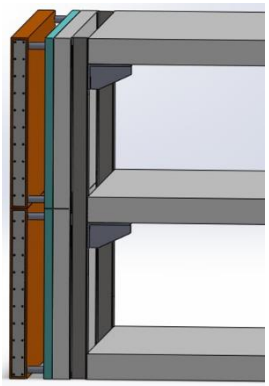
„Anwendungsgerechte leichte Explosionsschutzlösungen für die Absorption kurzzeitdynamischer Belastungen“

Dipl.-Ing. Gregor Kaufmann,
Dipl.-Wirtsch.-Ing. Stefan Krause
Institut für Strukturleichtbau und Energieeffizienz gGmbH



1. Entwicklung innovativer leichter Explosionsschutzlösungen

1.1 Motivation

1.2 Grundlagen

1.3 Innovativer Ansatz

1.4 Funktionsprinzip

1.5 Erprobung Energieabsorption

1.6 Demonstratoren

2. Einsatz leichter Explosionsschutzlösungen für die Delaborierung von Sprengstoffen

2.1 Motivation

2.2 Aktuelle Situation

2.3 Detektion

2.4 Bergung und Vernichtung

2.5 Innovativer Ansatz

1. Entwicklung innovativer leichter Explosionsschutzlösungen

Motivation

- **Weltweit zunehmende Gefährdungslage**

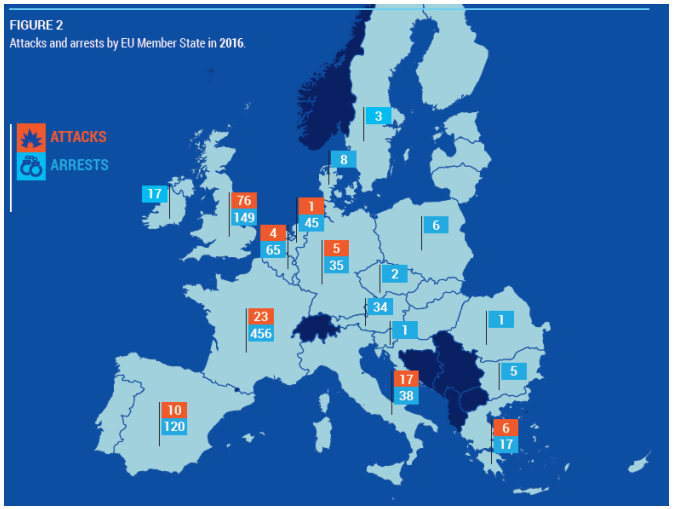
Madrid 03.04.2004

London 07.07.2005

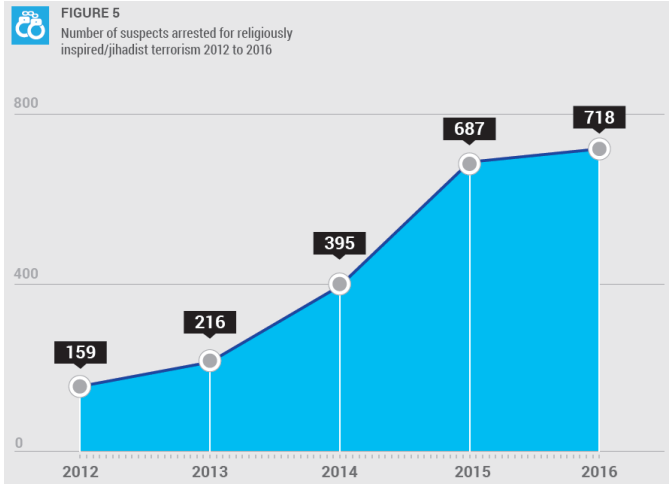
Oslo 22.07.2011

Brüssel 22.03.2016

Paris 13.11.2015



© EUROPEAN UNION TERRORISM SITUATION AND TREND REPORT



© EUROPEAN UNION TERRORISM SITUATION AND TREND REPORT

Motivation

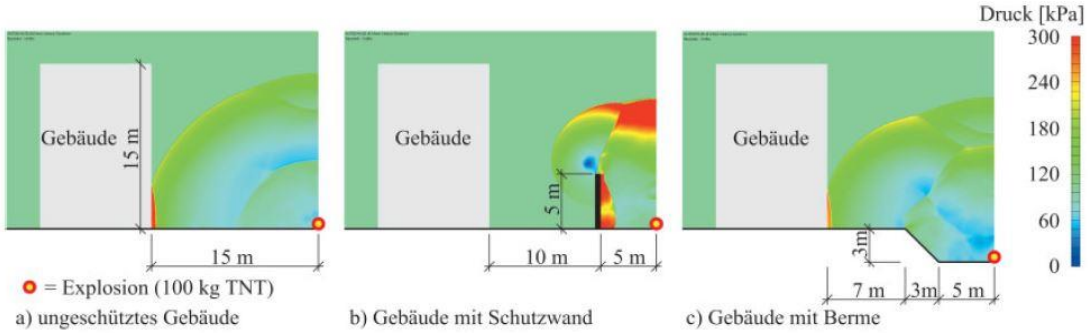
- **Anschlag auf die deutsche Botschaft in Kabul (31.05.2017)**

  Gezielter Anschlag im Diplomatenviertel durch einen präparierten Abwassertanklaster (1500 kg Sprengstoff ≈ 5000 kg TNT-Äquivalent)

  150 Tote, 400 Verletzte, massive Schäden an den Botschaften von Bulgarien, Deutschland, Frankreich, Indien, Japan, Türkei, Vereinigten Arabischen Emiraten und dem NATO-Hauptquartier

Motivation

- **Beispiele für konventionelle Explosionsschutzlösungen**



© N. Gebekken: „ Sicherheit bei terroristischen Bedrohungen im öffentlichen Raumdurch spezielle bauliche Lösungen; 2011

- Ziel ist die Ablenkung oder Reduzierung der Explosionslasten

→ Passive Maßnahmen

- Abstand zur Explosion schaffen

→ Aktive Maßnahmen

- Aufnahm bzw. Reduzierung der Explosionslasten

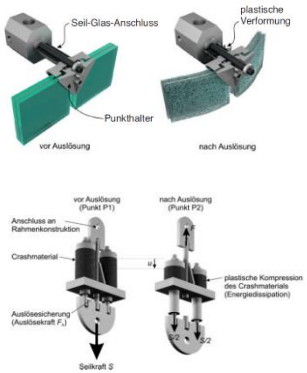
- konventioneller Explosionsschutz i.d.R. durch Masse

Motivation

- **Neuartige Explosionsschutzlösungen**

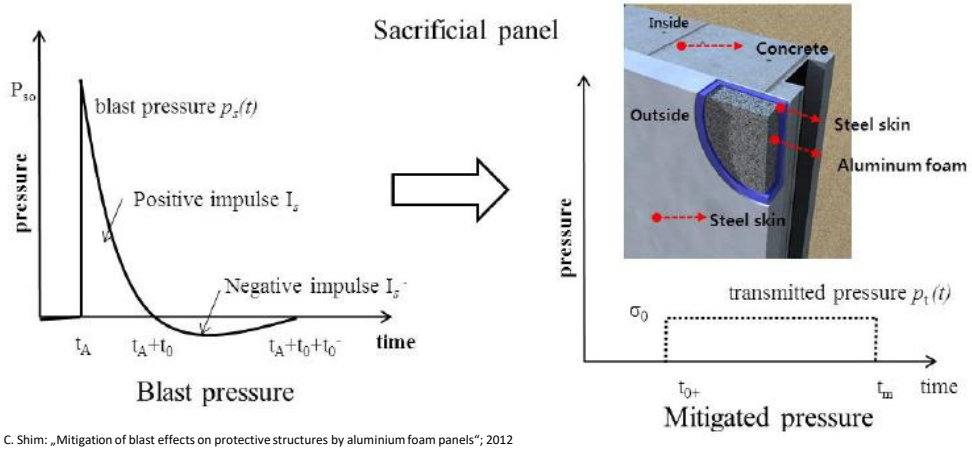
→ Explosionsschützende Seilnetzfassade

© F. Wellershoff: „Blast enhanced facades for the new World Trade Center Towers"; 2008

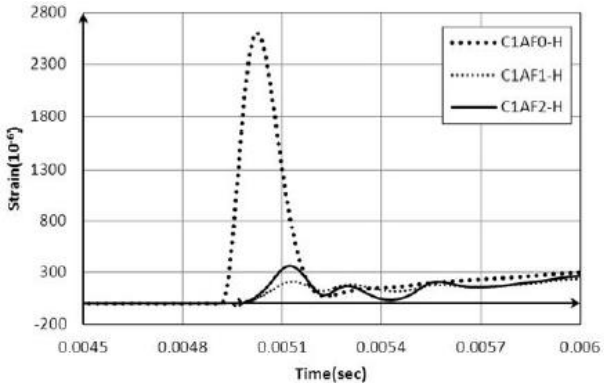


→ Explosionsschutz durch „Sacrifial Cladding"

➢ Ziel: Explosionsschutz unter Nutzung leichter energieabsorbierender Materialien

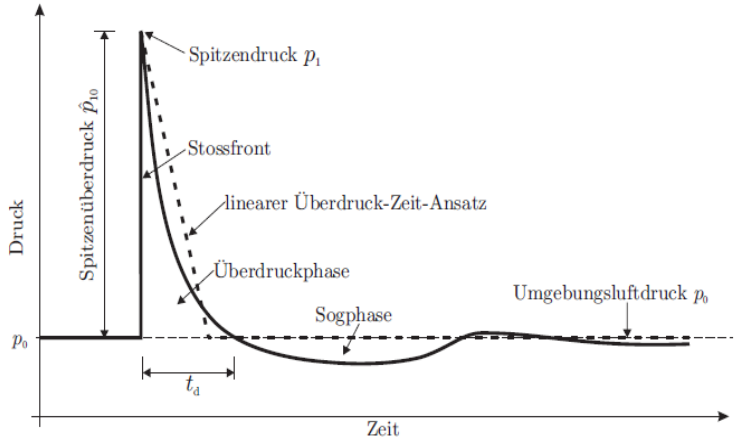


© C. Shim: „Mitigation of blast effects on protective structures by aluminium foam panels"; 2012



- **Charakterisierung Explosionsbeanspruchung**

→ Druck-Zeit-Verlauf einer Explosion (Friedländer-Funktion)



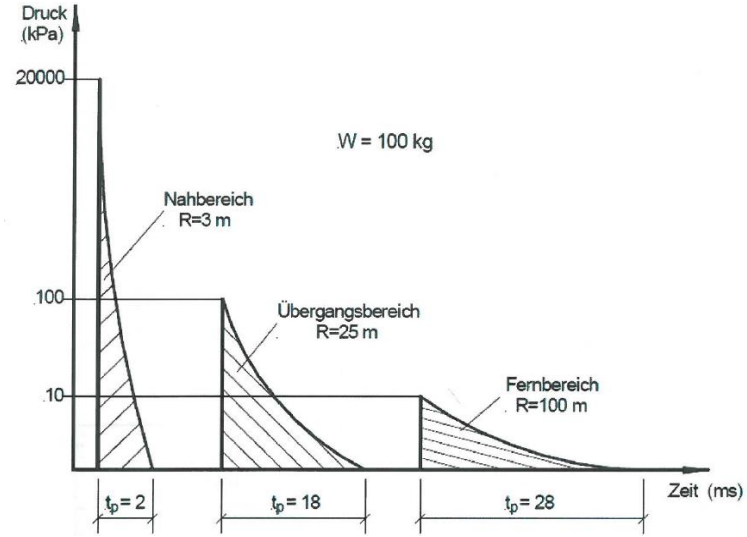
→ effektive Sprengstoffmasse und Abstand zur Explosion

$$z = \frac{R}{m_{eff}^{1/3}}$$

z …skalierter Abstandsparameter

R …Abstand vom Explosionsherd

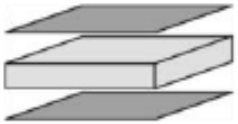
m_{eff} …effektive Sprengstoffmasse TNT kg



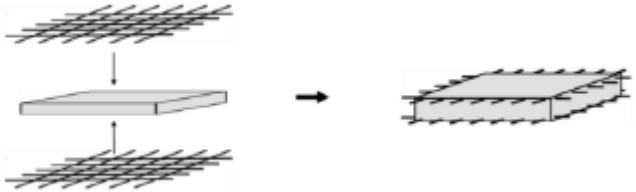
Innovativer Ansatz

- **Erhöhte Energieabsorption durch leichte Hybridverbunde aus bewehrten und Aluminiumschaum**

→ Funktionskombination in einem Bauteil zur Vernichtung kinetischer Energie

	Bauteil	Masse	Biegefestigkeit
Schaumplatte		++	--
Schaumplatte mit Bewehrung		+	+
Sandwich		--	++

© Fraunhofer IWU



Schäumbares Vormaterial kombiniert mit Bewehrung

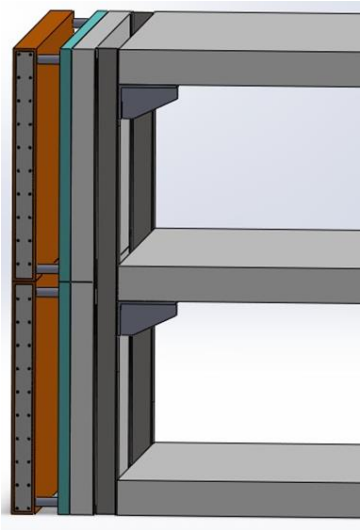
Schaumkern mit Bewehrung

Innovativer Ansatz

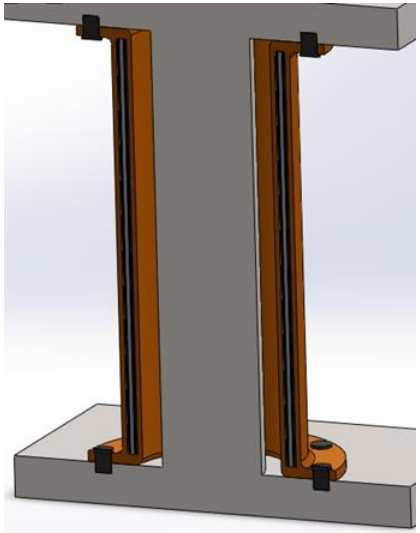
- **Erhöhte Energieabsorption durch leichte Hybridverbunde aus bewehrten und Aluminiumschaum**

→ Anwendungsfälle

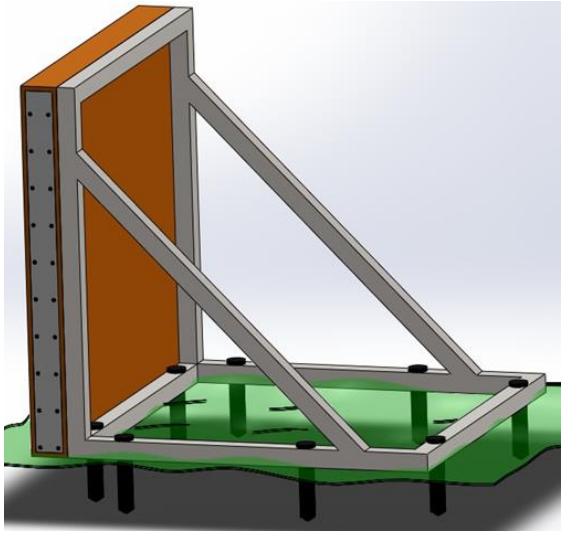
Vorgehängte hinterlüftete Fassade (VHF)



Schutzummantelung für Gebäudestützen



Temporärer Explosionsschutz

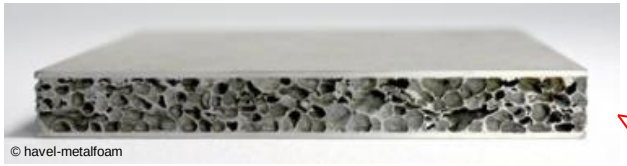


Funktionsprinzip

- **Explosionsschützende vorgehängte hinterlüftete Fassade (VHF)**

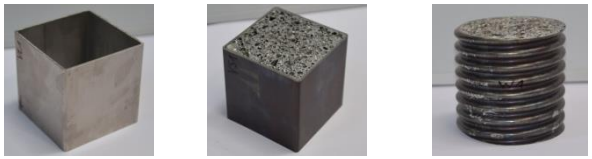
→ Funktionaler Aufbau

Sandwich-Fassadenelemente

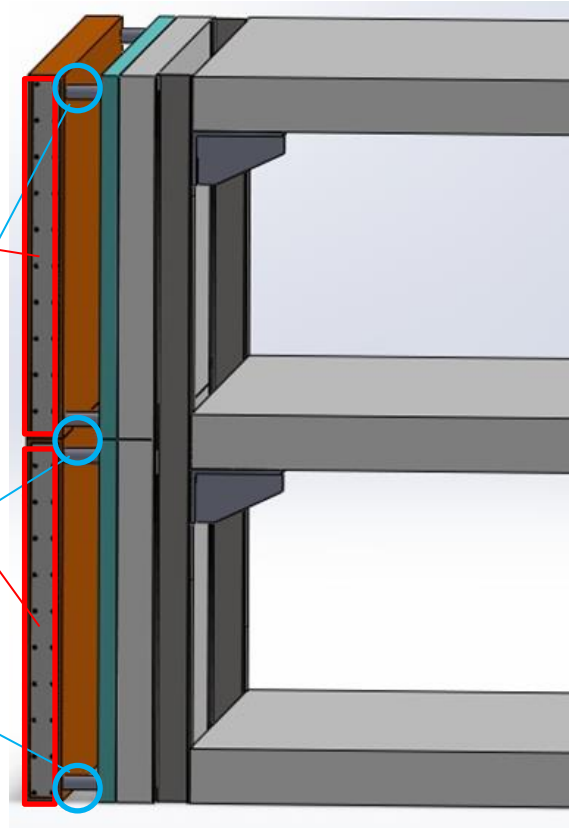


Bewehrte Al-Schaum-Sandwichplatten mit ausreichender Biegesteifigkeit und Energieabsorptionsvermögen in adaptiver Auslegung mit den Deformationselementen

Deformationselemente



Irreversible Dämpfungselemente zur wirksamen Reduzierung und Abtragung der Explosionslasten in die tragende Gebäudestruktur



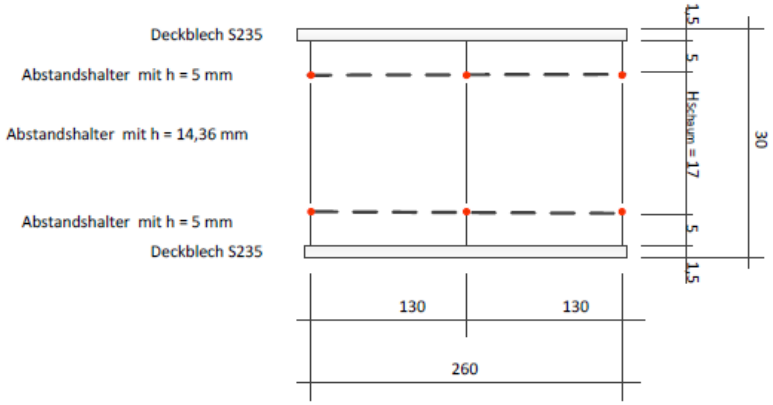
- **Bewehrung**

→ Einfluss der Bewehrung (Form, Art) auf die Eigenschaften des Aluminiumschaums

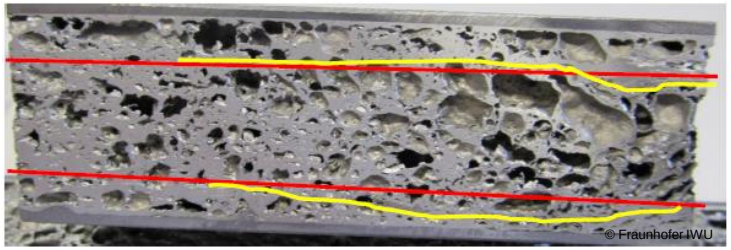
Parameter:
- Basaltfasern
- metallische Drahtstrukturen

→ Metallische Drahtstrukturen

➢ Durchschäumversuche zur Herstellung von Schaumkernen mit ebenen Bewehrungslagen



© Fraunhofer IWU



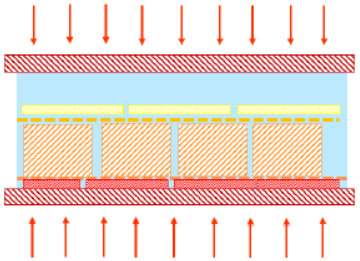
- **Bewehrung**

→ Einfluss der Bewehrung (Form, Art) auf die Eigenschaften des Aluminiumschaums

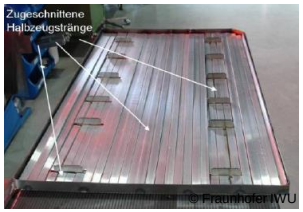
Parameter:
- Basaltfasern
- metallische Drahtstrukturen

→ Metallische Drahtstrukturen

➢ Durchschäumversuche zur Herstellung von Schaumkernen mit 3D-Bewehrungstruktur



© Fraunhofer IWU



© Fraunhofer IWU

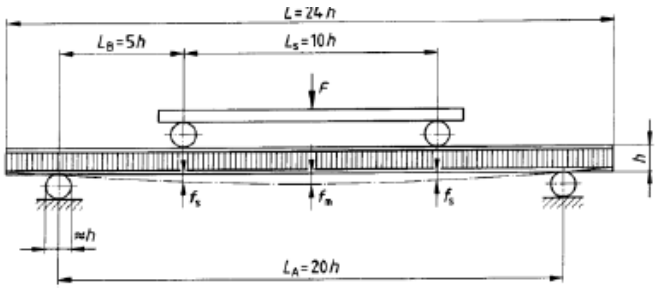
© Fraunhofer IWU

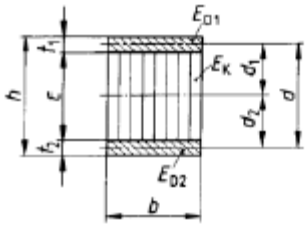
© Fraunhofer IWU

Erprobung – Energieabsorption bewehrte Hybridverbunde

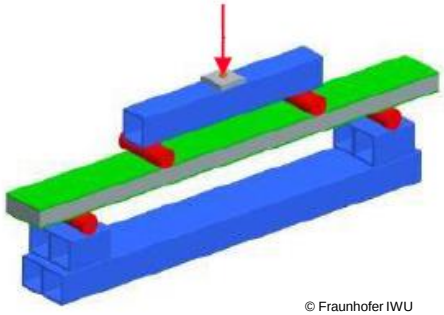
- **Experimentelle Untersuchungen (4-Punkt-Biegeversuche)**

→ 4-Punkt-Biegeversuche nach DIN 53293 (Prüfung von Kernverbunden – Biegeversuch)





$$d = \frac{h + c}{2}$$



→ quasistatische Druckversuche

→ dynamische Fallturmversuche

Erprobung – Energieabsorption bewehrte Hybridverbunde

- **Experimentelle Untersuchungen (4-Punkt-Biegeversuche)**

→ Versuchsprogramm

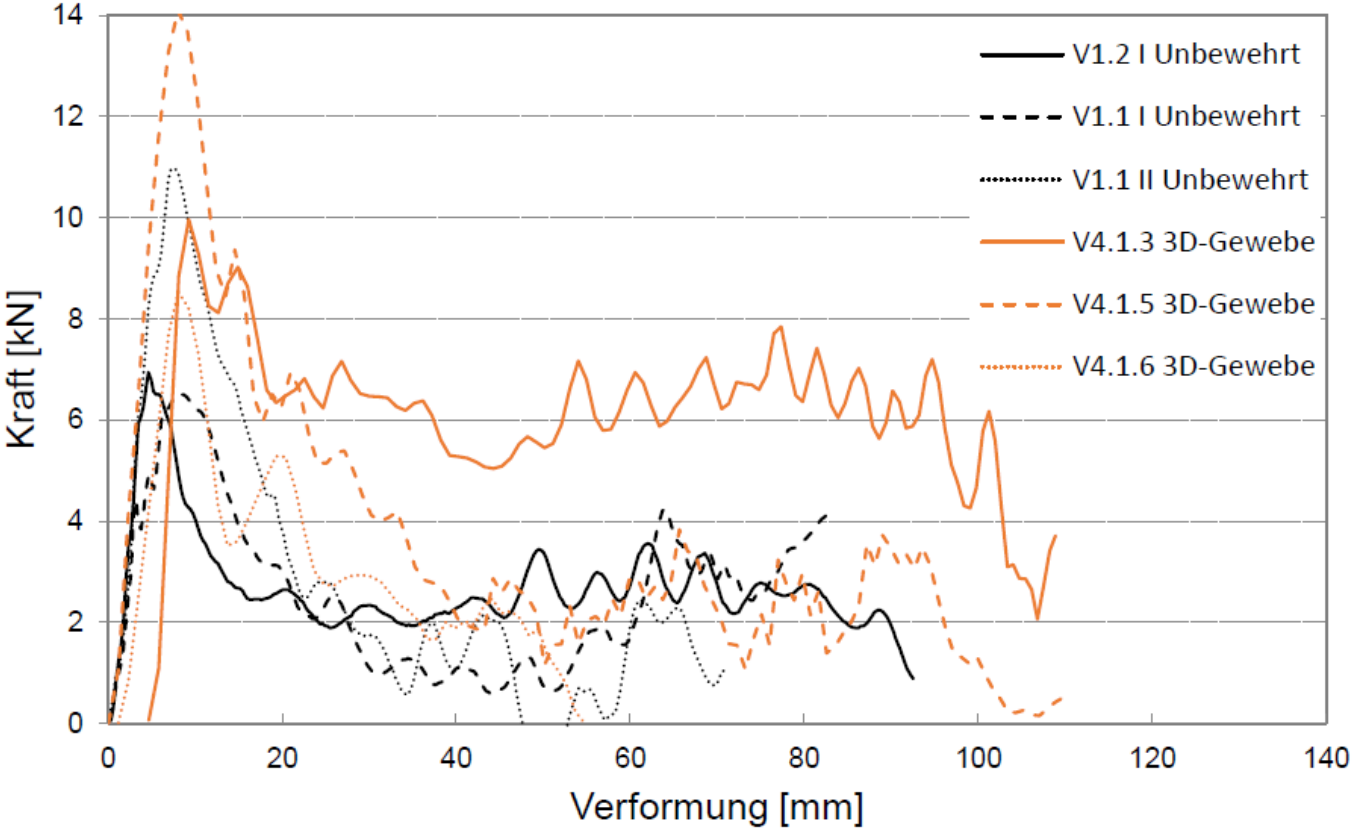
Variante	Bewehrungsmaterial	Bewehrungsstruktur	Deckblechdicke [mm]	Proben-höhe [mm]	Abmessungen [mm²]	Beanspruchungsart
V1	ohne Bewehrung	ohne Bewehrung	1,5	30	720 x 75	statisch
					720 x 75	dynamisch
V2	Gewebe (doppelt drilliert)	2D-Bewehrungslagen (5 mm Abstand zu DB)	1,5	30	720 x 75	statisch
					720 x 75	dynamisch
V3	Gewirk	2D-Bewehrungslagen (5 mm Abstand zu DB)	1,5	30	720 x 75	statisch
					720 x 75	dynamisch
V4	Gewebe	3D-Bewehrungsstruktur	1,5	30	720 x 75	statisch
					720 x 75	dynamisch
V5	Gewirk	3D-Bewehrungsstruktur	1,5	30	720 x 75	statisch
					720 x 75	dynamisch
V6	ohne Bewehrung	ohne Bewehrung	1,5 Basaltgewe-be-Epoxidharz-laminat, geklebt	28	672 x 70	statisch
					672 x 70	dynamisch

© Fraunhofer IWU

Erprobung – Energieabsorption bewehrte Hybridverbunde

- **Experimentelle Untersuchungen (4-Punkt-Biegeversuche)**

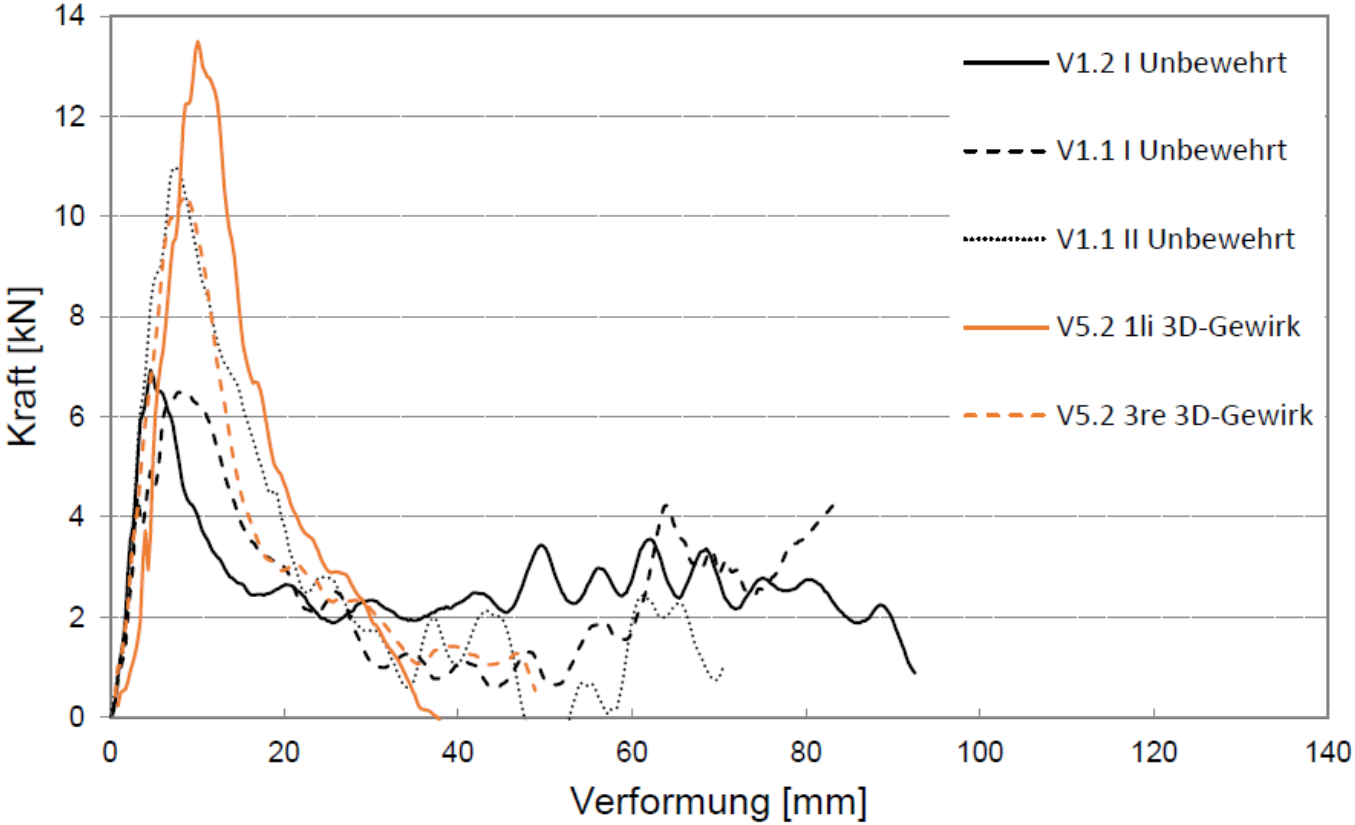
→ 3D-Gewebe

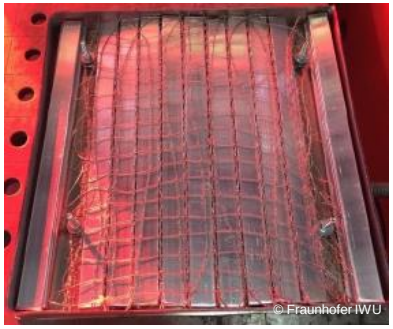


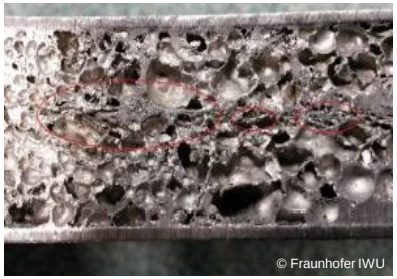
Erprobung – Energieabsorption bewehrte Hybridverbunde

- **Experimentelle Untersuchungen (4-Punkt-Biegeversuche)**

→ 3D-Abstandsgewirk



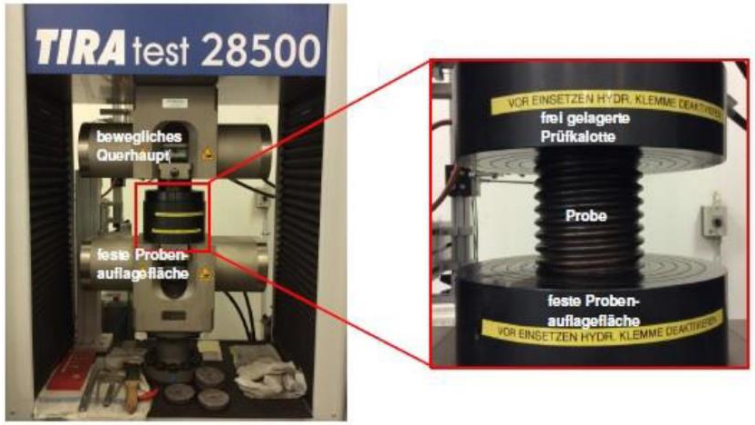




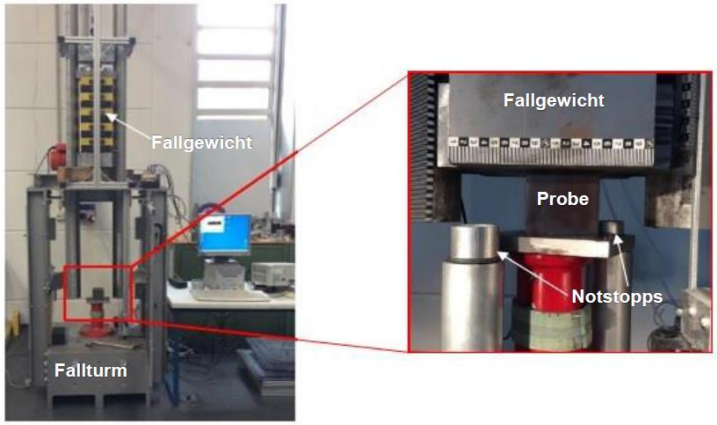
Erprobung – Energieabsorption Dämpfungselemente

- **Experimentelle Untersuchungen (Druck-/Fallturmversuche)**

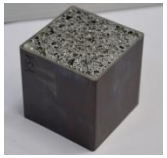
→ quasistatische Druckversuche



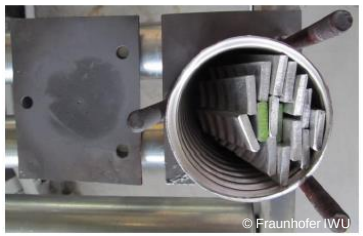
→ dynamische Fallturmversuche



→ Versuchsprogramm

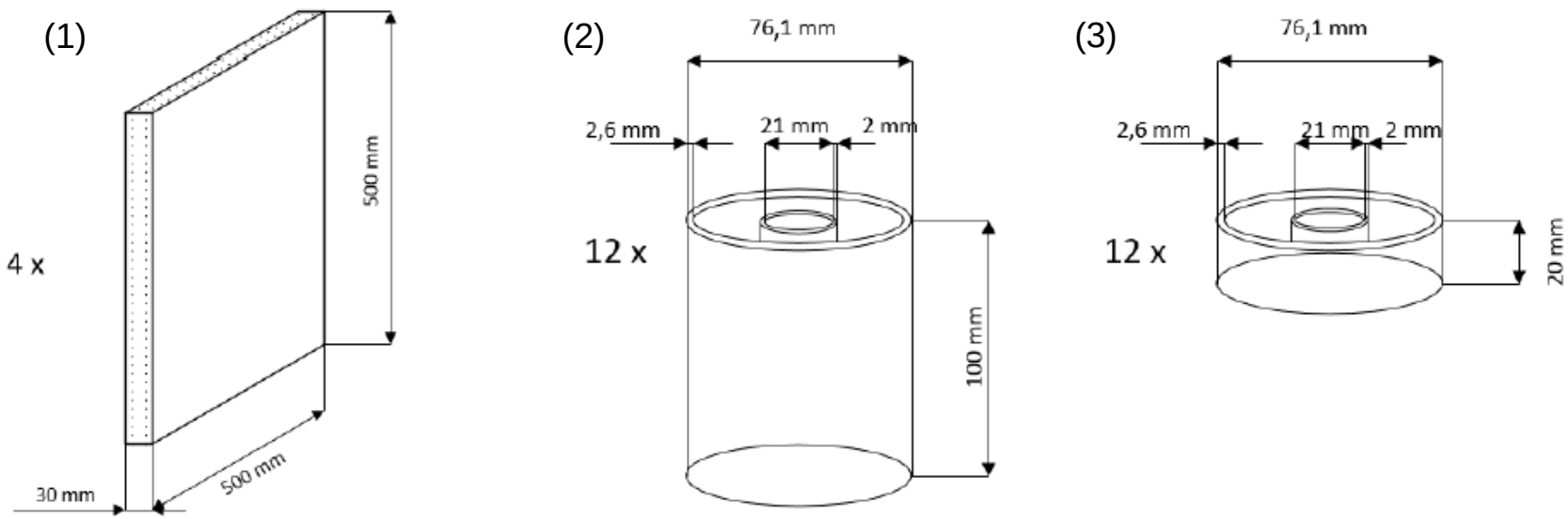


Probentyp/ Parameter	leeres Vierkantrohr	ausgeschäumtes Vierkantrohr	ausgeschäumtes Spiralwellrohr
Probenquerschnitt [mm]	80 × 80	80 × 80	ø 80
Rohrwandstärke [mm]	2	2	1
Probenhöhe [mm]	80	80	80
Probenmasse [g]	360,0	592,2	302,0
Rohrwandmaterial	1.4301	1.4301	1.4301
Aluminiumschaum	--	AlMg1Si0,5	AlMg1Si0,5



- **Demonstrator – Vorgehängte hinterlüftete Fassade**

→ Konstruktionsprinzip des Demonstrators



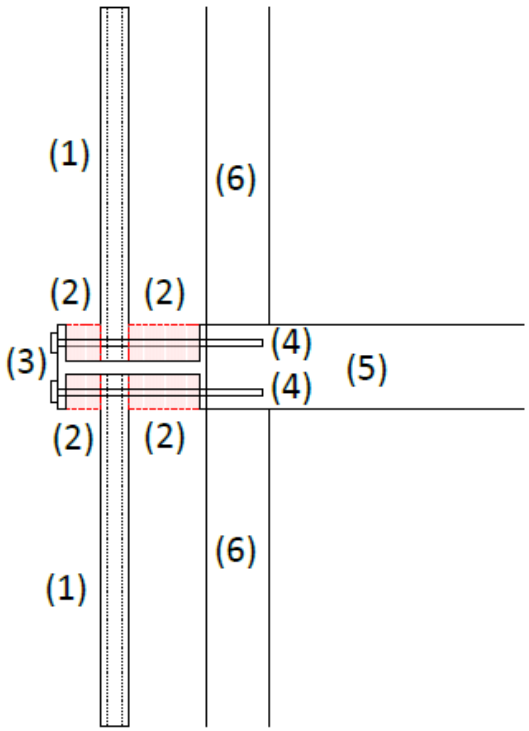
(1) Stahl-Aluminiumschaum-Sandwichplatte mit innenliegender 3D-Gewebe-Abstandsbewehrung

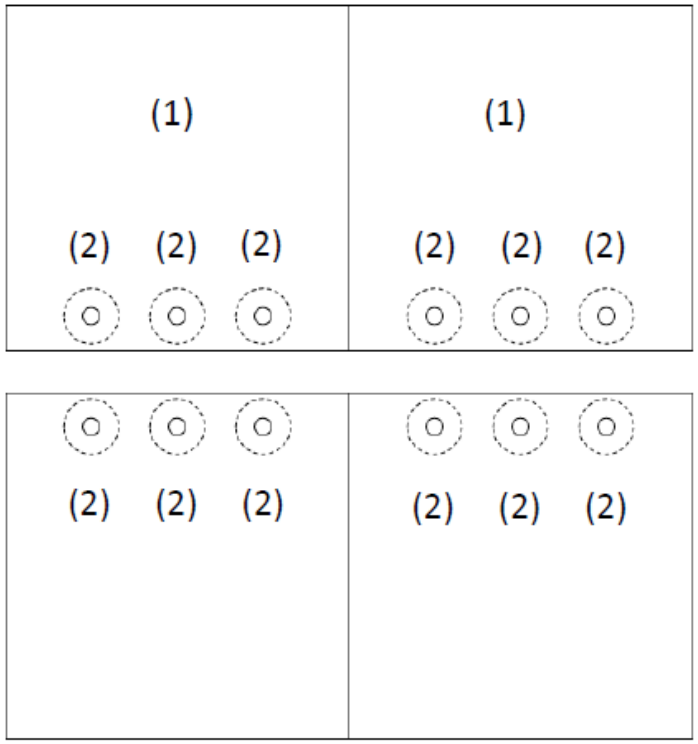
(2) Stahl-Aluminiumschaum-Dämpfungselemente zur Reduzierung der explosiven Druckbelastung

(3) Stahl-Aluminiumschaum-Dämpfungselemente zur Reduzierung der explosiven Sogbelastung

- **Demonstrator – Vorgehängte hinterlüftete Fassade**

→ Konstruktionsprinzip des Demonstrators





(1) SAS-Platte mit Bewehrung

(2) Dämpfungselemente

(3) Gebäudeanbindung

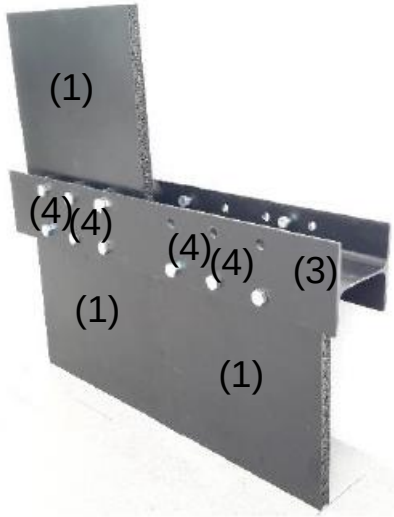
(4) Verankerung

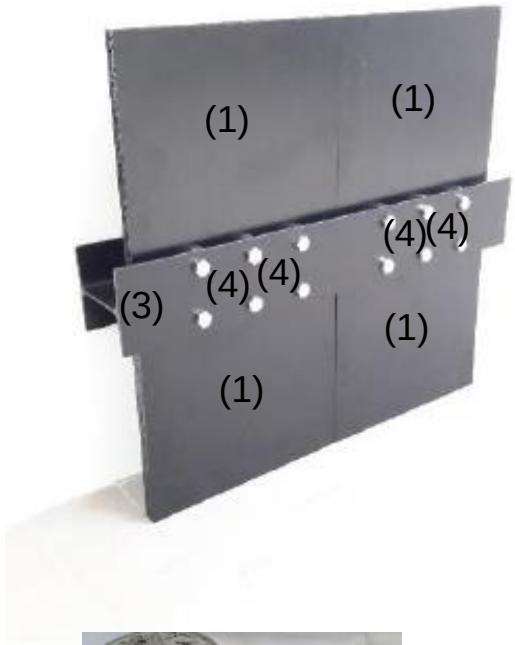
(5) Deckenelement

(6) Wandelement

- **Demonstrator – Vorgehängte hinterlüftete Fassade**

→ Fertiger Demonstrator



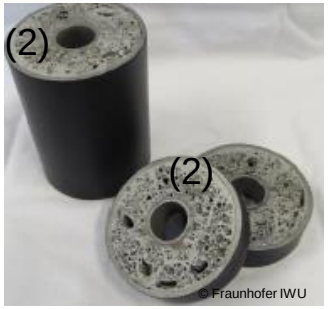


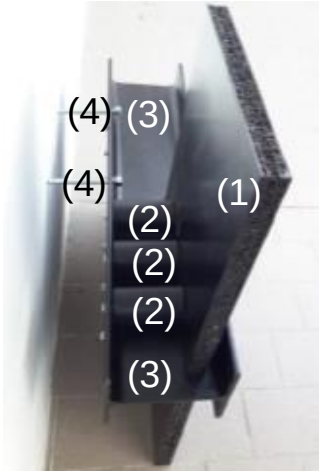
(1) SAS-Platte mit Bewehrung

(2) Dämpfungselemente

(3) Gebäudeanbindung

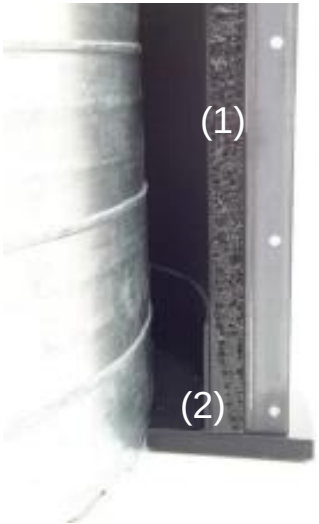
(4) Verankerung





- **Demonstrator – Vorgehängte hinterlüftete Fassade**

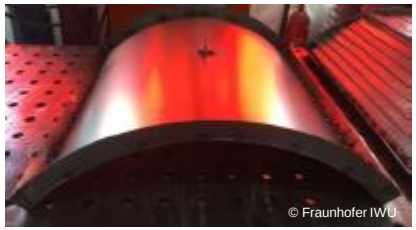
→ Fertiger Demonstrator

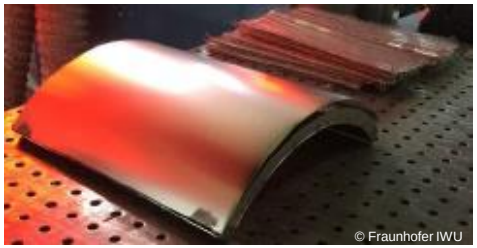


(1) SAS-Platten mit Bewehrung

(2) Gebäudeanbindung

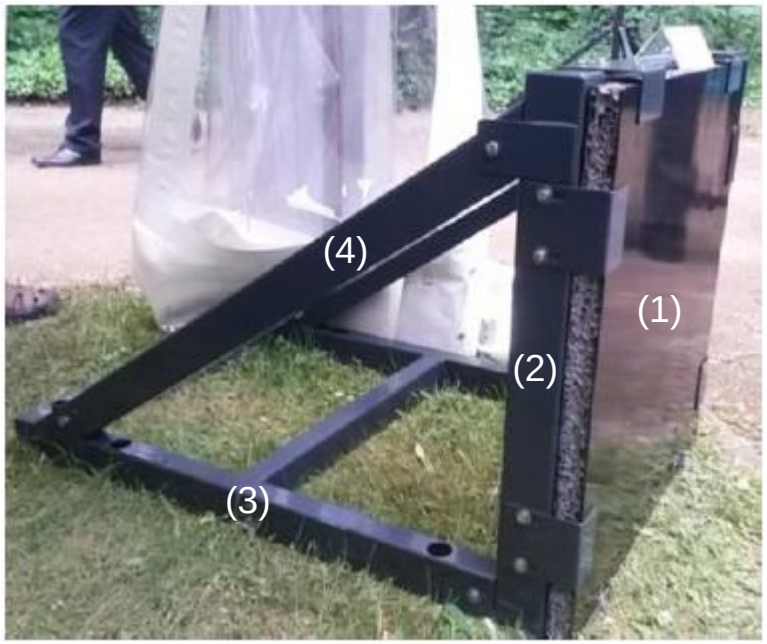
→ Herstellung





- **Demonstrator – Vorgehängte hinterlüftete Fassade**

→ Fertiger Demonstrator



(1) SAS-Platte mit Bewehrung

(2) Tragrahmen

(3) Bodenrahmen

(4) Versteifung

2. Einsatz leichter Explosionsschutzlösungen für die Delaborierung von Sprengstoffen

Motivation

- 1 600 000 t Munition in Nord- und Ostseegewässern
- Langfristig ist eine Freisetzung nahezu aller Kampfstoffe zu erwarten
- Makro- und Meiofauna in geringerer Zahl und mit weniger Taxa in Versenkungsgebiete
- Geringe Sauerstoffkonzentration um Versenkungsgebiete reduziert aktuell die Exposition von Organismen mit Chemischen Kampfstoffen
  - Erste Effekte können auf Organe, Gewebe, Zellen und subzellular nachgewiesen werden
- Akut ist keine Gefährdung von Fischen anzunehmen, aber potenzielle Chronische und indirekte Folgen für das Ökosystem sind nicht abzuschätzen
- Von 179 Sedimentproben enthielten 57 eine oder mehrere Chemikalien die in Chemischen Kampfstoffen enthalten sind.
- Ansätze zur Identifikation von Munition sind vorhanden, Motivation zur Umsetzung ist aber gering.

Motivation

- **Hohes Gefährdungspotential für den Menschen durch direkten Kontakt**

– Vielzahl an Munitionsfunden durch Fischer
  - Fangen der Munition in Schleppnetzen
  - Freisetzen der Chemischen Kampfstoffe an der Oberfläche
  - Gefährdung der Besatzung, verschiedene Fälle mit schweren Verletzungen der Besatzung
  - Häufig werden Chemische Kampfstoffe nicht rechtzeitig erkannt
    - Besatzung der *WŁA 206* entsorgten Senfgas in einem Abfallcontainer des Hafens, Besatzung erlitt schwere Hautverletzungen, Todesfälle wurden nur durch die geringe Außentemperatur verhindert, welche die Evaporation des Senfgas verlangsamte.
    - Besatzung der *Hildarstindür* erkannte ein eingefangenes Objekt nicht als Senfgas, das Senfgas breitete sich auf dem Schiff und in den Kabinen aus. Die Besatzung erlitt schwere Verletzungen.

- **Hohes Gefährdungspotential für den Menschen im Rahmen von Bauprojekten**
  - Nordstream durch mit Munition belastete Gebiete
  - Weitere Bauprojekte wie Offshore Windkraftanlagen

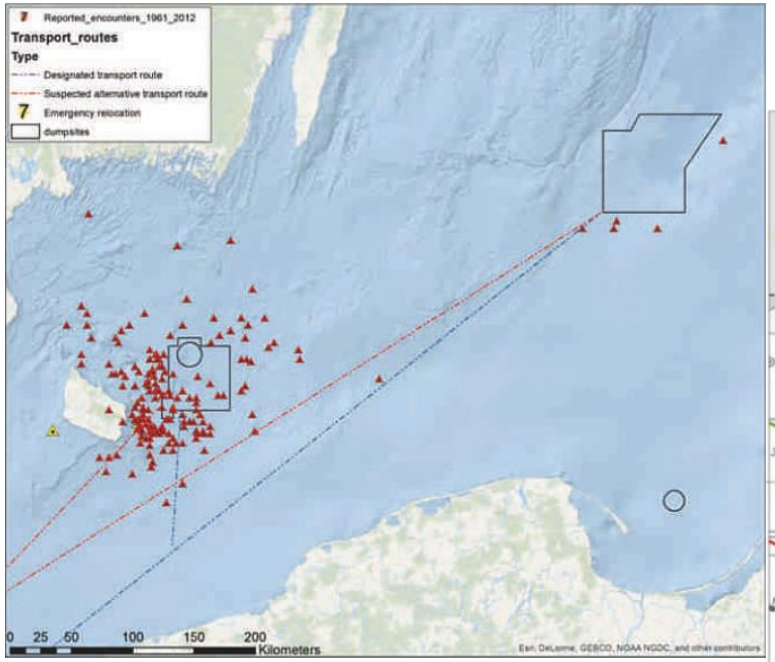
Aktuelle Situation

- **Nicht alle mit Kampfmitteln belasteten Flächen sind bekannt**
  - Lückenhafte Dokumentation
  - Fehlende Aufarbeitung historischer Berichte
  - Entsorgung entlang der offiziellen und alternativen Routen
  - Strömungsbedingtes Abtreiben
    - Erste chemische Waffen in Holzkisten entsorgt
  - Ungenau Navigation und schlechte Markierung der Versenkungsgebiete
  - Inoffizielle Berichte gehen von Versenkung von Munition durch DDR und UdSSR aus zu denen keine Daten vorhanden sind

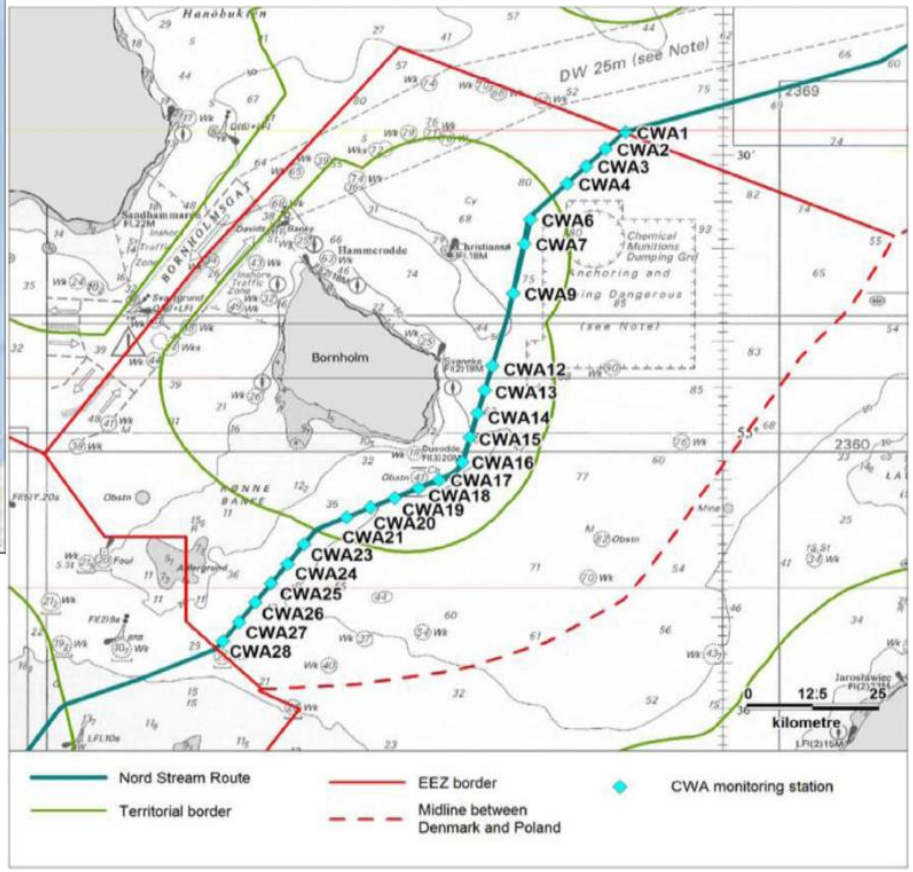
Offizielle und inoffizielle Versenkungsgebiete.
Offizielle Transportwege als Punktlinie.
[Bełdowski et al. 2014]

Aktuelle Situation

- **Probleme bei Bauprojekten der Energieversorgung**



Kontakte mit Chemischen Kampfstoffen oder Munitionsteilen um Bornholm von 1961 bis 2021 [Helcom]



Nord Stream Route [Sanderson et al. 2012]

Aktuelle Situation

- **Little Belt**

Allgemein:

- Tiefe: 25-31 m
- Teilweise mit Sediment bis zu einer Dicke von 8m bedeckt
- Fläche: 4180 ha

Menge:

- 5 000 t einzelne Munition
- 1 250 t auf zwei Schiffen bereits geborgen

Chemische Kampfstoffe:

- Tabun
- Senfgas
- Phosgen wurde als möglicher Kampfstoff genannt, wird jedoch angezweifelt

Weiteres:

- Bis zu 1 200 auf dem Weg von Flensburg versenkt
- Gemischt mit anderen Munitionstypen wie Artilleriegrananten

Bergung von 10,5cm Tabungranaten von einem der versenkten Schiffe [Knobloch et al. 2013]

Aktuelle Situation

- **Gotland Basin**

Allgemein:

- Tiefe: 93-137 m
- Lehmiges Sediment bis zu 6m dick
- Fläche: 141 610 ha

Menge:

- 2 000 t einzelne Munition

Chemische Kampfstoffe

- Senfgas
- Arsinöl
- Adamsit
- α-chloroacetophenone
- Tabun

Weiteres:

- Versenkung zusammen mit konventioneller Munition und Seeminen
- Versenkung von Chemieabfällen

An die Oberfläche kommende Ankertaumienen [Landesportal Schleswig-Holstein]

Aktuelle Situation

- **Bornholm Basin**

Allgemein:

- Tiefe: 93-137 m
- Lehmiges Sediment bis zu 6m dick
- Fläche: 67 260 ha

Menge:

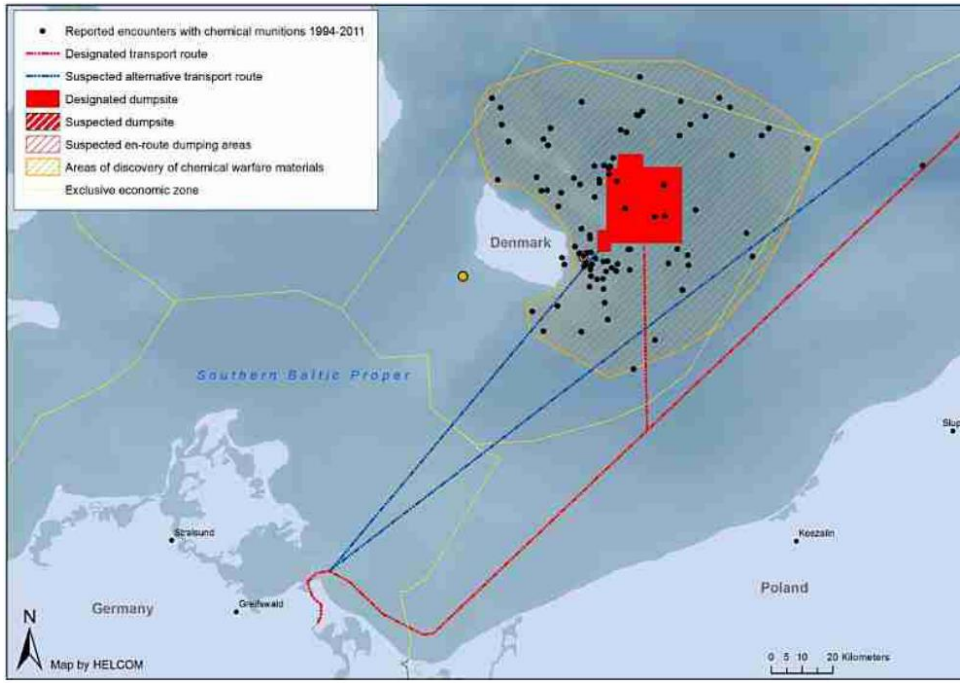
- 32 000 t einzelne Munition (Soviet)
- 30 t einzelne Munition (DDR)
- 30 t auf Schiff versenkt (DDR)

Chemische Kampfstoffe

- Senfgas
- Arsinöl
- Adamsit
- α-chloroacetophenone
- Phosgen
- Lewisite
- Tabun

Weiteres:

- Versenkung zusammen mit konventioneller Munition
- Versenkung von Chemieabfällen



Versenkungszone (rot), Bereiche mit Munitionsfunden (gelb), Kontakte mit Munition (schwarz), offizielle Transportrouten (rot) und vermutete Transportrouten (blau) des Bornholm Basin [Knobloch et al. 2013]

Aktuelle Situation

- **Art der Munition**

- Sehr große Vielfalt an Munition
  - Chemische Waffen
    - Mit Sprengkörpern
    - In Fässern
  - Bomben
  - Minen
    - Im 2 WK bis etwa 1 t Schießwolle
  - Kleinere Sprengkörper
    - Wurfgranaten
    - Artillerie Treibladung
    - Spreng-Brand-Granaten

Chemische Waffen und Fässer mit Senfgas geladen auf einem Schiff zur Versenkung [Helcom]

Wurfgranate (links) [Kampfmittelräumdienst Schleswig-Holstein] 4 cm Spreng-Brand-Granaten (rechts) [Feuerwehr Hamburg]

KC250 Fliegerbombe [Bornholm Marinedistrikt]

Detektion

Analyse Historischer Dokumente

- Viele Historische Dokumente bis heute nicht analysiert
- Festlegung eines Suchgebiets in dem Größere Mengen Munition erwartet werden
- Abmaße der Munition herausarbeiten die in dem Suchgebiet erwartet wird

Hydroakustische Verfahren

- Fächerecholot
- Seitensichtsonar
- Ermittlung von möglichen Objekten mit ähnlichen Abmessungen wie die erwartete Munition

Magnetometrische Verfahren

- Erkennung von Ferromagnetischen Objekten
- Rückschlüsse auf Munitionshüllen

Sichtprüfungen und Sedimentproben

- Überprüfung der mit anderen Verfahren gefundenen Objekte
- Ergibt wo Sichtprüfung möglich ist Sicherheit über das Objekt
- Sedimentproben geben Aufschluss über Kampfstoff und zustand des Behälters

Detektion

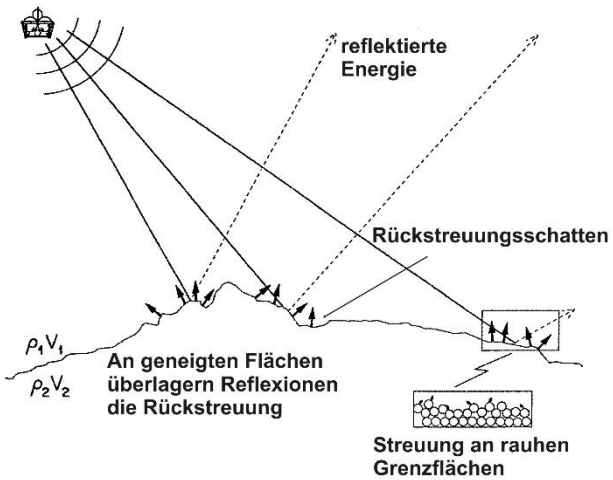
- **Hydroakustische Gefahren**

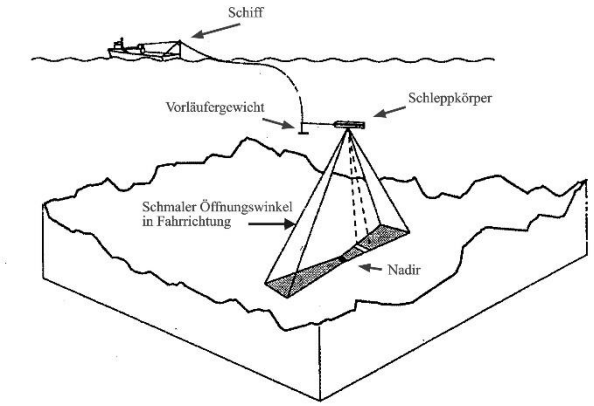
Seitensichtsonar (SSS)

- Ausführung als Schwimmer gezogen von einem Schiff
  - Untersuchung großer Flächen in vergleichsweise kurzer Zeit
  - Genauigkeit gering
- Ausführung an einem AUV
  - Weniger Zeiteffizient
  - Hohe Genauigkeit
  - Gefahr durch Wracks und Geisternetze aufgrund geringem Abstand zum Grund
- Kombination der Verfahren Sinnvoll
  - Untersuchung der Fläche auf Gefahren für das AUV durch SSS als Schwimmer
  - Suche nach Objekten durch genaueres SSS als AUV

Fächerecholot:

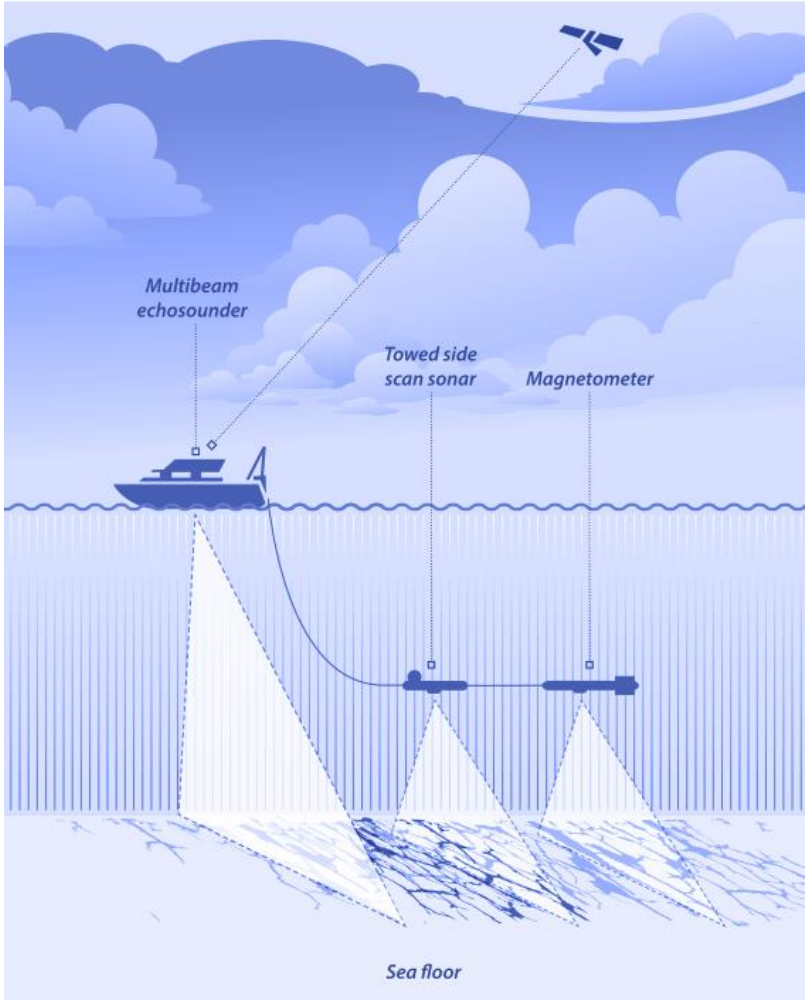
- Ähnlich zum SSS als Schwimmer



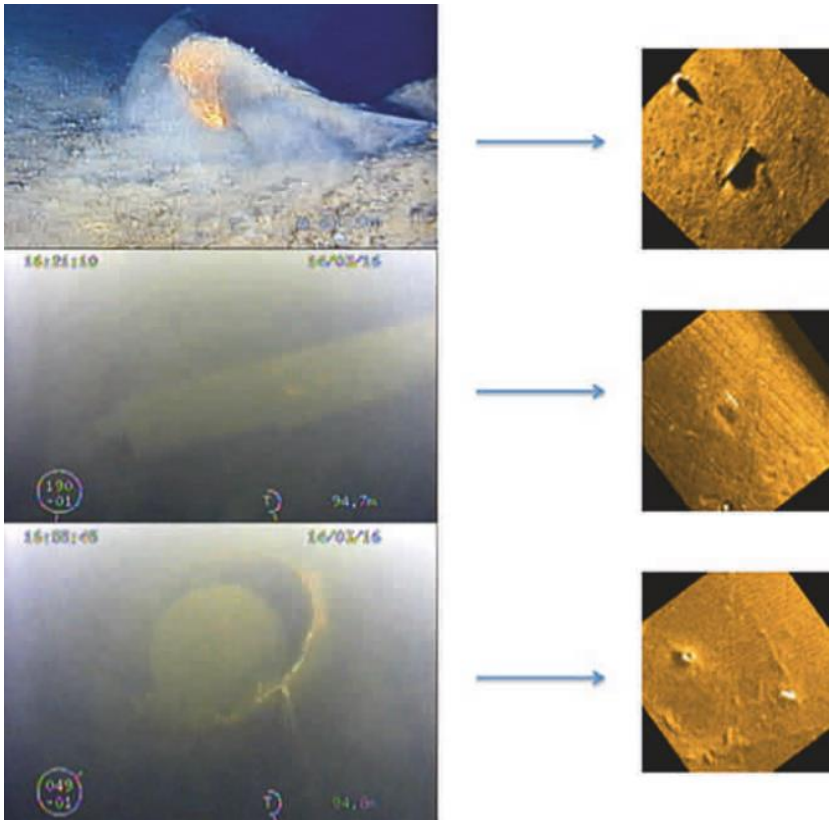


Seitensichtsonar [GEOMAR]

Detektion



Konfiguration der genutzten Technik zur Detektion von Munition im CHEMSEA Projekt [Bełdowski et al. 2014]



Objekte identifiziert durch SSS (rechts) und deren Bestätigung durch ROV (links) [Grabowski et al. 2014]

Bergung und Vernichtung

Bergung und Delaborierung über Wasser

- Große tiefen mit hohem Wasserdruck
  - Druckabfall könnte zur Detonation führen
- Munition nicht immer zum Transport geeignet
- Zustand der Munition sehr verschieden
  - Wanddicken variabel

Mögliches Vorgehen

- Bergung in Druckcontainern
  - Munition verbleibt in Meerwasser
  - Druck bleibt konstant
  - Vernichtung erfolgt zusammen mit Container
  - Munition hat zu keinem Zeitpunkt der Bergung Kontakt zur Umgebung
  - Vernichtung auf dem Festland
- Alternativ (nach KOBELCO)
  - Bergung in Containern
  - Inspektion nach Bergung (Röntgenverfahren) und Entfernung aus Bergungscontainer
  - Vernichtung auf Seeplattform
  - Problem: Druckänderung können zur Detonation führen, nicht für Bergung aus größeren Tiefen geeignet

Delaborierung am Fundort

- Vorteile:
  - Arbeit unter gleichbleibendem Druck
    - Reduktion der Detonationsgefahr
  - Transportwege werden minimal gehalten
  - Reduktion des Risikos für Menschen
- Voraussetzungen:
  - Prozess muss automatisiert oder Remotely controlled erfolgen
  - Delaborierungsanlage am Meeresgrund
- Herausforderungen
  - Delaborierung ist komplexer als Vernichtung in Sprengkammer
    - Zusätzliche Herausforderung durch Delaborierung unter Wasser, unter hohem Druck und automatisiert oder Remotely controlled
  - Nicht jede Munition ist für die Delaborierung geeignet
    - Kontrollierte Sprengung oder Vernichtung in Sprengkammern muss weiterhin erfolgen

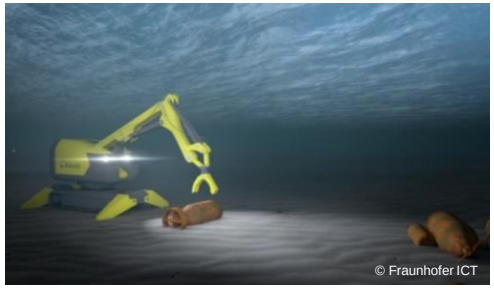
Delaborierung ist der Sprengung zu präferieren, aber Sprengung ist technisch und finanziell einfacher umzusetzen.

Projektansatz

- **Bergung und Delaborierung durch autonome Systeme mit leichtem Explosionsschutz**

Autonome Schiffe mit unbemannten Ponton und autonomen Bergungsfahrzeugen

Bergung von Sprengstoffen durch autonome Bergungsfahrzeuge

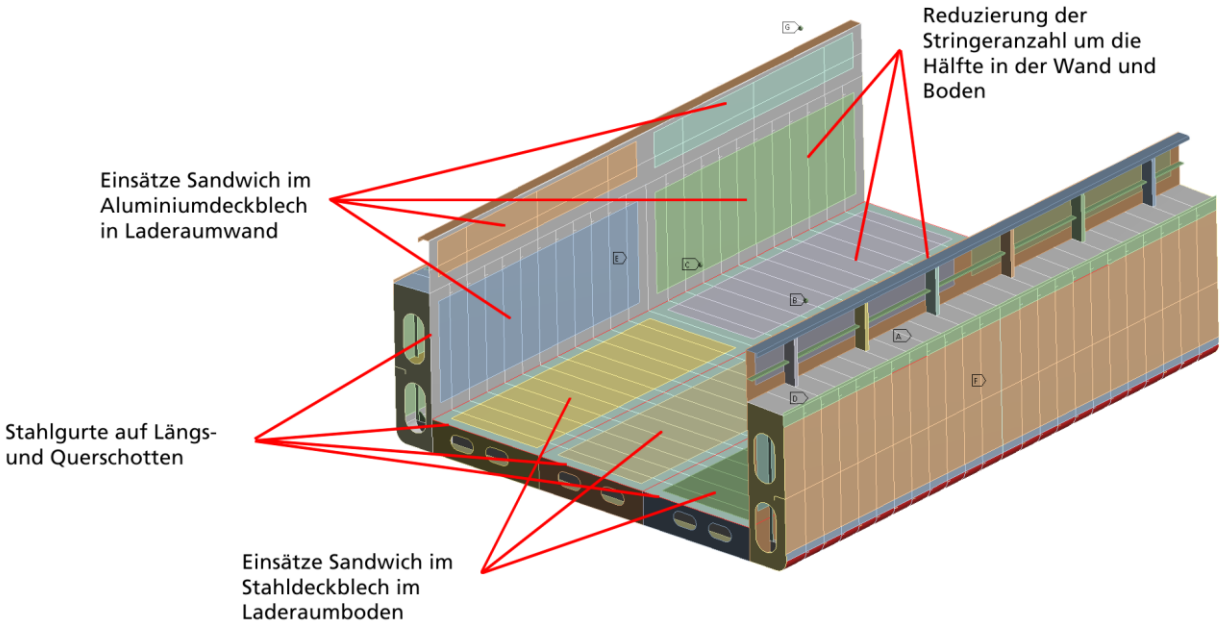


autonomen Bergungsfahrzeug und Delaborierungs-Container

Projektansatz

- **Einsatz von bewehrten Aluminiumschaumsandwiches**

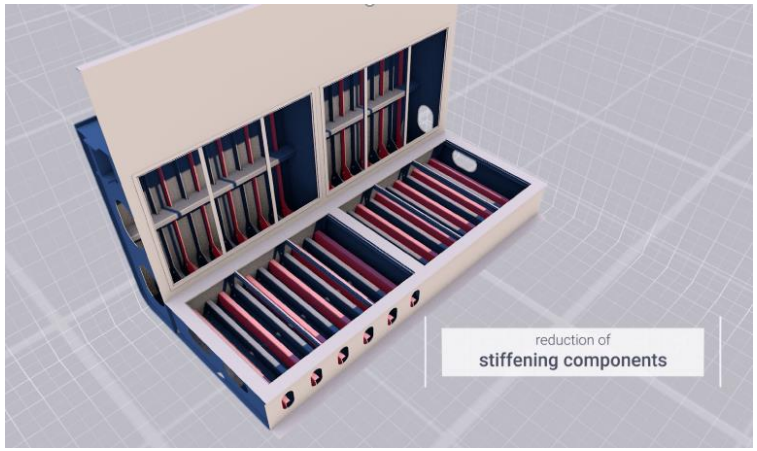
Gewichtsreduzierte Hybrid-Schiffskonstruktion durch den Einsatz bewehrter Al-Schaumsandwiches

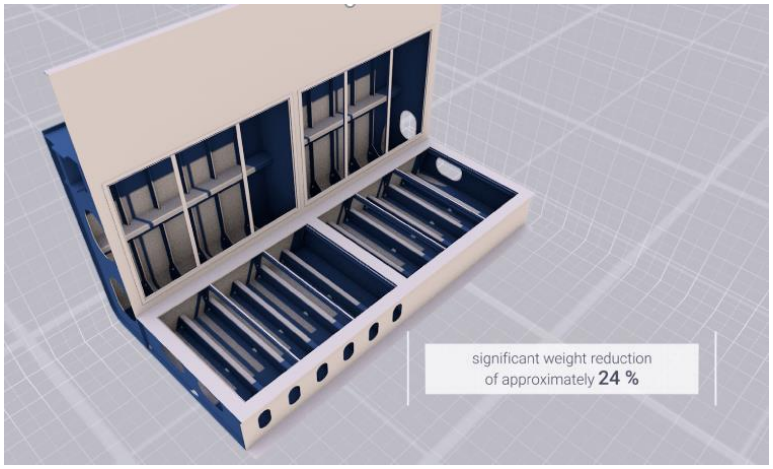


Projektansatz

- **Einsatz von bewehrten Aluminiumschaumsandwiches**

Gewichtsreduzierte Hybrid-Schiffskonstruktion durch den Einsatz bewehrter Al-Schaumsandwiches

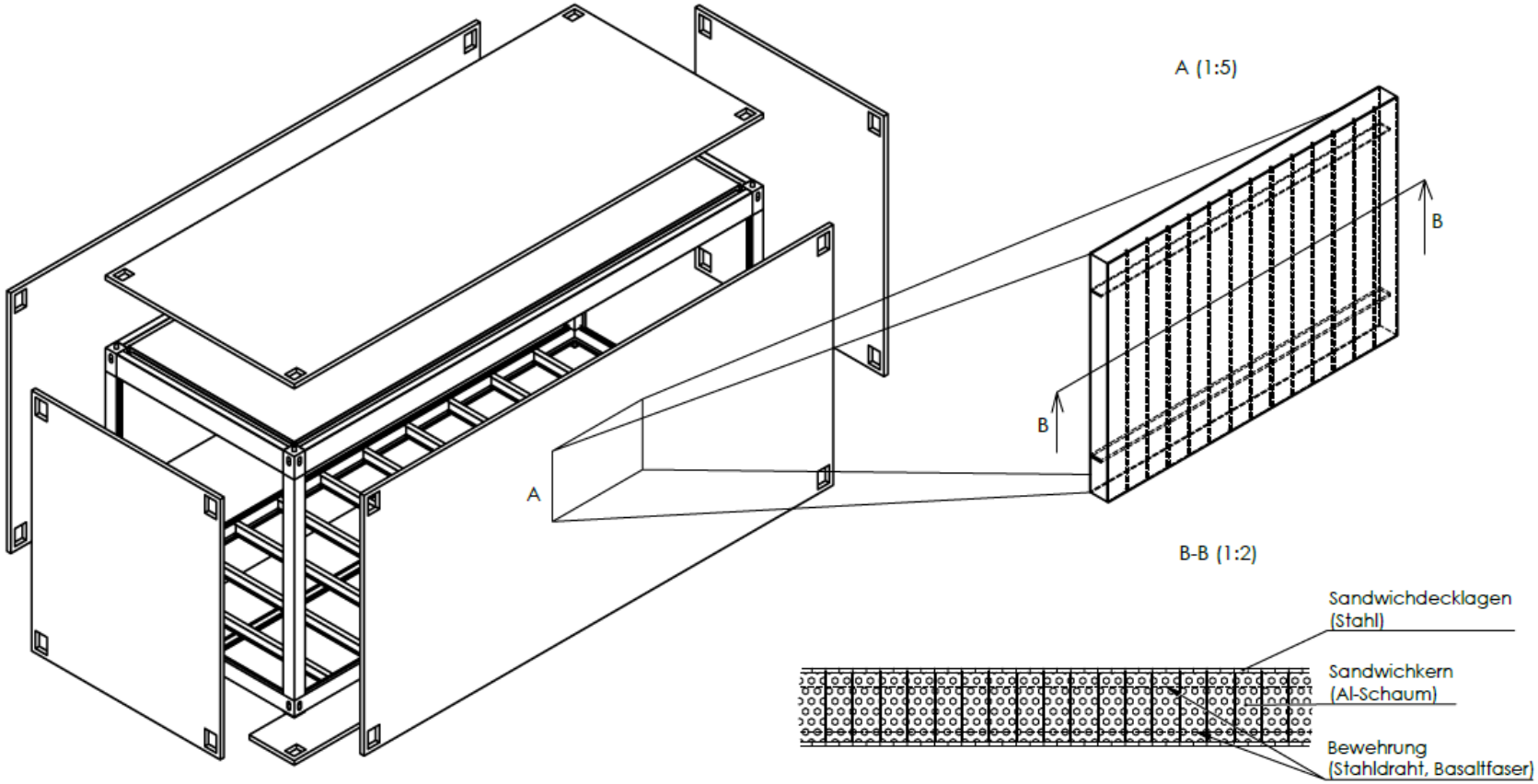




Projektansatz

- **Einsatz von bewehrten Aluminiumschaumsandwiches**

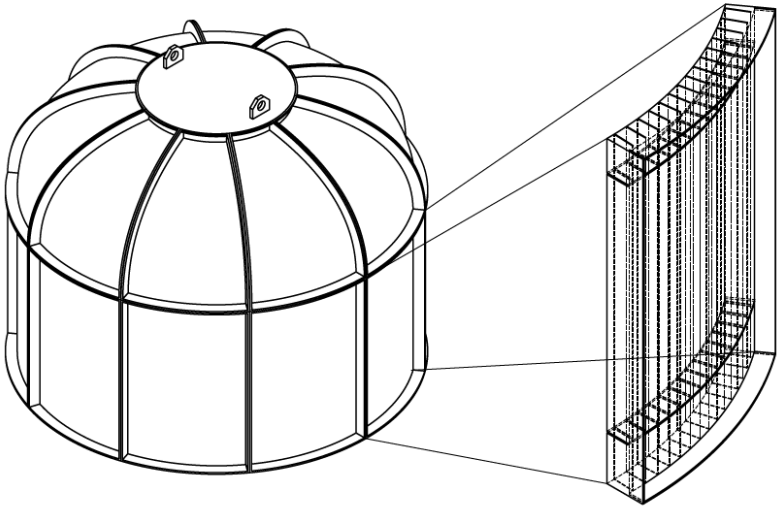
Delaborierungscontainer (Munitionstransportcontainer)

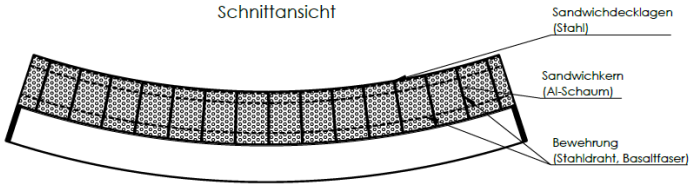


Projektansatz

- **Einsatz von bewehrten Aluminiumschaumsandwiches**

Unterwasser-Delaborierungs-/Sprengvorrichtung (Munitionstransportcontainer)





Zusammenfassung

- Hoher Bedarf und weitreichende Anwendungsgebiete für leichte Explosionsschutzlösungen

- Erfolgreiche funktionale und technologische Entwicklung von Hybridverbunden mit duktilem Aluminiumschaumkern und eingeschäumten metallischen Drahtbewehrungen (2D- und 3D-Strukturen)

- Nachweis des erhöhten Energieabsorptionsvermögens der entwickelten Hybridverbunde gegenüber konventionellen Stahl-Aluminiumschaum-Sandwichverbunden

- Fertigung funktionaler Demonstratoren für die Anwendungsfälle (Fassaden-, Stützen-, mobiler Explosionsschutz) mittels der entwickelten Hybridverbunde

- Weiterentwicklung und Einsatz in maritimen Anwendungsbereichen, wie der Delaborierung von Sprengstoffen

Institut für Strukturleichtbau und Energieeffizienz gGmbH
Limbacher Straße 56
09113 Chemnitz
www.institut-se.de

Dipl.-Ing. Gregor Kaufmann
Geschäftsführer

E-Mail: g.kaufmann@institut-se.de
Tel: (+49) 371 33 800 0

Dipl.-Wirtsch.-Ing. Stefan Krause
Leiter Projektmanagement

E-Mail: s.krause@institut-se.de
Tel: (+49) 371 33 800 15