

05.11.2016

DRUCKGASFLASCHEN IM FEUER

Dr. Kai Holtappels

Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM)

Leiter des Fachbereichs 2.4

„Konstruktiver Brand- und Explosionsschutz Gase“

05.11.2016

DRUCKGASFLASCHEN IM FEUER

Acetylenflaschen und LPG-Tanks in Kraftfahrzeugen

Kai Holtappels, Rico Tschirschwitz, Martin Kluge, Daniel Krentel

Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM)
Fachbereich 2.4 „Konstruktiver Brand- und Explosionsschutz Gase“

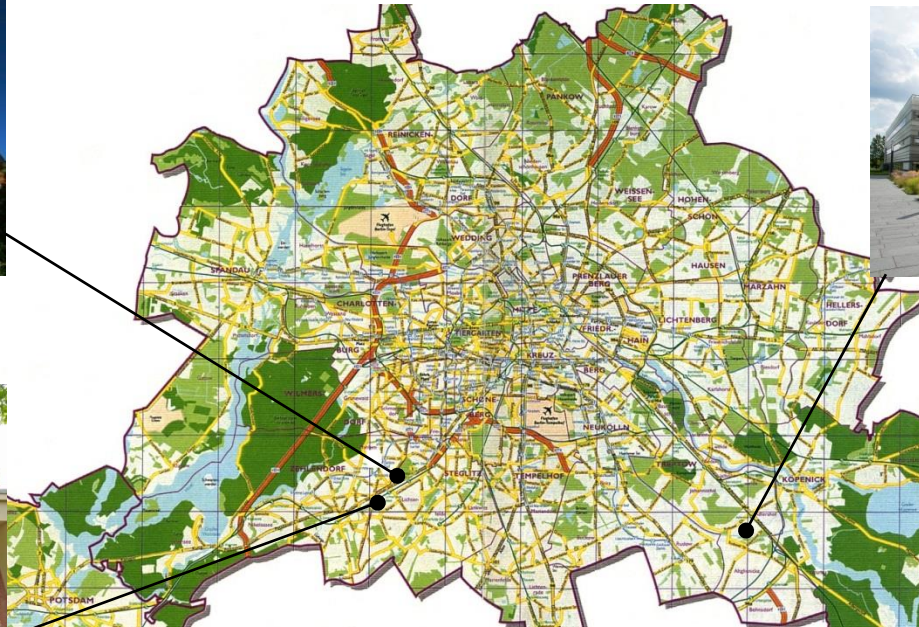
Standorte



Zweiggelände Fabeckstraße



Stammgelände Lichterfelde



Zweiggelände Adlershof



BAM TTS in Baruth/Mark



Unser Auftrag



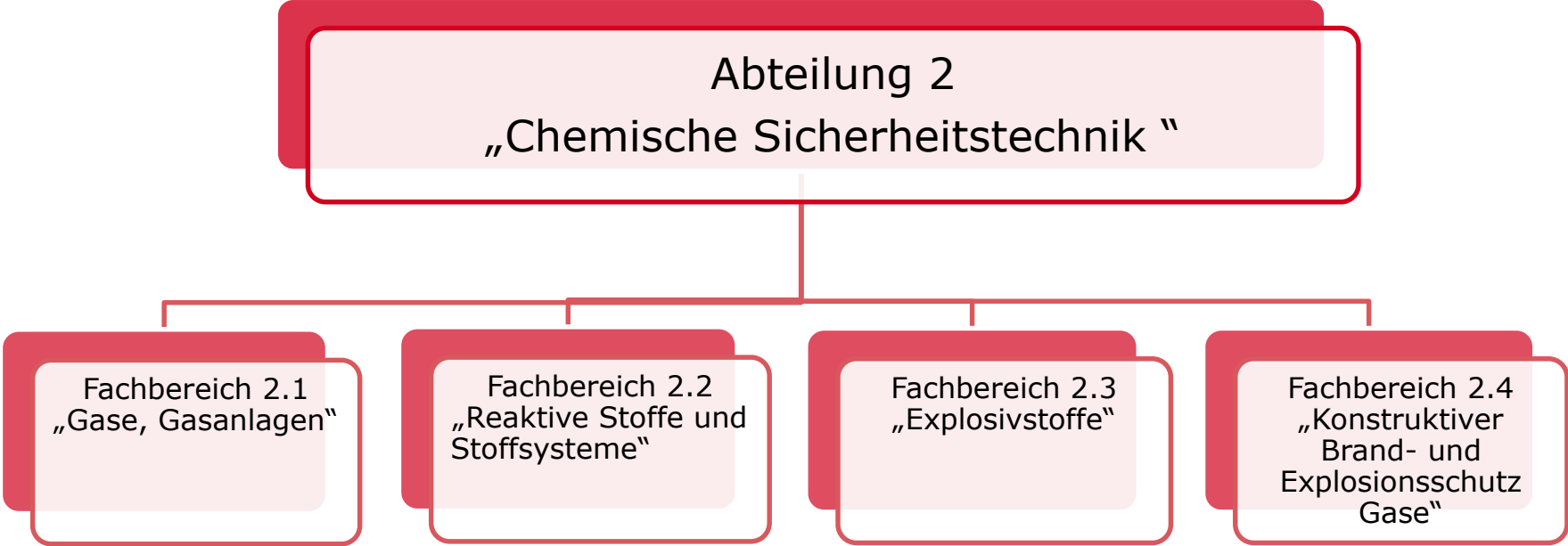
Die BAM ist eine Bundesbehörde im Geschäftsbereich des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie.



Wir gewährleisten Sicherheit in Technik und Chemie.

Die Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) integriert Forschung, Bewertung und Beratung unter einem Dach.

- | | | | |
|----------|--------------------------------------------|----------|------------------------------------------|
| 1 | Analytische Chemie;
Referenzmaterialien | 5 | Werkstofftechnik |
| 2 | Chemische
Sicherheitstechnik | 6 | Materialschutz und
Oberflächentechnik |
| 3 | Gefahrgutumschließungen | 7 | Bauwerkssicherheit |
| 4 | Material und Umwelt | 8 | Zerstörungsfreie Prüfung |
| | | 9 | Komponentensicherheit |
| | | S | Qualitätsinfrastruktur |



```
graph TD; A[Abteilung 2  
„Chemische Sicherheitstechnik“] --- B[Fachbereich 2.1  
„Gase, Gasanlagen“]; A --- C[Fachbereich 2.2  
„Reaktive Stoffe und  
Stoffsysteme“]; A --- D[Fachbereich 2.3  
„Explosivstoffe“]; A --- E[Fachbereich 2.4  
„Konstruktiver  
Brand- und  
Explosionsschutz  
Gase“];
```

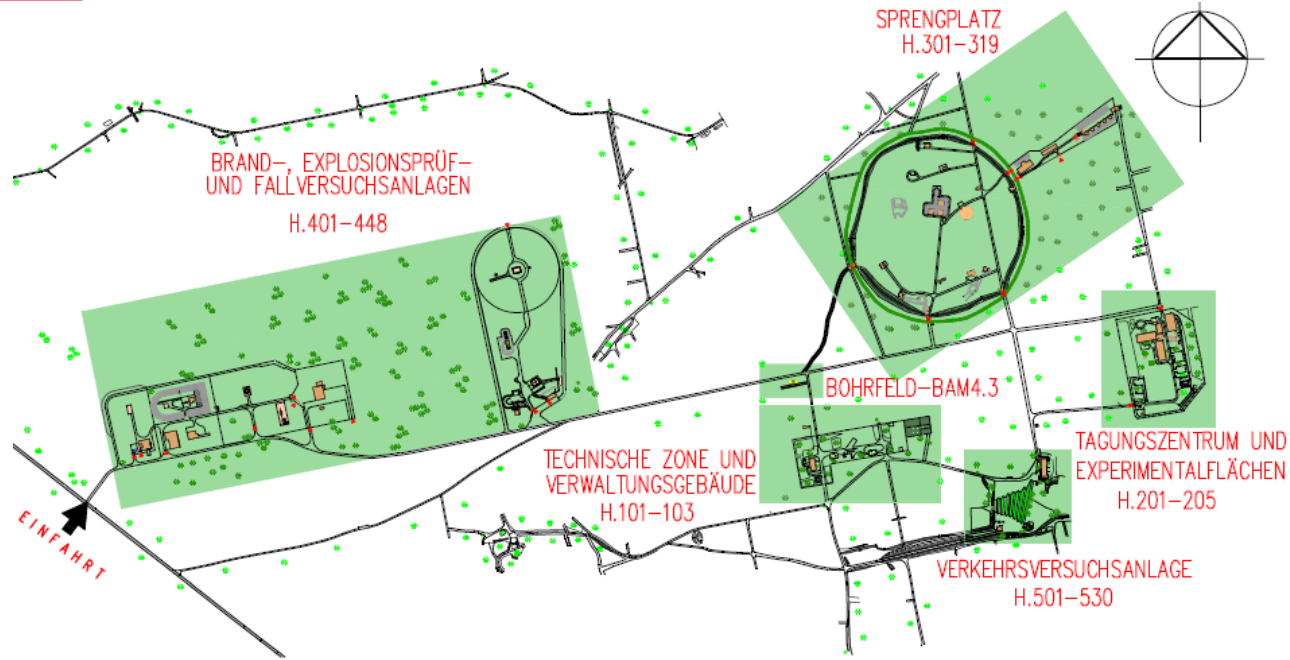
Abteilung 2
„Chemische Sicherheitstechnik“

Fachbereich 2.1
„Gase, Gasanlagen“

Fachbereich 2.2
„Reaktive Stoffe und
Stoffsysteme“

Fachbereich 2.3
„Explosivstoffe“

Fachbereich 2.4
„Konstruktiver
Brand- und
Explosionsschutz
Gase“



Gesamtfläche: 12 km²

Acetylenflaschen im Feuer

Erfahrungen der BAM

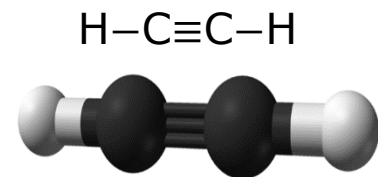
- Acetylen (C_2H_2) ist ein farbloses Gas der homologen Reihe der Alkine
- Flammentemperatur mit O_2 bis zu $3300\text{ }^\circ\text{C}$
- Anwendungen: Schweißen/Schneiden von Metallen, Synthese von Polymeren
- **Besonderheit:** chemisch instabiles Gas (kann auch in Abwesenheit von Luft oder Sauerstoff explosionsartig reagieren)



$$\Delta H_R = -226\text{ kJ/mol}$$

↑ p, T

↑ r_{zer}



Ein Acetylenzerfall in Acetylenflaschen muss zuverlässig verhindert werden

- Die Lagerung von Acetylen in Gasflaschen erfordert spezielle Vorkehrungen

Acetylenflaschen sind vollständig mit einem porösen Material gefüllt

Aufgabe bei Einleitung eines Acetylenzerfalls in der Flasche

- die poröse Struktur des porösen Materials soll die Reaktion quenchen



Querschnitt durch eine 5 L Acetylenflasche Poröses Material

- monolithischer Block
- Porosität von etwa 90 %
- besteht aus Calciumsilicat-Hydrat
- wird unmittelbar in der Gasflasche hergestellt
- Edukte sind Quarz, Kalk, mineralische Fasern und Zuschlagstoffe

Das poröse Material adsorbiert ein Lösemittel

- Aceton oder DMF (Dimethylformamid)
- gleichmäßig in der Acetylenflasche verteilt

Das Acetylen wird in dem Lösemittel gelöst (Dissousgas)

-
- Wärme kann einen Zerfall in der Flasche auslösen
 - Gewöhnlich wird er vom porösen Material zuverlässig aufgehalten
 - Aber bei höheren Drücken und Temperaturen ist darauf kein Verlass
 - In dem porösen Material kann der Zerfall langsam voranschreiten (im Vergleich zu einer Explosion), selbst wenn die Flasche nicht mehr erhitzt wird
 - Der Druckanstieg durch den Zerfall könnte zu einem Bersten der Flasche führen

Das ist kein Spaß ...



... außer man sitzt an einem geschützten Platz in respektvoller Entfernung!

British Compressed Gas Association (BCGA)

Wie lange muss eine Acetylenflasche gekühlt werden?

Muss eine 200 m Sicherheitsabspernung für 24 h aufrecht gehalten werden?

1987	Tod des Feuerwehrmanns John Wixey
1994	HSL Versuchsreihe
2003/2004	Neue "FRS guidance" (200 m / 24 h?)
07/2005	Schließung der M25 bei Hertfordshire
06/2006	Schließung von King's Cross
2006	Bildung einer NSG
03/2007	Stop des Eurostar (South West London)
10/2009	Fallstudie "Cold impact" abgeschlossen

Seit 2003/2004:

- Einrichten einer 200 m Sicherheitszone bis gesicherte Informationslage vorliegt
- Dynamische Anpassung der Zonengröße
- 24 h Kühlung der Flasche(n), kein Abtransport oder Druckentlastung

Problem:

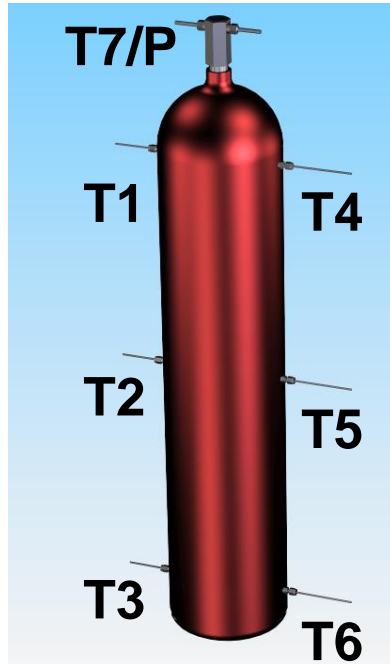
Wer übernimmt die Verantwortung für die Verkleinerung der Sicherheitszone?

-
- **Wie lange muss eine „volle“ Acetylenflasche unterfeuert werden, bis sie birst?**
 - **Erfassung von Zustandsdaten**
 - Druck- und Temperaturverläufe in der Acetylenflasche bzw. im porösen Material
 - im Feuer und während der Kühlung
 - Daten für die Entwicklung eines Simulationsmodells
 - **Wirksamkeit der Kühlung**
 - optimales Kühlsystem
 - Mindestdauer für die Kühlung

Prüfplan (jeweils für 10 und 50 l)

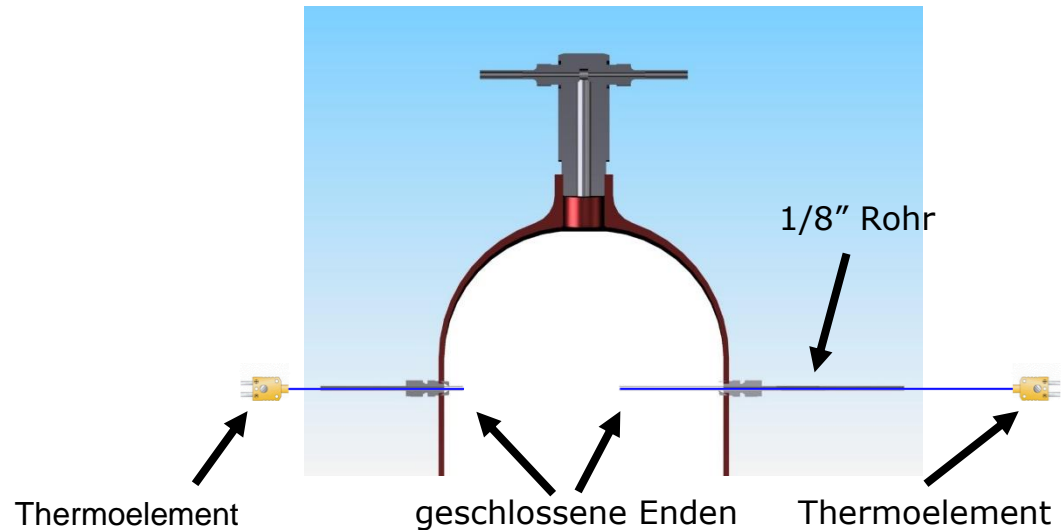
Muster	Prüfung	Ergebnis
1	Elektrische Heizung nur mit <u>porösem Material</u>	Nicht zerstörerisch
1	Elektrische Heizung mit <u>porösem Material</u> und <u>Lösemittel</u>	Eventuell zerstörerisch
2 - 4	Erhitzen im Holzfeuer bis zum Bersten	zerstörerisch
5, 6	Erhitzen im Holzfeuer, Versuch der Rettung durch Kühlen	Eventuell zerstörerisch





12 Acetylenflaschen wurden vorbereitet für Messung von:

- Temperatur im porösen Material
- Druck und Temperatur am Flaschenkopf





Sechserpack nach BAM-Art

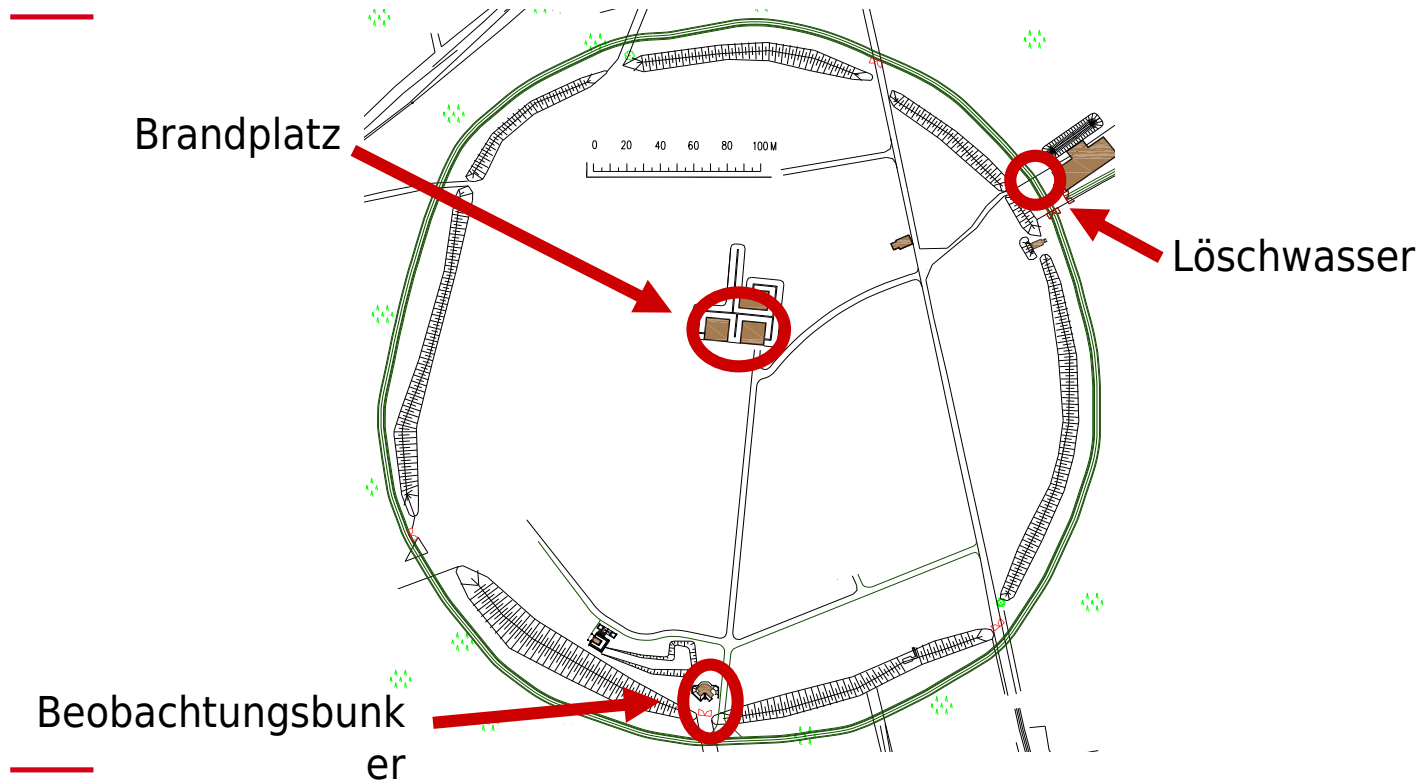


Durchführung (lang)

In der Flaschenwand



BAM TTS, Sprengplatz - Unterfeuerungsversuche



Versuchsvorbereitung (1)



Bodenplatte aus Metall



Holz wird geliefert

Stapel bauen



Versuchsvorbereitung (2)



Alte Zeitungen sind wichtig



Stapel fertig!



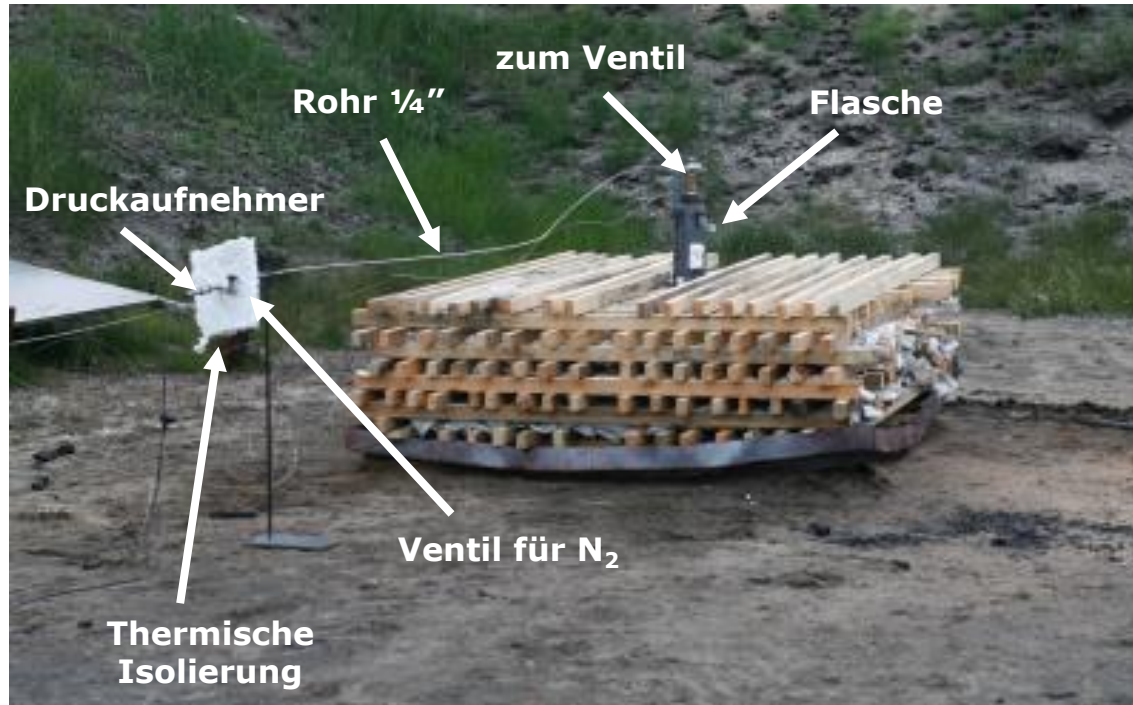
Pyrotechnischer Zünder



Blick aus dem Beobachtungsbunker

Starthilfe für das Feuer





Unterfeuerungsversuche ohne Kühlung

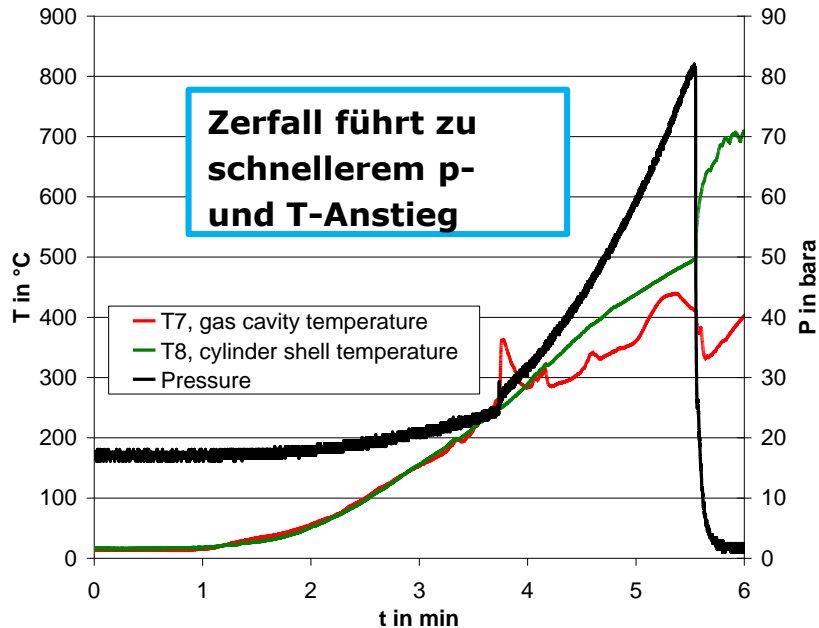
- 10 L Flasche
- Partielles Aufreißen mit Stichflamme

10 L Flasche: Versuch 1



Nur partielles Aufreißen des
Druckbehälters → Flammenstrahl

10 L Flasche: Versuch 1



Zeit bis:

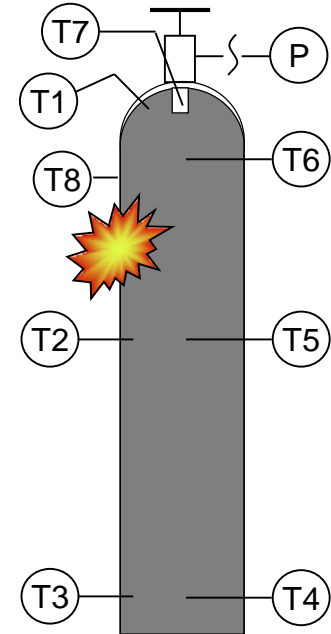
- Zerfall oben: ~3.5 min
- Bersten: ~5 min

Druck bei:

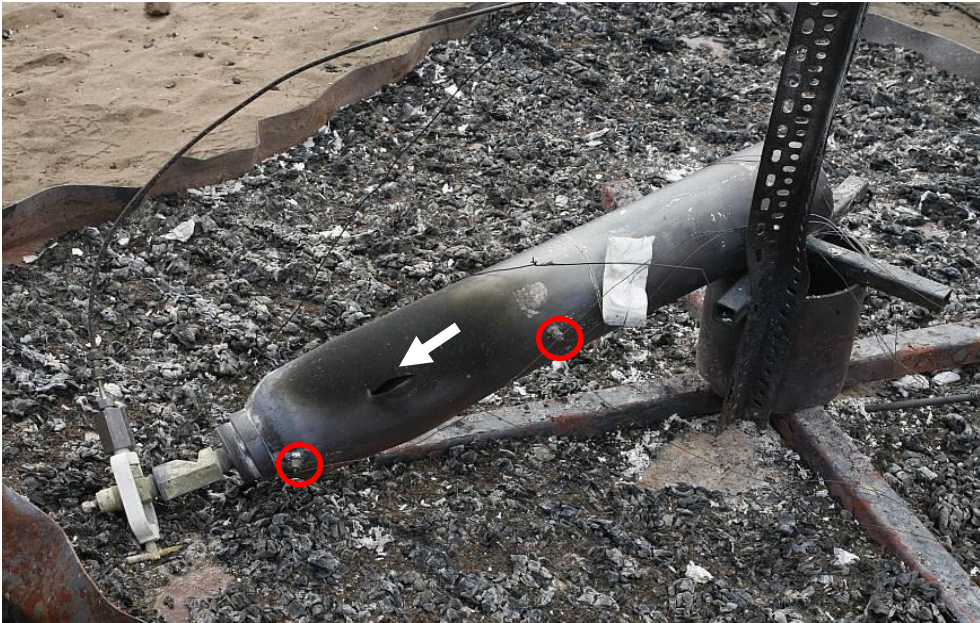
- Zerfall: 25 bara
- Bersten: 81 bara

Temperatur beim Zerfall:

- oben: 265 °C
- Mantel: 250 °C



10 L Flasche: Test 1



Partieller Riss
im oberen
Flaschendrittel

Unterfeuerungsversuche ohne Kühlung

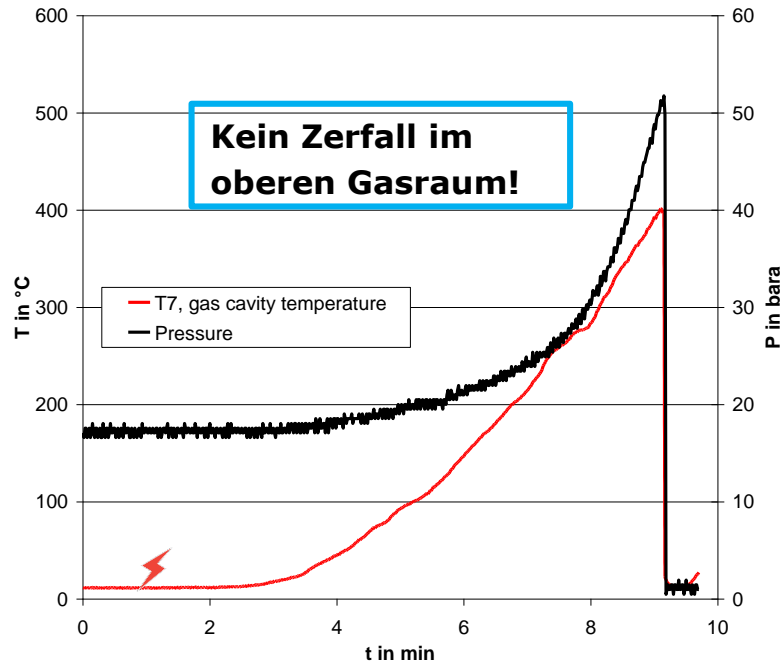
- 50 L Flasche
- Bersten mit BLEVE

50 L Flasche: Versuch 1



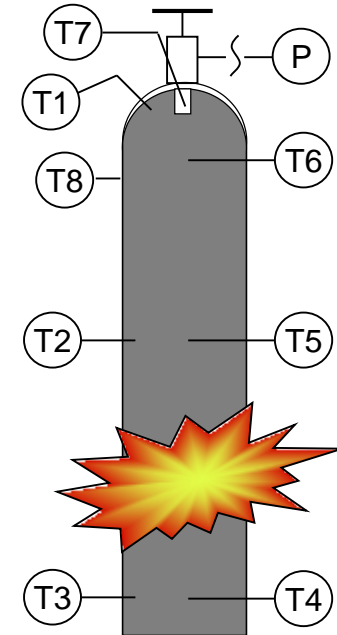
Bersten des Druckbehälters
→ BLEVE (Boiling Liquid
Expanding Vapour Cloud
Explosion)

50 L Flasche: Versuch 1



Zeit bis zum Bersten:
~8 min

Druck beim Bersten:
52 bara



50 L Flasche: Versuch 1

Fragment 1



Fragment 2



▲ Entfernung vom Feuer: 66 m

Ergebnisse „Unterfeuerung ohne Kühlung“

Unterfeuerungsversuche		Zerfall im Gasspalt			Bersten/Druckentlastung		
Nr.	V [L]	t [min]	T_Spalt [°C]	p [bara]	t [min]	T_Mantel [°C]	p [bara]
Test 1 - UL1	10	3	265	25	5	492	81
Test 2 - UL1	10	3	187	27	5	342	102
Test 3 - UL1	10	kein Zerfall beobachtet			5	570	126
Test 1 - UL1	50	kein Zerfall beobachtet			8	-	52
Test 2 - UL1	50	8	138	32	10	436	69
Test 3 - UL1	50	5	145	25	6	417	46
Test 1 - BOC	9	kein Zerfall beobachtet			4	485	28
Test 2 - BOC	9	11	105	23	15	470	38

Basierend auf diesen Ergebnissen wurde der Beginn der Kühlung festgelegt:

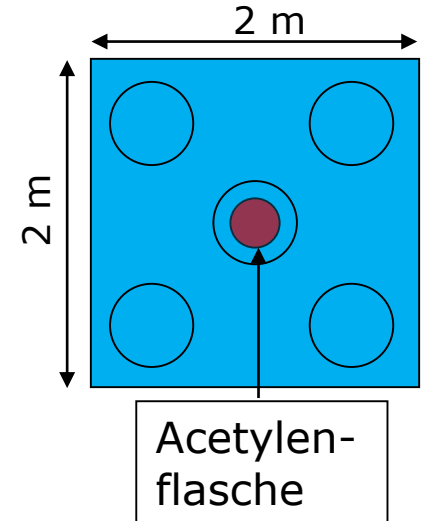
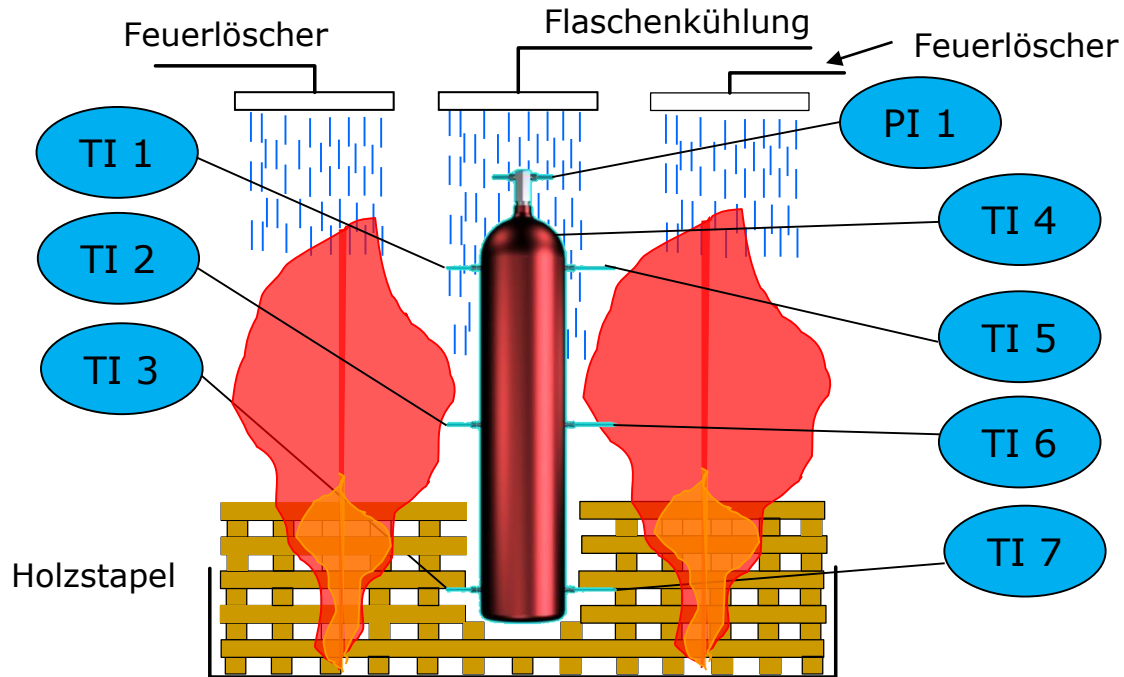
- 4 Minuten für 10 L Flaschen
- 5 Minuten für 50 L Flaschen

(unter Berücksichtigung von 40 s Verzögerung für Wasserversorgung)

Ferngesteuerte Holzstapellöschmaschine nach BAM-Art

(nicht patentiert ... noch nicht!)

Unterfeuerung mit Kühlung



Gerüst mit Schlitten



„fertiger Aufbau“



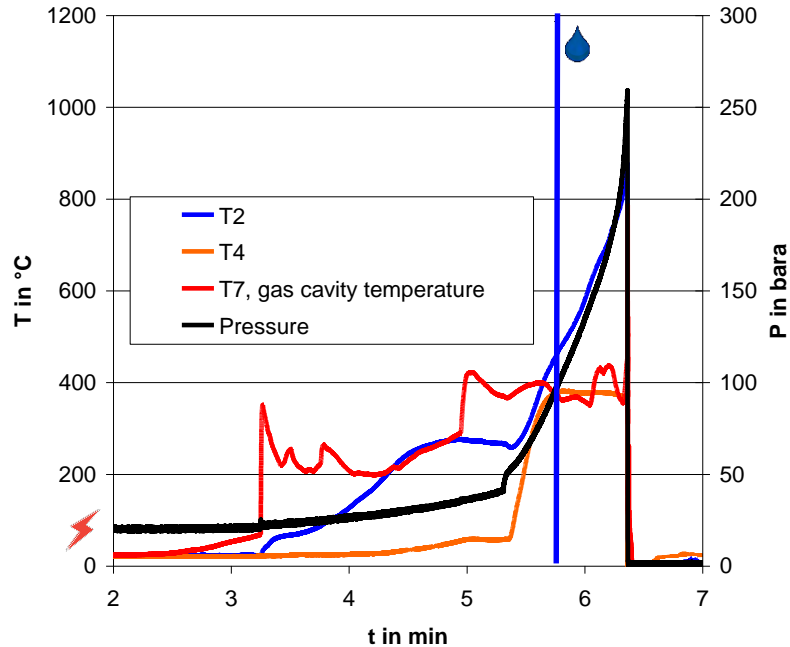
Unterfeuerungsversuche mit Kühlung

- 10 L Flaschen

10 L Flasche: Kühlversuch 1



10 L Flasche: Kühlversuch 1



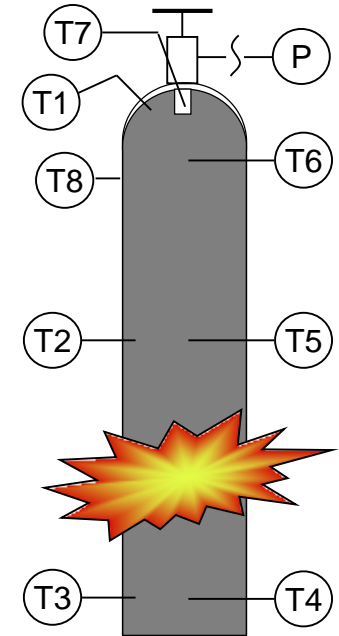
Zeit bis:

- Zerfall oben: ~2 min
- Bersten: ~5 min

Druck bei:

- Zerfall oben: 21 bara
- Bersten: **258 bara!!!**

- Kühlung (4 Minuten + 40 s) konnte ein Bersten nicht verhindern!
- **kein** Feuerball

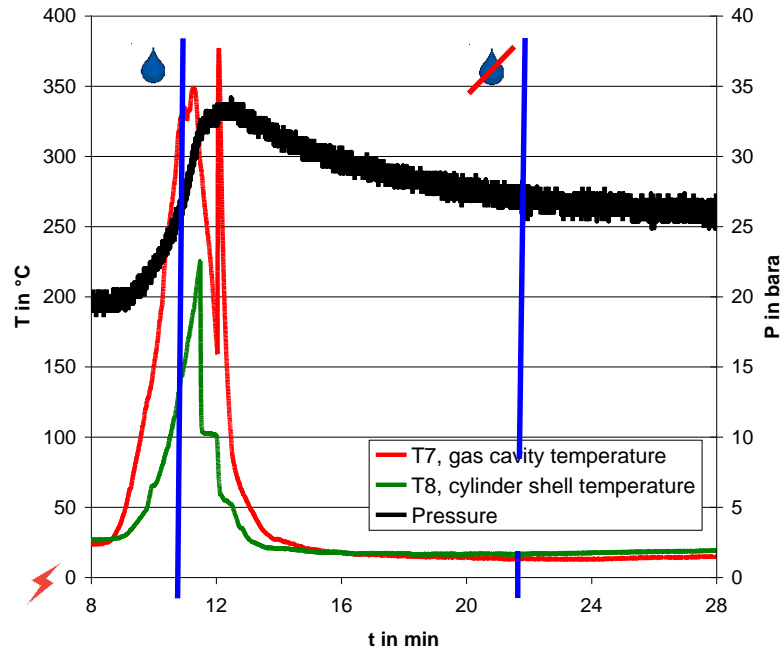


10 L Flasche: Cooling Test 1

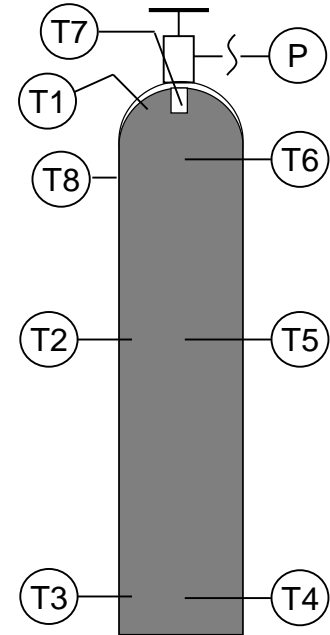


Fundort:
84 m entfernt vom
Unterfeuerungsort

10 L Flasche: Kühlversuch 2



Die **erfolgreiche** Wasserkühlung wurde **~12 min** betrieben, wurde aber kurz vor Zerfall im oberen Gasraum begonnen.

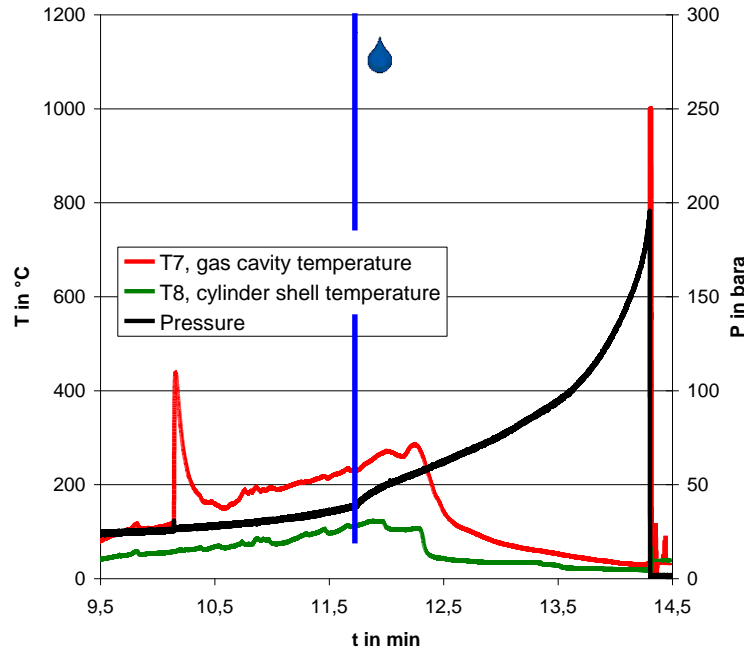


Unterfeuerungsversuche mit Kühlung

- 50 L Flaschen

Bersten trotz Kühlung

50 L Flasche: Kühlversuch 1



Zeit bis:

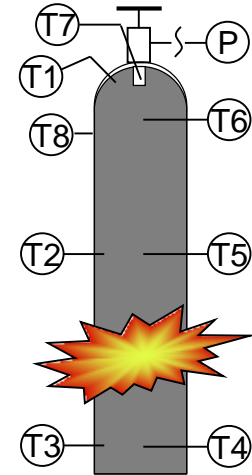
- Zerfall oben: ~3,5 min
- Bersten: ~8 min

Druck bei:

- Zerfall oben: 27 bara
- Bersten: 194 bara

Temperatur beim Zerfall:

- oben: 120 °C
- Mantel: 58 °C



- Kühlung (5 Minuten + 40 s) konnte ein Bersten nicht verhindern!
- großer Feuerball

Bersten trotz Kühlung



Fundort:
72 m entfernt vom
Unterfeuerungsort

Farbwechsel



Farbwechsel
während des
Kühlens



Reaktion scheint
rechts nach
unten
fortzuschreiten



Für alle vier Versuche konnte der selbe Schlitten verwendet werden



Grasnarbenbrand



Unterfeuerungsversuche		Zerfall im Gasspalt			Bersten/Druckentlastung		
Nr.	V [L]	t [min]	T_Spalt [°C]	p [bara]	t [min]	T_Mantel [°C]	p [bara]
Test 1 - UL1	10	3	265	25	5	492	81
Test 2 - UL1	10	3	187	27	5	342	102
Test 3 - UL1	10	kein Zerfall beobachtet			5	570	126
Test 1 - UL1	50	kein Zerfall beobachtet			8	-	52
Test 2 - UL1	50	8	138	32	10	436	69
Test 3 - UL1	50	5	145	25	6	417	46
Test 1 - BOC	9	kein Zerfall beobachtet			4	485	28
Test 2 - BOC	9	11	105	23	15	470	38

Kühlungsversuche		Beginn der Wasserkühlung			Bersten/Druckentlastung	
Nr.	V [L]	t [min]	p [bara]	Zerfall [Ja/Nein]	t [min]	p [bara]
Test 1 - UL1	10	4 + 40 s	135	Ja	5	258
Test 2 - UL1	10	3 + 40 s	32	Nein	gerettet	
Test 1 - UL1	50	5 + 40 s	57	Ja	8	194
Test 2 - UL1	50	4 + 40 s	51	Ja	5	62
Test 1 - BOC	9	20,5 + 40 s	39	Ja	gerettet	

„leere“ Acetylenflaschen im Feuer

UTM Umwelt-Technik-Recycling GmbH

Wie verhalten sich „leere“ Acetylenflaschen im Feuer?



-
- **Druckerhöhung durch Erwärmung der Gasphase**
 - **Ausdehnung der Flüssigphase**
 - **Temperaturgradient durch poröses Material**

Frage:

Wie lange muss eine **„leere“** Acetylenflasche unmittelbar einem Feuer ausgesetzt sein, bis sie birst?

„leere“ Acetylenflaschen im Feuer



„leere“ Acetylenflaschen im Feuer



Zusammenfassung

-
- Acetylenflaschen (leer oder voll) können bersten, wenn sie lange genug einem Feuer ausgesetzt sind
 - volle Flaschen reißen/bersten innerhalb von 15 min (direkt im Feuer)
 - leere Flaschen reißen/bersten innerhalb von 30 min (direkt im Feuer)
 - Aufreißen und Bersten erzeugen eine Druckwelle
 - Aufreißen kann eine mehrere Meter lange Stichflamme erzeugen
 - Bersten muss nicht mit einem Feuerball einhergehen
 - Lösemittel aus einer aufgerissenen Flasche kann noch stundenlang brennen

- Entscheidend ist der Druck in der Acetylenflasche und Temperatur des Stahlmantels (Verringerung der Zugfestigkeit mit steigender Temperatur)
Druck steigt durch Ausdehnung der Gas- und Flüssigphase
- Acetylenzerfall führt zu weiterem Druck- und Temperaturanstieg
- Kühlung verhindert nicht zwingend das Bersten der Flasche (45 bar „Regel“)
- Fragmente (i. d. R. max. 4 - 5 Teile) können bis zu 200 m weit fliegen
- Wegen der hohen Temperaturen und des langsamen Druckaufbaus ist das Material nicht spröde, sondern duktil – kein Schrappnell-Effekt

-
- So lange die Flasche im Feuer steht: wegbleiben
 - Wenn Feuer gelöscht oder Flasche nicht mehr im Feuer: mit reichlich Wasser kühlen
 - Sicherstellen, dass es eine Acetylenflasche ist (die noch intakt ist...)
 - Wenn ja: nach angemessener Kühldauer (1 h) prüfen, ob sie noch Wärme erzeugt (Benetzung, IR-Kamera, sichtbare Veränderungen der Farbe usw.)
 - Wenn ja: Flasche gefährlich, weiter kühlen
 - Wenn Flasche nach einer Stunde Kühlung noch intakt ist und keine Wärme erzeugt → **Verringerung der Sperrzone**

-
- Protokoll in der „FRS guidance“ bzw. „HazMat“ in UK verankert
 - einheitliche Verfahrensanweisung soll entsprechend kommuniziert werden
-
- **Frage: Wie sieht das Protokoll in Deutschland aus?**

- Bei längerer Beaufschlagung eines Acetylenbehälters mit über 100 °C → Druckgefäßzerknall
- Beim Bersten entsteht Feuerball mit 30 m Durchmesser und Behälterteile fliegen bis zu 300 m weit

Sicherheitsabstände:

- 30 m für Einsatzkräfte unter PA und Hitzeschutzkleidung und „stabiler“ Deckung
- 50 m für Einsatzkräfte mit „stabiler“ Deckung
- 300 m für Personen ohne Deckung

Auszug aus „Taschenbuch Einsatzdienst“ der Berliner Feuerwehr

- Flaschen möglichst nicht erschüttern
- Nur unbedingt notwendiges Personal in der näheren Umgebung der betroffenen Gasflasche einsetzen
- Gefahrenbereich: Direkt angrenzende Gebäude sowie im Freien einen Umkreis von ca. 300 m sofort räumen!
- Nach 30 min ununterbrochenen Kühlen Prüfen, ob die Flasche kühl bleibt: ggf. Wärmebildkamera oder Fernthermometer einsetzen, hierfür das Kühlen für 5 - 10 min unterbrechen.
- Bleibt die Flasche kalt, kann die Flasche geborgen und in ein Wasserbad (Ventil möglichst höher als der Flaschenfuß gelagert) gelegt werden.
Ansonsten → weiterkühlen

Auszug aus Merkblatt der Vereinigung zur Förderung des Deutschen Brandschutzes e. V. (vfdb)

- Wegen der Zersetzungsgefahr sind Gasflaschen-Bergebehälter für Acetylenflaschen ungeeignet und nicht zugelassen!



**Nicht ganz
korrekt!**



Bergungsbehälter GASTOR Typ M
(UTM GmbH)

Propangasflaschen im Feuer

Auswirkungen im Versagensfall



- Wohnungsbrand
- Während der Löscharbeiten kommt es zum Versagen einer „haushaltsüblichen 13kg-Gasflasche“
- 6 Verletzte, davon 5 Feuerwehrangehörige



Quelle: <http://www.marinspompiersdemarseille.com/>
<http://www.dailymotion.com/LaProvence>

Brand Maschinenhalle mit Explosion

05.10.2016 08:55 Uhr

Heute Morgen wurden die Berufsfeuerwehr Augsburg sowie die Freiwillige Feuerwehr Gersthofen zu einer brennenden Maschinenhalle in der Mühlhauser Straße gerufen. Schon auf der Anfahrt konnten die Einsatzkräfte eine starke Rauchentwicklung feststellen. Bei den sofort eingeleiteten Löscharbeiten kam es zu einer Explosion durch eine vom Feuer erhitzte Gasflasche. Bei dieser Explosion wurde zum Glück keine Einsatzkraft verletzt. Der Brand neben einer Maschinenhalle wurde mit 3 C- Druckluftschaumrohren bekämpft und schließlich gelöscht. Eine zweite dem Feuer ausgesetzte Gasflasche wurde von den Einsatzkräften ebenfalls mittels Strahlrohr gekühlt. Die Außenseite der Halle wurde durch das Feuer ebenfalls beschädigt, was eine aufwendige Suche nach Glutnestern mit Wärmebildkamera und Laserthermometer nach sich zog. Durch die Lage der Einsatzstelle wurde vorsorglich der Abrollbehälter Wasser (7000 Liter) sowie ein Tanklöschfahrzeug der Freiwilligen Feuerwehr Gersthofen (5000 Liter) mitalarmiert.

100.000 Euro geschätzt.

Die Polizei hat die genaue Ursachenermittlung aufgenommen.

Quelle: <http://www.feuerwehr-augsburg.net>
Quelle: <http://www.der-tagesspiegel.de>

FwDV-500 „Einheiten im ABC – Einsatz“

Pkt. 1.5.3.5 Gefahren- und Absperrbereich

- Gefahrenbereich: kürzester Abstand ca. 50 m
- Absperrbereich: kürzester Abstand ca. 100 m

Pkt. 4.3.2.3 Maßnahmengruppen (MG) - MG 2 „Gasförmige Stoffe“: Flüssiggastankwagen, Druckgaskesselwagen und Industrietanks:

- Gefahrenbereich: 300 m
- Absperrbereich: 1000 m

vfdb Merkblatt

„Empfehlung für den
Feuerwehreinsatz bei Gefahr
durch Flüssiggas“ – Seite 8

2.6 Sicherheitsabstände bei Flüssiggasunfällen und -bränden

Behälter Art	Volumen (m ³)	größte Lagermasse (kg)	Abstand für Einsatzkräfte unter Wärmeschutzkleidung (m)	Gefahrenbereich (m)	Ab-sperrbereich (m)
Druckgasflaschen	< 0,08	33	25	50	100
Gasbetr. KFZ	0,1	40	25	100	200
Priv. Versorgungsanlage/ Kompaktanlage	2,7 – 6,4	1200 - 2900	100*	200	400
Einzel-LKW 5 t Ladegewicht	6 - 11	2500 - 5000	100*	200	400
LKW mit Anhänger/ Sattelzüge	20 - 36	9000 - 16000	200*	400	800
Eisenbahnkesselwagen	von 62 bis 110	26000 46000	300*	600	1200
Speicheranlagen und Binnenschiffe	< 250 < 1000 > 1000	100000 430000 > 430000	>300* > 300* 500*	>600 >600 >800	1500 2000 2500

* Zum Instellungbringen von Wasserwerfern und Monitoren ggf. zu unterschreiten.
Eine Unterschreitung der Sicherheitsabstände bei ausreichender Deckung ist möglich.
Vereinzelt treten bei Gasflaschen bereits Wurfweiten von Flaschentrümmern bis zu 800 m auf.

Versuche

Vollunterfeuerung 11kg-Propangasflaschen

- 15 identische, handelsübliche 11kg-Propangasflaschen, ohne Sicherheitsventil (PRD)
- Unterfeuerungsmethode: liegend, je 5 Versuche mit Holz-, Benzin- und Propanfeuer



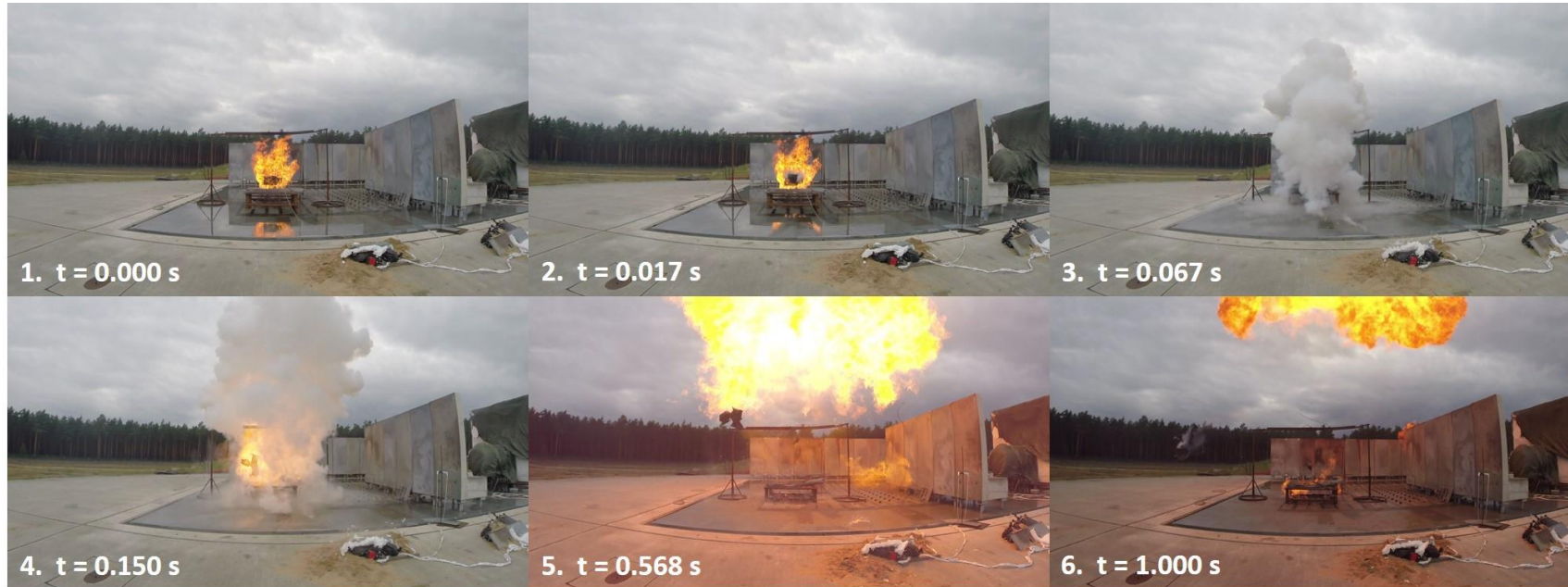
Beispiel Übersicht:



Beispiel Nahbereich:



Beispielversuch Propanunterfeuerung



Behälterversagen bei Unterfeuerung mittels Propanbrenner (Sequenz)

Ergebnisse

Druck & Temperatur

Berstdruck (p_b) der Behälter: $p_b = (70,7 - 98,2)$ bar (mind.: $p_b = 50$ bar)

Unverdämmte Druckwirkung auf das Umfeld:

- in 5 m Entfernung: $p = (0,049 - 0,267)$ bar

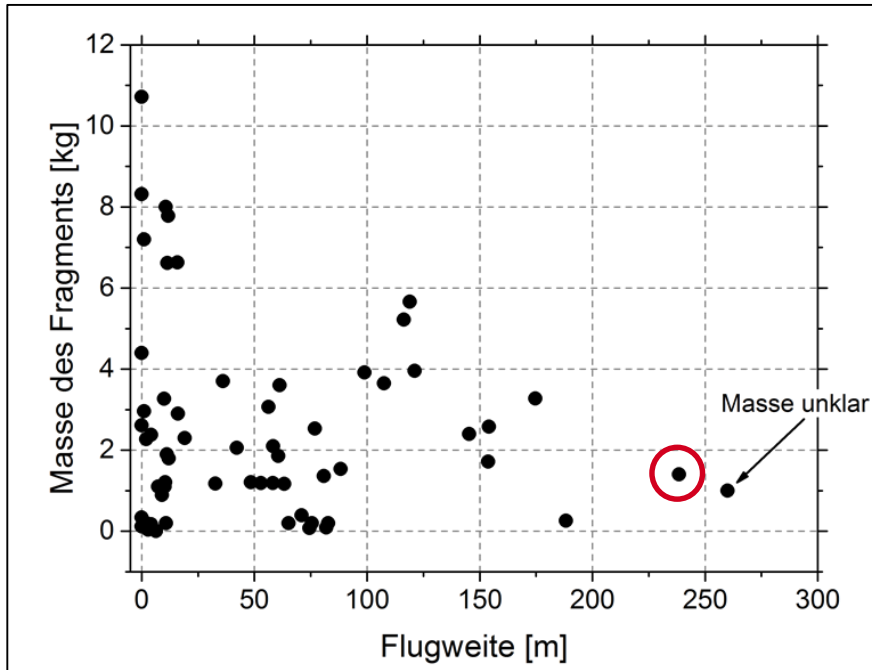
- in 9 m Entfernung: $p = (0,035 - 0,098)$ bar

→ $0,1$ bar = 10.000 Pa = 10.000 N/m²

Durchmesser Feuerball: $d > 20$ m

Temperatur 9 m Entfernung: kurzzeitig $T > 200^\circ\text{C}$

Ergebnisse Fragmentwurf



- 15 Gasflaschen fragmentieren in insgesamt 61 (größere) Teile.
- Die maximal ermittelte Flugweite lag bei ca. 260 m.



-
1. Im Freien ist mit einem Trümmerwurf von deutlich über 200 m zu rechnen (Tümmerwurf = Hauptgrund für mortale Verletzungen)!
 2. Im Falle eines Behälterversagens ist ein Feuerball > 20 m zu erwarten!
 3. Die unverdämmte Druckwirkung in 5 m Entfernung (max.: 0,267 bar) reicht aus:
 - um Personen umzustoßen (0,01 bar)
 - Scheiben zu zerstören (100% bei 0,05 bar)
 - zu einem Trommelfellriß zu führen (0,175 bar)
 - 24er Mauerwerk zu zerstören (0,25 bar)
 4. Im verdämmten Fall (z. B. Gebäude) ist mit deutlich stärkeren Druckwirkungen zu rechnen!

CoFi-ABV

Projektkurzbeschreibung

Ausgangsszenario

- Unfall eines Fahrzeugs mit alternativen Treibstoffkonzepten



Erkennen von Gefahren

- Gaswolkendetektion mit Flugdrohne



Auswirkung beim Versagen

- Gaswolkenexplosion
- BLEVE/Bersten
- Druckwirkung, Strahlung, Fragmente



CoFi-ABV

Anwenderbeteiligung

Ein Ziel des Forschungsvorhabens sind anwendungsorientierte Ergebnisse.

Daher findet ein regelmäßiger Austausch (Workshops, Newsletter, Projektpräsentationen,...) mit Vertretern von Feuerwehren, Hilfsorganisationen und Unfallversicherern statt.

Nächster Workshop: 15.11.2016, 10 - 16 Uhr, Berlin

Bei Interesse an Infomaterial, Workshopteilnahme oder Aufnahme in den Newsletterverteiler sprechen Sie uns einfach an!

Vielen Dank für die Aufmerksamkeit!



Fragen?

