

Explosionsdruckstoßfestigkeit von Transporttanks

Gemeinsame RID/ADR-Tagung

Genf, September 2008



Bundesanstalt für
Materialforschung
und -prüfung

Gefahrguttanks
und
Unfallmechanik

J. Ludwig

Folie Nr. 1

Explosionen in geschlossenen Behältern - Festlegung der Randbedingungen

Ausgangspunkt:

**Explosionen entzündbarer Gas/Luft- bzw. Dampf/Luft-Gemische
bei geringen Ausgangsdrücken**

Gesichtspunkte in bezug auf

- Nebel
- Stäube
- chemisch instabile Stoffe
- reine Gas/Sauerstoff bzw. Dampf/Sauerstoff-Gemische, mit Sauerstoff angereicherte Luft-Gemische
- erhöhte Ausgangsdrücke (mehr als 0,2 bar Überdruck)
- erhöhte Temperaturen

entfallen.



Bundesanstalt für
Materialforschung
und -prüfung

Gefahrguttanks
und
Unfallmechanik

J. Ludwig

Folie Nr. 2

Explosionsvoraussetzungen

Vorhandensein eines explosiblen Gas/Luft- oder Dampf/Luft-Gemisches bestimmter Konzentration und Verteilung in einem Tank sowie einer ausreichenden Zündquelle innerhalb oder - bei geöffnetem Tank - außerhalb des Tanks



Bundesanstalt für
Materialforschung
und -prüfung

Gefahrgut tanks
und
Unfallmechanik

J. Ludwig

Folie Nr. 3

Unfälle mit Transporttanks

Beispiel 1:

Reinigen eines Tanks und Verbleiben von Lösungsmittelresten im Tankinneren, Belüftung des Tanks infolge Temperaturabsenkung über ein Vakuumventil, Schweißarbeiten am Tank mit entsprechender (lokaler) Erwärmung als Zündquelle.

Beispiel 2:

Entlasten eines Tanks, indem sich bereits explosives Gemisch befindet, über eine Entspannungseinrichtung; Zündung des abströmenden Gemisches außerhalb des Tanks durch eine beliebige Zündquelle (z.B. elektrischer Entladungsfunken, offene Flamme usw.).



Bundesanstalt für
Materialforschung
und -prüfung

Gefahrgut tanks
und
Unfallmechanik

J. Ludwig

Folie Nr. 4

Schutzmaßnahmen gegen Explosionen

1. Vorbeugender Explosionsschutz

- Maßnahmen, welche die Bildung explosibler Gemische einschränken oder verhindern
- Maßnahmen, welche die Zündung explosibler Gemische verhindern

2. Konstruktiver Explosionsschutz

- Konstruktive Maßnahmen, welche die Auswirkung einer Explosion auf ein unbedenkliches Maß beschränken



Bundesanstalt für
Materialforschung
und -prüfung

Gefahrgutanks
und
Unfallmechanik

J. Ludwig

Folie Nr. 5

Konstruktive Explosionsschutzmaßnahmen

1. Explosionsfeste (explosionsdruckfeste bzw. explosionsdruckstoßfeste) Bauweise

2. Explosionsdruckentlastung

3. Explosionsunterdrückung

4. Verhinderung der Explosionsübertragung (flammendurchschlagsichere Einrichtungen)



Bundesanstalt für
Materialforschung
und -prüfung

Gefahrgutanks
und
Unfallmechanik

J. Ludwig

Folie Nr. 6

Grundlage; RID/ADR

ADR/RID, Absatz 4.3.4.1.1:

Tanks für Stoffe mit einem Flammpunkt bis höchstens 60°C – z.B. Benzin (Ottokraftstoff), Roherdöl, Düsenkraftstoff, Dieselmotorkraftstoff, Heizöl usw. – mit nicht absperrbarer Lüftungseinrichtung müssen in der Lüftungseinrichtung eine Flammendurchschlagsicherung haben oder explosionsdruckstoßfest sein.

ADR, Absatz 4.3.2.2.4:

Soweit Tanks zur Beförderung flüssiger Stoffe nicht durch Trenn- oder Schwallwände in Abteile von höchstens 7 500 l Fassungsraum unterteilt sind, müssen sie entweder zu mindestens 80 % oder zu höchstens 20 % ihres Fassungsraums gefüllt sein.

ADR, Absatz 6.8.2.1.22, Satz 2:

Die Fläche der Schwallwand muss mindestens 70 % der Querschnittsfläche des Tanks betragen, in dem sich die Schwallwand befindet.



Bundesanstalt für
Materialforschung
und -prüfung

Gefahrgut-tanks
und
Unfallmechanik

J. Ludwig

Folie Nr. 7

Explosionsdruckstoßfestigkeit - Definition und Nachweismöglichkeiten

Definition:

Transporttanks sind explosionsdruckstoßfest gebaut, wenn nachgewiesen ist, dass sie einer Explosion im Inneren standhalten ohne aufzureißen; dabei sind bleibende Verformungen zulässig.

Nachweismöglichkeiten:

1. Berechnung aller drucktragenden Teile des Tanks mit dem höchsten auftretenden Explosionsdruck p_{ex} und 1,3facher Sicherheit gegen die Zugfestigkeit R_m ; anwendbar nur für Tanks ohne Einbauten (z.B. Schwallwände)
2. Experimentelle Prüfung, beispielsweise durch eine Explosion mit explosionsfähigstem Ethylen/Luft-Gemisch im Tank bei Einhaltung des Kriteriums 1,3fache Sicherheit gegen die Zugfestigkeit R_m .



Bundesanstalt für
Materialforschung
und -prüfung

Gefahrgut-tanks
und
Unfallmechanik

J. Ludwig

Folie Nr. 8

Explosionsdruckstoßfestigkeit - Bemessungsgrundlagen

Der Explosionsdruck ist stoffabhängig und abhängig vom Ausgangsdruck, bei dem die Zündung im Tank erfolgt.

Der höchste auftretende Explosionsdruck p_{ex} ergibt sich nach folgender Beziehung:

$$p_{ex} = |p_{ex0}| \cdot p_a - 1 \text{ (in bar, Überdruck)}$$

$$p_{ex0} = p_{ex} \text{ bei einem Ausgangsdruck } p_a \text{ von 1 bar (abs.)}$$

$$p_{ex0} = 9,9 \text{ bar (abs.) für das explosionsfähigste Ethylen/Luft-Gemisch (} p_{ex} \approx 10 \text{ bar)}$$

$$p_a = \text{absoluter Ausgangsdruck (in bar)}$$

Annahme: p_a ist abhängig von der Größe - dem Durchmesser d - der betriebsmäßig freien Öffnung, durch die eine Flamme in den Tank zurückschlagen kann:

d [mm]	p_a [bar]
≤ 25	1,10
≤ 50	1,15
≤ 80	1,20

⇒

p_{ex} [bar]
10,0
10,5
11,0



Bundesanstalt für
Materialforschung
und -prüfung

Gefahrgut tanks
und
Unfallmechanik

J. Ludwig

Folie Nr. 9

Optimierungsproblem Explosionsschutz - Beispiel Straßenverkehr

Eine Beförderungseinheit besteht aus dem Basisfahrzeug, dem Tank und der Füllung.

Die höchstzulässige Gesamtmasse einer Beförderungseinheit beträgt nach StVZO $m_{max} = 40 \text{ t}$.

Der Schutz gegen Explosionen im Tankinneren ist durch Flammendurchschlagsicherungen oder explosionsdruckstoßfeste Bauweise des Tanks zu gewährleisten.

Zielkonflikt:

- Ziel konstruktiver Auslegungen von Beförderungseinheiten: Verringerung der Taramassen von Basisfahrzeugen und Tanks
- Nachteil explosionsdruckstoßfester Bauweise: Erhöhung der Taramasse der Tanks

Lösung:

- Optimierung von Bemessungsgrundlagen und Nachweismöglichkeiten
- Konstruktive Optimierungen der Tanks auf analytischer und experimenteller Basis



Bundesanstalt für
Materialforschung
und -prüfung

Gefahrgut tanks
und
Unfallmechanik

J. Ludwig

Folie Nr. 10

Forschungs- und Entwicklungsarbeiten, Untersuchungen und Prüfungen

- Integrale Simulation von Explosionen in realen Transporttanks und einem druckfesten Versuchstank, partiell mit Einbau von Tankkomponenten wie Schwallwänden,
- Optimierung von Tankkonstruktionen, Ableitung analytischer Bewertungs- und Auslegungsmöglichkeiten von Tanks.
- Überprüfung der Ausgangsparameter und Ermittlung der Kennwerte des Explosionsablaufs in einem druckfesten Versuchstank,



Bundesanstalt für
Materialforschung
und -prüfung

Gefahrgut tanks
und
Unfallmechanik

J. Ludwig

Folie Nr. 11

Versuche mit realen Transporttanks

33 Versuche

davon

- 28 Explosionsversuche
- 5 Wasserdruckversuche
- 21 Explosionsversuche mit Tanks

davon

- 4 Versuche mit zylindrischen Tanks ohne Einbauten
- 3 Versuche mit zylindrischen Tanks mit Trennboden
- 12 Versuche mit zylindrischen Tanks mit Schwallwänden und Trennboden
- 2 Versuche mit kofferrörmigem Tank mit Schwallwand und Trennboden

13 der 21 Versuche mit Tanks fanden auf Antragsbasis statt



Bundesanstalt für
Materialforschung
und -prüfung

Gefahrgut tanks
und
Unfallmechanik

J. Ludwig

Folie Nr. 12

Versuchsfilm 1



Bundesanstalt für
Materialforschung
und -prüfung

Gefahrgut tanks
und
Unfallmechanik

J. Ludwig

Folie Nr. 13

Tanks ohne Einbauten

Einführung in die Spannungsbewertung bei plastischer Verformung

Selbst wenn der Tank nicht explodiert und damit keine über die Zugfestigkeit R_m hinausgehenden Beanspruchungen - also lediglich bleibende Verformungen - erleidet, kann zunächst keine Aussage darüber getroffen werden, ob die Beanspruchungen unterhalb der Schwelle „1,3fache Sicherheit gegen die Zugfestigkeit R_m “ liegen.

Hierzu ist eine Bewertung der tatsächlich auftretenden Beanspruchungen durch den Explosionsversuch erforderlich. Diese Spannungsbewertung - Bewertung der Anstrengung des Tankwerkstoffes durch den Explosionsdruck - kann in weitgehender Analogie zur Bestimmung von Deformationen bei elastischer Beanspruchung, denen das Hooksche Gesetz

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E}$$

zu Grunde liegt, vorgenommen werden.



Bundesanstalt für
Materialforschung
und -prüfung

Gefahrgut tanks
und
Unfallmechanik

J. Ludwig

Folie Nr. 14

Tanks ohne Einbauten

Spannungsbewertung bei plastischer Verformung (I)

1. Voraussetzung: Messung des Explosionsdrucks und der dadurch hervorgerufenen Dehnungen
Annahme: Membranspannungszustand

2. Dreiachsiger Spannungszustand, plastischer Bereich, Deformationsgleichungen (Gesetz von Hencky)

$$\varepsilon_{xp} = \frac{1}{3G_p} \cdot \left(\sigma_x - \frac{\sigma_y + \sigma_z}{2} \right)$$

$$\varepsilon_{yp} = \frac{1}{3G_p} \cdot \left(\sigma_y - \frac{\sigma_x + \sigma_z}{2} \right)$$

$$\varepsilon_{zp} = \frac{1}{3G_p} \cdot \left(\sigma_z - \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} \right)$$



Bundesanstalt für
Materialforschung
und -prüfung

Gefahrtanks
und
Unfallmechanik

J. Ludwig

Folie Nr. 15

Tanks ohne Einbauten

Spannungsbewertung bei plastischer Verformung (II)

3. Membranspannungszustand

$$\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z = \text{Hauptspannungen (keine Biegung)}$$

$$\sigma_z, \varepsilon_{zp} = 0 \text{ bzw. vernachlässigbar}$$

4. Reduzierung, zweiachsiger Spannungszustand

Deformationsgleichungen

Hauptspannungen

$$\varepsilon_{xp} = \frac{1}{3G_p} \cdot \left(\sigma_x - \frac{\sigma_y}{2} \right)$$

$$\sigma_x = G_p \cdot (4\varepsilon_{xp} + 2\varepsilon_{yp})$$

$$\varepsilon_{yp} = \frac{1}{3G_p} \cdot \left(\sigma_y - \frac{\sigma_x}{2} \right)$$

$$\sigma_y = G_p \cdot (2\varepsilon_{xp} + 4\varepsilon_{yp})$$



Bundesanstalt für
Materialforschung
und -prüfung

Gefahrtanks
und
Unfallmechanik

J. Ludwig

Folie Nr. 16

Tanks ohne Einbauten

Spannungsbewertung bei plastischer Verformung (III)

5. (variabler) Plastizitätsmodul

$$\varepsilon_{vp} = \frac{1}{3} \frac{\sigma_v}{G_p} \quad \text{bzw.} \quad G_p = \frac{1}{3} \frac{\sigma_v}{\varepsilon_{vp}}$$

σ_v und ε_{vp} sind auf den einachsigen Vergleichszustand bezogen.

6. Ermittlung der Vergleichdehnung
Hauptformänderung (Volumendilatation)

$$\phi_x + \phi_y + \phi_z = 0$$

$$\phi = \ln(1 + \varepsilon_p)$$

$$\varepsilon_{xp}, \varepsilon_{yp} = \text{gemessen}$$



Bundesanstalt für
Materialforschung
und -prüfung

Gefahrgut tanks
und
Unfallmechanik

J. Ludwig

Folie Nr. 17

Tanks ohne Einbauten

Spannungsbewertung bei plastischer Verformung (IV)

$$\phi_z = -(\phi_x + \phi_y)$$

$$\phi_v = \sqrt{\frac{2}{3} (\phi_x^2 + \phi_y^2 + \phi_z^2)}$$

$$\phi_v = \ln(1 + \varepsilon_{vp})$$

$$\varepsilon_{vp} = e^{\phi_v} - 1$$



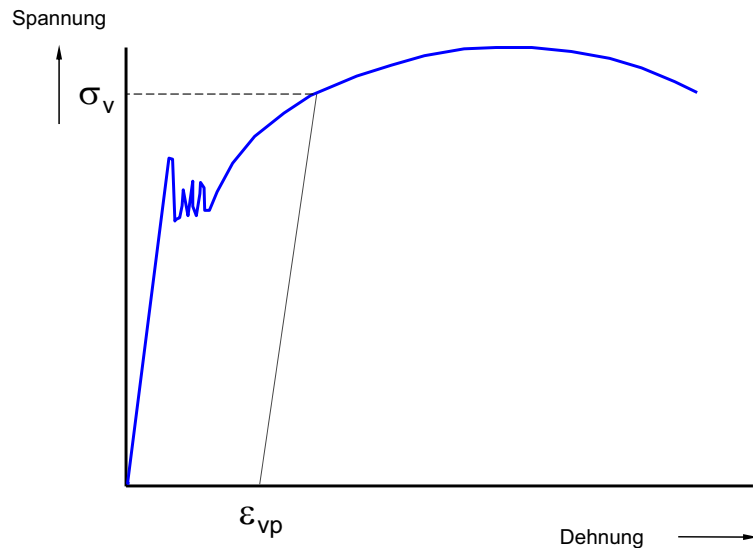
Bundesanstalt für
Materialforschung
und -prüfung

Gefahrgut tanks
und
Unfallmechanik

J. Ludwig

Folie Nr. 18

Spannungs-Dehnungs-Diagramm (einachsiger Zugversuch)



Bundesanstalt für
Materialforschung
und -prüfung

Gefahrgut tanks
und
Unfallmechanik

J. Ludwig

Folie Nr. 19

Tanks ohne Einbauten

Spannungsbewertung bei plastischer Verformung (V)

7. Ermittlung der Vergleichsspannung

Aus dem im (einachsigen) Zugversuch ermittelten Spannungs-Dehnungs-Diagramm für den Tankwerkstoff lässt sich mit der Vergleichsdehnung ε_{vp} die zugehörige Vergleichsspannung σ_v bestimmen und damit der Plastizitätsmodul G_p unter Versuchsbedingungen berechnen.

Mit G_p und den gemessenen Dehnungen ε_{xp} und ε_{yp} in den Hauptspannungsrichtungen sind nunmehr Umfangsspannung σ_x und Längsspannung σ_y bestimmbar.



Bundesanstalt für
Materialforschung
und -prüfung

Gefahrgut tanks
und
Unfallmechanik

J. Ludwig

Folie Nr. 20

Tanks ohne Einbauten

Spannungsbewertung bei plastischer Verformung (VI)

8. Bestimmung des Explosionsdruckes

Aus der „Kesselformel“ für Innendruckbelastungen einer zylindrischen Tankschale

$$\sigma_x = \frac{p_{ex} \cdot D}{20 \cdot e} \quad \text{bzw.} \quad p_{ex} = \frac{20 \cdot \sigma_x \cdot e}{D}$$

lässt sich mit ermittelter Umfangsspannung σ_x bei gegebenen Tankabmessungen der Explosionsdruck p_{ex} bestimmen.



Bundesanstalt für
Materialforschung
und -prüfung

Gefahrguttanks
und
Unfallmechanik

J. Ludwig

Folie Nr. 21

Tanks ohne Einbauten

Spannungsbewertung bei plastischer Verformung (VII)

Es ergeben sich auf diese Weise:

- eine redundante Möglichkeit zur Bestimmung des Explosionsdruckes aus gemessenen Dehnungen für den Fall des Ausfalls der direkten Druckmessung,
- eine Kontrollmöglichkeit in Bezug auf korrekte Versuchsdurchführung,
- ggf. Hinweise auf eine erhöhte Explosionsfestigkeit bzw. das Verhalten der Tanks bei größerer Verformungsgeschwindigkeit.

Es empfiehlt sich:

- redundante Dehnungsmessungen (Anbringen von Vergleichsmaßstäben, Wanddickenmessungen) für den Fall des Ausfalls der direkten Dehnungsmessungen vorzunehmen.



Bundesanstalt für
Materialforschung
und -prüfung

Gefahrguttanks
und
Unfallmechanik

J. Ludwig

Folie Nr. 22

Ergebnisse der Berechnung des Explosionsdruckes auf der Grundlage von Dehnungsmessungen



Bundesanstalt für
Materialforschung
und -prüfung

Gefahrgut tanks
und
Unfallmechanik

Versuchs- Nummer	Druck (gemessen) p_{ex} [bar]	Druck (berechnet) p_{ex} [bar]
1	-	9,0
3	> 10,3	11,4
5	10,3	10,6
21	9,1	9,2
1	10,4	10,4
30	15,5	14,8

J. Ludwig

Folie Nr. 23

Tanks ohne Einbauten



Bundesanstalt für
Materialforschung
und -prüfung

Gefahrgut tanks
und
Unfallmechanik

Spannungsbewertung bei plastischer Verformung (VIII)

9. Spannungsbewertung

Anhand der ermittelten Werte für σ_x (und ggf. für σ_y) lässt sich bewerten, ob der (zylindrische) Teil eines Tanks als explosionsdruckstoßfest gelten kann.

Dies ist dann der Fall, wenn σ_x bei Berücksichtigung erforderlicher Sicherheitsbeiwerte genügend klein gegenüber der vorhandenen Zugfestigkeit R_m bzw. der zulässigen Spannung

$$\sigma_{zul} = \frac{R_m}{1,3} \quad \text{bzw.} \quad \sigma_{erf} \leq \sigma_{zul} = \frac{R_m}{1,3}$$

für den verwendeten Tankwerkstoff ist.

J. Ludwig

Folie Nr. 24

Explosionen in geschlossenen Behältern - Explosionskenngrößen und -parameter

1. Explosionskenngrößen:

- Explosionsdruck
- Druckanstiegsgeschwindigkeit
- Explosionsheftigkeit

2. Explosionsparameter:

Zündart:

- Brennmomentzündung im Tank
- Zündung durch Flammeneintritt
- Flammenstrahlzündung

Zündort:

- zentral
- am Rand
- außerhalb des Tanks

Geometrie:

- Längen/Durchmesser Verhältnis (L/D)
- Oberflächen/Volumen-Verhältnis (O/V)

Druck (Vor- bzw. Ausgangsdruck)

Konzentration (Ethylenkonzentration)

Turbulenzgrad (Einbauten)



Bundesanstalt für
Materialforschung
und -prüfung

Gefahrguttanks
und
Unfallmechanik

J. Ludwig

Folie Nr. 25

Explosionskenngrößen - Volumenabhängigkeit der maximalen Druckanstiegsgeschwindigkeit

$$K_G = \left(\frac{dp}{dt} \right)_{\max} \cdot V^{\frac{1}{3}} = \text{const.}$$

mit

$$K_G = \text{Explosionsheftigkeit} \left[\frac{\text{bar}}{\text{s} \cdot \text{m}} \right]$$

$$\left(\frac{dp}{dt} \right)_{\max} = \text{max. Druckanstiegsgeschwindigkeit} \left[\frac{\text{bar}}{\text{s}} \right]$$

$$V = \text{Behälter - /Kammervolumen} \left[\text{m}^3 \right]$$



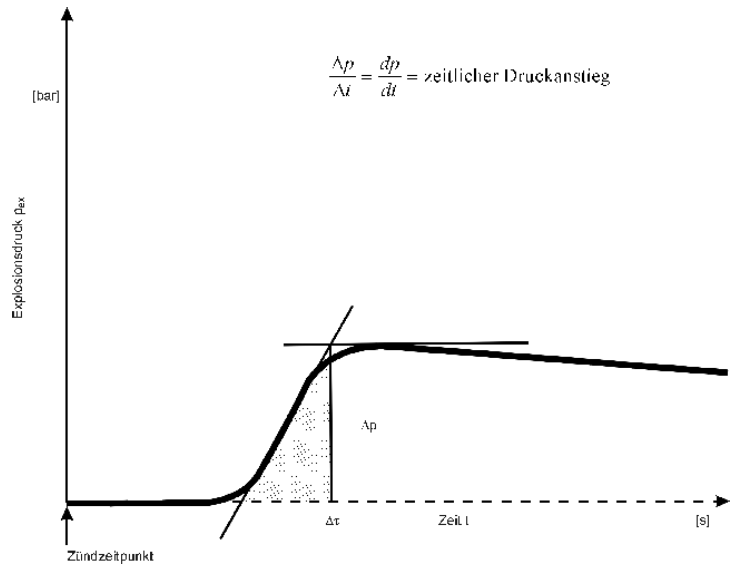
Bundesanstalt für
Materialforschung
und -prüfung

Gefahrguttanks
und
Unfallmechanik

J. Ludwig

Folie Nr. 26

Bestimmung der Druckanstiegsgeschwindigkeit (zeitlicher Druckanstieg)



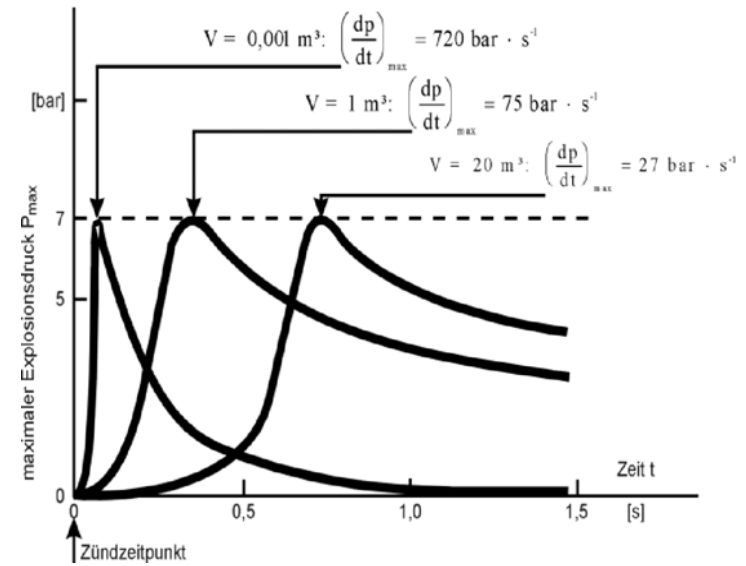
Bundesanstalt für
Materialforschung
und -prüfung

Gefahrgut tanks
und
Unfallmechanik

J. Ludwig

Folie Nr. 27

Volumeneinfluß auf Brenngasexplosionen (Propan-Explosionen, stöchiometrisches Gemisch)



Bundesanstalt für
Materialforschung
und -prüfung

Gefahrgut tanks
und
Unfallmechanik

J. Ludwig

Folie Nr. 28

Versuche mit dem Versuchstank

56 Versuche, davon:

48 Versuche ohne Einbauten, davon ausgewertet:

- 3 Versuche zur experimentellen Bestätigung des Ausgangsdrucks,
- 1 Versuch zur Wirksamkeit verwendeter Flammensperren,
- 15 Versuche zum Einfluss der Zündart,
- 6 Versuche zum Einfluss der Größe betriebsmäßig freier Öffnungen,
- 34 Versuche zum Einfluss des Zündortes,
- 11 Versuche zum Einfluss des Längen-/Durchmesserverhältnisses,
- 26 Versuche zum Einfluss des Ausgangsdrucks,
- 4 Versuche zum Einfluss der Ethylen-Konzentration;

8 Versuche mit Einbauten (Schwallwände) zur Ermittlung des Einflusses

- des Überdeckungsgrades,
- der Öffnungsanzahl je Schwallwand.



Bundesanstalt für
Materialforschung
und -prüfung

Gefahrguttanks
und
Unfallmechanik

J. Ludwig

Folie Nr. 29

Explosionsdruckfester Versuchstank



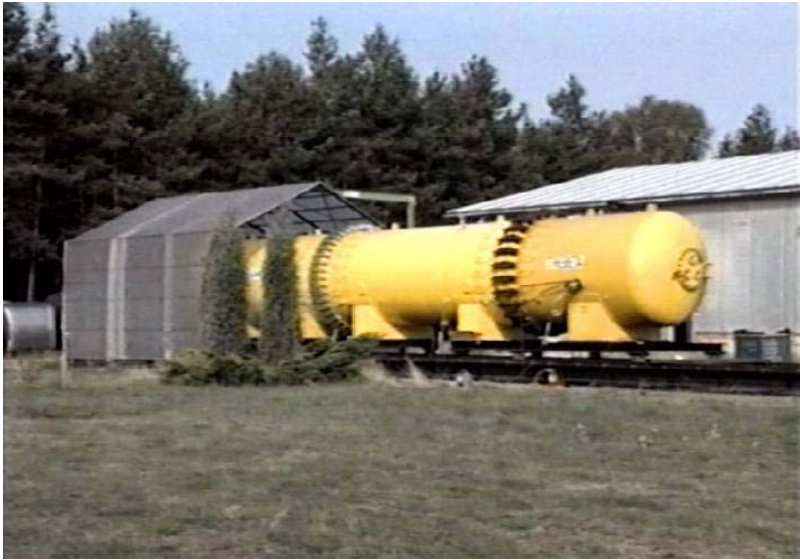
Bundesanstalt für
Materialforschung
und -prüfung

Gefahrguttanks
und
Unfallmechanik

J. Ludwig

Folie Nr. 30

Versuchsfilm 2



Bundesanstalt für
Materialforschung
und -prüfung

Gefahrguttanks
und
Unfallmechanik

J. Ludwig

Folie Nr. 31

Ergebnisse I - Überprüfung von Basisannahmen



Bundesanstalt für
Materialforschung
und -prüfung

Gefahrguttanks
und
Unfallmechanik

J. Ludwig

Folie Nr. 32

1. Erforderlicher Ausgangsdruck:

$$p_a \leq 0,03 \text{ bar}$$

$$p_{ex} \leq 9 \text{ bar}$$

dp/dt und K_G -Wert ergeben sich günstiger als
bei der ursprünglichen Bemessungsgrundlage

2. Eignung verwendeter Flammensperren:

Erforderlich: Dauerbrandsichere Flammendurchschlagsicherungen

3. Einfluss großer Öffnungen:

Mannlöcher entsprechen Druckentlastungseinrichtungen

Ergebnisse II – Tanks ohne Einbauten

1. Explosionskenngrößen sind Funktionen der Konzentration
2. Explosionskenngrößen sind nicht vom Zündort abhängig
3. Dehnungen/Dehnungsgeschwindigkeiten:
Explosionsdruckstoß entspricht einer quasistatischen Druckbeaufschlagung

Voraussetzungen

- Zündart Flammeneintritt
- Ausgangsdruck $p_a \sim 0$ bar
- $L/D \leq 6$
- $O/V \sim 2,1$ bis $2,2$
- Druckentlastung durch freie Öffnung



Bundesanstalt für
Materialforschung
und -prüfung

Gefahrgut tanks
und
Unfallmechanik

J. Ludwig

Folie Nr. 33

Ergebnisse III – Tanks mit Einbauten

1. Explosionskenngrößen dp/dt und K_G -Wert sind abhängig
 - vom Überdeckungsgrad der Schwallwand
 - von der Größe der größten Schwallwandöffnung
 - von der Anzahl der Schwallwandöffnungen
2. Explosionsdruck p_{ex} ist weitgehend unabhängig von diesen Parametern
3. Dehnungen/Dehnungsgeschwindigkeiten
Explosionsdruckstoß quasistatische Druckbeaufschlagung

Voraussetzungen

- Zündart Flammeneintritt
- Ausgangsdruck $p_a \sim 0$ bar
- $L/D \leq 6$
- $O/V \sim 2,1$ bis $2,2$
- Druckentlastung durch freie Öffnung
- Optimierte konstruktive Gestaltung und Fertigung



Bundesanstalt für
Materialforschung
und -prüfung

Gefahrgut tanks
und
Unfallmechanik

J. Ludwig

Folie Nr. 34

Explosionsdruckstoßfestigkeit - erweiterte Nachweismöglichkeiten

1. Berechnung

Berechnung aller drucktragender Teile des Tanks mit dem höchsten auftretenden Explosionsdruck p_{ex} und

- 1,3facher Sicherheit gegen die Zugfestigkeit oder
- 1facher Sicherheit gegen die Streckgrenze

Analytische Optimierung der Tankschale mit dem höchsten auftretenden Explosionsdruck p_{ex} unter Anwendung eines Beiwertes möglich.

Unter bestimmten konstruktiven Bedingungen und/oder bei Vorliegen separater experimenteller Nachweise können die Berechnungsmöglichkeiten auch bei Tanks mit Einbauten Verwendung finden.



Bundesanstalt für
Materialforschung
und -prüfung

Gefahrguttanks
und
Unfallmechanik

J. Ludwig

Folie Nr. 35

Explosionsdruckstoßfestigkeit - Bemessungsgrundlagen

Der Explosionsdruck ist stoffabhängig und abhängig vom Ausgangsdruck, bei dem die Zündung im Tank erfolgt.

Als Ausgangsdruck kann $p_a = 1$ bar (abs.) angenommen werden.

Daher ergibt sich als höchster Explosionsdruck p_{ex} der als Stoffkonstante ermittelte p_{ex0} .

Für stoffunabhängige Bewertungen ist $p_{ex0} = 9,9$ bar (abs.) für das explosionsfähigste Ethylen/Luft-Gemisch (also $p_{ex} \approx 10$ bar (abs.)) zugrunde zu legen.



Bundesanstalt für
Materialforschung
und -prüfung

Gefahrguttanks
und
Unfallmechanik

J. Ludwig

Folie Nr. 36

Optimierung des Durchmesser/Wanddickenverhältnisses

Kriterien für explosionsfeste Bauweise:

1. Explosionsdruckstoßfeste Bauweise: $\sigma_{zul} = \frac{R_m}{1,3}$

2. Explosionsdruckfeste Bauweise (I): $\sigma_{zul} = \frac{R_e}{1,0}$

3. Explosionsdruckfeste Bauweise (II): $\sigma_{zul} = \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot R_e$

4. Grenzkriterium (I): $\frac{R_e}{R_m} = 0,77$

5. Grenzkriterium (II): $\frac{R_e}{R_m} = 0,67$

6. Abschnittskriterium: $\frac{R_e}{R_m} = 0,85$



Bundesanstalt für
Materialforschung
und -prüfung

Gefahrgut tanks
und
Unfallmechanik

J. Ludwig

Folie Nr. 37

Optimierung des Durchmesser/Wanddickenverhältnisses

$$\frac{D_a}{e} = \text{maximum} \left\{ 19,63 \cdot \frac{R_e}{p_{ex}} ; 13,08 \cdot \frac{R_m}{p_{ex}} \right\}$$

abgeleitet aus:

$$\sigma_x = \frac{p_{ex} \cdot D_a}{20 \cdot e \cdot v}$$

mit

$$\sigma_x = \text{maximum} \left\{ \frac{2}{\sqrt{3}} R_e ; \frac{R_m}{1,3} \right\}$$

und

$$v = 0,85$$



Bundesanstalt für
Materialforschung
und -prüfung

Gefahrgut tanks
und
Unfallmechanik

J. Ludwig

Folie Nr. 38

Tanksegment mit eingebauter Schwallwand



Bundesanstalt für
Materialforschung
und -prüfung

Gefahrgut tanks
und
Unfallmechanik

J. Ludwig

Folie Nr. 39

Versuche mit verschiedenen Schwallwänden

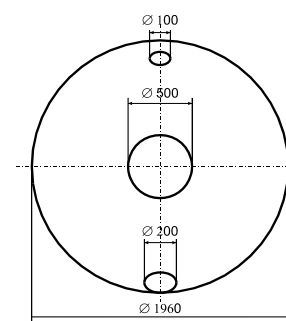


Bundesanstalt für
Materialforschung
und -prüfung

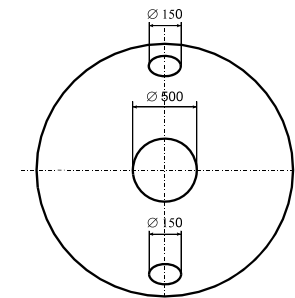
Gefahrgut tanks
und
Unfallmechanik

J. Ludwig

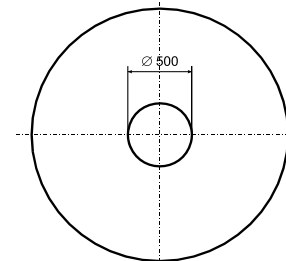
Folie Nr. 40



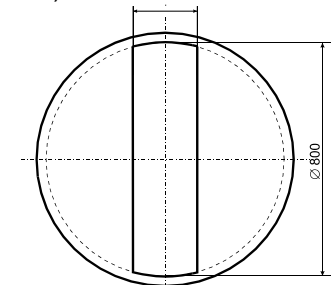
a) Versuch Nr. 39



b) Versuche Nr. 40 und 44



c) Versuche Nr. 56 und 57



d) Versuche Nr. 53, 54 und 55

Beispiel: Versuchstank mit verschiedenen Einbauten



Bundesanstalt für
Materialforschung
und -prüfung

Gefahrgut tanks
und
Unfallmechanik

Versuch Nr.	Nr. 40	Nr. 53
Rezipient	K1 = C, K2 = A	K1 = C, K2 = A + B
Einbauten	1 SW/3 Ö	1 SW/1 Ö
Überdeckungsgrad f	92 %	71 %
Einbauart	K1/K2	K1/K2
Zündort	Z1	Z1
Zündart	Flammenstrahl	Flammeneintritt
p_a [bar(abs.)]	1,2	1,0
c [Vol.-%]	7,7	8,0
p_{ex} [bar(abs.)]	12,9	9,6
$(dp/dt)_{max}$ [bar/s]	844	68
K_G -Wert [bar · m/s]	2384	228

J. Ludwig

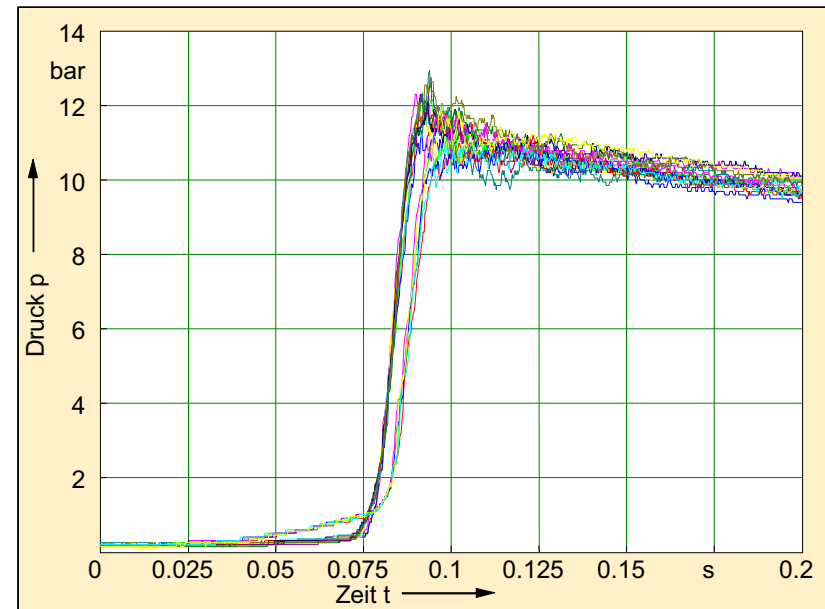
Folie Nr. 41

Druckverläufe bei Versuch Nr. 40



Bundesanstalt für
Materialforschung
und -prüfung

Gefahrgut tanks
und
Unfallmechanik

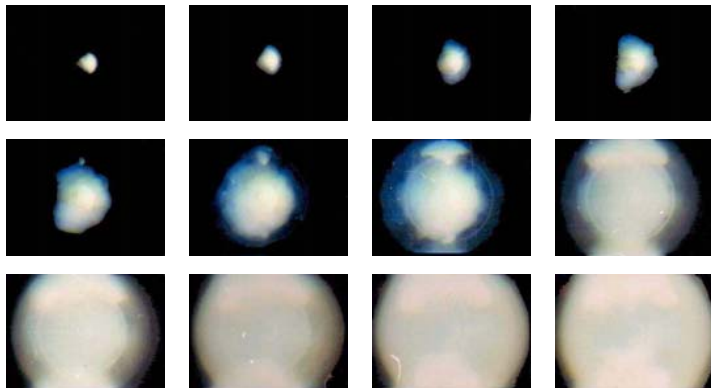


J. Ludwig

Folie Nr. 42

Durchtritt der Flammenfront durch die Schwallwand mit 3 Öffnungen

(Versuch Nr. 39, $\Delta t = 1 \text{ ms}$)



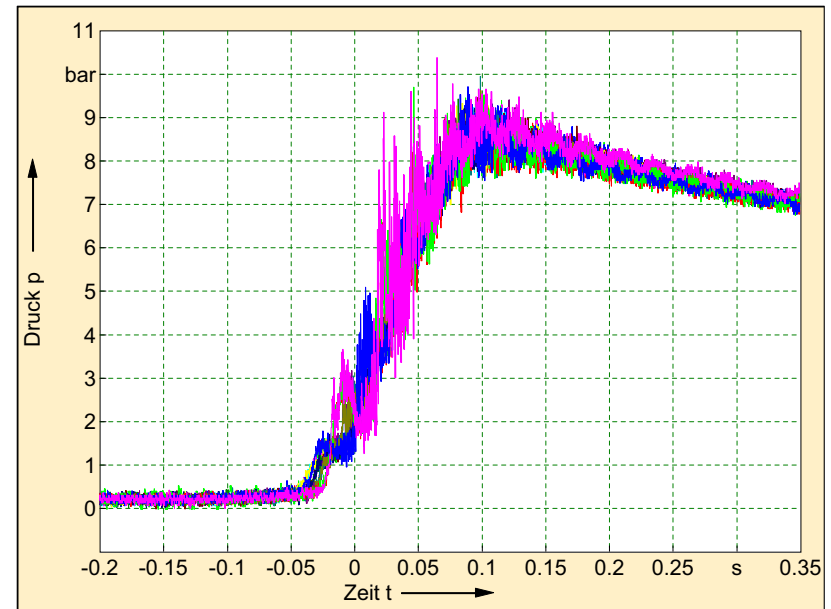
Bundesanstalt für
Materialforschung
und -prüfung

Gefahrgut tanks
und
Unfallmechanik

J. Ludwig

Folie Nr. 43

Druckverläufe bei Versuch Nr. 53



Bundesanstalt für
Materialforschung
und -prüfung

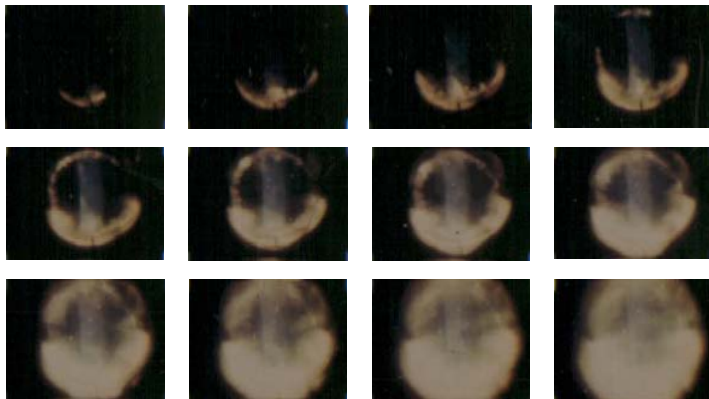
Gefahrgut tanks
und
Unfallmechanik

J. Ludwig

Folie Nr. 44

Durchtritt der Flammenfront durch die Schwallwand mit einer Öffnung

(Versuch Nr. 55, $\Delta t = 2,7$ ms)



Bundesanstalt für
Materialforschung
und -prüfung

Gefahrgut tanks
und
Unfallmechanik

J. Ludwig

Folie Nr. 45

Impressum

BAM
Unter den Eichen 87
D-12205 Berlin

Jörg Ludwig
phone: +49 (0) 30/8104-1320
fax: +49 (0) 30/8104-1327
E-Mail: joerg.ludwig@bam.de



Bundesanstalt für
Materialforschung
und -prüfung

Gefahrgut tanks
und
Unfallmechanik

J. Ludwig

Folie Nr. 46