

29.10.2024

SICHERHEIT VON WASSERSTOFFTECHNOLOGIEN – QUO VADIS

Dr. Kai Holtappels
Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung
Sprecher des Kompetenzzentrums H2Safety@BAM
Leiter des Fachbereichs „Sicherheit von Energieträgern“



Unser Auftrag: Sicherheit in Technik und Chemie



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz



Kompetenzzentrum H₂Safety@BAM

- Forschung und Dienstleistungen entlang der gesamten H₂-Wertschöpfungskette
- angefragte Expertise bei Sicherheitsthemen
- Einzigartiges Prüfareal zur H₂-Sicherheit (BAM Testgelände für Technische Sicherheit)
- Sprecher im nationalen Forschungsnetzwerk Wasserstoff
- Leitung des AK „Qualitätsinfrastruktur“ der Normungsroadmap Wasserstofftechnologien

Vertrauen schaffen in den Energieträger der Zukunft



Reallabor BAM TTS

- Sicherheitsuntersuchungen im Realmaßstab



Grundlagen für den sicheren Umgang mit Wasserstoff

www.bam.de

- Wasserstoff ist nicht gefährlicher oder weniger gefährlich als andere brennbare Gase!
- Es gibt spezifische Eigenschaften, die ggf. gesondert betrachtet werden müssen.
- Die potentiellen Gefahren und Risiken müssen bekannt sein und relevante Personengruppen unterwiesen sein.
- Die Gesellschaft ist es durchaus gewohnt, Risiken einzuschätzen und damit umzugehen, es braucht aber auch seine Zeit ...
- Die Risikoeinschätzung muss auf Fakten und nicht Mythen beruhen, nur so kann Vertrauen entstehen!

Tempelhofer Flugfeld, Berlin (1894)



Explosion von Druckgasbehältern aus Eisen (Quelle: Eng. Failure Analysis 43 (2014) no. 8)

Fukushima, Japan (2011)

Wasserstoffexplosion im KKW nach einem Erdbeben/Tsunami (Quelle: Digital Globe)



Kjørbo, Norwegen (2019)

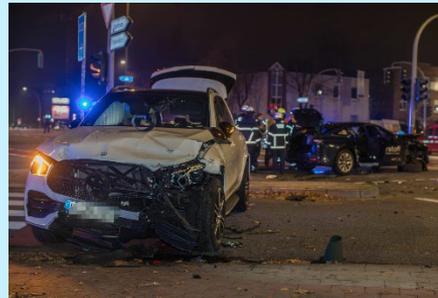
Wasserstoffexplosion an einer Tankstelle nach unbeabsichtigter Freisetzung (Quelle: IAFRS)

... und passieren auch in Deutschland

26.08.2024, Leuna: Trailerexplosion und -brand Quelle: MDR



25.06.2024, Gersthofen:
Defekter Kompressor
führt zu Explosion und
Brand
Quelle: Augsburgere Allemeine



11.11.2024, Hamburg:
Wasserstoffauto in Unfall
verwickelt
Quelle: Hamburger Morgenpost

Sicherheitstechnische Kenngrößen von Methan und Wasserstoff im Vergleich

Sicherheitstechnische Kenngröße	Methan	Wasserstoff
Untere Explosionsgrenze (UEG)	4.4 Mol-%	4.0 Mol-%
Obere Explosionsgrenze (OEG)	17.0 Mol-%	77.0 Mol-%
Sauerstoffgrenzkonzentration (LOC)	9.9 Mol-%	4.3 Mol-%
Mindestzündtemperatur (AIT)	595 °C	560 °C
Mindestzündenergie (MIE)	0.29 mJ	0.017 mJ
Grenzspaltweite (MESG)	1.14 mm	0.29 mm
Maximaler Explosionsdruck p_{\max}	8.1 bar	8.3 bar
K_G -Wert	69 bar*m/s	990 bar*m/s
Flammengeschwindigkeit	43 cm/s	346 cm/s

Besonderheiten des Wasserstoffs (gegenüber KW-Brenngasen):

- großer Explosionsbereich 
- sehr geringe Mindestzündenergie 
- geringe Dichte 
- hohe Zündtemperatur 
- negativer Joule-Thomson-Effekt 
- Brandverhalten 
- Wechselwirkungen mit Materialien 

Aktuelle Forschungsbedarfe

- Expertenempfehlungen des Forschungsnetzwerk Wasserstoff

Leckageüberwachung

- Innovative Methoden zur Bereichsüberwachung
- Konzepte für Sensorauswahl, -kombination und -verteilung

Sicherheitskonzepte

- Leitlinien für spezifische Schutzmaßnahmen & Schutzbereichen
- LH₂
- (Q)RA-Werkzeuge

Wissenstransfer

- RCS
- allgemeine & berufliche (Aus)Bildung

Materialeignung

- Richtlinien für die Materialauswahl
- Entwicklung von Prüfverfahren für H₂-Readiness & Schadensfrüherkennung
- Entwicklung neuer Werkstoffkonzepte
- Prüfkonzepte/Prüfinfrastrukturen für Hochtemperaturanwendungen

Lebensdauermodelle & -konzepte

- Konstruktion von Bauteilen
- Erweiterung der Modelle um Schädigungsparameter "H₂"
- Eignung AM-gefertigter Bauteile

Klimawirksamkeit

- Emissionen messen und quantifizieren
- Konzepte zur Vermeidung & Rückgewinnung
- Faktor Mensch

Verhalten von H₂ in Unfallszenarien

- Verständnis für Szenarien
- Entwicklung von RCS
- Risikominderungspotentiale von Schutzmaßnahmen

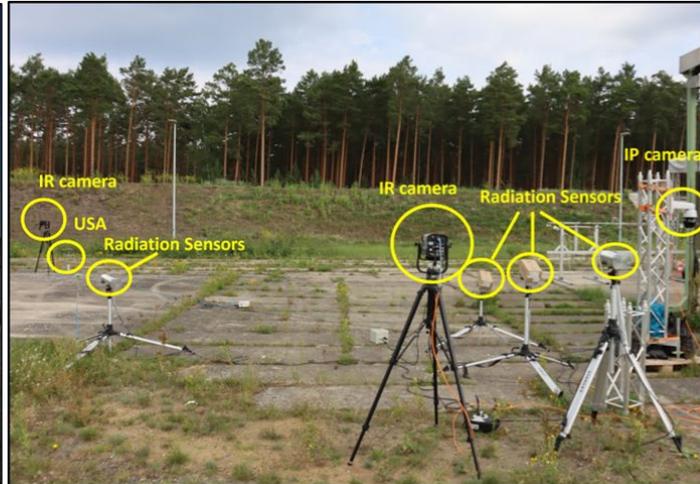
Freistrahlfreisetzungen von Druckgaswasserstoff

www.bam.de

Freistrahlfammen

zur Bestimmung der Auswirkungen

Bestimmung der Wärmestrahlung



Measurement technology:

- 4 Radiation sensors (Bolometer)
- 5 IR cameras
- 360° IP Kamera
- USA (Ultra Sonic Anemometer)
- Mass flow
- Temperatures
- Pressures

Quelle: Chr. Bernardy, BAM

In über 400 Versuchen bei Druckstufen bis 300 bar wurde niemals eine „Selbstentzündung beobachtet!“



Testparameter:

$$D_{\text{nozzle}} = 30 \text{ mm}$$

$$p_{\text{nozzle,out}} = 229 \text{ bar}$$

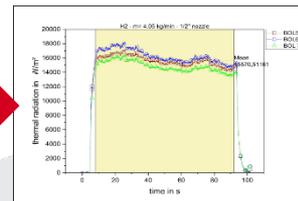
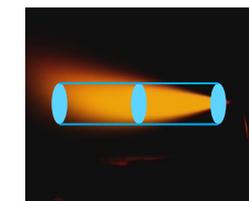
$$\dot{m}_{\text{H}_2} = 0,175 \text{ kg/s}$$

$$l_f \approx 9 \text{ m}$$

$$p_{\text{sound}} = 131 \text{ dB}$$

Quelle: Chr. Bernardy, BAM

- Empfehlung der Kommission für Anlagensicherheit KAS-63 zur „Ermittlung des angemessenen Sicherheitsabstands bei Anlagen mit gasförmigem Wasserstoff“ im November 2023 verabschiedet
- angemessene (konservative) pauschale Sicherheitsabstände für Anlagen mit gasförmigem Wasserstoff festgelegt (Explosionsüberdruck 50 mbar oder Wärmestrahlung $1,6 \text{ kW/m}^2$; zwei Leckagequerschnitte)
- Empfehlung basiert auf BAM-Berechnungen
- laufende Erkenntnisse aus F&E-Arbeiten zur Wärmestrahlung werden in KAS-18 Leitfaden einfließen



Flüssigwasserstoff LH₂

www.bam.de

Unfallszenario:

Verladen/Entladen von Flüssigwasserstoff (LH₂) im Hafen: Leitungsbruch/-riss oder Abtrennen eines Verbindungsschlauches

- Flüssigwasserstoff verdampft explosionsartig und erzeugt eine Druckwelle → Auswirkungen nur im unmittelbaren Nahbereich (3 m)

Unfallszenario grundsätzlich beherrschbar!

S^oH₂IFT



Die entstehende „Wasserstoffwolke“ **entzündet** sich spontan → Explosionsdrücke können im Nahbereich (10 m) Personen und Infrastruktur beschädigen

- Explosionsüberdrücke in Luft: bis 400 mbar
- Explosionsdrücke im Wasser: bis 1250 mbar
- Auswirkungen durch Überdruck bei Entzündung:
 - Personenschäden möglich
 - Scheiben gehen zu Bruch
 - Schäden an Gebäuden

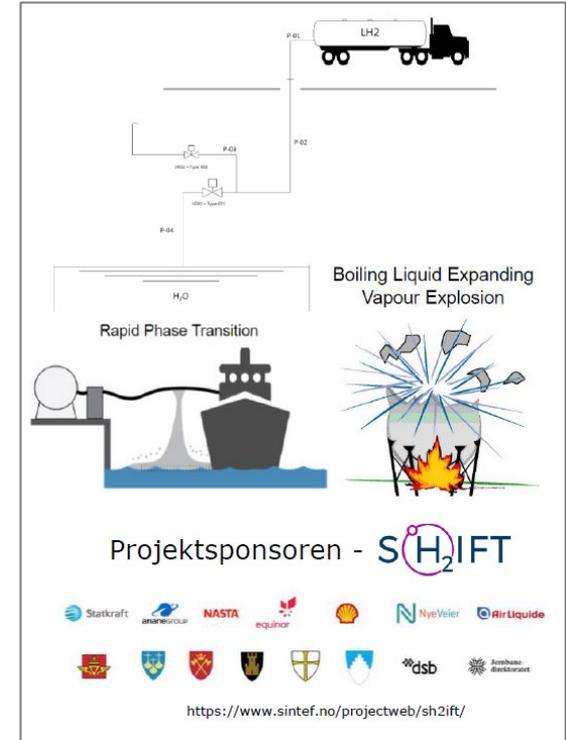
Unfallszenario beherrschbar, aber Ursache für Entzündung noch unklar!

S_H2IFT



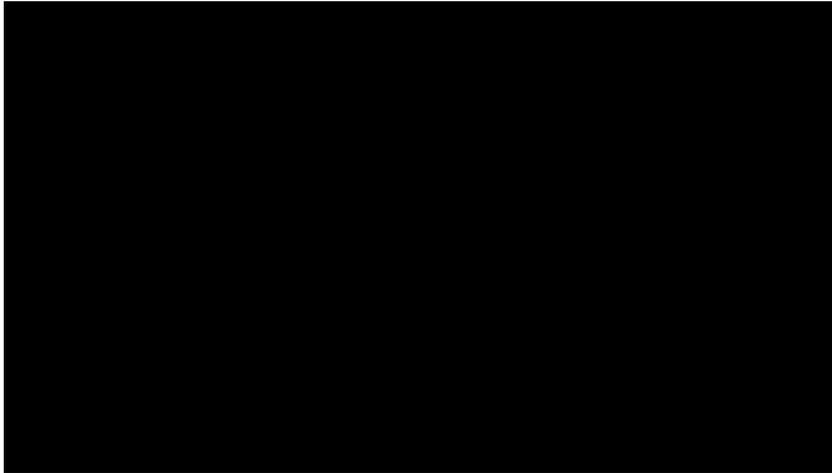
Unfallszenarien mit LH₂ im Realmaßstab

Auswirkung des Versagens eines LH₂-Behälters im Brandfall → alle Sicherheitseinrichtungen wurden entfernt bzw. deaktiviert



Auswirkungen des „BLEVE“-Experiments

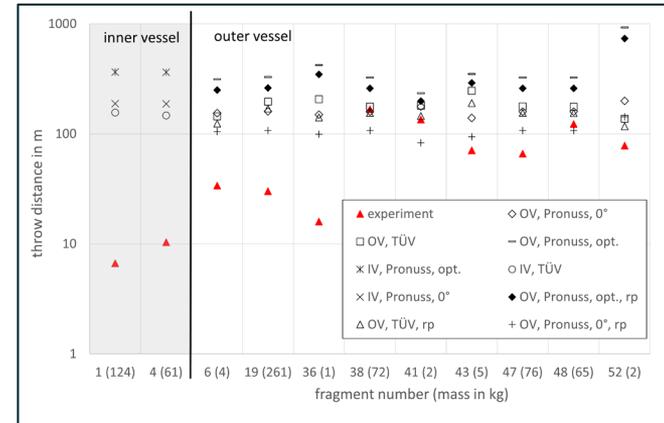
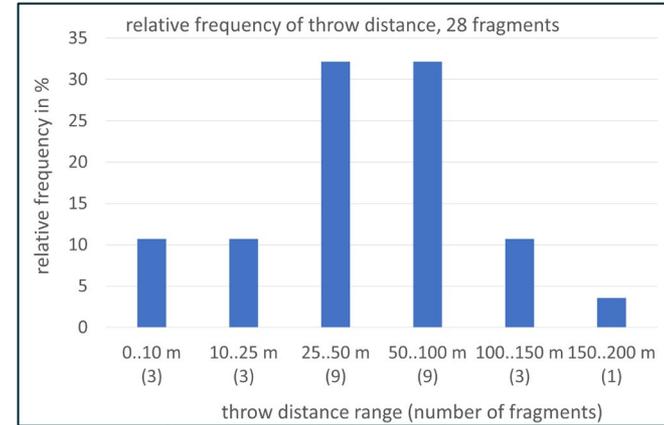
Drohnenaufnahme

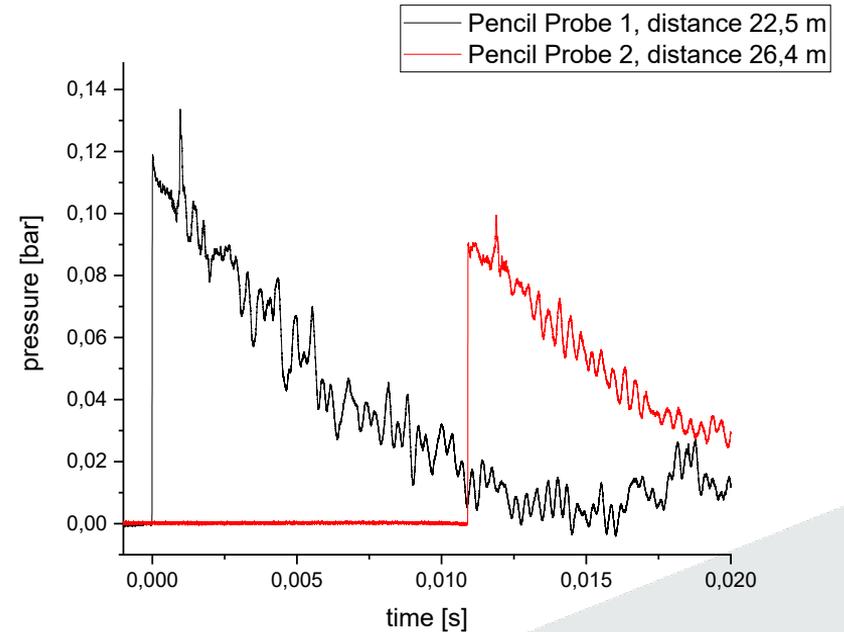
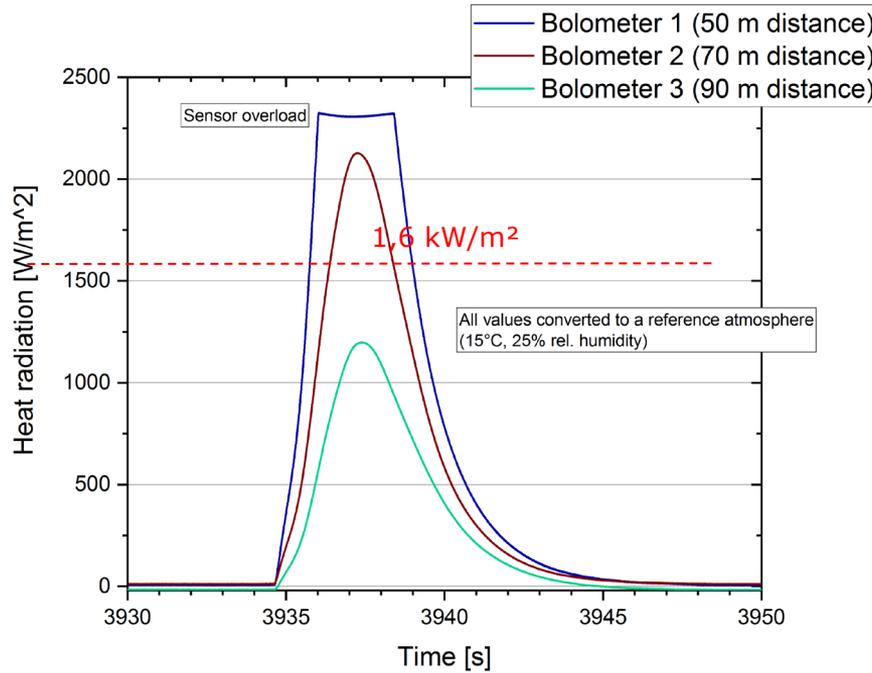


Frontalaufnahme



Fragmentverteilung





Ergebnisse aus drei „BLEVE“-Experimenten



BLEVE 1



BLEVE 2



BLEVE 3

- Einer von drei Behältern versagte nach 70 min (Multi-Layer Insulation)!
- Alle Behälter hielten dem Feuer für mehr als ein Stunde stand!
- Warum der Behälter versagte ist noch nicht geklärt ...

Unfallszenarien mit Druckgasbehältern

www.bam.de



Wasserstoff:

- steile, aufwärts gerichtete Flamme
- erlischt ohne Gaszufuhr
- geringe Wärmestrahlung
- kein Qualm



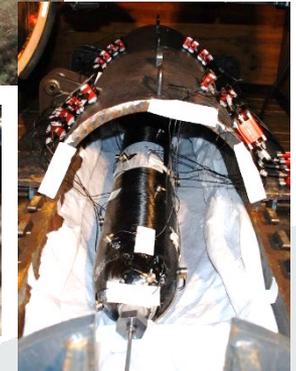
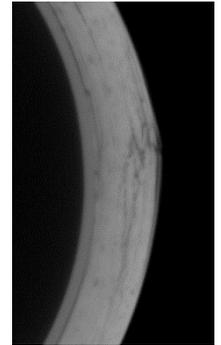
Benzin:

- breitet sich am Boden aus
- starke Wärmestrahlung
- dichter Qualm
- brennt noch weiter

Demonstration bei einer
Veranstaltung der Linde AG
am 1. Oktober 2003

Deep Dive: Sicherheit von Druckgasspeichern

- Abschluss des NIP II-Projekts DELFIN: alternative Werkstoffe/Herstellungsverfahren für kosten- und gewichtsreduzierte Druckbehälter aus endlosfaserverstärktem Kunststoff
- Impact-Versuche 25kJ@70MPa mit Druckgasspeichern (nur ein Behälterversagen!)
- Beschädigungsanalyse durch Schallemissionsanalytik & Computertomographie
- Ergebnisse: Verlässliche Daten über mechanische Robustheit & strukturelle Schäden, Benchmark-Werte für FE-Modelle (Verformung, Kontaktkräfte etc.)



One cylinder failed under extreme load (subscale #1356 @25kJ/700bar)



Sicherheit von Elektrolyseanlagen

www.bam.de

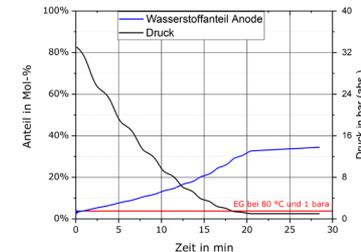
Auswirkungen von „Cross-Over“-Szenarien:

- Sicherheitseigenschaften von H₂-O₂-Gemischen
- Bewertung von Zündquellen
- Auswirkungsbetrachtungen von H₂-O₂-Explosionen

Materialkompatibilität (metallisch und nicht-metallisch) bei Prozessbedingungen (mit Feuchtigkeit):

- Materialversagen in Wasserstoff & Sauerstoff
- Abbrand bei Kontakt mit Sauerstoff

Gefährdungsbeurteilung:
Festlegung technischer & organisatorischer Schutzmaßnahmen



Und jetzt ...

... müssen diese (und weitere) Erkenntnisse in Leitfäden für die Feuerwehren eingebracht werden!

AGBF Leitfaden: Wasserstoff und dessen Gefahren – Ein Leitfaden für Feuerwehren (2008)

<https://feuerwehr-lernbar.bayern/lexikon/w/wasserstoffantrieb/>

H₂-DVWG: Wasserstoff in der Gasversorgung & Anwendung - Ein Einstieg für die Feuerwehr - Umgang, Gefährdungen und Erstmaßnahmen bei mit Wasserstoffbetriebenen Leitungen und Anlagen

HyResponder (<https://hyresponder.eu/>)

AICHe Academy: Introduction to Hydrogen Safety for First Responders (<https://www.aiche.org/ili/academy/courses/ela253/introduction-hydrogen-safety-first-responders>)

Vielen Dank!

Dr. rer. nat. Kai Holtappels
Tel.: +49 30 8104-1210
Mail: Kai.Holtappels@bam.de

