lässt dies erkennen, dass eine Beschreibung möglicher Abgangsbedingungen mittels Mott, Gurney und Taylor nicht zu den gewünschten Ergebnissen führt.

4.3 Experimentelle Untersuchungen

An einer realen Gesamtstruktur – zusammengesetzt aus verschiedenen Bauteilen und Elementen – können die Effekte durch Waffenwirkung oder terroristische Anschläge wesentlich komplexer sein, als dies mittels numerischer Simulation oder analytischer Verfahren überhaupt abbildbar ist. Experimentelle Tests an Gesamtstrukturen sind im Vergleich zu Tests an Bauteilen aufgrund der wesentlich größeren Komplexität aufwendiger. Ebenso komplex ist im Regelfall die resultierende Reaktion der Gesamtstruktur. Vorgänge wie der progressive Kollaps oder die Wechselwirkungen zwischen sich unterschiedlich verformenden Bauteilen können meistens nicht oder nur sehr schwer rein analytisch oder mittels numerischer Simulation abgebildet werden. Darüber hinaus können sich Schwierigkeiten bei der Abbildung komplexer Belastungssituationen oder bei der Beschreibung des Verhaltens einer vorgeschädigten Struktur ergeben.

Maßstabsversuche eignen sich vor allem zu Vorversuchen und Parameterstudien, wenn z. B. Primärtrümmer und deren Auswirkung auf die Umgebung und daraus resultierende Gefährdungsbereiche abgeschätzt werden sollen. Auch sind diese eine kostengünstige Alternative, um erste Parameter zu untersuchen. Hinsicht-

7. Workshop **BAU-PROTECT**

Experimentelle Nachweisverfahren als Grundlage der Risikobetrachtung am Beispiel VBIED

lich Bildung der Trümmer und möglicher Massen, Geschwindigkeiten, Abgangswinkel und Formen sind Maßstabsversuche eine erste Näherung. Auch sind Maßstabsversuche nicht geeignet, um die Aufbruchmechanismen eines potentiellen (S)VBIED hinreichend genau abzubilden. Maßstabsversuche ersetzen keine Versuche im Realmaßstab. Gleiches gilt für die Überprüfung von Parameterstudien mittels numerischer Simulation.

Für die Validierung der Modelle ist man im Allgemeinen auf Realversuche angewiesen, sei es zum Überprüfen der Berechnungen oder zum Feststellen einiger Randbedingungen. Grundsätzlich kommen mehrere Bedingungen in Frage, die eine experimentelle Nachweisführung an Schutzstrukturen nötig machen:

- Die Tests an Einzelbauteilen lassen keine zuverlässige Aussage über die Reaktion der Gesamtstruktur zu
- Unzureichende Kenntnisse über die einwirkende Seite (Waffenwirkung, Art der Waffe) und/oder der Schutzstruktur selbst
- Komplexe Belastungen, d. h. kombinierte Blast-/Splitterwirkung sowie resultierende Sekundärtrümmer.

Insbesondere für den Schutz bei komplexen terroristischen Anschlagsszenarien durch (S)VBIED führen die oben aufgeführte Bedingungen und Sonderfälle zu dem Resultat, dass eine experimentelle Nachweisführung unabdingbar ist. Aus wirtschaftlichen Gründen wird hier jedoch stets eine Kombination aus analytischen Verfahren, Realversuchen und numerischer Simulation angestrebt. So können abgesicherte Ergebnisse für komplexe Belastungssituationen erzielt werden.

Folgende Fragestellungen können hinsichtlich (S)VBIED beantwortet werden:

- Komplexe Belastungen, d. h. kombinierte Blast-/Splitterwirkung, resultierende Sekundärtrümmer auch mit baulichen Schutzmaßnahmen
- Ermittlung resultierender Gefährdungsbereich durch Primär- und Sekundärtrümmer
- Ermittlung von Abgangsbedingungen hinsichtlich Geschwindigkeit und Winkel mit geeigneten Messmethoden
- Blastausbreitung für komplexe Szenarien
- Art, Masse, Form und Wurfweiten der Splitter/Trümmer.



Abbildung 7: Experimentelle Nachweisführung eines (S)VBIED an der WTD 52 (Quelle: WTD 52).

5 AUSWERTEVERFAHREN

Bei Anschlägen mit (S)VBIEDs werden weltweit in 70 bis 80 Prozent der Fälle Fahrzeuge der Mittelklasse verwendet [2]. Die entsprechenden Fahrzeugmassen bewegen sich hierbei zwischen einer und zwei Tonnen. Die Bandbreite der in Frage kommenden Fahrzeuge ist riesig. Diese reichen von Limousinen, Kombis bis hin zu Fahrzeugen mit Schrägheck. Eine Unterscheidung diesbezüglich für die Wahl des Gefahrenherdes macht daher keinen Sinn. Ausschlaggebendes Kriterium ist die relevante Fahrzeugklasse (Mittelklasse, 1–2 t) und damit die potentielle Trümmergefährdung.

Neben der Fahrzeugklasse sind des Weiteren die Art des verwendeten Sprengstoffs sowie dessen Nettoexplosivstoffmasse eine Variable, die es bei der Schutzauslegung zu beherrschen gilt. Gegen extreme Nettoexplosivstoffmassen, die bevorzugt mit Kleintransportern oder LKW verbracht werden, ist ein Schutz unter wirtschaftlichen Aspekten kaum möglich oder es wären riesige Schutzabstände notwendig. Daher macht es Sinn, sich auf (S)VBIED-Kategorien zu beziehen, welche zum einen eine gewisse Einsatzwahrscheinlichkeit mit sich bringen und welche zum anderen für die Betrachtung und die Ermittlung der Gefährdung unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten machbar erscheinen. Zu untersuchen sind demnach potentielle (S)VBIEDs der Fahrzeugklasse „Mittelklasse“ (1–2 t Fahrzeugmasse, < 910 kg Explosivstoff).

7. Workshop BAU-PROTECT

Experimentelle Nachweisverfahren als Grundlage der Risikobetrachtung am Beispiel VBIED

Um eine Aussage über die dadurch entstehende Blast- und Trümmergefährdung treffen zu können, wurden und werden an der WTD 52 in Oberjettenberg sowie an der WTD 91 in Meppen experimentelle Untersuchungen mit (S)VBIEDs im Maßstab 1:1 durchgeführt. Ziel dieser Untersuchungen ist, neben der Ermittlung der Gefährdung, vor allem die Gewinnung von experimentellen Daten, die in weiterführende und zum Teil softwarebasierende Analysen in Zusammenarbeit mit dem EMI einfließen. Aus diesem Grund findet eine dreigliedrige Auswertung aller durchgeführten (S)VBIED-Versuche statt. Zum einen wird unmittelbar während der Detonation die entstehende und örtlich variable Blastbelastung erfasst. Zum anderen finden zwei Analyseschritte im Nachgang statt – die Splitter-/Trümmerauswertung und die Analyse der Trümmer-Abgangsbedingungen.

Gemäß den einschlägigen Erfahrungen bzgl. des standardisierten Verfahrens zur Ermittlung von Splittermatrizen in der Sprengtheke [4] sind sechs Versuche je Konfiguration durchzuführen. Die Durchführung von sechs Versuchen erlaubt eine statistische Datenerhebung der Abgangsbedingungen. Eine Voraussetzung hierfür ist die Betrachtung eines einheitlichen Gefahrenherdes. Da für die Untersuchungen Mittelklassewagen im Fokus stehen, zeigt Abbildung 8 beispielhaft eine Versuchsreihe, welche mit 100 kg PETN, platziert im Kofferraum, zur Ermittlung der Blast- und Splittergefährdung durchgeführt wurde.

						
Fahrzeuginformationen	V5.1	V5.2	V5.3	V5.4	V5.5	V5.6
	mit 125 kg TNT	mit 100kg PETN	mit 100kg PETN	mit 100kg PETN	mit 100kg PETN	mit 100kg PETN
Bezeichnung	Opel Omega A Lim.	Opel Vectra A Lim.	Ford Mondeo Kombi	Renault Laguna Kombi	Renault Espace II Van	VW Golf 3 Kompakt
Produktionsraum	1986-1993	1998-1995	1993 - 1996	1993 - 2001	1991 - 1996	1991 - 1997
Leistung	Ottomotoren: 1,8–3,0 Liter (60–150 kW) Dieselmotoren: 2,3 Liter (54–74 kW)	Ottomotoren: 1,4–2,5 Liter (52–150 kW) Dieselmotoren: 1,7 Liter (42–60 kW)	Ottomotoren: 1,6–2,5 Liter (65–125 kW) Dieselmotor: 1,8 Liter (65–66 kW)	Ottomotoren: 1,6–3,0 Liter (66–140 kW) Dieselmotoren: 1,9–2,2 Liter (61–83 kW)	Ottomotoren: 2,0–2,8 Liter (76–110 kW) Dieselmotor: 2,1 Liter (65 kW)	Ottomotoren: 1,4–2,9 Liter (40–140 kW) Dieselmotoren: 1,9 Liter (47–81 kW) Elektromotor: 17,6 kW
Länge	4738 mm	4352-4432 mm	4481-4637 mm	4508–4620 mm	4429–4464 mm	4020 mm
Breite	1760 mm	1700-1706 mm	1749 mm	1748–1752 mm	1795 mm	1665 - 1710 mm
Höhe	1445 mm	1400 mm	1428-1442 mm	1442–1448 mm	1805 mm	1405 - 1425 mm
Radstand	2730 mm	2600 mm	2704 mm	2670 mm	2580 mm	2471 - 2474 mm
Leergewicht (kg)	1150	1005	1070	990	1150	800

Abbildung 8: Versuche (S)VBIED – Reihe 5 mit 100 kg PETN – Kofferraum.

5.1 Auswerteverfahren Blast

Grundsätzlich wird erwartet, dass sich die Blastwirkung von (S)VBIEDs nicht sonderlich von der Blastwirkung gleich großer konventioneller Sprengladungen oder IEDs unterscheidet. Hinsichtlich der Bewertung möglicher Letalitätswahrscheinlichkeiten durch Blast ist es wichtig, die entsprechenden Druckverläufe quantitativ in zuvor festgelegten Abständen zu erfassen. Für mögliche Fokussierungseffekte sowie Reflektionen der auftretenden Blastdrücke sind diese mit Freifeldszenarien zu vergleichen.

Ein Vergleich der gemessenen Werte mit dem für eine Freifelddetonation berechneten Druck nach einem Ansatz von Kingery („hemispherical“: Halbkugelförmige Ladung am Boden) [10], ermöglicht eine fundierte Aussage hinsichtlich der zuvor beschriebenen Effekte des komplexen Blast. Die entsprechenden Ergebnisse sind auch in der ESQRA-GE [8] implementiert und beschreiben erwartete Spitzenüberdrücke im Freifeld (side-on) unter der Berücksichtigung der entsprechenden TNT-Äquivalente sowie der daraus resultierenden Letalitätswahrscheinlichkeiten infolge Blast z. B. für Personen. Diese decken sich auch mit dem Handbuch der NATO-Sicherheitsgrundsätze für die Lagerung militärischer Munition und Explosivstoffe (AASTP-1) [11]. In Abhängigkeit eines skalierten Abstandes werden erwartete Spitzendrücke für Freifeldszenarien angegeben und zu schützenden Objektkategorien zugewiesen.

7. Workshop BAU-PROTECT

Experimentelle Nachweisverfahren als Grundlage der Risikobetrachtung am Beispiel VBIED

Tabelle 3: Scaled Distance gemäß AASTP-1 [11].

$Z = \frac{R}{Q^{1/3}}$ Scaled Distance gem. AASTP1 (Q in kg, distance in m)	Freifeld (Kingery hemispherical)	
	erwarteter Ps (Incident Pressure)	
	in kPa	in bar
2,4	180	0,8
3,6	70	0,7
7,2	24	0,24
8	21	0,21
9,6	16	0,16
14,8	9	0,09
22,2	5	0,05
33,3	3	0,03

Z entspricht dem skalierten Abstand („Scaled Distance“, siehe Tabelle 3), Q der entsprechenden Ladungsmenge (TNT-Äquivalent in kg) und R (Abstand in m) der Entfernung zur Detonationsquelle, nach welcher der Erwartungswert des Spitzenüberdruckes (side-on) erreicht wird. Aus den entsprechenden Parametern lassen sich die Abstände R für die Platzierung der Drucksensoren errechnen. Zum Beispiel wird unter Freifeldbedingungen bei einem skalierten Abstand von $Z = 9,6 \text{ m/kg}^{1/3}$ ein Spitzenüberdruck von 16 kPa (side-on) in Abhängigkeit der verwendeten Ladung (TNT-Äquivalent in kg) erwartet. Für 25 kg TNT-Äquivalent würde dies einen Abstand von 28 m nach sich ziehen. Dementsprechend müssen folgende Daten im Rahmen der Versuchsdurchführung erfasst werden:

- Sprengstoffmasse (TNT-Äquivalent in kg)
- Art des Sprengstoffs und Wirkverstärker
- Platzierung des Sprengstoffs/Wirkverstärker (Kofferraum, Fahrgastzelle)
- Charakteristika des VBIED (Limousine, Kombi, LKW etc.)

7. Workshop BAU-PROTECT

Experimentelle Nachweisverfahren als Grundlage der Risikobetrachtung am Beispiel VBIED

- Druck-Zeit-Verläufe (side-on, reflektiert)
- Druck, Impuls, positive Druckdauer.

Somit können Aussagen über die tatsächlichen Druck-Zeitverläufe für unterschiedliche Versuchskonfigurationen sowie mögliche Reduzierungen durch das „Aufbrechen“ des (S)VBIED ermittelt werden. Eine Vergleichbarkeit zur „idealen Freifeldausbreitung“ ist unmittelbar gegeben und somit eine fundierte Aussage über Letalitätswahrscheinlichkeiten infolge Blast.

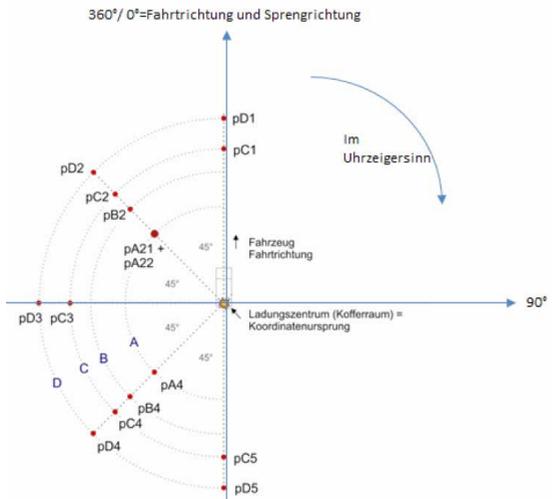


Abbildung 9: Anordnung der Drucksensoren im Versuchsfeld.

5.2 Auswerteverfahren Splitter/Trümmer

Neben dem Blast sind die entstehenden Fahrzeugtrümmer die maßgebliche Bedrohung durch VBIEDs. Für die Auswertung der Fahrzeugtrümmer infolge einer Detonation bieten sich prinzipiell zwei Messmethoden an:

- Einmessung mittels GPS/Tachymeter
- Parzellenlösung (Einteilung des Versuchsfeld in geeignete Parzellen).

7. Workshop BAU-PROTECT

Experimentelle Nachweisverfahren als Grundlage der Risikobetrachtung am Beispiel VBIED

Die Einmessung mittels GPS oder Tachymeter ist ein gängiges Verfahren im Bereich der Messtechnik. Praktische Erfahrungen zeigen bei 200–300 einzumessenden Trümmern je Versuch einen erheblichen zeitlichen Mehraufwand gegenüber dem Verfahren Parzellenlösung.

Bei der Parzellenlösung wird über das Testgelände ein radiales, in Sektoren geteiltes Gitter gelegt. Das Gitter hat sein Zentrum in der Mitte des initiierten Ereignisses. Dieses Auswerteverfahren ist geeignet, um bei einer großen Anzahl an Trümmern/Splittern unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten eine entsprechende Auswertung des Gefahrenbereiches durchzuführen. Das hier beschriebene Verfahren ist gängige Praxis im Bereich der internationalen Versuchsdurchführung, insbesondere bei der Lagerung von militärischer Munition und Explosivstoffen. Jedoch gibt es keine verbindlichen Vorgaben bzgl. der Sektoreneinteilung sowie der Tiefe der entsprechenden Parzellen. Vielmehr sind diese Parameter von den entsprechenden Versuchen, der wahrscheinlichen Reichweite der Trümmer und den örtlichen Gegebenheiten des Versuchsgeländes abhängig. Untersuchungen in den USA zur Ermittlung von Gefährdungsbereichen [12] wurden mit einer Sektoreneinteilung von jeweils 5° (im Uhrzeigersinn) und einer Tiefe der entsprechenden Parzellen von 30,5 m (100 ft) durchgeführt. Die Software ESQRA-GE [8] verwendet für die Gefährdungs- und Schadensanalyse ein Raster, welches mit einer Sektorentiefe von 20 m in der Grundeinstellung arbeitet. Da die erhobenen Daten auch für die Einbindung in Risikoanalysetools relevant sind, ist für eine Versuchsdurchführung eine Tiefe von 20 m für die Parzellenlösung als sinnvoll zu erachten. Im Anschluss an einen Versuch können die entstandenen Fahrzeugtrümmer eingesammelt, deren Position (Parzelle) kann festgehalten und deren Art und Masse können bestimmt werden:

- Flugweite >> Position, Entfernung zum Ground Zero (Sprengpunkt)
- Art (z. B. Fahrgestell, Motor etc.)
- Masse der einzelnen Trümmer
- Länge, Höhe, Breite und Form der Trümmer.

7. Workshop BAU-PROTECT

Experimentelle Nachweisverfahren als Grundlage der Risikobetrachtung am Beispiel VBIED

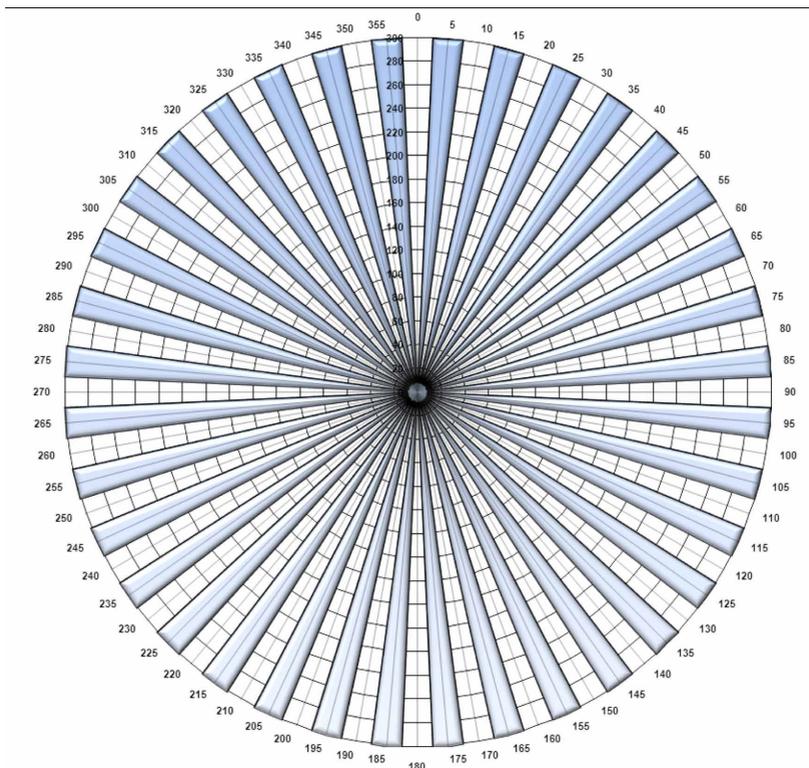


Abbildung 10: Einteilung des Versuchsfeldes in Sektoren (Parzellenlösung, [2]).

Ein weiterer wirtschaftlicher Vorteil der Parzellenlösung liegt darin, dass mehrere Versuche einer Versuchsreihe auf einem Versuchsfeld durchgeführt und ausgewertet werden können. Bei vergleichbaren Eingangsdaten (Fahrzeugmasse, Sprengstoffart und Sprengstoffmasse, Position der Ladung im Fahrzeug) kann je Versuchsreihe ein statistisches Mittel der Trümmer-/Massenverteilung ermittelt werden.

Für die Ermittlung von Gefahrenbereichen kann die Pseudo-Trajectory-Normal-Methode (PTN-Methode) angewandt werden (vgl. [13]). Bei dieser Methode wird von einem Schwellwert mit „einem gefährlichem Fragment je 600 ft²“ ausgegangen. Die projizierte Fläche eines stehenden Menschen ist mit 6 ft² definiert.

7. Workshop BAU-PROTECT

Experimentelle Nachweisverfahren als Grundlage der Risikobetrachtung am Beispiel VBIED

Auf diese Art und Weise wird über das Verhältnis der Flächen, genauer über das Verhältnis der Schwellwerte mit einem gefährlichen Fragment je 6 ft², bezogen auf 600 ft² (56 m²), eine Wahrscheinlichkeit von 1 % für eine gefährliche Verletzung abgebildet. Ein Fragment gilt dann als gefährlich, wenn es mindestens eine kinetische Energie von 79 Joule besitzt [11]. Diese Methode entspricht auch der Darstellung des gefährdeten Bereichs nach NATO-Kriterium [14]. Bei den Versuchen müssen die auf dem Boden liegenden Fragmente gesammelt werden. Dabei ist es nicht mehr möglich, die Energie der Fragmente zu bestimmen. Weiterhin werden Effekte, wie hohe Flugbahnen, „Tumble & Roll“ oder das tiefe Eindringen in den Boden, nicht berücksichtigt. Folglich wird jedes gefundene Fragment als gefährlich eingestuft, das nach den Tests gesammelt wurde. Dieser konservative Ansatz erlaubt die Ermittlung von Gefahrenbereichen je Versuchsreihe auf der sicheren Seite.

Die Abbildungen 11 und 12 zeigen beispielhaft aus einer Versuchsreihe die ermittelten Risiken durch Trümmer (Anzahl) sowie den gefährdeten Bereich nach NATO-Kriterium. Bei den Darstellungen handelt es sich jeweils um den Mittelwert aus 6 Versuchen.

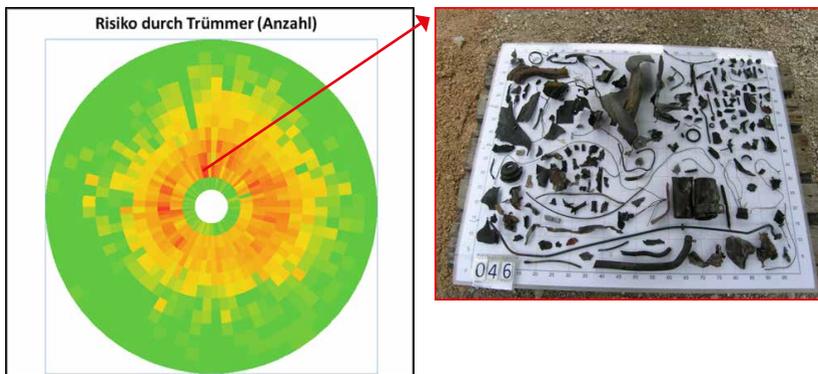


Abbildung 11: Risiko durch Trümmer (Anzahl) – Reihe 5 mit 100 kg PETN – Kofferraum.

7. Workshop BAU-PROTECT

Experimentelle Nachweisverfahren als Grundlage der Risikobetrachtung am Beispiel VBIED

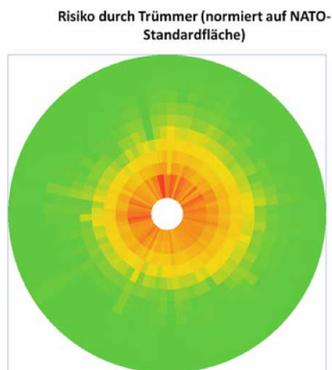


Abbildung 12: Risiko durch Trümmer (gefährdeter Bereich nach NATO-Kriterium) – Reihe 5 mit 100 kg PETN – Kofferraum.

5.3 Auswerteverfahren Trümmer-Abgangsbedingungen

Im internationalen Bereich werden überwiegend optische Verfahren mittels High-Speed-Videoauswertung herangezogen, um die Abgangsbedingungen von Trümmern zu ermitteln.

Ziel ist die Quantifizierung charakteristischer Abgangswinkel. Des Weiteren kann der Einfluss von baulichen Schutzmaßnahmen auf Abgangswinkel und mögliche Gefährdungsbereiche untersucht werden (Abbildung 13 und Abbildung 14).

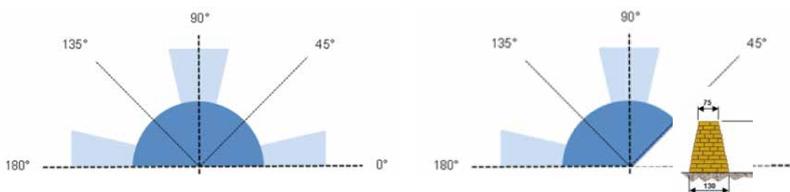


Abbildung 13: Mögliche Hauptwinkelgruppen sowie Einfluss von Schutzmaßnahmen (rechts).

Mit den ermittelten Daten ist ein quantifizierbares Schutzniveau für die Bewertung und Entwicklung baulich passiver Schutzstrukturen möglich. Dies betrifft zum einen die Abschattungseffekte (Winkelgruppen, welche nicht für den Ge-

7. Workshop BAU-PROTECT

Experimentelle Nachweisverfahren als Grundlage der Risikobetrachtung am Beispiel VBIED

fahrenbereich beitragen) sowie die Standfestigkeit gegenüber auftreffenden Trümmern (kein Durchschlagen der Schutzstruktur) und zum anderen die Vermeidung von möglichen Sekundärtrümmern aus der baulichen Schutzstruktur selbst.

Bei Beachtung einheitlicher Auswertevorgänge können so reproduzierbare Messergebnisse geliefert werden, wobei hier von einer unmittelbaren Vergleichbarkeit der Auswertungen ausgegangen werden kann. Des Weiteren ist durch das beschriebene Messverfahren eine statistische Ableitung der Abgangsbedingungen möglich. Durch das Zusammenführen der statistischen Ableitung der Abgangsbedingungen mit den Ergebnissen der parallel stattfindenden Trümmerauswertung kann eine Aussage über den von (S)VBIEDs ausgehenden Gefährdungsbereich getroffen werden. Zudem bilden die beiden statistischen Auswertungen (Abgangsbedingungen und Trümmer) die Grundlage für eine angestrebte Modellbildung.

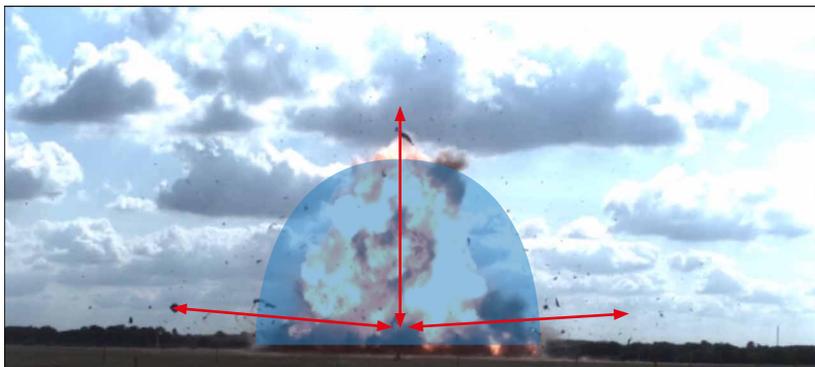


Abbildung 14: Trümmerabgang (Ansicht Front) – Reihe 5 mit 100 kg PETN – Kofferraum.

6 MODELLBILDUNG

Die experimentell ermittelten Daten müssen analytisch aufgearbeitet werden, um sie einerseits als direkte Eingabeparameter innerhalb von Risikoanalysetools wie der der ESQRA-GE verfügbar zu machen, andererseits aber gerade auch, um andere Szenarien beschreiben zu können, für die keine Versuchsdaten zur Verfügung stehen.