

**INLAND TRANSPORT COMMITTEE**

Working Party on the Transport of Dangerous Goods

Joint Meeting of the RID Committee of Experts and the  
Working Party on the Transport of Dangerous Goods

Geneva, 15-19 September 2008  
Agenda Item 2

**TANKS**

**Interpretation of 6.8.2.2.3**

**Transmitted by the Government of Germany**

1. In OTIF/RID/RC/2007/36 respectively ECE/TRANS/WP.15/AC.1/2007/36 Belgium noticed that the criterion of resistance to explosion according to par. 6.8.2.2.3 RID/ADR could result in construction requirements that differ widely from one Contracting Party to another. Belgium proposed therefore to ask the Working Group on Tanks to determine the methods by which resistance to explosion must be demonstrated.
  2. As discussed under TOP 5 at the 2007 September session of the tank working group (INF. 52) and announced by the Chairman Germany would like to provide the Joint Meeting with a background paper for the further discussion of the approach given by INF. 23 (2007).
  3. It is proposed that an editorial amended INF.23 will be taken in the pressure tank standard EN 14025 under a separate item "Explosion-pressure-shock-proofness".
-

# Explosion-pressure proofness of transport tanks

RID/ADR Joint Meeting

Geneva, September 2008



Federal Institute for  
Materials Research  
and Testing

Tanks for Dangerous  
Goods, Accidental  
Mechanics

J. Ludwig

Sheet no. 1

# Explosions in closed containers - establishing the basic conditions

**Starting point:**

## Explosions of flammable gases/air or vapour/air mixtures at low initial pressures

Factors in relation to

- Vapour
- Dust
- Chemically unstable substances
- Pure gases/oxygen or vapour/oxygen mixtures, air mixtures enriched with oxygen
- Higher initial pressures (more than 0.2 bar excess pressure)
- Higher temperatures

have not been taken into account.



Federal Institute for  
Materials Research  
and Testing

Tanks for Dangerous  
Goods, Accidental  
Mechanics

J. Ludwig

Sheet no. 2

## Conditions for an explosion

Presence of an explosive gas/air or vapour/air mixture of a particular concentration and dispersion in a tank and of an effectual source of ignition inside or – if the tank is open - outside the tank



Federal Institute for  
Materials Research  
and Testing

Tanks for Dangerous  
Goods, Accidental  
Mechanics

J. Ludwig

Sheet no. 3

## Accidents involving transport tanks

### Example 1:

Cleaning of a tank and remains of solvent residues inside the tank, ventilation of the tank as a result of temperature reduction through a vacuum valve, welding work on the tank with corresponding (local) heating as a source of ignition.

### Example 2:

Discharging a tank already containing an explosive mixture using a relief device; ignition of the dispersing mixture outside the tank by an arbitrary source of ignition (e.g. electrical discharge sparks, naked flame etc.).



Federal Institute for  
Materials Research  
and Testing

Tanks for Dangerous  
Goods, Accidental  
Mechanics

J. Ludwig

Sheet no. 4

## Measures to protect against explosions

### 1. Preventative protection against explosion

- Measures which limit or prevent the formation of explosive mixtures
- Measures which prevent the ignition of explosive mixtures

### 2. Constructional protection against explosion

- Constructional measures which limit the effect of an explosion to a harmless level



Federal Institute for  
Materials Research  
and Testing

Tanks for Dangerous  
Goods, Accidental  
Mechanics

J. Ludwig

Sheet no. 5

## Constructional measures to protect against explosion

### 1. Explosion-proof (explosion-pressure proof or explosion-pressure shock-proof) construction

### 2. Explosion pressure relief

### 3. Explosion suppression

### 4. Prevention of transmission of explosion (flame arresting devices)



Federal Institute for  
Materials Research  
and Testing

Tanks for Dangerous  
Goods, Accidental  
Mechanics

J. Ludwig

Sheet no. 6

## Basis; RID/ADR

### ADR/RID 4.3.4.1.1:

**Tanks for substances having a flash-point of not more than 60°C – e.g. petrol (motor spirit), petroleum crude oil, aviation fuel, diesel, heating oil etc. – with a venting system that cannot be shut off shall be fitted with a flame trap in the venting system or shall be explosion-pressure-shock-proof.**

### ADR 4.3.2.2.4:

Where shells intended for the carriage of liquids are not divided by partitions or surge plates into sections of not more than 7 500 litres capacity, they shall be filled to not less than 80% or not more than 20% of their capacity.

### ADR 6.8.2.1.22, second sentence:

The area of the surge plate shall be at least 70% of the cross-sectional area of the tank in which the surge plate is fitted.



Federal Institute for  
Materials Research  
and Testing

Tanks for Dangerous  
Goods, Accidental  
Mechanics

J. Ludwig

Sheet no. 7

## Explosion-pressure proofness - definition and means of proof

### Definition:

Tanks for transport have an explosion-pressure proof construction if it can be demonstrated that they can withstand an internal explosion without rupturing; however, permanent deformation is permissible.

### Means of proof:

1. Calculation of all pressure-bearing parts of the tank with the maximum occurring explosion pressure  $p_{ex}$  and 1.3 times safety in relation to tensile strength  $R_m$ ; only applicable to tanks without fittings (e.g. surge plates).
2. Experimental testing, e.g. by means of an explosion with most explosive ethylene/air mixture in the tank, maintaining the 1.3 times safety in relation to tensile strength  $R_m$  criterion.



Federal Institute for  
Materials Research  
and Testing

Tanks for Dangerous  
Goods, Accidental  
Mechanics

J. Ludwig

Sheet no. 8

## Explosion-pressure proofness - design criteria

**Explosion-pressure is dependent upon the substance and the initial pressure at which ignition in the tank occurs.**

The maximum occurring explosion-pressure  $p_{ex}$  is derived from the following equation:

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

$$p_{ex0} = p_{ex} \text{ at an initial pressure } p_a \text{ of 1 bar (abs.)}$$

$$p_{ex0} = 9.9 \text{ bar (abs.) for the most explosive ethylene/air mixture (} p_{ex} \approx 10 \text{ bar)}$$

$$p_a = \text{absolute initial pressure (in bar)}$$

Supposition:  $p_a$  depends on the size - diameter  $d$  - of the aperture open under normal operating conditions, through which a flame is able to flashback:

$d$ [mm]	$p_a$ [bar]
$\leq 25$	1.10
$\leq 50$	1.15
$\leq 80$	1.20

⇒

$p_{ex}$ [bar]
10.0
10.5
11.0



Federal Institute for  
Materials Research  
and Testing

Tanks for Dangerous  
Goods, Accidental  
Mechanics

J. Ludwig

Sheet no. 9

## Explosion protection optimisation problem - example of road transport

A transport unit consists of the base vehicle, the tank and the load.

In accordance with the German Road Transport Approvals Act (StVZO), the maximum permissible total mass of a transport unit is  $m_{max}$  40 tons.

Protection against explosions inside the tank is to be ensured by means of flame arresters or explosion-pressure-shock-proof tank construction.

Conflict of objectives:

- Aim of constructional design of transport units: reduction of tare weights of base vehicles and tanks
- Disadvantage of explosion-pressure-shock-proof construction: Increased tare weight of tank

Solution:

- Optimisation of calculation criteria and means of proof
- Constructional optimisation of tanks on analytical and experimental basis



Federal Institute for  
Materials Research  
and Testing

Tanks for Dangerous  
Goods, Accidental  
Mechanics

J. Ludwig

Sheet no. 10

## Research and development work, investigations and tests

- Integral simulation of explosions in real transport tanks and a pressure resistant test tank, partly with installation of tank components, such as surge plates,
- Optimisation of tank constructions, derivation of analytical tank evaluation and design possibilities,
- Examination of the starting parameters and determination of the characteristic values of the explosive process in a pressure resistant test tank.



Federal Institute for  
Materials Research  
and Testing

Tanks for Dangerous  
Goods, Accidental  
Mechanics

J. Ludwig

Sheet no. 11

## Tests with real transport tanks

33 Tests

of which

- 28 explosion tests
- 5 hydraulic pressure tests
- 21 explosion tests with tanks

of which

- 4 tests with cylindrical tanks without fittings
- 3 tests with cylindrical tanks with dividing wall
- 12 tests with cylindrical tanks with surge plates and dividing end
- 2 tests with a box-shaped tank with surge plate and dividing end

13 of the 21 tests with tanks were carried out on request



Federal Institute for  
Materials Research  
and Testing

Tanks for Dangerous  
Goods, Accidental  
Mechanics

J. Ludwig

Sheet no. 12

## Test film 1



Federal Institute for  
Materials Research  
and Testing

Tanks for Dangerous  
Goods, Accidental  
Mechanics

J. Ludwig

Sheet no. 13

## Tanks without fittings

### Introduction to stress evaluation in plastic deformation

Even if the tank does not explode and does not therefore suffer any stresses above and beyond the tensile strength  $R_m$  – i.e. if it only suffers permanent deformation – it cannot initially be stated whether the stresses are less than the “1.3 times safety in relation to tensile strength  $R_m$ ” threshold.

For this, it is necessary to evaluate the actual stresses that occur in the explosion test. This stress evaluation – assessment of the strain on the tank material caused by the pressure of the explosion – can be carried out largely by analogy with how deformations as a result of elastic stress are evaluated, for which Hooke's law forms the basis.

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



Federal Institute for  
Materials Research  
and Testing

Tanks for Dangerous  
Goods, Accidental  
Mechanics

J. Ludwig

Sheet no. 14



## Tanks without fittings

### Stress evaluation in plastic deformation (I)

1. Requirement: Measurement of the explosion pressure and of the elongations it causes  
Supposition: Membrane stress condition
2. Tri-axial stress condition, plastic field, deformation equations (Hencky's law)

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

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

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



Federal Institute for  
Materials Research  
and Testing

Tanks for Dangerous  
Goods, Accidental  
Mechanics

J. Ludwig

Sheet no. 15

## Tanks without fittings

### Stress evaluation in plastic deformation (II)

3. Membrane stress condition

$$\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z = \text{main stresses (no bending)}$$

$$\sigma_z, \varepsilon_{zp} = 0/\text{negligible}$$

4. Reduction, biaxial stress condition

Deformation equations

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

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

Main stresses

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

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



Federal Institute for  
Materials Research  
and Testing

Tanks for Dangerous  
Goods, Accidental  
Mechanics

J. Ludwig

Sheet no. 16

## Tanks without fittings

### Stress evaluation in plastic deformation (III)

5. (variable) modulus of plasticity

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

$\sigma_v$  and  $\varepsilon_{vp}$  are based on the uniaxial comparative state.

6. Evaluation of the comparative elongation

Main deformation (volume expansion)

$$\varphi_x + \varphi_y + \varphi_z = 0$$

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

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



Federal Institute for  
Materials Research  
and Testing

Tanks for Dangerous  
Goods, Accidental  
Mechanics

J. Ludwig

Sheet no. 17

## Tanks without fittings

### Stress evaluation in plastic deformation (IV)

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

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

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

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



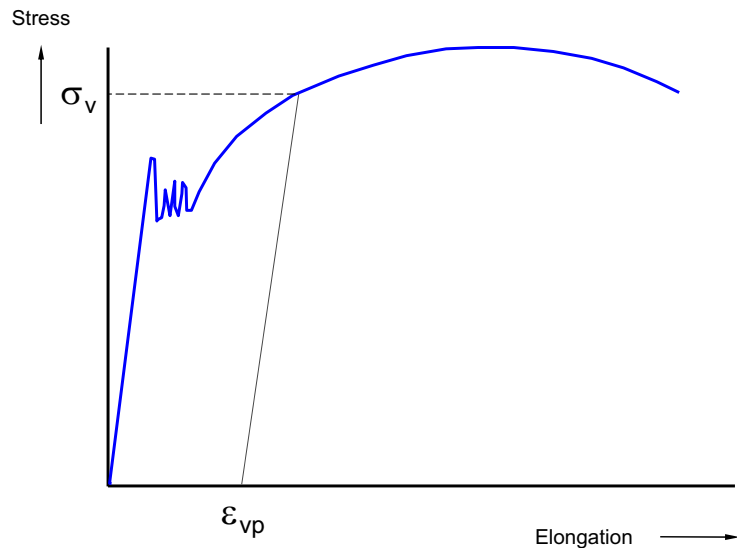
Federal Institute for  
Materials Research  
and Testing

Tanks for Dangerous  
Goods, Accidental  
Mechanics

J. Ludwig

Sheet no. 18

## Stress-Elongation Diagram (uniaxial tensile test)



Federal Institute for  
Materials Research  
and Testing

Tanks for Dangerous  
Goods, Accidental  
Mechanics

J. Ludwig

Sheet no. 19

## Tanks without fittings

### Stress evaluation in plastic deformation (V)

#### 7. Evaluation of the comparative stress

From the stress-elongation diagram for the tank material derived from the (uniaxial) tensile test, the comparative stress  $\sigma_v$  associated with the comparative elongation  $\epsilon_{vp}$  can be determined and hence the modulus of plasticity  $G_p$  can be calculated under test conditions.

With  $G_p$  and the elongations  $\epsilon_{xp}$  and  $\epsilon_{yp}$  measured in the main directions of stress, circumferential stress  $\sigma_x$  and longitudinal stress  $\sigma_y$  can now be ascertained.



Federal Institute for  
Materials Research  
and Testing

Tanks for Dangerous  
Goods, Accidental  
Mechanics

J. Ludwig

Sheet no. 20

## Tanks without fittings

### Stress evaluation in plastic deformation (VI)

#### 8. Ascertaining the explosion pressure

The explosion pressure  $p_{\text{ex}}$  can be determined from the “boiler formula” for internal pressure loads of a cylindrical tank shell

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

with the circumferential stress  $\sigma_x$  calculated for given tank dimensions.



Federal Institute for  
Materials Research  
and Testing

Tanks for Dangerous  
Goods, Accidental  
Mechanics

J. Ludwig

Sheet no. 21

## Tanks without fittings

### Stress evaluation in plastic deformation (VII)

There thus results:

- a redundant possibility of determining the explosion pressure from measured elongations in the case where direct pressure measurement fails,
- an opportunity of carrying out checks concerning the correct performance of the test,
- if necessary, information on increased resistance to explosion or the behaviour of the tank at a greater rate of deformation.

It is recommended:

- to carry out redundant elongation measurements (application of standards of comparison, wall thickness measurements) in the case where direct elongation measurements fail.



Federal Institute for  
Materials Research  
and Testing

Tanks for Dangerous  
Goods, Accidental  
Mechanics

J. Ludwig

Sheet no. 22

## Results of calculating the explosion-pressure on the basis of elongation measurements



Federal Institute for  
Materials Research  
and Testing

Tanks for Dangerous  
Goods, Accidental  
Mechanics

Test number	Pressure (measured) $p_{ex}$ [bar]	Pressure (calculated) $p_{ex}$ [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

Sheet no. 23

## Tanks without fittings



Federal Institute for  
Materials Research  
and Testing

Tanks for Dangerous  
Goods, Accidental  
Mechanics

### Stress evaluation in plastic deformation (VIII)

#### 9. Stress evaluation

Using the values determined for  $\sigma_x$  ( and, if necessary, for  $\sigma_y$ ), an assessment can be made as to whether the (cylindrical) part of a tank can be considered as explosion-pressure proof.

This can be considered to be the case if  $\sigma_x$ , taking into account the available tensile strength  $R_m$  or the permissible stress

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

is sufficiently small for the tank material used.

J. Ludwig

Sheet no. 24

## Explosions in closed containers - Explosion characteristics and parameters

### 1. Explosion characteristics:

- Explosion-pressure
- Rate of pressure rise
- Intensity of explosion

### 2. Explosion parameters:

Type of ignition:

- Electrical ignition in the tank
- Ignition resulting from the ingress of flame
- Flame flash-over (jet) ignition

Place of ignition:

- central
- at the edge
- outside the tank

Geometry:

- Length/diameter ratio (L/D)
- Surface/volume ratio (S/V)

Pressure (primary/initial pressure)

Concentration (ethylene concentration)

Turbulence level (fittings)



Federal Institute for  
Materials Research  
and Testing

Tanks for Dangerous  
Goods, Accidental  
Mechanics

J. Ludwig

Sheet no. 25

## Explosion characteristics - Volume dependency of the maximum rate of pressure rise

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

with

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

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

$$V = \text{container - /chamber volume} \left[ \text{m}^3 \right]$$



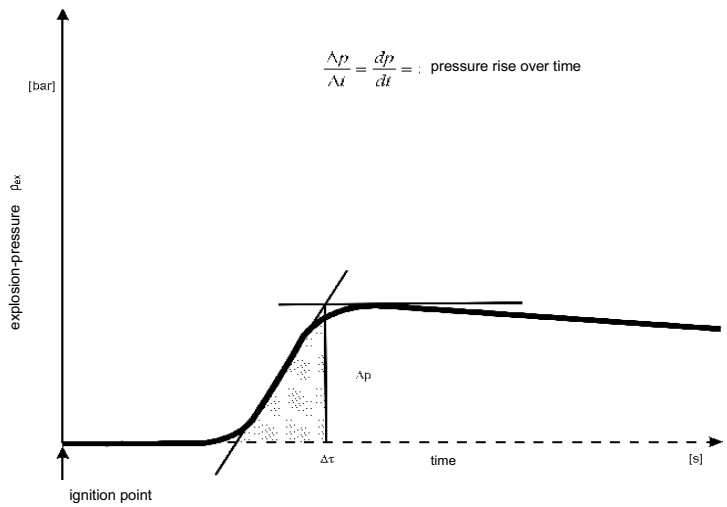
Federal Institute for  
Materials Research  
and Testing

Tanks for Dangerous  
Goods, Accidental  
Mechanics

J. Ludwig

Sheet no. 26

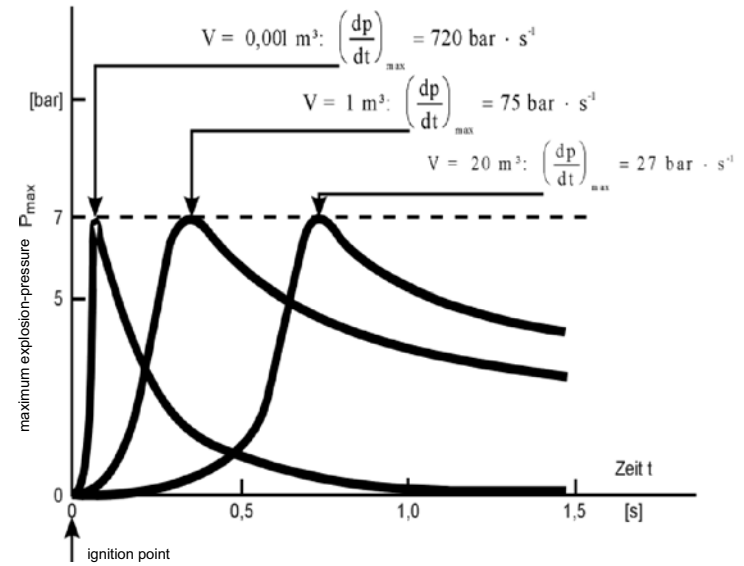
## Determining the rate of pressure rise (pressure rise over time)



J. Ludwig

Sheet no. 27

## Influence of volume on fuel gas explosions (propane explosions, stoichiometric mixture)



J. Ludwig

Sheet no. 28

## Tests using the test tank

56 Tests, of which:

48 tests without fittings, from which the following were evaluated:

- 3 tests to confirm initial pressure experimentally,
- 1 test on effectiveness of flame arresters used,
- 15 tests on effect of type of ignition,
- 6 tests on the effect of the size of apertures open under normal operating conditions,
- 34 tests on the effect of the place of ignition,
- 11 tests on the effect of the length/diameter ratio,
- 26 tests on the effect of the initial pressure,
- 4 tests on the effect of the ethylene concentration;

8 tests with fittings (surge plates) to determine the effect of

- the degree of coverage,
- the number of openings per surge plate.



Federal Institute for  
Materials Research  
and Testing

Tanks for Dangerous  
Goods, Accidental  
Mechanics

J. Ludwig

Sheet no. 29

## Explosion-pressure proof test tank



Federal Institute for  
Materials Research  
and Testing

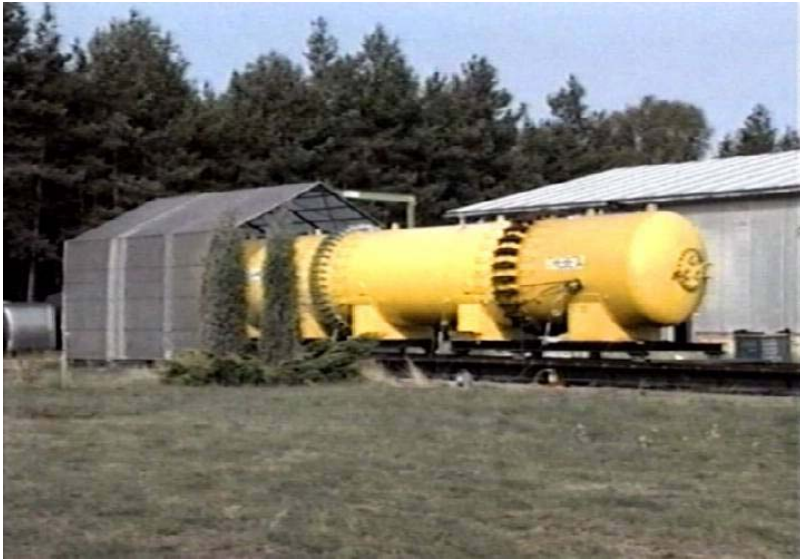
Tanks for Dangerous  
Goods, Accidental  
Mechanics

J. Ludwig

Sheet no. 30



## Test film 2



Federal Institute for  
Materials Research  
and Testing

Tanks for Dangerous  
Goods, Accidental  
Mechanics

J. Ludwig

Sheet no. 31

## Results I – Review of basic assumptions



Federal Institute for  
Materials Research  
and Testing

Tanks for Dangerous  
Goods, Accidental  
Mechanics

J. Ludwig

Sheet no. 32

### 1. Initial pressure required:

$$p_a \leq 0.03 \text{ bar}$$

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

$dp/dt$  and  $K_G$ -value are more favourable than  
in the original measurement criteria

### 2. Suitability of the flame traps used:

Required: flame arresters that can resist endurance burning

### 3. Effect of large openings:

Manholes are equivalent to pressure relief devices

## Results II – Tanks without fittings

1. Explosion characteristics depend on the concentration
2. Explosion characteristics do not depend on the place of ignition
3. Elongations/rates of elongation:  
Explosion shock pressure corresponds to quasi-static pressurisation

### Conditions

- Type of ignition – ingress of flame
- Initial pressure  $p_a \sim 0$  bar
- $L/D \leq 6$
- $S/V \sim 2.1$  to  $2.2$
- Pressure relief through open aperture



Federal Institute for  
Materials Research  
and Testing

Tanks for Dangerous  
Goods, Accidental  
Mechanics

J. Ludwig

Sheet no. 33

## Results III – Tanks with fittings

1. Explosion characteristics  $dp/dt$  and  $K_G$ -value depend on
  - Degree of coverage of the surge plate
  - Size of the biggest surge plate opening
  - Number of surge plate openings
2. Explosion pressure  $p_{ex}$  is largely independent of these parameters
3. Elongations/rates of elongation  
Explosion shock pressure quasi-static pressurisation

### Conditions

- Type of ignition – ingress of flame
- Initial pressure  $p_a \sim 0$  bar
- $L/D \leq 6$
- $S/V \sim 2.1$  to  $2.2$
- Pressure relief through open aperture
- Optimised constructional design and manufacture



Federal Institute for  
Materials Research  
and Testing

Tanks for Dangerous  
Goods, Accidental  
Mechanics

J. Ludwig

Sheet no. 34

## Explosion-pressure proofness - further means of proof

### 1. Calculation

Calculation of all the pressure bearing parts of the tank with the highest occurring explosion pressure  $p_{ex}$  and

- 1.3 times safety in relation to tensile strength or
- 1 times safety in relation to yield stress

Analytical optimisation of the shell with the highest occurring explosion pressure  $p_{ex}$  using a coefficient is possible.

Under certain constructional conditions and/or if separate experimental proofs are available, the possibility of using calculations can also be applied to tanks with fittings.



Federal Institute for  
Materials Research  
and Testing

Tanks for Dangerous  
Goods, Accidental  
Mechanics

J. Ludwig

Sheet no. 35

## Explosion-pressure proofness – basis of measurement

Explosion pressure does not depend on the substance and is dependent upon the initial pressure at which ignition in the tank occurs.

For the initial pressure,  $p_a = 1$  bar (abs.) can be assumed.

From this results, as the highest explosion pressure  $p_{ex}$ , the  $P_{ex0}$  determined as substance constant.

For evaluations independent of the substance,  $p_{ex0} = 9.9$  bar (abs.) for the most explosive ethylene/air mixture (i.e.  $p_{ex} \approx 10$  bar (abs.)) is the basis.



Federal Institute for  
Materials Research  
and Testing

Tanks for Dangerous  
Goods, Accidental  
Mechanics

J. Ludwig

Sheet no. 36

## Optimisation of the diameter/wall thickness ratio

Criteria for explosion-resistant construction:

1. Explosion-pressure shock-proof construction:  $\sigma_{zul} = \frac{R_m}{1.3}$
2. Explosion-pressure proof construction (I):  $\sigma_{zul} = \frac{R_e}{1.0}$
3. Explosion-pressure proof construction (II):  $\sigma_{zul} = \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot R_e$
4. Limit criterion (I):  $\frac{R_e}{R_m} = 0.77$
5. Limit criterion (II):  $\frac{R_e}{R_m} = 0.67$
6. Section criterion:  $\frac{R_e}{R_m} = 0.85$



Federal Institute for  
Materials Research  
and Testing

Tanks for Dangerous  
Goods, Accidental  
Mechanics

J. Ludwig

Sheet no. 37

## Optimisation of the diameter/wall thickness ratio

$$\frac{D_a}{e} = \text{maximum} \left\{ 19.63 \cdot \frac{R_e}{p_{ex}} ; 13.08 \cdot \frac{R_m}{p_{ex}} \right\}$$

derived from:

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

with

$$\sigma_x = \text{maximum} \left\{ \frac{2}{\sqrt{3}} R_e ; \frac{R_m}{1.3} \right\}$$

and

$$v = 0.85$$



Federal Institute for  
Materials Research  
and Testing

Tanks for Dangerous  
Goods, Accidental  
Mechanics

J. Ludwig

Sheet no. 38

## Tank section with built-in surge plate



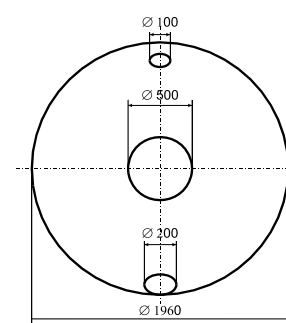
Federal Institute for  
Materials Research  
and Testing

Tanks for Dangerous  
Goods, Accidental  
Mechanics

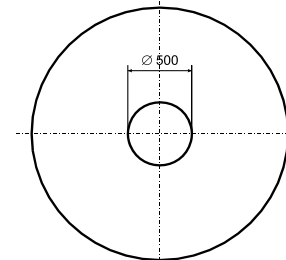
J. Ludwig

Sheet no. 39

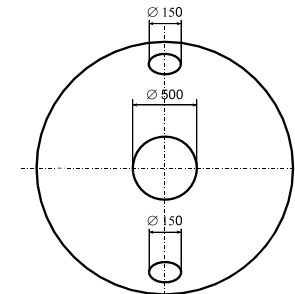
## Tests with different surge plates



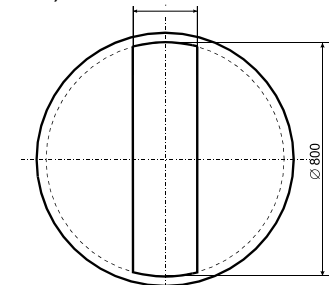
a) Test No. 39



c) Tests Nos. 56 and 57



b) Tests Nos. 40 and 44



d) Tests Nos. 53, 54 and 55



Federal Institute for  
Materials Research  
and Testing

Tanks for Dangerous  
Goods, Accidental  
Mechanics

J. Ludwig

Sheet no. 40

## Example: test tank with various fittings



Federal Institute for  
Materials Research  
and Testing

Tanks for Dangerous  
Goods, Accidental  
Mechanics

Test No.	No. 40	No. 53
Chamber	C1 = C, C2 = A	C1 = C, C2 = A + B
Fittings	1 SP/3 O	1 SP/1 O
Degree of coverage f	92 %	71 %
Type of installation	K1/K2	K1/K2
Place of ignition	Z1	Z1
Type of ignition	Flashover	Flame ingress
$p_a$ [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
$K_G$ -value [bar · m/s]	2384	228

J. Ludwig

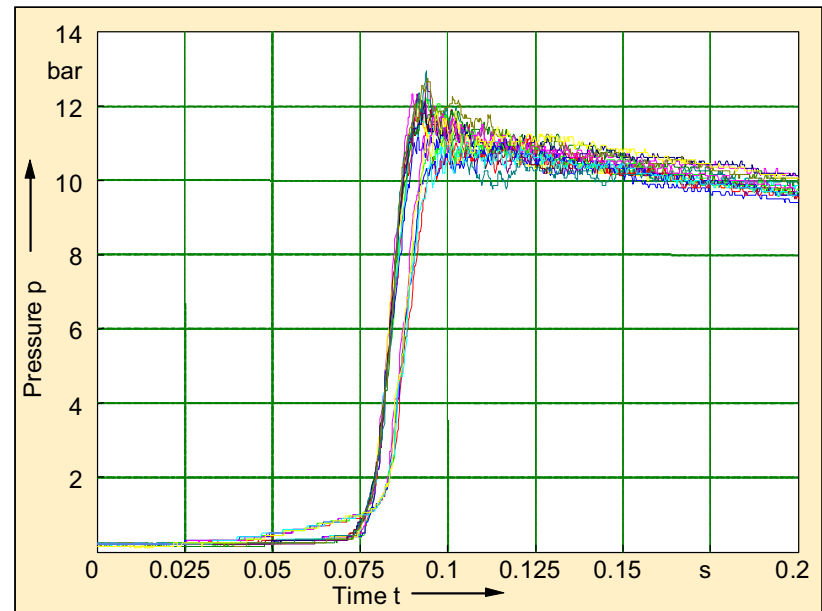
Sheet no. 41

## Pressure curve in test No. 40



Federal Institute for  
Materials Research  
and Testing

Tanks for Dangerous  
Goods, Accidental  
Mechanics

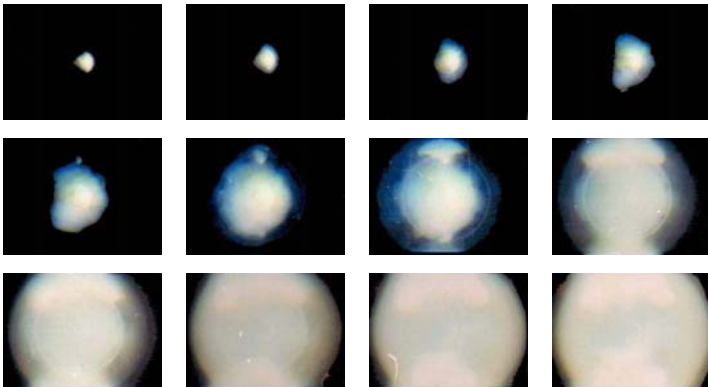


J. Ludwig

Sheet no. 42

## Passage of the front of the flame through the surge plate with 3 openings

(Test No. 39,  $\Delta t = 1 \text{ ms}$ )



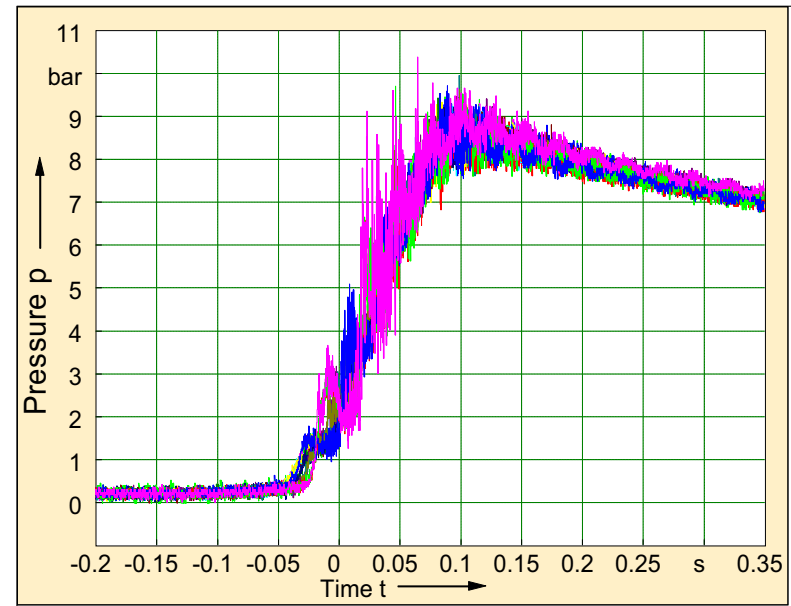
Federal Institute for  
Materials Research  
and Testing

Tanks for Dangerous  
Goods, Accidental  
Mechanics

J. Ludwig

Sheet no. 43

## Pressure curve in test No. 53



Federal Institute for  
Materials Research  
and Testing

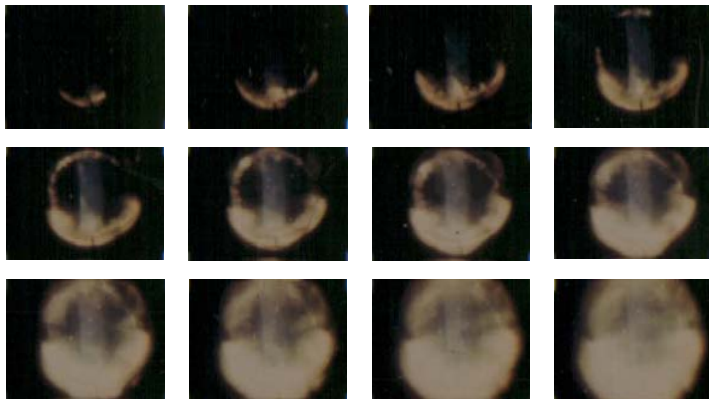
Tanks for Dangerous  
Goods, Accidental  
Mechanics

J. Ludwig

Sheet no. 44

## Passage of the front of the flame through the surge plate with 1 opening

(Test No. 55,  $\Delta t = 2.7$  ms)



Federal Institute for  
Materials Research  
and Testing

Tanks for Dangerous  
Goods, Accidental  
Mechanics

J. Ludwig

Sheet no. 45

## Published by

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](mailto:joerg.ludwig@bam.de)



Federal Institute for  
Materials Research  
and Testing

Tanks for Dangerous  
Goods, Accidental  
Mechanics

J. Ludwig

Sheet no. 46



# 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

Gefahrguttanks  
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

Gefahrguttanks  
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

Gefahrgut tanks  
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

Gefahrgut tanks  
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, Diesekraftstoff, 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]
$\leq 25$	1,10
$\leq 50$	1,15
$\leq 80$	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

Gefahrguttanks  
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

Gefahrguttanks  
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

Gefahrguttanks  
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

Gefahrguttanks  
und  
Unfallmechanik

J. Ludwig

Folie Nr. 16



## Tanks ohne Einbauten

### Spannungsbewertung bei plastischer Verformung (III)

5. (variabler) Plastizitätsmodul

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

$\sigma_v$  und  $\varepsilon_{vp}$  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)

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

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

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

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



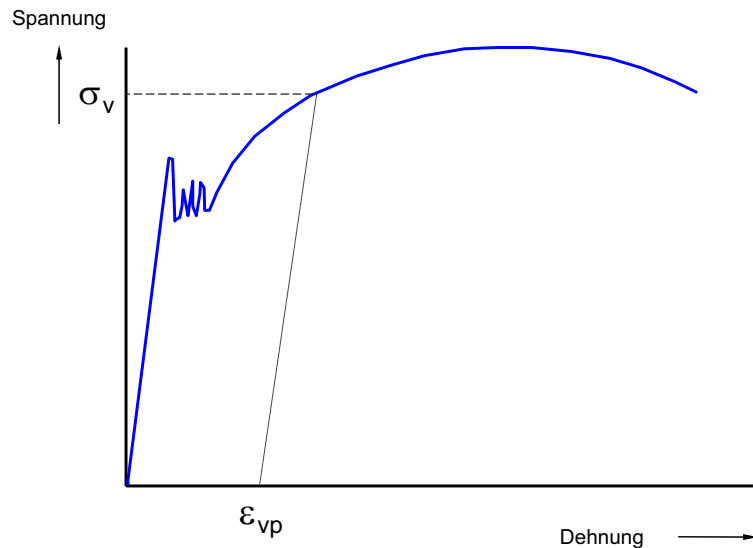
Bundesanstalt für  
Materialforschung  
und -prüfung

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  $\epsilon_{vp}$  die zugehörige Vergleichsspannung  $\sigma_v$  bestimmen und damit der Plastizitätsmodul  $G_p$  unter Versuchsbedingungen berechnen.

Mit  $G_p$  und den gemessenen Dehnungen  $\epsilon_{xp}$  und  $\epsilon_{yp}$  in den Hauptspannungsrichtungen sind nunmehr Umfangsspannung  $\sigma_x$  und Längsspannung  $\sigma_y$  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 Umfangspannung  $\sigma_x$  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  $\sigma_x$  ( und ggf. für  $\sigma_y$ ) lässt sich bewerten, ob der (zylindrische) Teil eines Tanks als explosionsdruckstoßfest gelten kann.

Dies ist dann der Fall, wenn  $\sigma_x$  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

Gefahrgut tanks  
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

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

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

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



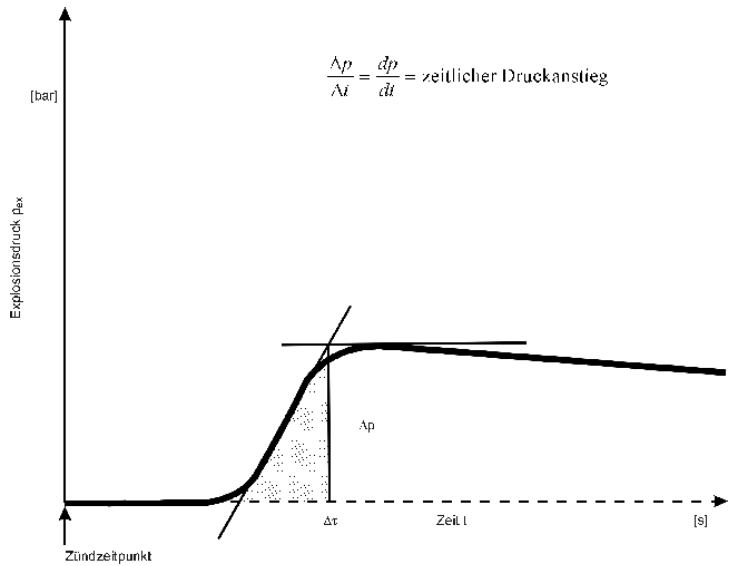
Bundesanstalt für  
Materialforschung  
und -prüfung

Gefahrgut tanks  
und  
Unfallmechanik

J. Ludwig

Folie Nr. 26

## Bestimmung der Druckanstiegsgeschwindigkeit (zeitlicher Druckanstieg)



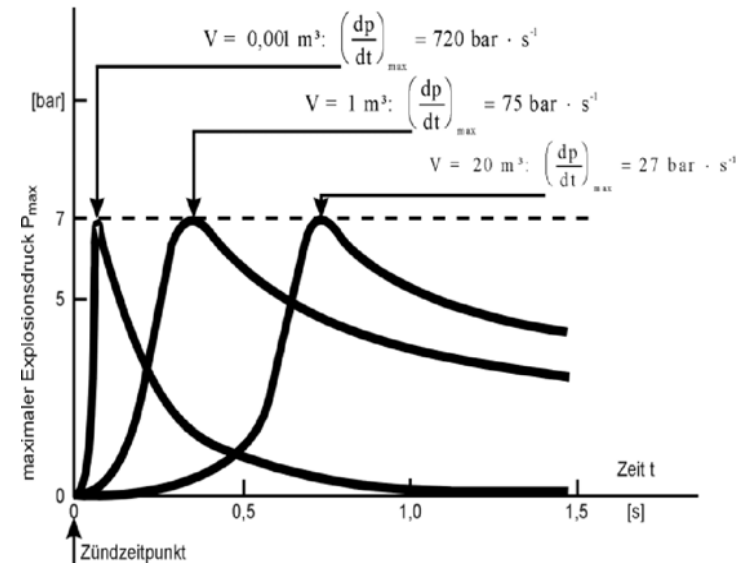
Bundesanstalt für  
Materialforschung  
und -prüfung

Gefahrgutanks  
und  
Unfallmechanik

J. Ludwig

Folie Nr. 27

## Volumeneinfluß auf Brenngasexplosionen (Propan-Explosionen, stöchiometrisches Gemisch)



Bundesanstalt für  
Materialforschung  
und -prüfung

Gefahrgutanks  
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



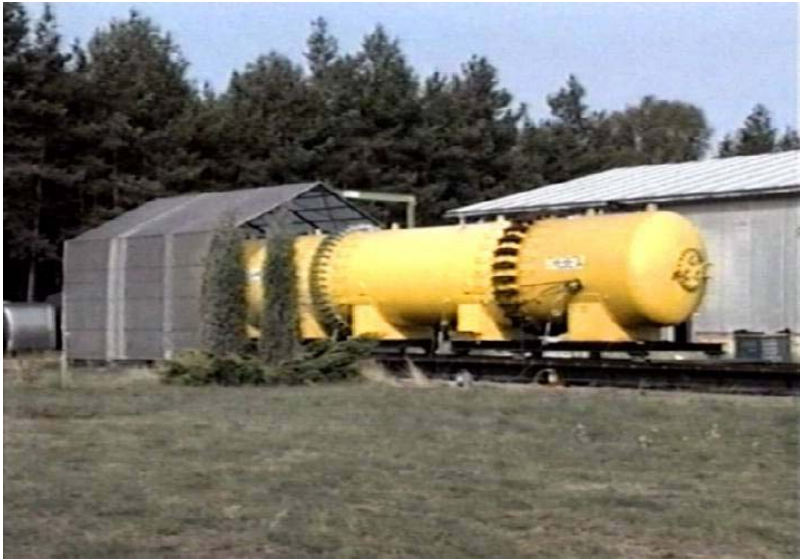
Bundesanstalt für  
Materialforschung  
und -prüfung

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

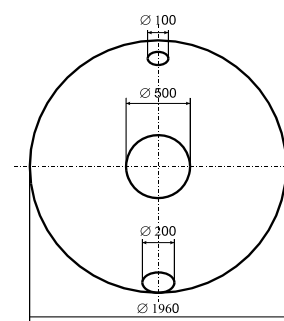


Bundesanstalt für  
Materialforschung  
und -prüfung

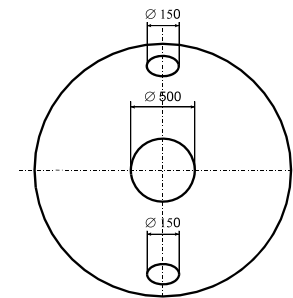
Gefahrgut tanks  
und  
Unfallmechanik

J. Ludwig

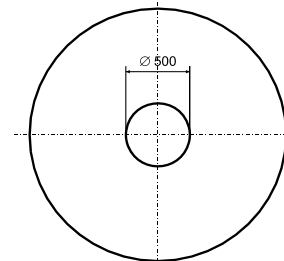
Folie Nr. 40



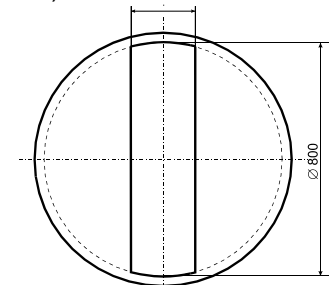
a) Versuch Nr. 39



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

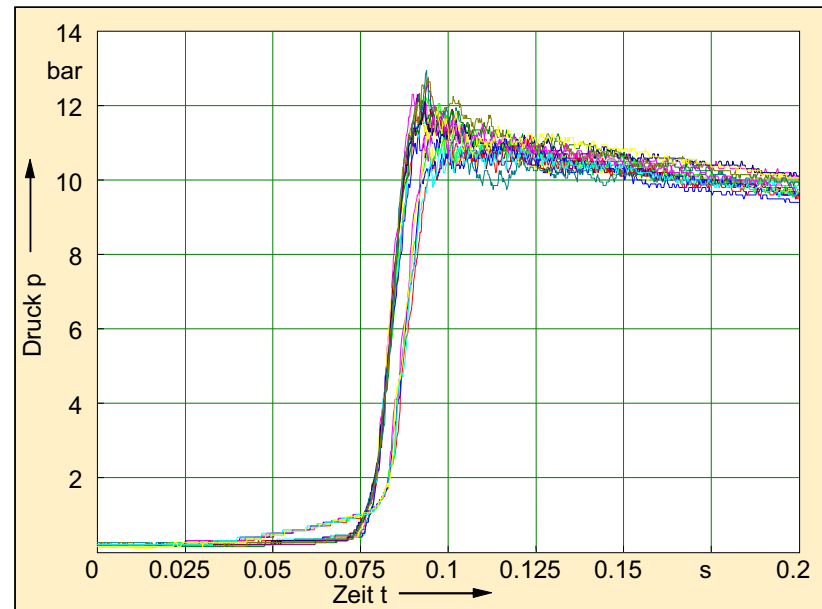
Folie Nr. 41

## Druckverläufe bei Versuch Nr. 40



Bundesanstalt für  
Materialforschung  
und -prüfung

Gefahrgut tanks  
und  
Unfallmechanik

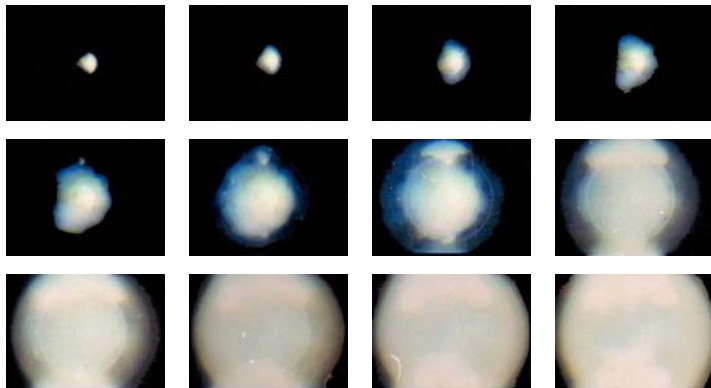


J. Ludwig

Folie Nr. 42

## Durchtritt der Flammenfront durch die Schwallwand mit 3 Öffnungen

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



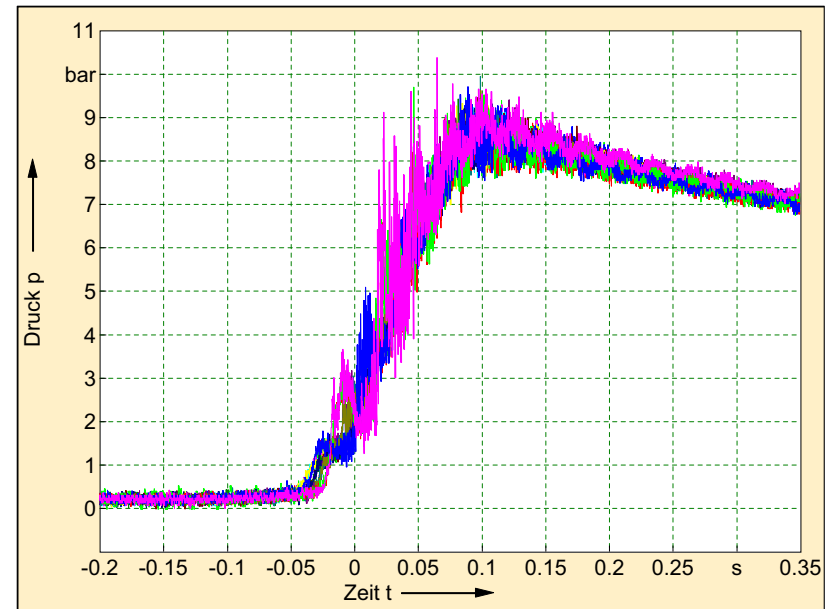
Bundesanstalt für  
Materialforschung  
und -prüfung

Gefahrgut tanks  
und  
Unfallmechanik

J. Ludwig

Folie Nr. 43

## Druckverläufe bei Versuch Nr. 53



Bundesanstalt für  
Materialforschung  
und -prüfung

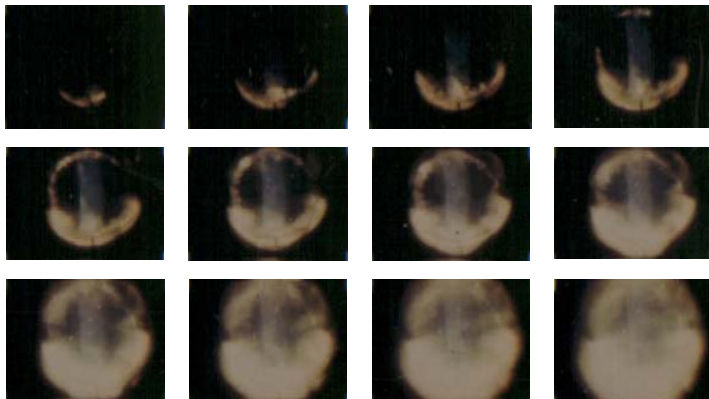
Gefahrgut tanks  
und  
Unfallmechanik

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](mailto:joerg.ludwig@bam.de)



Bundesanstalt für  
Materialforschung  
und -prüfung

Gefahrgut tanks  
und  
Unfallmechanik

J. Ludwig

Folie Nr. 46