

## „Anwendungsgerechte leichte Explosionsschutzlösungen für die Absorption kurzzeitdynamischer Belastungen“

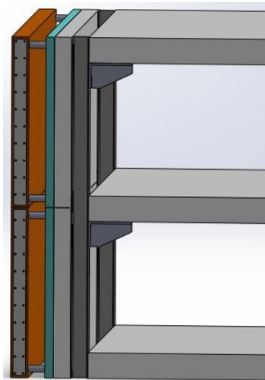
---



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

- **Weltweit zunehmende Gefährdungslage**

Madrid 03.04.2004



London 07.07.2005



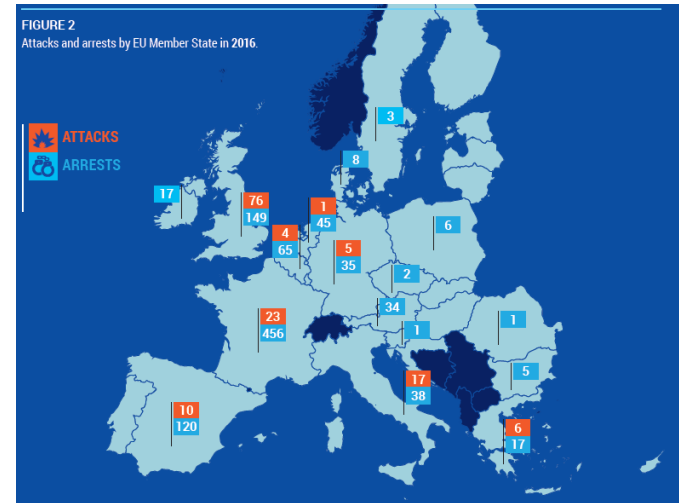
Oslo 22.07.2011



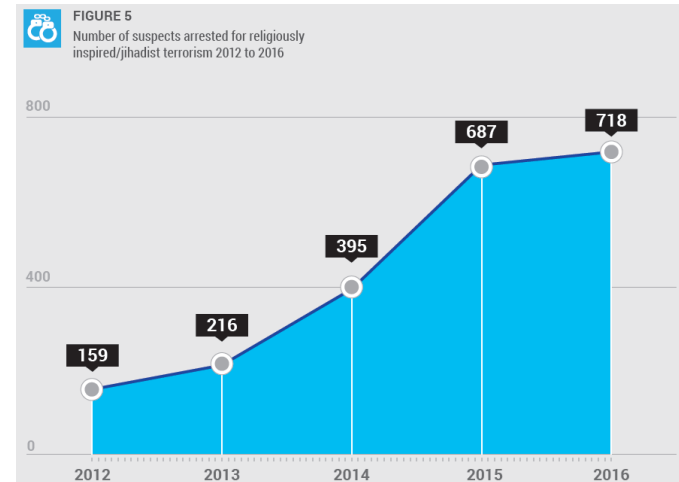
Brüssel 22.03.2016



Paris 13.11.2015

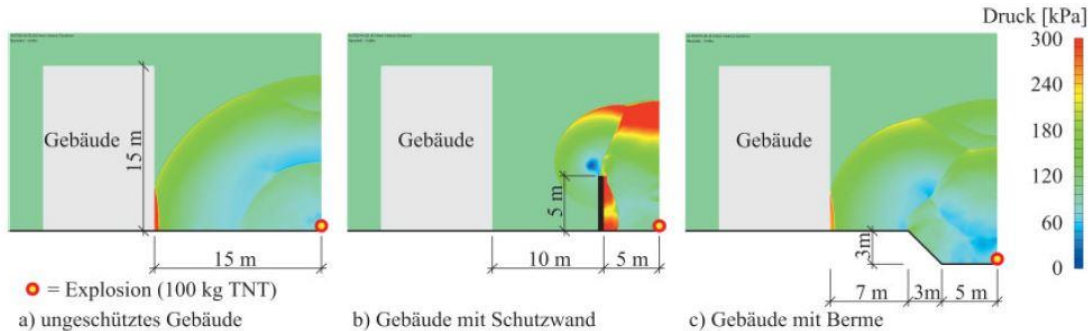


© EUROPEAN UNION TERRORISM SITUATION AND TREND REPORT



© EUROPEAN UNION TERRORISM SITUATION AND TREND REPORT

## Beispiele für konventionelle Explosionsschutzlösungen



- Ziel ist die Ablenkung oder Reduzierung der Explosionslasten

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

### → Passive Maßnahmen



- Abstand zur Explosion schaffen



### → Aktive Maßnahmen



- Aufnahme bzw. Reduzierung der Explosionslasten



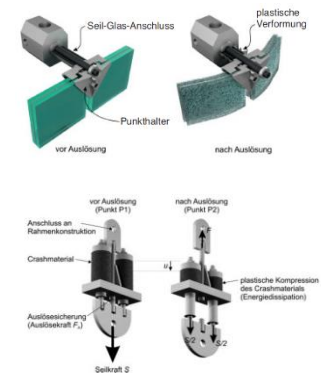
- konventioneller Explosionsschutz i.d.R. durch Masse

## ▪ Neuartige Explosionsschutzlösungen

→ Explosionsschützende Seilnetzfassade

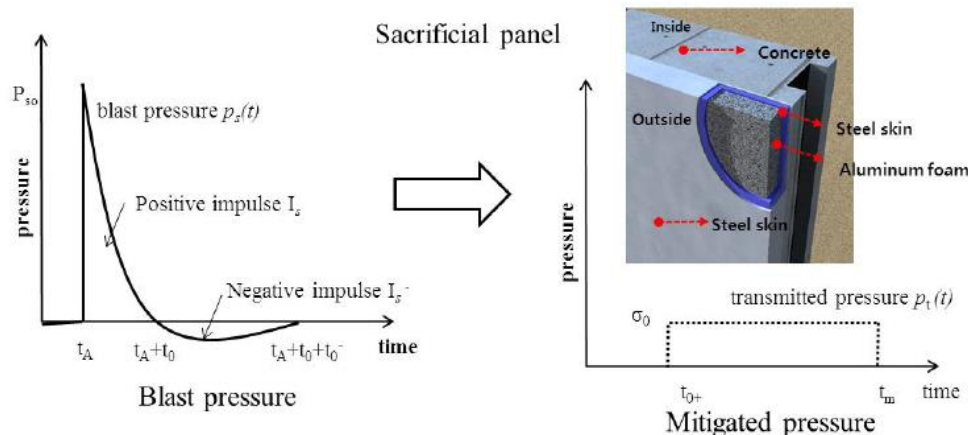


© F. Wellershoff: „Blast enhanced facades for the new World Trade Center Towers“; 2008

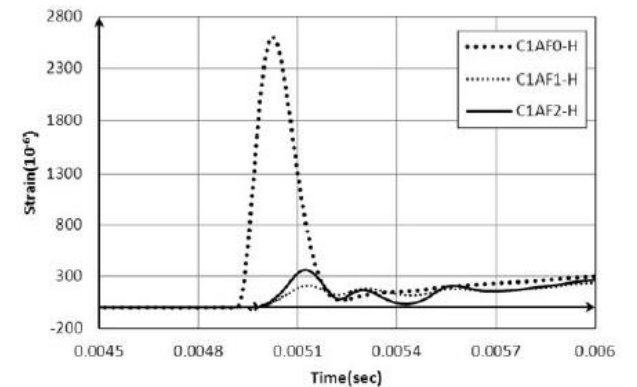


→ Explosionsschutz durch „Sacrificial Cladding“

➤ Ziel: Explosionsschutz unter Nutzung leichter energieabsorbierender Materialien



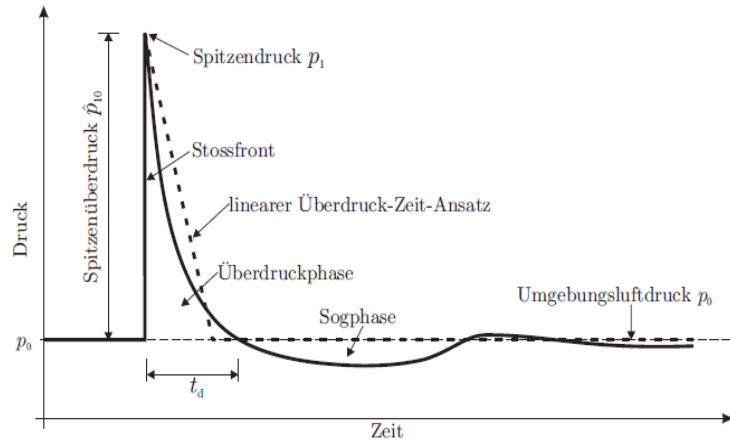
© C. Shim: „Mitigation of blast effects on protective structures by aluminum foam panels“; 2012



# Grundlagen

## ▪ Charakterisierung Explosionsbeanspruchung

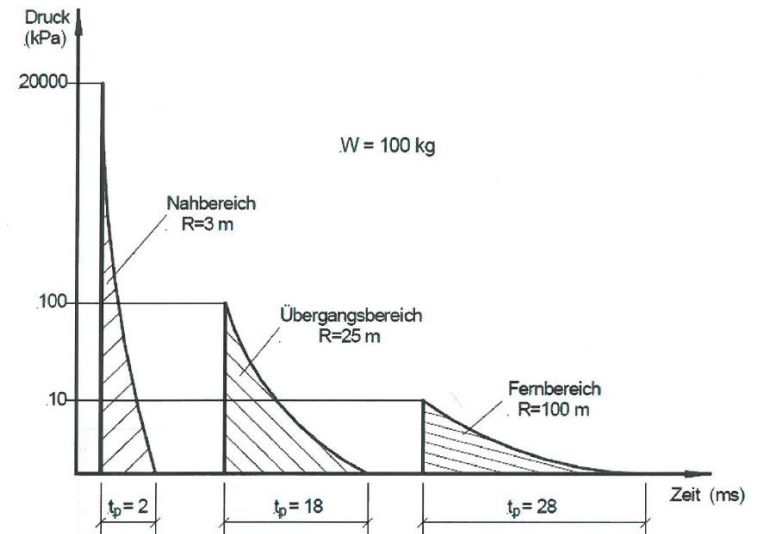
→ Druck-Zeit-Verlauf einer Explosion (Friedländer-Funktion)



→ effektive Sprengstoffmasse und Abstand zur Explosion

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


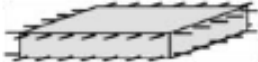

$z$  ...skalierter Abstandsparameter  
 $R$  ...Abstand vom Explosionsherd  
 $m_{eff}$  ...effektive Sprengstoffmasse TNT kg



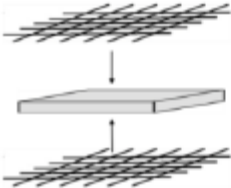
# Innovativer Ansatz

- **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

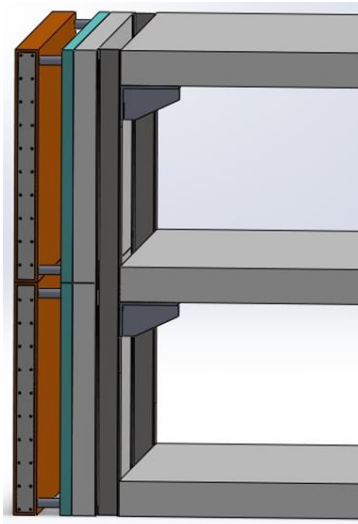


# Innovativer Ansatz

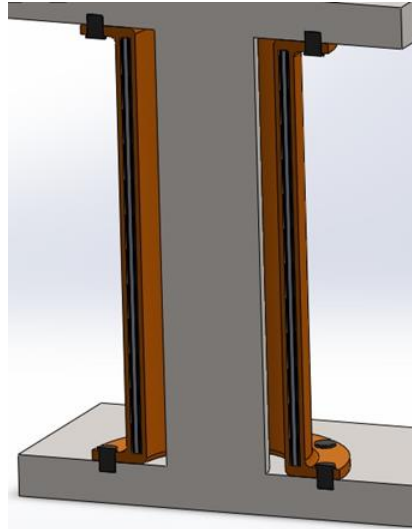
- **Erhöhte Energieabsorption durch leichte Hybridverbunde aus bewehrten und Aluminiumschaum**

→ Anwendungsfälle

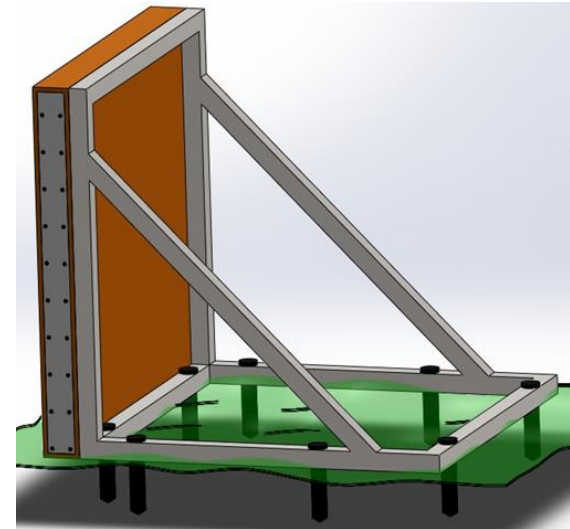
Vorgehängte hinterlüftete Fassade (VHF)



Schutzummantelung für Gebäudestützen



Temporärer Explosionsschutz



# Funktionsprinzip

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

→ Funktionaler Aufbau

## Sandwich-Fassadenelemente

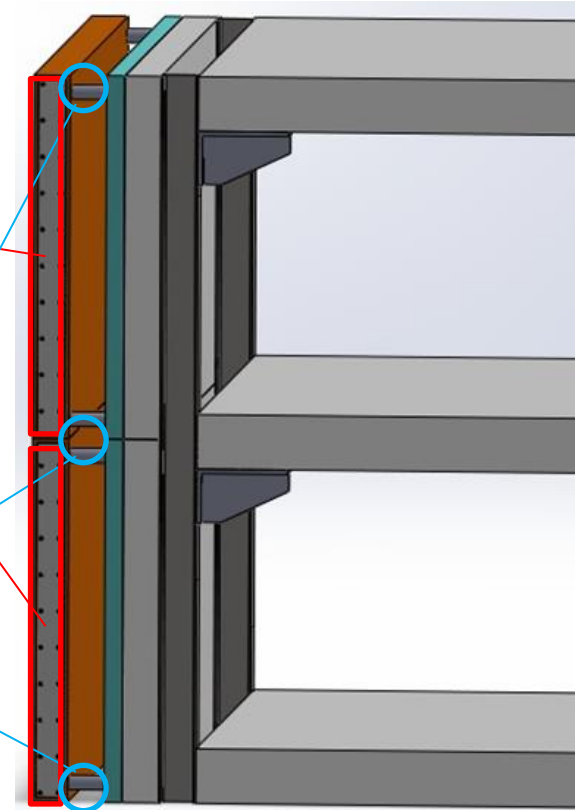


*Bewehrte Al-Schaum-Sandwichplatten mit ausreichender Biegesteifigkeit und Energieabsorptionsvermögen in adaptiver Auslegung mit den Deformationselementen*

## Deformationselemente



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



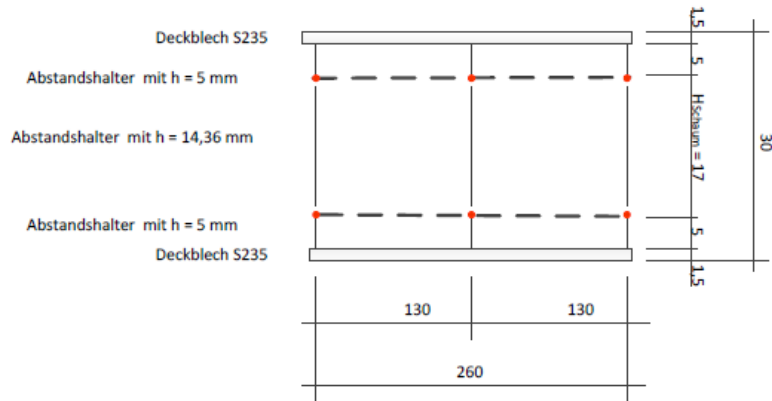
## ▪ Bewehrung

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

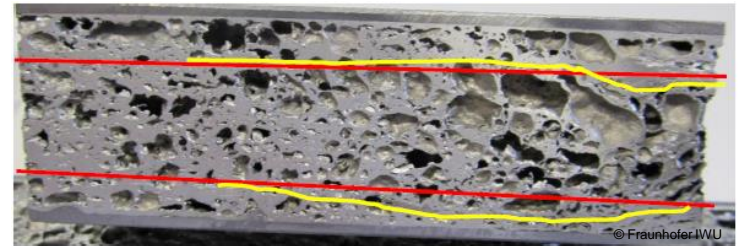
- Parameter:
- Basaltfasern
  - metallische Drahtstrukturen

→ Metallische Drahtstrukturen

➤ Durchschäumversuche zur Herstellung von Schaumkernen mit ebenen Bewehrungslagen



© Fraunhofer IWU



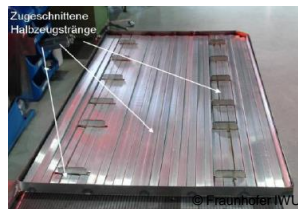
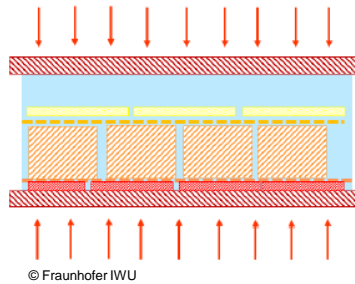
## ▪ Bewehrung

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

- Parameter:
- Basaltfasern
  - metallische Drahtstrukturen

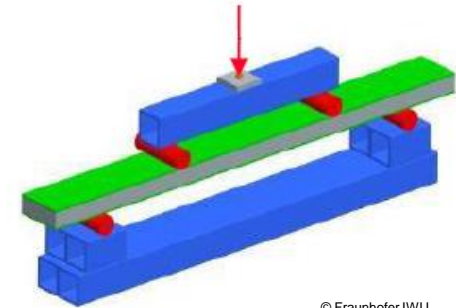
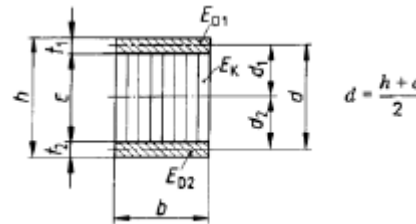
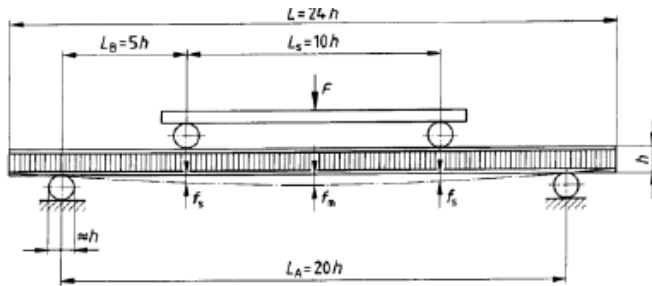
→ Metallische Drahtstrukturen

- Durchschäumversuche zur Herstellung von Schaumkernen mit 3D-Bewehrungsstruktur



## ▪ Experimentelle Untersuchungen (4-Punkt-Biegeversuche)

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



© Fraunhofer IWU

→ quasistatische Druckversuche



© Fraunhofer IWU

→ dynamische Fallturmversuche



© Fraunhofer IWU

## ▪ Experimentelle Untersuchungen (4-Punkt-Biegeversuche)

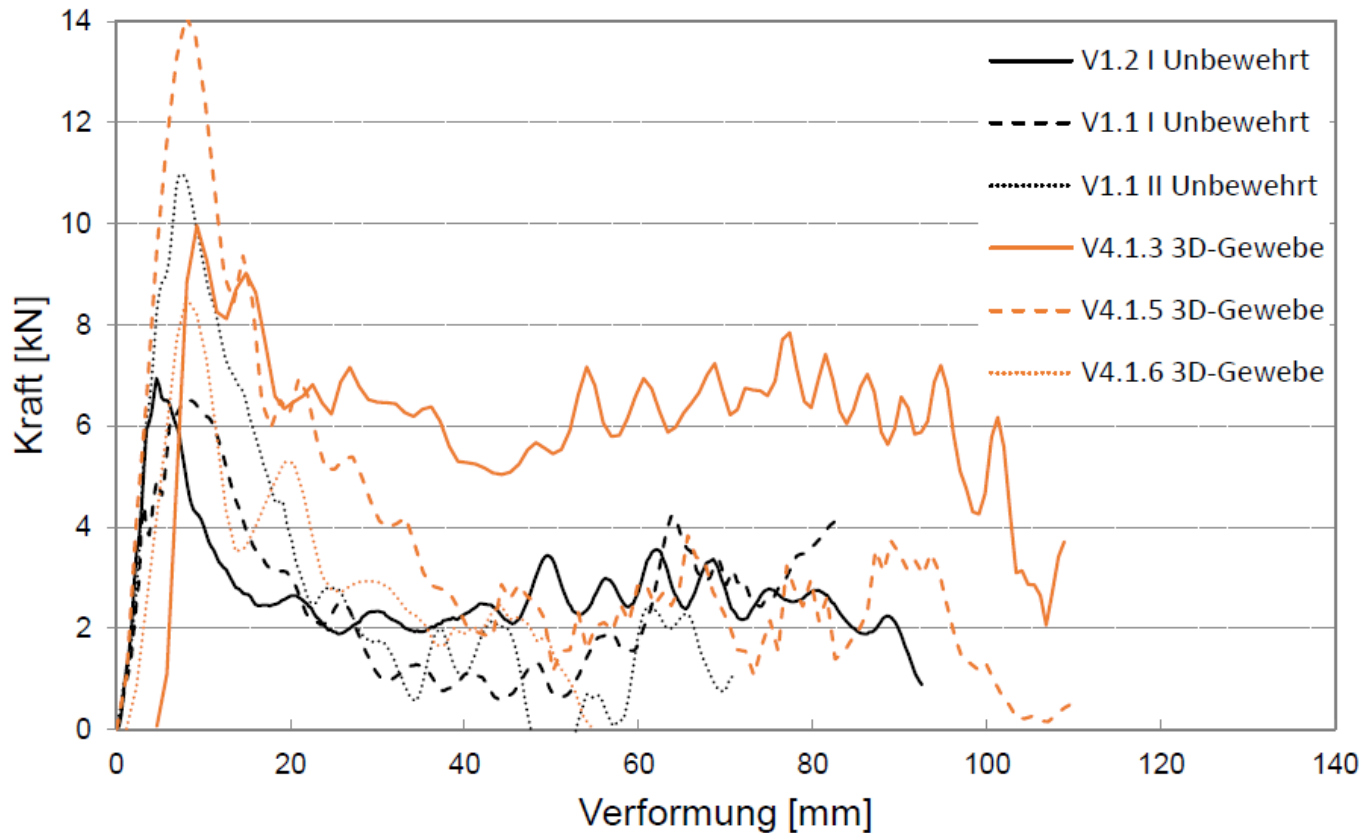
→ Versuchsprogramm

Variante	Bewehrungsmaterial	Bewehrungsstruktur	Deckblechdicke [mm]	Probenhöhe [mm]	Abmessungen [mm <sup>2</sup> ]	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 Basaltgewebe-Epoxidharz-laminat, geklebt	28	672 x 70	statisch
					672 x 70	dynamisch

© Fraunhofer IWU

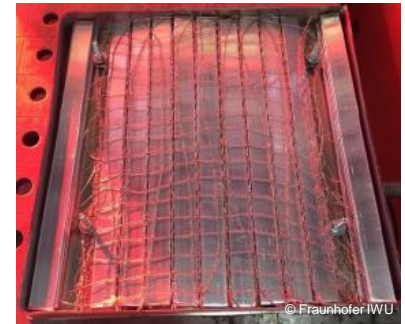
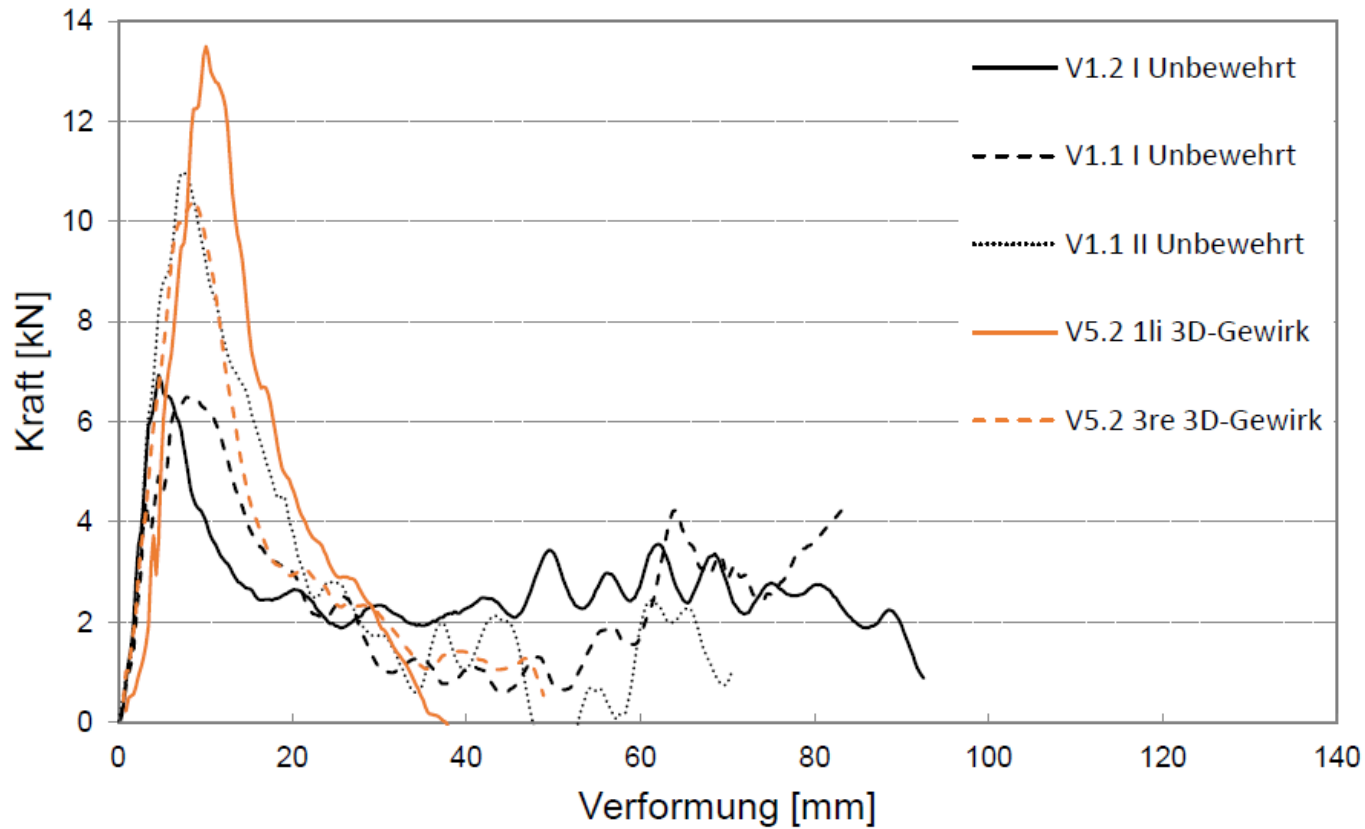
## ▪ Experimentelle Untersuchungen (4-Punkt-Biegeversuche)

→ 3D-Gewebe



## ▪ Experimentelle Untersuchungen (4-Punkt-Biegeversuche)

→ 3D-Abstandsgewirk



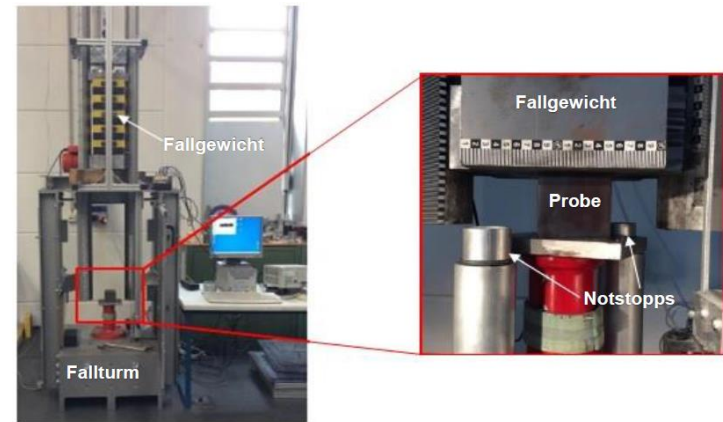


## ▪ Experimentelle Untersuchungen (Druck-/Fallturmversuche)

→ quasistatische Druckversuche



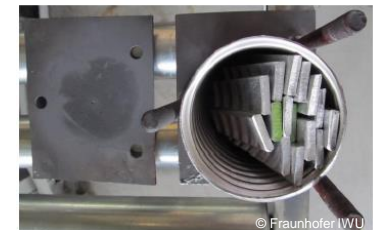
→ dynamische Fallturmversuche



→ Versuchsprogramm

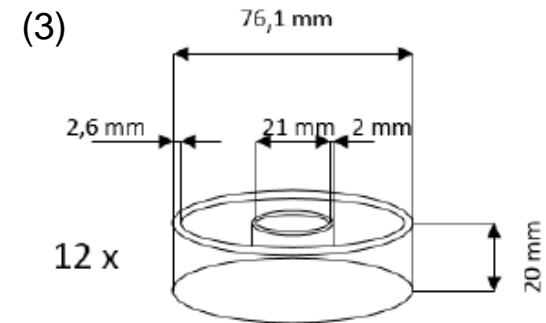
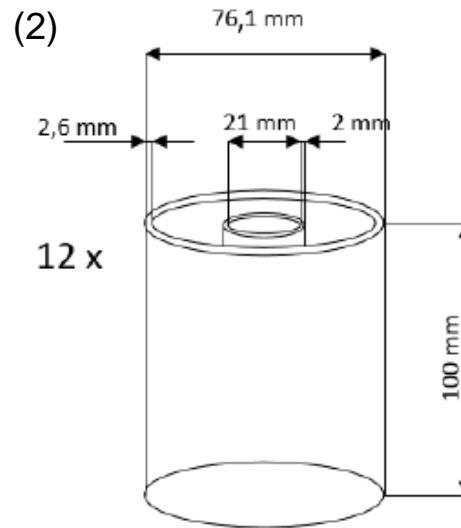
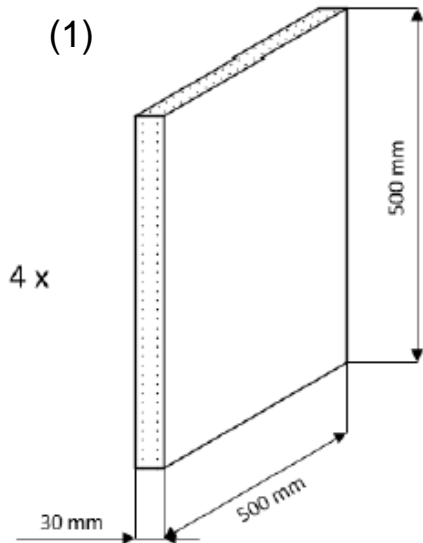


Probentyp/ Parameter	leeres Vierkantrohr	ausgeschäumtes Vierkantrohr	ausgeschäumtes Spiralwellrohr
Probenquerschnitt [mm]	80 × 80	80 × 80	Ø 80
Rohrwandstärke [mm]	2	2	1
Probenhöhe [mm]	80	80	80
Probenmasse [g]	360,0	592,2	302,0
Rohrwandmaterial	1.4301	1.4301	1.4301
Aluminiumschaum	--	AlMg1Si0,5	AlMg1Si0,5



## ▪ Demonstrator – Vorgehängte hinterlüftete Fassade

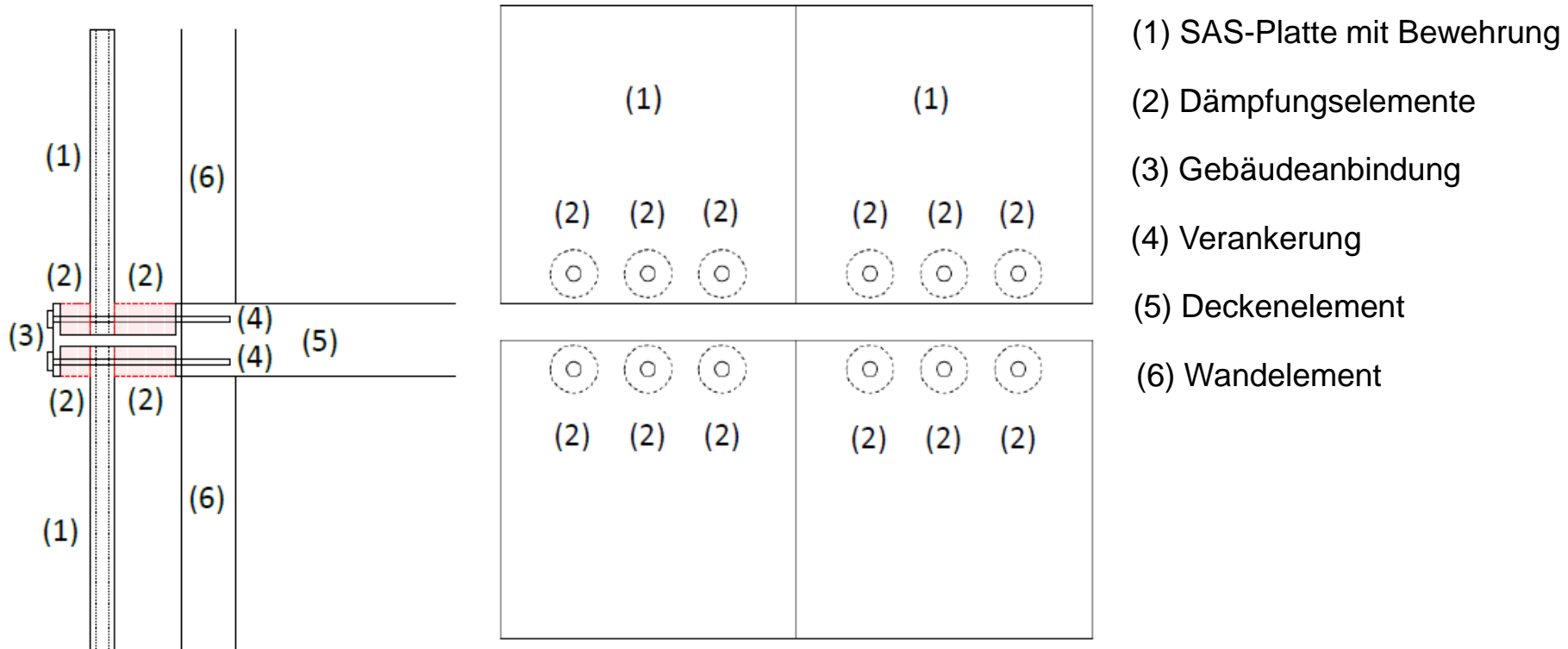
→ Konstruktionsprinzip des Demonstrators



- (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

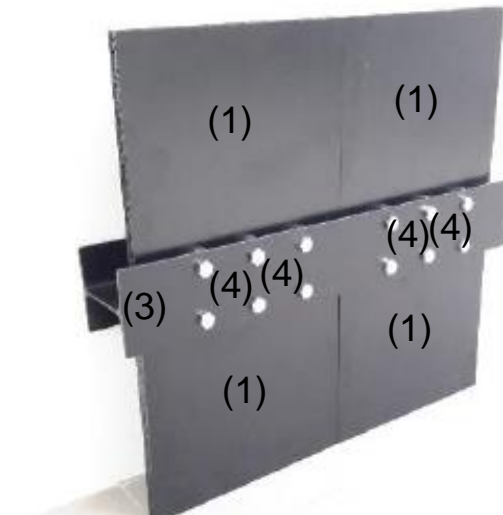
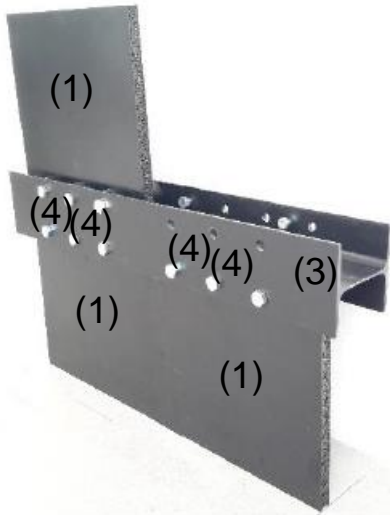
## ▪ Demonstrator – Vorgehängte hinterlüftete Fassade

→ Konstruktionsprinzip des Demonstrators

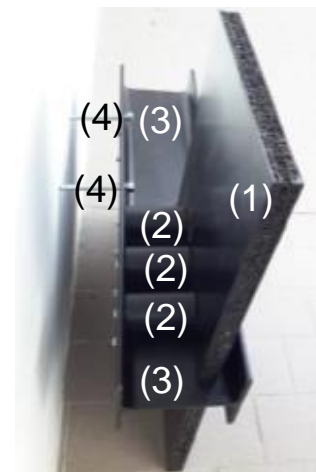


## ▪ Demonstrator – Vorgehängte hinterlüftete Fassade

→ Fertiger Demonstrator

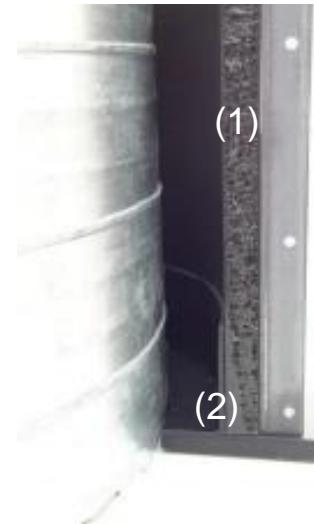


- (1) SAS-Platte mit Bewehrung
- (2) Dämpfungselemente
- (3) Gebäudeanbindung
- (4) Verankerung



## ▪ Demonstrator – Vorgehängte hinterlüftete Fassade

→ Fertiger Demonstrator



- (1) SAS-Platten mit Bewehrung
- (2) Gebäudeanbindung

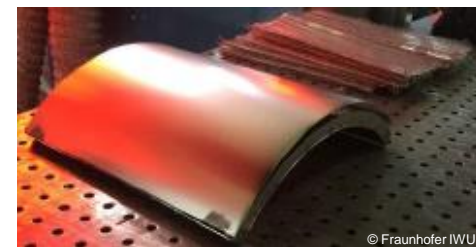
→ Herstellung



© Fraunhofer IWU



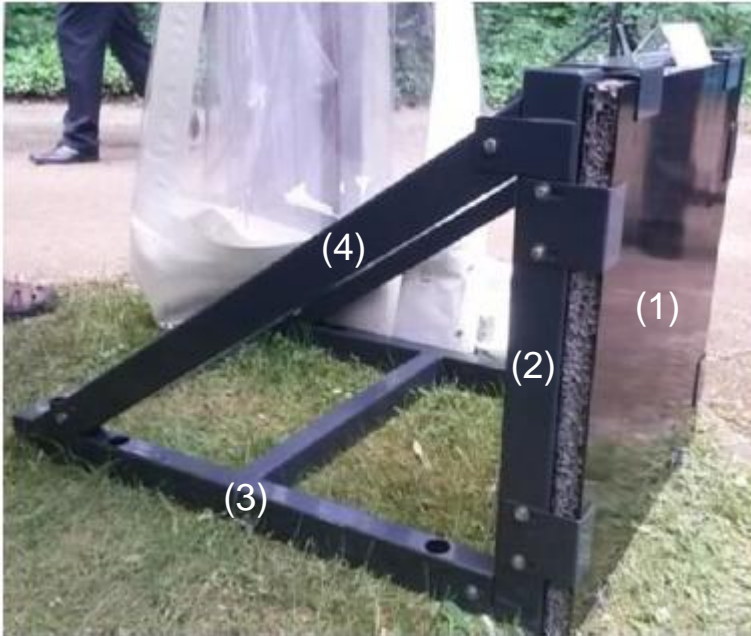
© Fraunhofer IWU



© Fraunhofer IWU

## ▪ 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

- 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 subzellulär 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.





- **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 *WLA 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

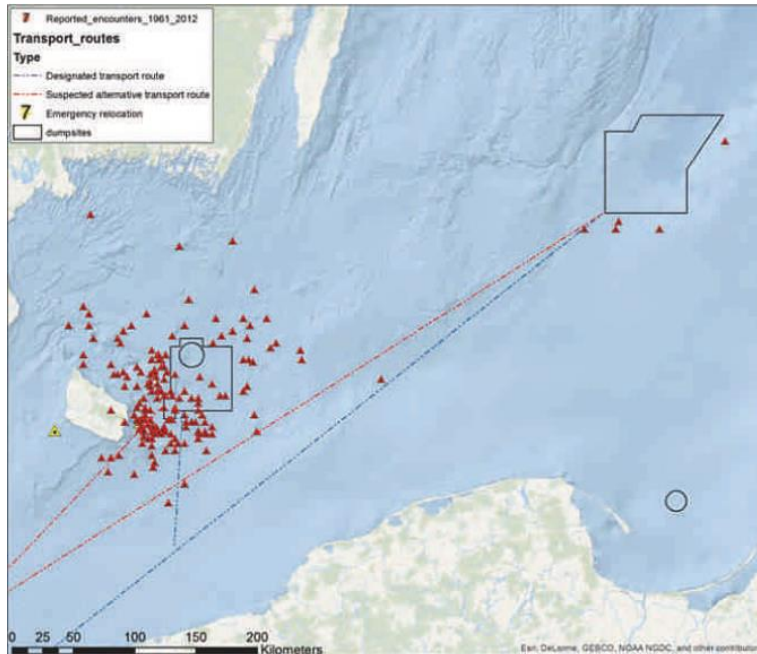
## ▪ Nicht alle mit Kampfmitteln belasteten Flächen sind bekannt

- 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

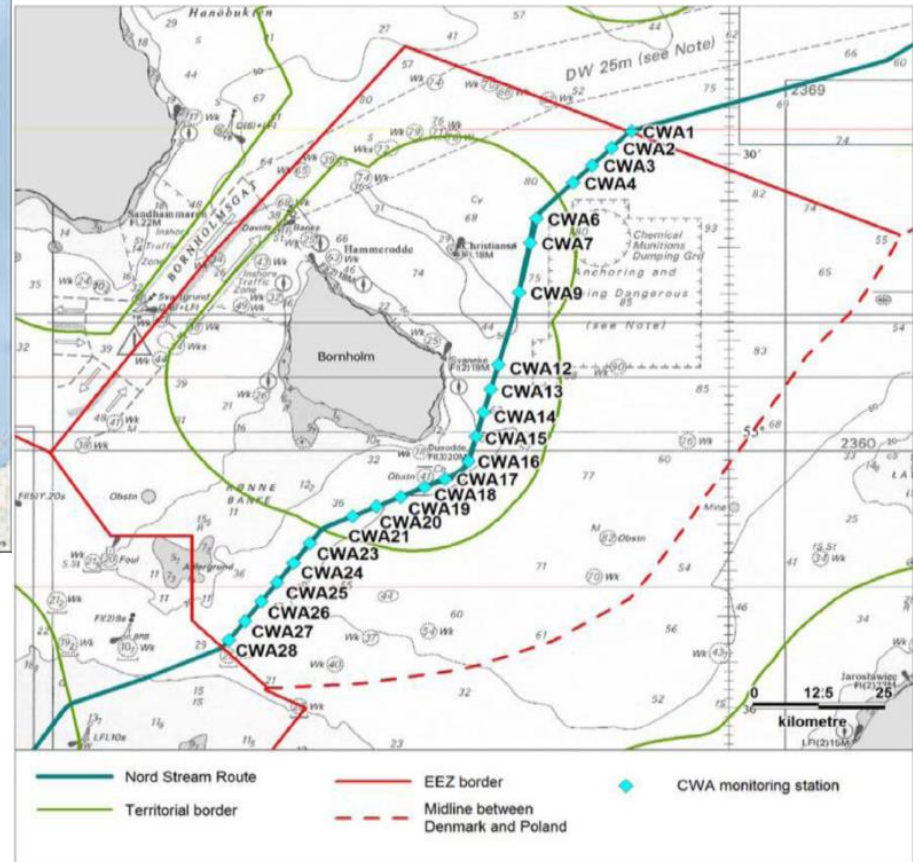


*Offizielle und inoffizielle Versenkungsgebiete.  
Offizielle Transportwege als Punktlinie.  
[Bełdowski et al. 2014]*

## 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]

## ▪ 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]*

## ▪ 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
- $\alpha$ -chloroacetophenone
- Tabun

Weiteres:

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



*An die Oberfläche kommende Ankertaumienen  
[Landesportal Schleswig-Holstein]*

## ▪ Bornholm Basin

### Allgemein:

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

### Menge:

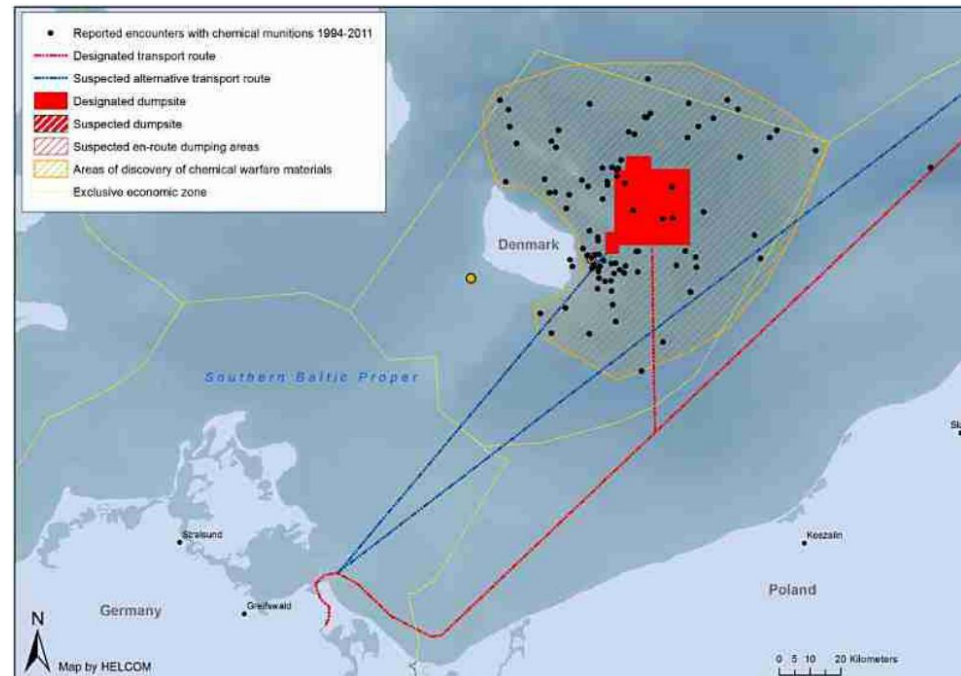
- 32 000 t einzelne Munition (Soviet)
- 30 t einzelne Munition (DDR)
- 30 t auf Schiff versenkt (DDR)

### Chemische Kampfstoffe

- Senfgas
- Arsinöl
- Adamsit
- $\alpha$ -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]*

## ▪ 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



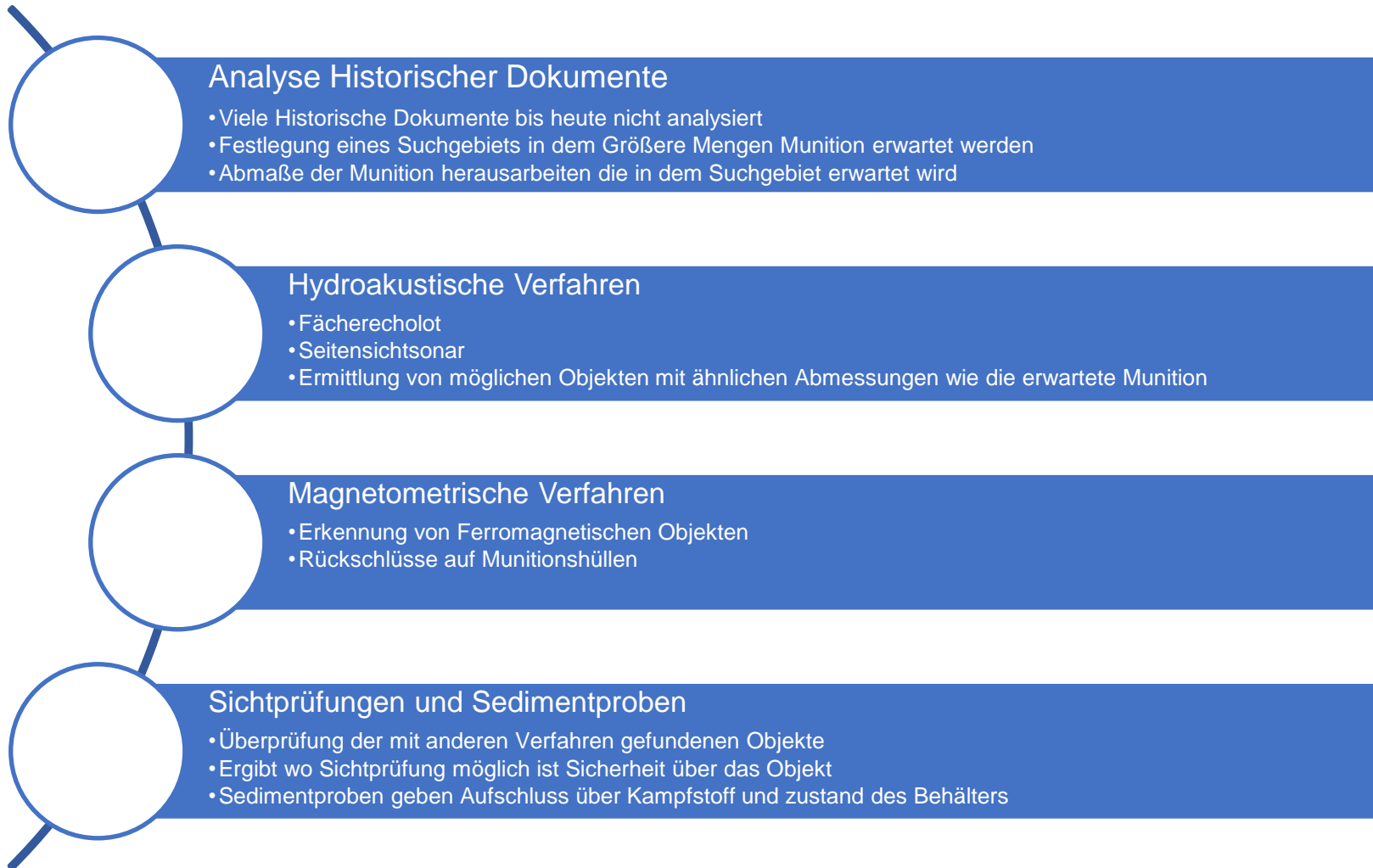
*Chemische Waffen und Fässer mit Senfgas geladen auf einem Schiff zur Versenkung [Helcom]*



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



*KC250 Fliegerbombe  
[Bornholm Marinedistrikt]*





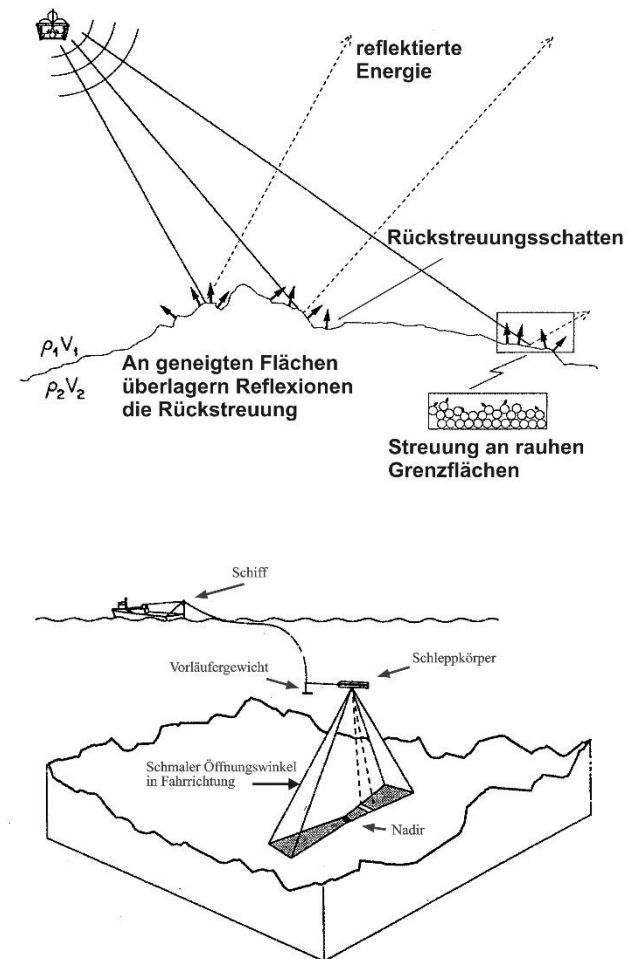
## ▪ Hydroakustische Gefahren

### Seitensichtsonar (SSS)

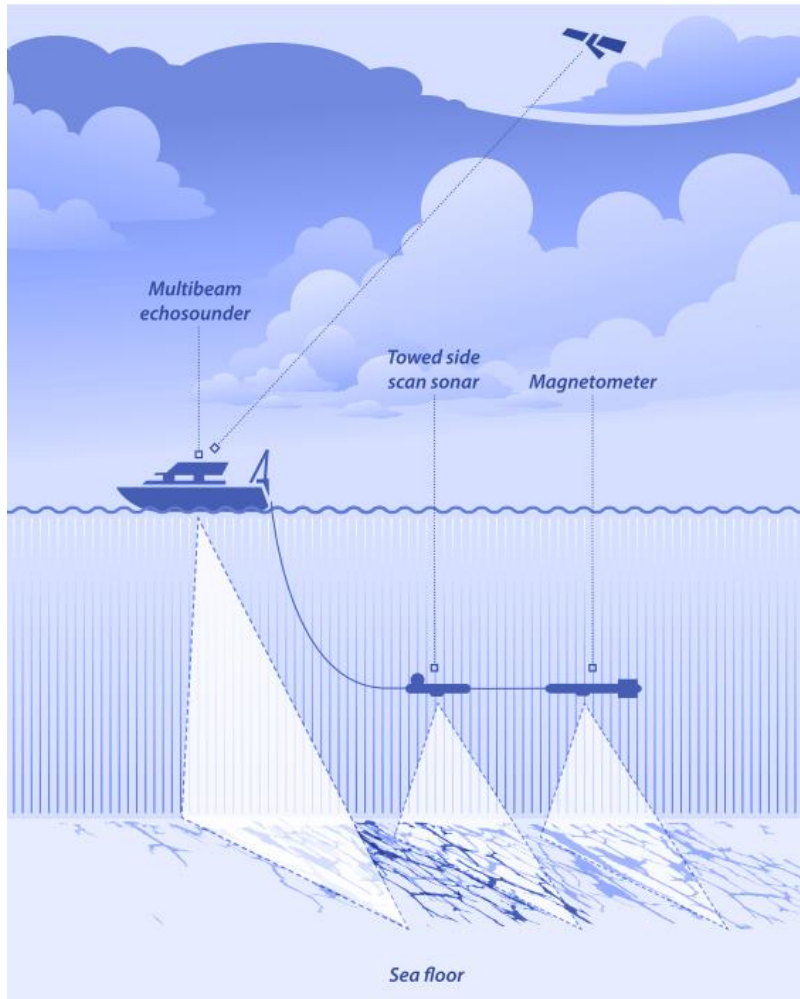
- Ausführung als Schwimmer gezogen von einem Schiff
  - Untersuchung großer Flächen in vergleichsweise kurzer Zeit
  - Genauigkeit gering
- Ausführung an einem AUV
  - Weniger Zeiteffizient
  - Hohe Genauigkeit
  - Gefahr durch Wracks und Geisternetze aufgrund geringem Abstand zum Grund
- Kombination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

### Fächerecholot:

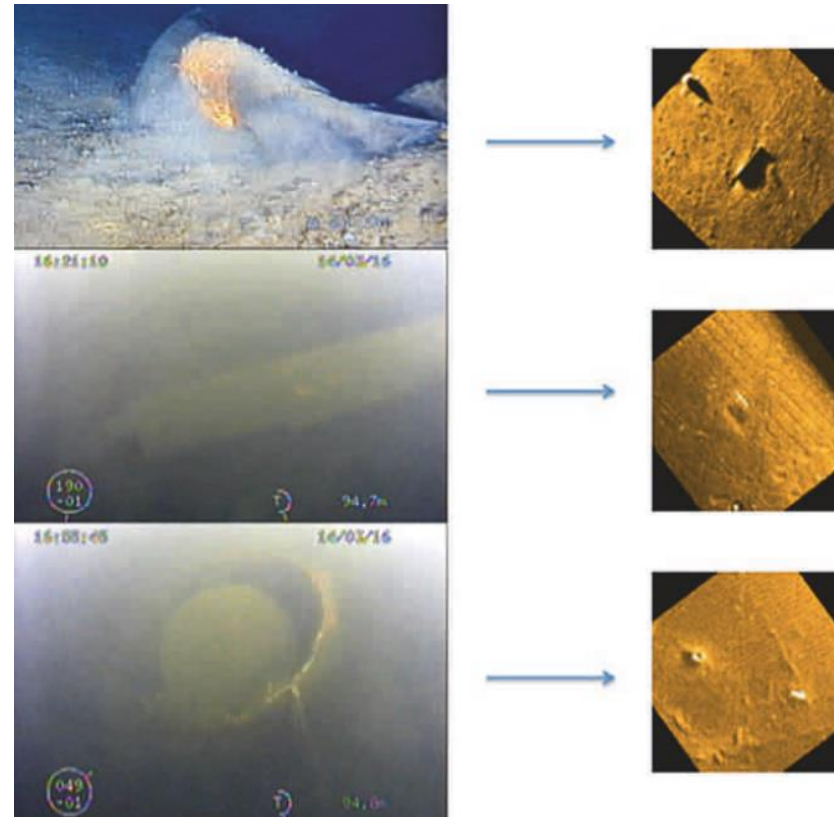
- Ähnlich zum SSS als Schwimmer



Seitensichtsonar [GEOMAR]



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



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

## ▪ **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

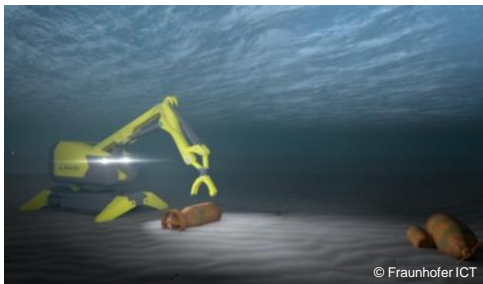
**Delaborierung ist der Sprengung zu präferieren, aber Sprengung ist technisch und finanziell einfacher umzusetzen.**

## ▪ Bergung und Delaborierung durch autonome Systeme mit leichtem Explosionsschutz

*Autonome Schiffe mit unbemannten Ponton und autonomen Bergungsfahrzeugen*



*Bergung von Sprengstoffen durch autonome Bergungsfahrzeuge*

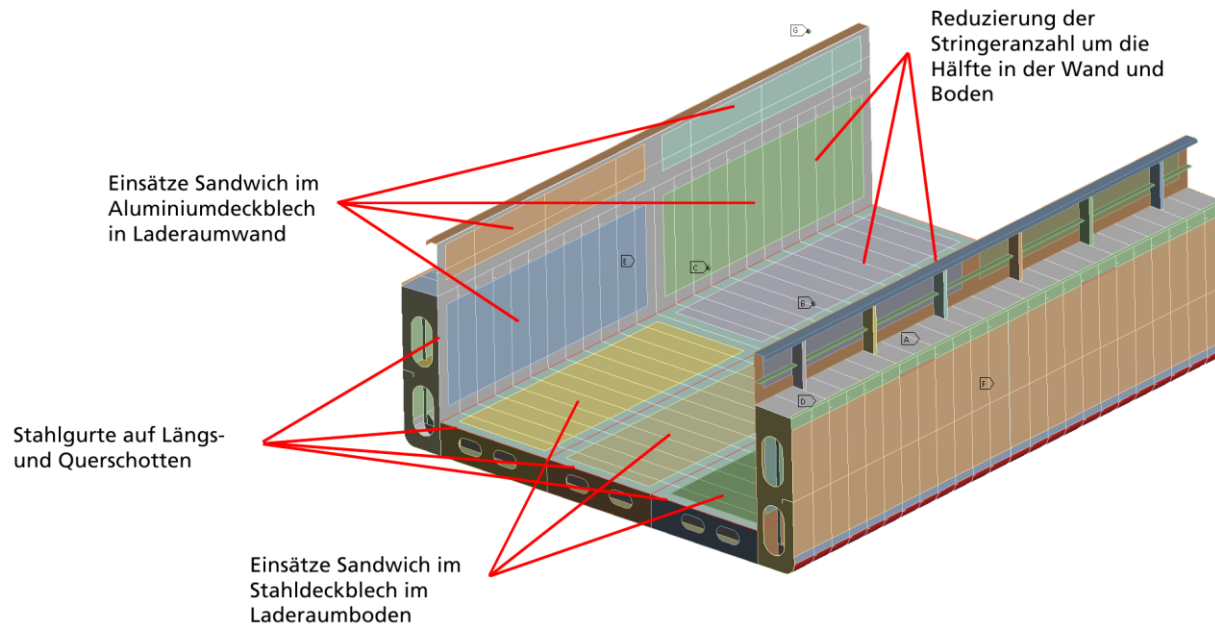


*autonomen Bergungsfahrzeug und Delaborierungs-Container*



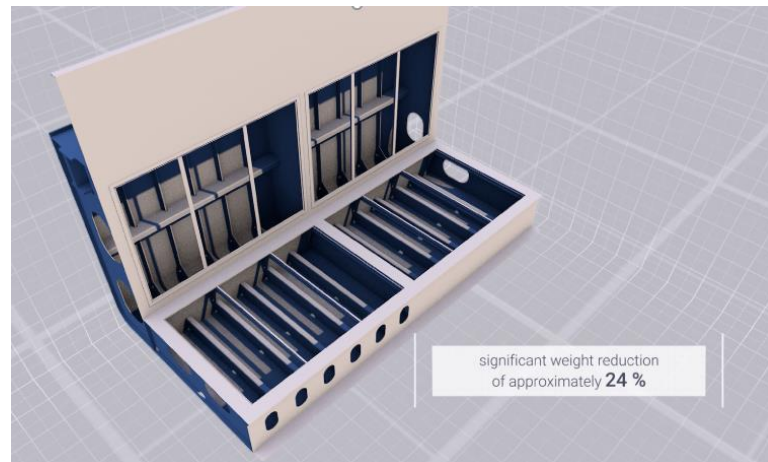
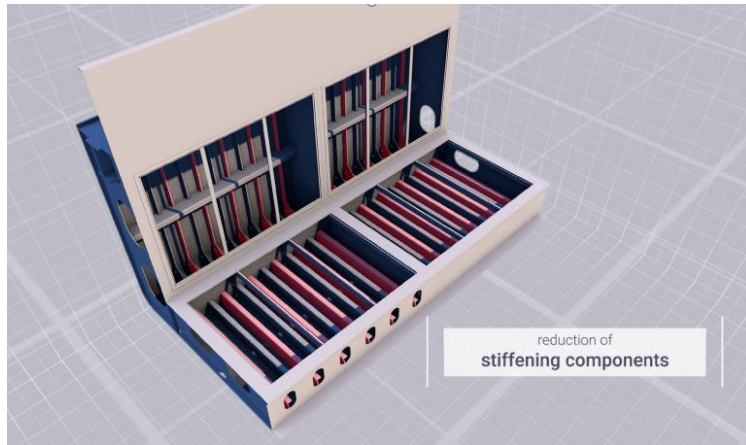
## ▪ Einsatz von bewehrten Aluminiumschaumsandwiches

Gewichtsreduzierte Hybrid-Schiffskonstruktion durch den Einsatz bewehrter Al-Schaumsandwiches



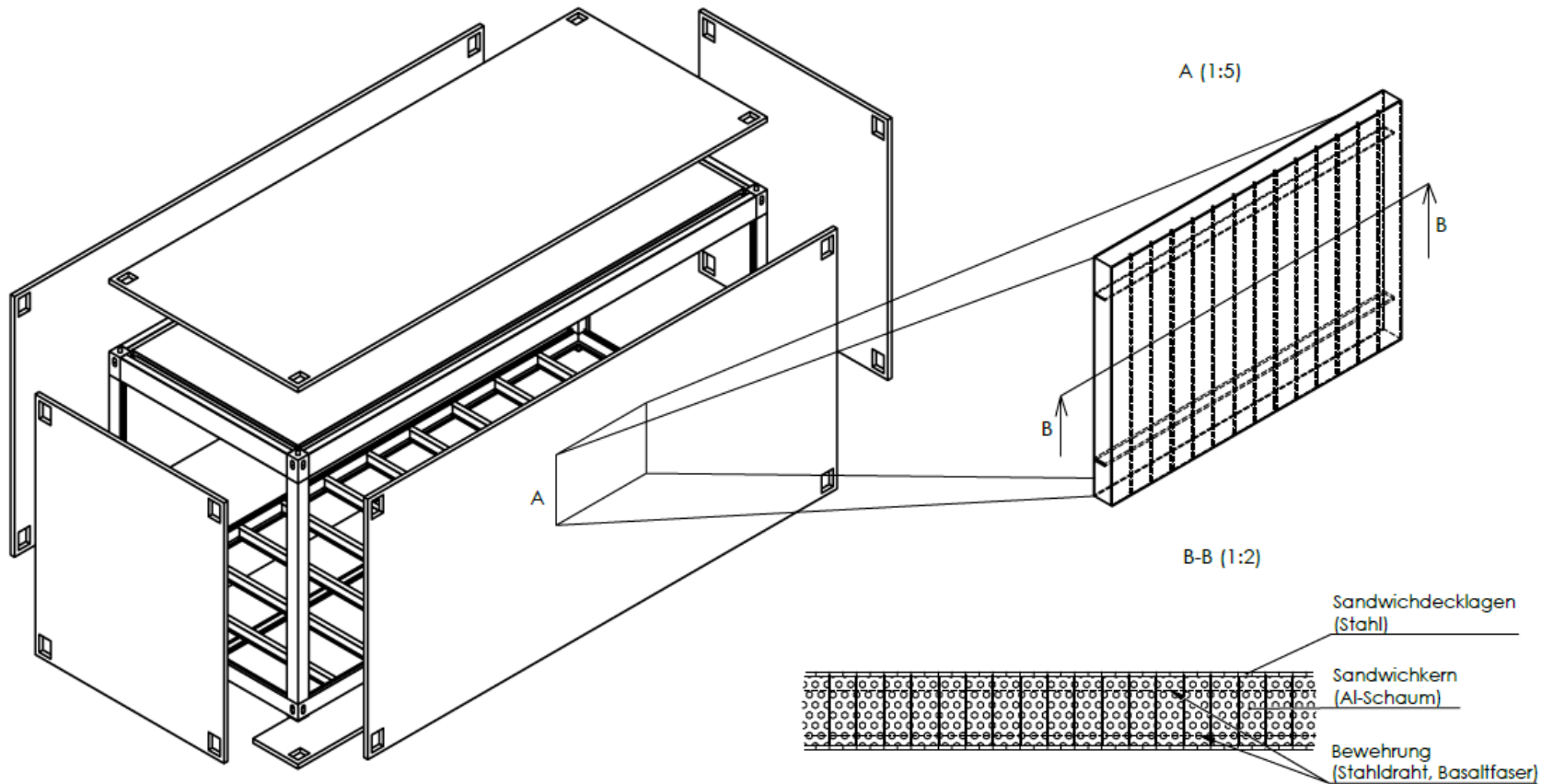
- **Einsatz von bewehrten Aluminiumschaumsandwiches**

Gewichtsreduzierte Hybrid-Schiffskonstruktion durch den Einsatz bewehrter Al-Schaumsandwiches



- **Einsatz von bewehrten Aluminiumschaumsandwiches**

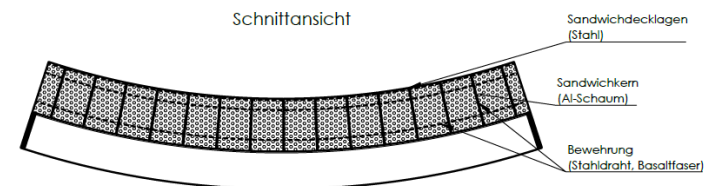
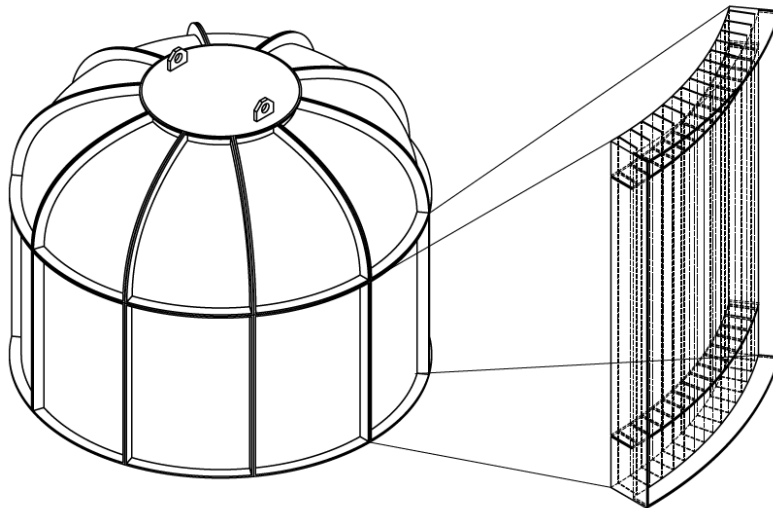
Delaborierungscontainer (Munitionstransportcontainer)





- **Einsatz von bewehrten Aluminiumschaumsandwiches**

Unterwasser-Delaborierungs-/Sprengvorrichtung (Munitionstransportcontainer)



- 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](http://www.institut-se.de)

---

Dipl.-Ing. Gregor Kaufmann  
Geschäftsführer

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