

Jörg Ludwig

**Experimentelle Untersuchungen
und Empfehlungen zur
Belastbarkeit von Transporttanks
für gefährliche Stoffe durch
Explosionsdruck und andere
Beanspruchungen**

255

Forschungsbericht



Die Aufgaben
der Bundesanstalt
stehen unter der Leitlinie:

Sicherheit und Zuverlässigkeit in Chemie- und Materialtechnik

Die Aufgaben

Die BAM ist im Aufgabenverbund „Material – Chemie – Umwelt – Sicherheit“ zuständig für:

- Hoheitliche Funktionen zur öffentlichen technischen Sicherheit, insbesondere im Gefahrstoff- und Gefahrgutrechtsbereich;
- Mitarbeit bei der Entwicklung entsprechender gesetzlicher Regelungen, z. B. bei der Festlegung von Sicherheitsstandards und Grenzwerten;
- Beratung der Bundesregierung, der Wirtschaft sowie der nationalen und internationalen Organisationen im Bereich der Materialtechnik und Chemie;
- Entwicklung und Bereitstellung von Referenzmaterialien und -verfahren, insbesondere der analytischen Chemie und der Prüftechnik;
- Unterstützung der Normung und anderer technischer Regeln für die Beurteilung von Stoffen, Materialien, Konstruktionen und Verfahren im Hinblick auf die Schadensfrüherkennung bzw. -vermeidung, den Umweltschutz und den Erhalt volkswirtschaftlicher Werte.

Die Tätigkeitsbereiche

Das Tätigkeitsspektrum der BAM umfasst die sich ergänzenden und aufeinander bezogenen Tätigkeiten:

- Forschung und Entwicklung
- Prüfung, Analyse und Zulassung
- Beratung und Information.

Die nationale und internationale Zusammenarbeit

Die Aufgaben der BAM für Technik, Wissenschaft, Wirtschaft und Gesellschaft erfordern eine interdisziplinäre Zusammenarbeit. Insofern arbeitet die Bundesanstalt mit Technologieinstitutionen des In- und Auslandes, insbesondere den nationalen Schwesterinstituten eng zusammen. Sie berät Bundesministerien, Wirtschaftsverbände, Industrieunternehmen sowie Verbraucherorganisationen und unterstützt mit Fachgutachten Verwaltungsbehörden sowie Gerichte. Daneben ist sie in die internationale technische Zusammenarbeit eingebunden und im Bereich „Messwesen – Normung – Prüftechnik – Qualitätssicherung“ (MNPQ) als nationale Institution für die Prüftechnik zuständig. Die Mitarbeiter der Bundesanstalt wirken in zahlreichen Fachgremien, gesetzlichen Körperschaften und normensetzenden Institutionen an der Aufstellung von technischen Regeln und Sicherheitsbestimmungen mit und vertreten die Bundesrepublik in nationalen und supranationalen Einrichtungen.

Der Status

Die BAM ist als technisch-wissenschaftliche Bundesoberbehörde im Geschäftsbereich des Bundesministeriums für Wirtschaft und Arbeit Nachfolgeinstitution des 1871 gegründeten Staatlichen Materialprüfungsamtes sowie der 1920 gebildeten Chemisch-Technischen Reichsanstalt (CTR). Sie hat dementsprechend die Funktion einer materialtechnischen und chemisch-technischen Bundesanstalt. In ihr sind etwa 1600 Mitarbeiter, darunter mehr als 700 Wissenschaftler und Ingenieure, auf dem Stammgelände in Berlin-Lichterfelde sowie auf den Zweiggeländen in Berlin-Steglitz und Berlin-Adlershof tätig.

Dr. Ing. Jörg Ludwig

Experimentelle Untersuchungen und Empfehlungen zur Belastbarkeit von Transporttanks für gefährliche Stoffe durch Explosionsdruck und andere Beanspruchungen

Forschungsbericht 255
Berlin 2003

Impressum

Forschungsbericht 255: **Experimentelle Untersuchungen
und Empfehlungen zur Belastbarkeit von Transporttanks
für gefährliche Stoffe durch Explosionsdruck und andere
Beanspruchungen**
2003

Herausgegeben von der Bundesanstalt für
Materialforschung und -prüfung (BAM)
Unter den Eichen 87
12205 Berlin

Telefon: +49 30 8104-0
Telefax: +49 30 8112029
E-mail: info@bam.de
Internet: <http://www.bam.de>

Copyright © 2002 by Bundesanstalt für
Materialforschung und -prüfung (BAM)

Herstellung und Verlag:
Wirtschaftsverlag NW
Verlag für neue Wissenschaft GmbH
27568 Bremerhaven
Telefon: +49 471 94544-0
Telefax: +49 471 94544-77/-88

Umschlag: Lutz Mittenzwei
Layout: BAM-Referat G.1

ISSN 0938-5533
ISBN 3-89701-735-0

Zusammenfassung

Die Beförderung gefährlicher Stoffe in größeren Mengen findet überwiegend in Transporttanks statt. Im Hinblick auf die Beförderung entzündbarer Gase und Flüssigkeiten ergibt sich insbesondere beim Befüllen und Entleeren der Tanks sowie bei Reinigungs- und Reparaturarbeiten die Gefahr, daß die Tanks durch eine Explosion im Tankinneren mit den entsprechenden Folgen für die Umgebung über ihre Versagensgrenzen hinaus beansprucht werden, zumindest solange, wie sich beispielsweise Restmengen des Ladegutes im Tank befinden. Voraussetzung für eine derartige Explosion ist also das Vorhandensein eines explosiblen Gas-/ bzw. Dampf/Luft-Gemischs geeigneter Verteilung und Konzentration im Inneren des Tanks und einer Zündquelle innerhalb oder außerhalb des Tanks.

Einer Reaktionsübertragung aus der Umgebung des Tanks über eine freie Öffnung in das Tankinnere kann durch das Vorsehen einer Flammendurchschlagsicherung begegnet werden. Hierbei wird also vorausgesetzt, daß sich die Zündquelle außerhalb des Tanks befindet. Flammendurchschlagsicherungen unterliegen hinsichtlich ihrer Anwendbarkeit jedoch gewissen Einschränkungen.

Bei Arbeiten im oder am offenen Tank (z.B. Schweißarbeiten) kann es dennoch zu einer Zündung im Tankinneren kommen.

Gegen die Auswirkungen einer Explosion im Tankinneren empfiehlt sich die explosionsdruck- bzw. explosionsdruckstoßfeste Bauweise als alternative Sicherungsmaßnahme. Mit dieser Maßnahme wird erreicht, daß der Tank den Beanspruchungen durch eine Explosion im Tankinneren ohne oder mit bleibende(r) Verformung gewachsen ist.

Aus Wirtschaftlichkeitserwägungen und da Transporttanks im allgemeinen gewissen Restriktionen bezüglich ihres zulässigen Gesamtgewichts unterliegen, wird im Rahmen geltender Regelungen eine möglichst leichte - also explosionsdruckstoßfeste - Bauweise bevorzugt.

Sinnvoll anwendbar ist diese Maßnahme jedoch nur dann, wenn die Art und Höhe der Beanspruchung durch eine entsprechende Explosion bekannt ist. Neben stofflichen Gesichtspunkten spielen verschiedene Aspekte konstruktiver Art, die Einfluß auf den Reaktionsablauf in einem Tank haben, eine wesentliche Rolle. Demzufolge sind die Randbedingungen, unter denen sich Explosionen in Transporttanks ereignen können, festzustellen. Ferner sind die Parameter, die die Explosionskennwerte tangieren, zu bestimmen und ihr Einfluß ist zu quantifizieren. Vor diesem Hintergrund wird in der vorliegenden Arbeit ferner über die erweiterte Definition des Begriffes „Explosionsdruckstoßfestigkeit“, Methoden des analytischen und experimentellen Eignungsnachweises und Berechnungs- und Konstruktionsmöglichkeiten zu optimierter Auslegung von explosionsdruckstoßfesten Transporttanks berichtet.

Abstract

The transport of large volumes of hazardous materials primarily takes place using transport tanks. With respect to the transport of flammable gases and liquids, a particular risk is that when tanks are being charged or discharged, an explosion within the tank with resulting effects for the environment will cause the tank to be stressed beyond its failure limit under certain circumstances; this is at least the case when, for example, residual volumes of the freight are in the tank. A requirement for such an explosion is that there exists an explosive gas/air or vapour/air mixture of suitable distribution and concentration within the tank and that there is an ignition source inside or outside of the tank.

Providing a flame arrester or flame trap can counteract the potential risk of a reaction being transferred from the tank's surroundings to the inside of the tank via a free opening. It is assumed here that the ignition source is located outside of the tank. However, flame arresters respectively flame traps are subject to certain restrictions as far as their applicability is concerned. When work is being performed on or in the open tank (e.g. welding work), an ignition within the tank may nonetheless occur.

A recommendable alternative safety measure to counteract the effects of an explosion within a tank is to use a design that is explosion-pressure proof or explosion-blast resistant. This measure ensures that a tank will be able to withstand the stresses encountered under the conditions that arise when an internal explosion occurs, with or without plastic deformation.

However, this measure is only appropriate if the type and magnitude of the stresses resulting from an internal explosion are known. In addition to material-related aspects, different design aspects that have an effect on the course of the reaction within the tank play a significant role.

In the present thesis explanations concerning the course of explosions with gas/air or vapour/air mixtures in tanks will be given based on the results of investigations carried out with an installation specifically developed for that purpose. Thus the boundary conditions under which explosions can take place inside tanks will be determined on one hand and material and design related parameters that touch the explosion characteristics will be quantified. Before this background a more precise definition of the term explosion pressure proof design than that being applied in the past will be presented and the development of analytical and experimental methods to verify and optimize explosion pressure proof designs of tanks and their components will be derived. Thus the evaluation of transport tanks will be put in a concrete and easy applicable form. Finally, recommendations on the implementing of the above-mentioned findings into the relevant regulations or standards will be formulated.

Inhalt

1.	Einleitung - Themenabgrenzung und Zielstellung	9
2.	Explosionen mit Dämpfen entzündbarer flüssiger Stoffe - Ablauf und Schutzmaßnahmen	13
2.1.	Voraussetzungen für Explosionen	13
2.2.	Verbrennungsvorgänge - Brände und Explosionen	14
2.3.	Explosionen in geschlossenen Behältern	15
2.3.1.	Explosionsgrenzen	15
2.3.2.	Explosionsdruck und Explosionsheftigkeit bei Einzelbehältern	17
2.3.3.	Explosionsdruck und -heftigkeit bei miteinander verbundenen Behältern und Behälterabschnitten	20
2.3.4.	Explosionsdruck und -heftigkeit bei langgestreckten Behältern (beiderseits geschlossenen Rohren)	23
2.4.	Schutzmaßnahmen gegen Explosionen	25
2.4.1.	Maßnahmen, welche die Bildung explosibler Gemische verhindern oder einschränken	25
2.4.2.	Maßnahmen, welche die Zündung explosibler Gemische verhindern	25
2.4.3.	Konstruktive Maßnahmen, welche die Auswirkung einer Explosion auf ein unbedenkliches Maß beschränken	26
2.5.	Folgerungen für geschlossene ortsbewegliche Behälter (Transporttanks)	28
3.	Rechtsvorschriften - Explosionsdruckstoßfestigkeit von Transporttanks	30
3.1.	Grundlagen der Regelungen über die Beförderung gefährlicher Güter	30
3.2.	Sicherheitstechnische Anforderungen an Tanks zur Beförderung gefährlicher Güter	33
3.2.1.	Vorbemerkungen	33
3.2.2.	Vorschriften über die Beförderung gefährlicher Güter	33
3.2.3.	Vorschriften über die Beförderung gefährlicher Güter in Tanks	35
3.2.4.	Die Anhänge B.1a und B.1b der Anlage B des ADR	35
3.3.	Vorschriften für den Schutz gegen Explosionen im Tankinneren - Explosionsdruckstoßfestigkeit	36
3.3.1.	Vorschriften bis 1996	37
3.3.2.	Vorschriften ab 1997	39
4.	Voruntersuchungen und deren Ergebnisse	41
4.1.	Qualifizierung von Transporttanks nach Rechtsvorschriften und hierzu durchgeführte Versuche	41
4.2.	Diskussion der Versuchsergebnisse	43
4.2.1.	Reale Transporttanks ohne Schwallwände	43
4.2.2.	Reale Transporttanks mit Schwallwänden	44
4.3.	Definitionen zur Zielstellung - Bestimmung offener Fragen	45
5.	Entwicklung der Untersuchungskonzeption	46
5.1.	Versuchstank (Rezipient)	46
5.1.1.	Grundsätzliche Anforderungen	46
5.1.2.	Prinzipieller Aufbau	46
5.1.3.	Justier- und Montagevorrichtung	47
5.1.4.	Montage, Dichtheitsprüfung	48
5.2.	Konzeption zur Durchführung von Explosionsdruckstoßversuchen	49
5.2.1.	Grundvoraussetzungen	49
5.2.2.	Erzeugung des explosiblen Ethylen-Luft-Gemisches	49
5.2.3.	Einstellung des Vordrucks	50
5.2.4.	Gewährleistung eines homogenen Ethylen/Luft-Gemisches	51
5.2.5.	Zündung des Ethylen-Luft-Gemisches	51

5.2.6. Versuchsaufbau	51
5.3. Meß- und Auswerttechnik	52
5.3.1. Meßwertaufnehmer (Sensoren)	52
5.3.2. Meßwertaufzeichnung	52
5.3.3. Meßwerterfassung	53
5.3.4. Dokumentation	53
5.4. Alternative Zündarten	53
6. Explosionsdruckstoßversuche und Ergebnisse - Übersichten über die durchgeführten Versuche	54
7. Überprüfung der Voraussetzungen nach Rechtsvorschriften	60
7.1. Tatsächlich erforderlicher Ausgangsdruck	60
7.1.1. Vorbemerkungen	60
7.1.2. Analytische Abschätzung des Ausgangsdruckes	60
7.1.3. Experimentelle Bestätigung des Ausgangsdruckes	61
7.1.4. Diskussion der Ergebnisse	62
7.2. Wirksamkeit von Flammensperren	63
7.2.1. Vorbemerkungen	63
7.2.2. Versuch mit einer Flammensperre (Flammensieb)	63
7.2.3. Diskussion des Ergebnisses	64
7.3. Wirkung großer freier Tanköffnungen (offenes Mannloch)	64
7.3.1. Vorbemerkungen	64
7.3.2. Versuche mit einem Aluminiumkoffertank	64
7.3.3. Diskussion der Ergebnisse	66
7.4. Schlußfolgerungen	67
8. Tanks ohne Einbauten	67
8.1. Versuche und Ergebnisse mit realen Transporttanks	67
8.1.1. Explosionsversuche	67
8.1.2. Ersetzensgleiche Wasserdruckprüfung	69
8.2. Reale Transporttanks ohne Einbauten - analytische Betrachtung	70
8.2.1. Explosionsversuche - Spannungsbewertung	70
8.2.1.1. Ungestörte Zylinderbereiche bei elastischer Verformung	70
8.2.1.2. Ungestörte Zylinderbereiche bei plastischer Verformung	72
8.2.1.3. Krepfenbereiche von Böden bei plastischer Verformung	75
8.2.1.4. Mannlochstützen, Tragarme, Aufsattelungen usw.	76
8.2.2. Wasserdruckversuch - Spannungsbewertung für den ungestörten Zylinderbereich bei plastischer Verformung	77
8.2.3. Verallgemeinerung der Versuchsergebnisse an Einzeltanks	78
8.2.3.1. Übertragbarkeit der an Einzeltanks gewonnenen Versuchsergebnisse auf Tanks gleicher Bauart	78
8.2.3.2. Allgemeine Werkstoffbewertung für Transporttanks	79
8.3. Schlußfolgerungen aus Versuchsergebnissen und Spannungsbewertungen von realen Transporttanks	81
8.4. Versuche mit dem Versuchstank (Rezipienten)	82
8.4.1. Erläuterungen und Vorbemerkungen	82
8.4.2. Beschreibung der durchgeführten Versuche	83

8.4.3. Einfluß der Zündart	84
8.4.4. Einfluß des Zündortes	85
8.4.5. Einfluß des Längen/Durchmesser-Verhältnisses	86
8.4.6. Einfluß des Ausgangsdruckes und der Ethylen-Konzentration	87
8.5. Schlußfolgerungen - Bewertung von Tanks ohne Einbauten	87
9. Tanks mit Einbauten	88
9.1. Versuche und Ergebnisse mit realen Transporttanks	88
9.1.1. Tanks mit Trennboden	88
9.1.2. Tanks mit einer oder mehreren Schwallwänden und Trennboden	89
9.1.2.1. Grundvoraussetzungen und allgemeine Ergebnisse	89
9.1.2.2. Ergebnisse der Versuche mit Tankversagen	89
9.1.3. Schlußfolgerungen aus den Versuchen mit realen Transporttanks	90
9.2. Versuche und Ergebnisse mit dem Versuchstank (Rezipienten)	91
9.2.1. Erläuterungen, Vorbemerkungen und allgemeine Ergebnisse	91
9.2.2. Versuchsdurchführung und -ergebnisse	92
9.2.2.1. Versuche mit einer Schwallwand mit 3 Öffnungen	92
9.2.2.2. Versuche mit einer Schwallwand mit zentraler Öffnung	94
9.2.2.3. Versuche mit einer Schwallwand mit großer Längsöffnung	94
9.2.3. Schlußfolgerungen aus den Versuchen mit dem Rezipienten	95
9.3. Schlußfolgerungen - Bewertung von Tanks mit Einbauten	96
10. Auslegung und Bewertung explosionsdruckstoßfester Transporttanks	98
10.1. Zusammenstellung wesentlicher Ergebnisse	98
10.2. Konstruktive Auslegung von Transporttanks	99
10.2.1. Tanks ohne Einbauten	99
10.2.2. Tanks mit Einbauten	99
10.3. Qualifizierende Bewertung von Transporttanks	101
11. Abschließende Bemerkungen	102
Literaturverzeichnis	103
Abbildungsverzeichnis	106
Tabellenverzeichnis	107
Anhänge	
Anhang I: Technische Richtlinien Tanks TRT 006 „Explosionsdruckstoßfestigkeit“	109
Anhang II: Versuche Nr. 34 bis 89 (Versuchsaufbauten und Meßstellenpläne, Tabellen der Einzel- und Mittelwerte der Druckmessungen)	111

1 Einleitung – Themenabgrenzung und Zielsetzung

In hochentwickelten Industriestaaten werden Möglichkeiten geschaffen, immer mehr Menschen immer besser mit allen Arten von Gütern versorgen zu können, in Exportnationen wie der Bundesrepublik Deutschland weit über den Eigenbedarf hinaus. Hierdurch werden jedoch bestimmte Gefährdungen, denen Mensch und Umwelt heutzutage ausgesetzt sind, erst hervorgerufen, da technisch-wissenschaftlicher Fortschritt nicht ausschließlich zu erwünschten, geplanten und vorhergesehenen Ergebnissen geführt hat und wohl auch nicht führen kann, denn jedwede Technologie kann versagen und bringt demzufolge Risiken mit sich [1].

Es liegt auf der Hand, daß der etwa bei Energieversorgung und Industrieproduktion bestehende Bedarf an großen Mengen von Gefahrgut an nahezu jedem Ort zu entsprechenden Produktionsmengen und - da der Ort der Herstellung überwiegend nicht der Ort der Verwendung ist - Beförderungsleistungen führt.

Rund ein Sechstel des Gesamttransportaufkommens in Deutschland entfällt daher auf Gefahrguttransporte [2].



Bild 1.1: Gefahrgutaufkommen der verschiedenen Verkehrsträger [3]

Da per Definition die Beförderung gefährlicher Güter nicht nur den Vorgang der Ortsveränderung, sondern beispielsweise auch die Übernahme und die Ablieferung des Gutes sowie Vorbereitungs- und Abschlußhandlungen (z.B. Be- und Entladen) umfaßt, ergeben sich somit Überschneidungen mit Vorgängen wie Lagerung und u.U. Herstellung und Bereitstellung von gefährlichen Gütern bzw. Gefahrstoffen [4]. Probleme bei der Beförderung gefährlicher Güter können demzufolge denen bei der Handhabung gefährlicher Güter allgemein gleichgestellt werden. Insbesondere wenn größere Mengen von Gefahrgut gehandhabt werden - etwa bei der Beförderung von Flüssigkeiten und Gasen in im Verhältnis großen Mengen in Tanks - kann davon ausgegangen werden, daß es sich somit generell um die Handhabung von Systemen hohen Energieinhaltes oder Gefährdungspotentials handelt. Sicherheitstechnische Probleme bei der Handhabung von

Flüssigkeiten und deren Dämpfen sowie Gasen ergeben sich aus deren Eigenschaften physikalischer - beispielsweise Druck, Temperatur, Ausbreitungsverhalten usw. - und chemischer Art - unter anderem Brennbarkeit, Instabilität, korrosive Wirkung und Giftigkeit. Unsachgemäße Handhabungen und unkontrollierte bzw. unkontrollierbare Einwirkungen von außen können wegen dieser Eigenschaften demzufolge zu Unfällen mit entsprechenden Auswirkungen führen [5,6].

Solange der Umgang bzw. die Handhabung derartiger Risikosysteme betrieben wird, wird es bei entsprechenden Eigenschaften der gehandhabten gefährlichen Güter durch unvorhergesehene bzw. unvorhersehbare Freisetzungen und Reaktionsabläufe auch immer wieder zu Bränden und Explosionen kommen.

Gefahrgutunfälle auf der Straße Tank- und Stückguttransport in Deutschland 1991

1.500	Gefahrgutunfälle davon 1.000 mit Tankfahrzeugen
0.800	Unfälle mit Personenschaden
1.000	geschädigte Personen
0.100	getötete Personen
0.060	Unfälle mit Gefahrgutaustritt
0.008	Unfälle mit Gefahr schwerer Umweltschäden
0.002	Brände

Tabelle 1.1: Konservative Abschätzung des Gefahrgutunfallaufkommens auf der Straße für die BRD, 1991 [3]

Zur Beförderung gefährlicher Güter in größeren Mengen in Tanks werden festverbundene Tanks (Tankfahrzeuge), Aufsetztanks und Batterie-Fahrzeuge, ferner Eisenbahnkesselwagen und ortsbewegliche Tanks (Tankcontainer) sowie Tankschiffe verwendet.

Das mögliche Füllvolumen von Tankfahrzeugen, Aufsetztanks und Tankcontainern beträgt bis zu 50 m³, dasjenige von Eisenbahnkesselwagen bis zu ungefähr 120 m³.

Den nachfolgenden Erörterungen vorgreifend kann im Rahmen dieser Arbeit von der Betrachtung von Batterie-Fahrzeugen und Tankschiffen jedoch abgesehen werden, da

- Batterie-Fahrzeuge aus einem Trägerfahrzeug und einer Vielzahl von miteinander verbundenen Einzel-elementen bestehen. Hierbei handelt es sich im allgemeinen um relativ kleine Druckgasbehälter, in denen sich wegen des betriebsbedingt nicht möglichen Auftretens explosibler Atmosphäre Explosionen praktisch nicht ereignen können und die außerdem eine

genügend hohe Festigkeit aufweisen würden, um auftretenden Explosionen im Behälterinneren zu widerstehen;

- Tankschiffe, die beispielsweise der Beförderung entzündbarer flüssiger Stoffe dienen, zwar den gleichen Gefährdungen unterliegen können wie die sonstigen vorerwähnten Tanks, aber aus Kostengründen nicht explosionsdruckstoßfest gestaltet werden und daher in jedem Fall anderweitig gegen mögliche Flammenrückschläge bzw. Explosionen im Tankinneren geschützt werden.

Zur Erläuterung häufig wiederkehrender Begriffe bzw. der Bezeichnungen von Tankkomponenten kann auf die schematischen Darstellungen in den Bildern 1.1 und 1.2 (erstellt unter Verwendung von Druckschriften der Firmen Tiphook Container Rental und Sea Containers) verwiesen werden.

Bei der Beförderung gefährlicher Güter in Tanks (d.h. beim eigentlichen Beförderungsvorgang - nach der Befüllung und vor der Entleerung) werden sich Explosionen der Tanks oder ihres Inhaltes normalerweise durch unfallbedingte Einwirkungen von außen ergeben, etwa durch ein Unfallfeuer, welches zum thermischen Versagen der Tankschalen führt, oder durch unfallbedingtes mechanisches Versagen der Tanks, was jeweils die Freisetzung des Inhaltes der Tanks zur Folge hat. Besteht der Tankinhalt beispielsweise aus entzündbaren flüssigen Stoffen oder Gasen kann bzw. wird es zu Ausbreitungen und gegebenenfalls zu Bränden und Explosionen mit entsprechenden Auswirkungen kommen [6].

Ein anderer denkbarer Fall: Wird ein leerer ungereinigter Tank, in dem sich ein unter Überdruck stehendes explosives Gemisch befindet, über ein Entlastungsventil entspannt und kommt es demzufolge außerhalb des

Tanks zu einer Zündung des Gemisches, kann ein Flammenrückschlag durch die freie Öffnung der Entlastungseinrichtung zu einer Explosion im Tankinneren führen (s. nachfolgendes Beispiel 4). Dieser Vorgang ist in Bild 1.4 schematisch dargestellt.

Seltener dürfte der Fall eintreten, daß ein Tank während der Beförderung durch eine Explosion im Tankinneren zerstört wird, obwohl derartige Unfälle vereinzelt ebenfalls aufgetreten sind (auf das nachfolgende Beispiel 5 wird verwiesen). Des weiteren läßt sich vermuten, daß zulässige betriebliche Zustände unfallbegünstigend wirken können: Wenn beispielsweise eine entzündbare Flüssigkeit bei erhöhter Temperatur abgefüllt wird, wird es wegen der Temperaturabsenkung

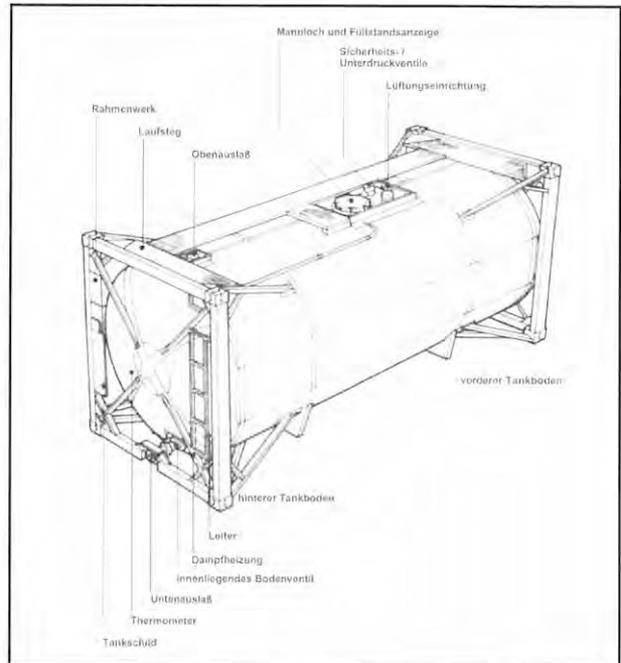


Bild 1.2: Ortsbeweglicher Tank (Tankcontainer) - Schematische Darstellung

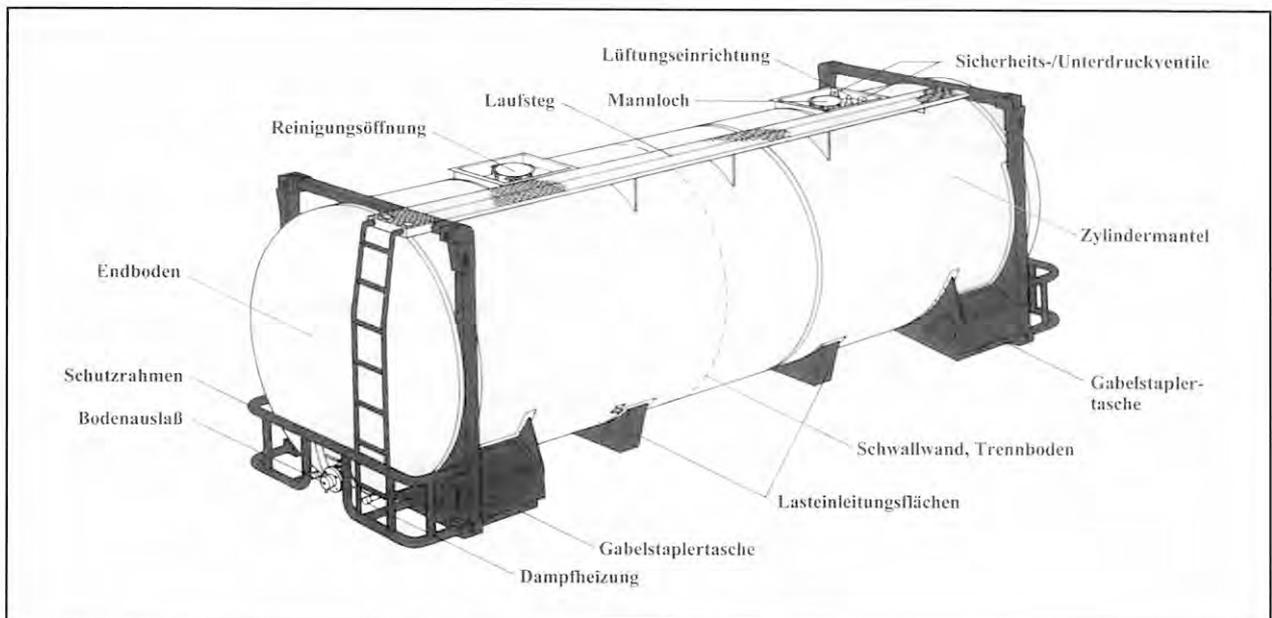


Bild 1.3: Ortsbeweglicher Tank (Wechseltank) - Schematische Darstellung

während des Transportes zur Abkühlung und damit zum Sinken des Druckes im Tank kommen.

Ist der Tank nicht in genügender Weise gegen die Wirkung äußeren Überdruckes ausgelegt und statt dessen mit einem sogenannten Vakuum- oder selbsttätigen Belüftungsventil ausgestattet, wird der Tank bei Überschreiten des Ansprechdruckes der genannten Einrichtungen „belüftet“, so daß sich im Tank ein explosives Dampf/Luftgemisch bilden kann, welches z.B. durch einen elektrostatischen Entladungsfunken gezündet werden könnte, was demzufolge zur Explosion im Tankinneren mit entsprechenden Auswirkungen führen würde. Genauso wäre es denkbar, daß bis auf Restmengen entleerte Tanks wegen klimatischer Temperaturschwankungen eine Druckabsenkung erfahren, die die Belüftung der Tanks bei Bildung eines explosiblen Dampf/Luft-Gemisches zur Folge hat, so daß es ebenfalls zu Explosionen im Tankinneren kommen kann.

Bekannt geworden und teilweise protokolliert sind dagegen Explosionen im Tankinneren sowohl von Lager- als auch Transporttanks, die sich während des Befüllens oder Entleerens - teilweise bei geöffnetem Mannlochdeckel - sowie als Folge von Reparaturarbeiten an Tanks, die nicht vollständig gereinigt oder bei denen Reinigungsmittelrückstände im Tank verblieben waren, ergeben haben:

1. Ein 10000 Liter fassender Anhänger eines Straßentankfahrzeuges enthielt noch ca. 2000 Liter eines Verschnittbitumens. Das Bitumen wurde durch einen in das Bitumen eintauchenden Ölbrenner auf die für das Entleeren notwendige Viskosität gebracht und mit Hilfe von Luft unter einem Überdruck von ca. 6 bar entleert. Bei dem Abfüllvorgang ereignete sich plötzlich eine Explosion, bei der der Tank aufgerissen wurde. Zwei Arbeiter erlitten Verbrennungen, an denen einer der beiden verstarb. Im Unfallbericht sind Berechnungen wiedergegeben, aus denen zu ersehen ist, daß das Bitumen zum Zeitpunkt des Unfalls auf ca. 140 °C aufgeheizt war. Diese Temperatur liegt über dem Flammpunkt des Bitumens. Es konnte sich also ein entzündbares Dampf/Luft-Gemisch bilden, das wegen des relativ hohen Förderdruckes zu dieser heftigen Explosion führte. [7]
2. Zwei Monteure hatten die Aufgabe oberhalb von zehn stationären Tanks eine Sammelgasleitung zu verlegen, an die neun Bitumentanks und ein Schweröltank über geflanschte Rohrkrümmer angeschlossen werden sollten. Wie in Raffineriebetrieben üblich, wurde für Arbeiten mit offenem Feuer von Fall zu Fall ein entsprechender Erlaubnisschein ausgestellt. Am Unfalltag waren Feuerarbeiten nicht vorgesehen. Die Monteure wollten abseits der Tanks weitere Rohrelemente vorbereiten. Hierzu benötigten sie die noch auf dem Dach des Schweröltanks liegenden Schweißkabel. Beim Aufnehmen der

Schweißkabel ereignete sich plötzlich eine Explosion, bei der das Tankdach mit den beiden Monteuren abgerissen und weggeschleudert wurde. Einer der Monteure starb an den Unfallfolgen, der andere erlitt erhebliche Verletzungen. [8]

3. Ein als Vorratsbehälter dienender Kesselwagen sollte an einen Lagertank mit Pumpstation angeschlossen werden. Drei Arbeiter befanden sich auf dem Kesselwagen, um den beheizbaren Befüllstutzen mittels Schweißarbeiten mit einer Dampfheizung zu verbinden. Nach einem hörbaren Zischen flog der lose aufliegende Domdeckel des Kesselwagens auf und ein Feuerball mit mehr als einem Meter Durchmesser trat aus der Domöffnung aus. Zwei Arbeiter erlitten Verbrennungen an Kopf und Füßen. Explosionsursache war die Entzündung flüchtiger Bestandteile von sich im Tank befindenden Resten von Anthrazenöl durch die vorgenommenen Schweißarbeiten. [9]
4. Es kam zu einer Explosion, als Mechaniker einer Autowerkstatt den Tank eines Flüssiggas-Tankfahrzeuges, welcher weder inertisiert noch vollständig entleert und gereinigt war, belüfteten. Beide Arbeiter wurden schwer verletzt, das Werkstattgebäude erheblich beschädigt. [10]

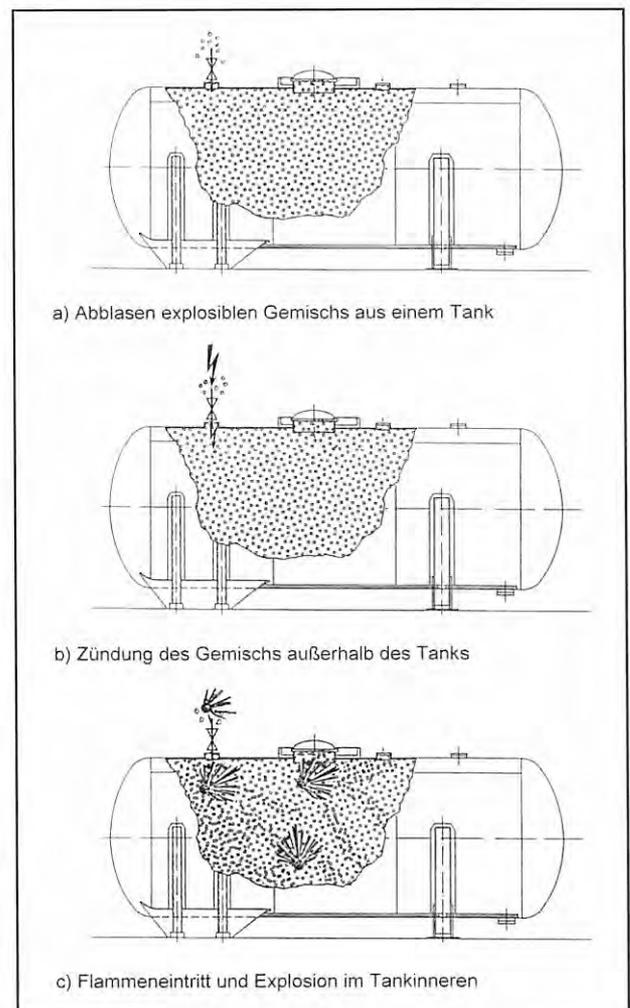


Bild 1.4: Flammenrückschlag in einen Tank (schematisch)

5. Im Bereich einer Autobahnbaustelle fuhr ein LKW auf ein nahezu leeres Tankfahrzeug auf, das ursprünglich Otto-Kraftstoff geladen hatte. Das Benzindampf/Luft-Gemisch in den fast vollständig entleerten Tankkammern wurde entzündet und es kam zu einer Explosion. Der Tankzug und zwei weitere Fahrzeuge brannten aus. Der Unfallverursacher und ein unbeteiligter PKW-Fahrer starben. [11]
6. Aufgrund von Schweißarbeiten am Dom eines leeren, gereinigten Tankaufliegers explodierte in der darunter liegenden Kammer ein entzündbares Dampf/Luft-Gemisch. Der mit den Reparaturarbeiten beschäftigte Mitarbeiter kam dabei ums Leben. Es darf vermutet werden, daß sich Reinigungsmittelrückstände im Tank befanden. [12]
7. Auf dem Betriebsgrundstück des Herstellers von Druckfarben kam es zu einer Explosion in einem Tankcontainer für die Beförderung von Farbpaste. Durch den sich ergebenden Druckstoß wurde der ca. 22 kg schwere Tankdeckel (Mannlochdeckel) abgerissen. Er durchschlug ein Schutzdach und beschädigte anschließend das Betriebsgebäude. Der Unfall ereignete sich beim Entleeren von bis auf 100 °C oder etwas mehr erwärmter Farbpaste mit Hilfe von Förderluft bei einem Förderüberdruck von ca. 2,5 bar. Der Betriebsüberdruck des Tankcontainers betrug 4 bar. Es kam zur Zündung eines explosiblen Lösungsmitteldampf/Luft-Gemisches. Es darf vermutet werden, daß die Zündung als Folge elektrostatischer Aufladung auftrat [13].

Unfälle der vorstehend geschilderten Art haben zur Forderung nach deren Verhinderung oder Beschränkung ihrer Auswirkungen, also zur Forderung nach Schutzmaßnahmen gegen Explosionen im Tankinneren geführt. Eine der möglichen Schutzmaßnahmen gegen die Auswirkungen von Explosionen im Tankinneren – das Vorsehen explosionsdruckstoßfester Bauweise von Tanks zur Beförderung entzündbarer flüssiger Stoffe – soll im folgenden ausführlicher diskutiert werden. Hierbei handelt es sich um eine Maßnahme, die im Sinne von Sicherheitsentscheidungen bei Risikoanalysen einsetzbar ist [14]. Die Anwendung einer Schutzmaßnahme in Fällen, in denen mit dem Auftreten explosibler Dampf/Luft-Gemische gerechnet werden muß, setzt zunächst jedoch eine Beurteilung ihrer Wirksamkeit voraus, die nur dann sinnvoll möglich ist, wenn der Explosionsablauf in Behältern bzw. Tanks genau genug bekannt ist.

2 Explosionen mit Dämpfen entzündbarer flüssiger Stoffe – Ablauf und Schutzmaßnahmen

2.1. Voraussetzungen für Explosionen

In den Richtlinien für die Vermeidung der Gefahren durch explosionsfähige Atmosphäre (Explosionsschutz-Richtlinien - EX-RL) werden Definitionen zu Voraussetzungen für Explosionen wie folgt gegeben [15]:

Explosionen bzw. Explosionsgefahren können beim Umgang mit brennbaren bzw. oxidierbaren Stoffen auftreten, wenn diese Stoffe in feiner Verteilung als Gase, Dämpfe, Nebel (Flüssigkeitströpfchen bzw. Aerosole) oder Stäube vorliegen, ihre Konzentration im Gemisch mit Luft innerhalb bestimmter Grenzen liegt und die Gemischmenge gefahrdrohend ist. Zur Einleitung der Explosion muß eine wirksame Zündquelle vorhanden sein.

Wie anhand der Unfallschilderungen in Abschnitt 1. bereits ersichtlich war, treten bei Explosionen Flammen, hohe Temperaturen und vielfach auch hohe Drücke bzw. Druckanstiegsgeschwindigkeiten auf.

Explosionen mit gefährlichen Auswirkungen können also auftreten, wenn die vier folgenden Voraussetzungen gleichzeitig erfüllt sind:

- Hoher Dispersionsgrad der brennbaren Stoffe,
- Konzentration der brennbaren Stoffe in Luft innerhalb ihrer Explosionsgrenzen,
- Vorhandensein einer gefahrdrohenden Menge explosionsfähiger Atmosphäre,
- Vorhandensein einer wirksamen Zündquelle.

Der Dispersionsgrad von Nebeln oder Stäuben kann für das Zustandekommen einer Explosion bereits ausreichend sein, wenn die Tröpfchen- bzw. Teilchengröße relativ groß ist (kennzeichnende Längen oder Durchmesser bis zu 1 mm). Zahlreiche vorkommende Nebel, Aerosole oder Stäube haben Teilchengrößen zwischen 0,001 und 0,1 mm. Bei gas- oder dampfförmig vorliegenden Stoffen ist ein ausreichender Dispersionsgrad naturgemäß gegeben.

Wenn die Konzentration des ausreichend dispergierten brennbaren Stoffes in Luft einen Mindestwert (untere Explosionsgrenze) überschreitet, ist eine Explosion möglich. Eine Explosion kommt jedoch nicht mehr zustande, wenn die Konzentration einen maximalen Wert (obere Explosionsgrenze) überschritten hat.

Unter anderen als atmosphärischen Bedingungen ändern sich die Explosionsgrenzen. Der Konzentrationsbereich zwischen den Explosionsgrenzen erweitert sich

beispielsweise in der Regel mit steigendem Druck und steigender Temperatur des Gemisches. Die oberen Explosionsgrenzen liegen bei Gemischen mit Sauerstoff wesentlich höher als bei Gemischen mit Luft. Einige chemisch instabile Stoffe haben unter bestimmten Bedingungen keine obere Explosionsgrenze (z.B. Acetylen und Ethylenoxid).

Über einer brennbaren Flüssigkeit kann sich explosionsfähige Atmosphäre nur bilden, wenn die Temperatur der Flüssigkeitsoberfläche einen Mindestwert überschreitet.

Bereits 10 Liter explosionsfähige Atmosphäre als zusammenhängende Menge müssen in geschlossenen Räumen unabhängig von der Raumgröße in der Regel als gefahrdrohend angesehen werden.

Zündquellen werden in ihrer Wirkung häufig unterschätzt oder nicht erkannt. Ihre Wirksamkeit, d.h. ihre Fähigkeit explosionsfähige Atmosphäre zu entzünden, hängt primär von der Energie der Zündquelle und von den Eigenschaften der explosionsfähigen Atmosphäre ab. Unter anderen als atmosphärischen Bedingungen ändern sich die für die Entzündung maßgebenden Eigenschaften der explosionsfähigen Gemische, beispielsweise wird die Mindestzündenergie von Gemischen mit erhöhtem Sauerstoffgehalt um Zehnerpotenzen verringert.

Für die in den nächsten Abschnitten folgenden, eingehenderen Betrachtungen zur Explosionsdruckstofffestigkeit von Transporttanks ist ausschließlich von Explosionen brennbarer Gas/Luft- bzw. Dampf/Luft-Gemische im Tankinneren auszugehen, wobei diese Gemische nur bei geringen Ausgangsdrücken gezündet werden (können). Daher können Diskussionen von Randbedingungen, die sich auf

- Stäube
- chemisch instabile Stoffe
- Nebel (Flüssigkeitströpfchen, Aerosole)
- reine Gas/Sauerstoff- bzw. Dampf/Sauerstoff-Gemische oder mit Sauerstoff angereicherte Luft-Gemische
- erhöhte Ausgangsdrücke (mehr als 0,2 bar Überdruck)
- grundsätzlich über die Umgebungstemperatur erhöhte Ausgangstemperaturen

beziehen, entfallen.

Wegen ihrer - zumindest im Hinblick auf die erörterten Sachverhalte - physikalischen Ähnlichkeit sollen der Einfachheit halber im folgenden „Gas/Luft- bzw. Dampf/Luft-Gemische“ ausschließlich als „Dampf/Luft-Gemische“ bezeichnet werden. Für den Begriff „explosionsfähig“ wird künftig einheitlich die Bezeichnung „explosibel“ gewählt und für den Begriff „brennbare Flüssigkeiten“ wird von nun an - den Bezeichnungen in bestimmten, später näher betrachteten Rechtsvorschriften folgend - der Terminus „entzündbare flüssige Stoffe“ verwendet.

Alle Druckangaben - bis auf Dampfdrücke - erfolgen als Überdrücke.

2.2. Verbrennungsvorgänge - Brände und Explosionen

Im folgenden werden - den Darlegungen von Schampel [16] folgend - kurz die verschiedenen Verbrennungsvorgänge von Dampf/Luft-Gemischen bei Explosionen (Deflagrationen, Detonationen) und Dauerbränden beschrieben, gegen die - wie später noch erläutert werden soll - die explosionsdruckstoßfeste Bauweise von Tanks bzw. Flammendurchschlagsicherungen eine wirksame Schutzmaßnahme darstellen:

Eine Verbrennung ist eine schnell ablaufende, oxidierend wirkende Reaktion unter Flammenerscheinung.

Der Mechanismus einer laminaren Flammenausbreitung - bei der keine zeitlichen Schwankungen in der Größe und Richtung der Flammenausbreitungsgeschwindigkeit auftreten - besteht in der kontinuierlichen Aufheizung von aufeinanderfolgenden Schichten des unverbrannten Dampf/Luft-Gemisches durch Wärmeleitung, bis bei einer bestimmten Temperatur Zündung eintritt. Dabei beträgt die Flammengeschwindigkeit einige 100 mm/s bis zu wenigen m/s. Zur Wärmeleitung kommen im allgemeinen auch noch Diffusionsvorgänge hinzu, durch die die Verbrennungsprodukte in das unverbrannte Gemisch gelangen. Mit einem Strahlungsanteil am Wärmetransport zwischen Reaktionszone und kaltem Gemisch ist meist weniger zu rechnen, da die explosiblen Dampf/Luft-Gemische in der Regel nur wenig Strahlungsenergie absorbieren können.

Der zweite Ausbreitungsmechanismus, die Detonation, ist gekennzeichnet durch ihre hohe Ausbreitungsgeschwindigkeit von ca. 1500 bis 2000 m/s, verbunden mit einem steilen Druckanstieg bzw. einer großen Druckanstiegsrate. Wesentlich ist, daß bei ihr das unverbrannte Gemisch durch einen Verdichtungsstoß auf die Zündtemperatur gebracht wird (stoßinduzierte Verbrennung). Ist die Detonation initiiert, so läuft sie mit konstanter Geschwindigkeit weiter. Der Verdichtungsstoß wird durch die bei der chemischen Reaktion frei werdende Energie aufrecht erhalten. Wärmeleitung spielt nur eine geringe Rolle. Detonationen und langsame laminare Verbrennung sind die beiden stationären

Grenzfälle der Flammenausbreitung. Flammen können sich auch mit Geschwindigkeiten fortpflanzen, die zwischen diesen beiden Grenzfällen liegen, jedoch handelt es sich hierbei zumeist um instationäre Verbrennungsvorgänge.

Die (Schadens-)Wirkung der Explosionen von Dampf/Luft-Gemischen läßt sich nach Heinrich [17] im wesentlichen durch den erreichbaren Enddruck und die höchste dabei auftretende Druckanstiegsrate beschreiben. Die Geschwindigkeit, mit welcher der Druck im Verlauf einer Explosion ansteigt, hängt von verschiedenen Einflußgrößen ab, zunächst von der Größe der Brennfläche. Da sich die chemische Umsetzung einer Verbrennungsreaktion in der Flammenfront vollzieht, ist die Umsatzgeschwindigkeit - und damit die Geschwindigkeit des Druckanstiegs - der Ausdehnung der Brennfläche direkt proportional. Das durch das Ablaufen der chemischen Reaktion bedingte Fortschreiten der Brennfläche in das unverbrannte Gemisch mit der erwähnten Geschwindigkeit bei laminarer Flammenausbreitung wird in geschlossenen Behältern von einer durch die Expansion der heißen Schwaden (Verbrennungsprodukte) hervorgerufenen, in bezug auf den Ausgangspunkt (Zündort) der Explosion kugelsymmetrischen Strömung überlagert. Dadurch wird die Reaktionsfront (Brennfläche) mit sehr viel größerer Geschwindigkeit als allein durch die chemische Reaktion bedingt in das unverbrannte Gemisch vorgeschoben.

Bei ruhendem Gemisch und Zündung im geometrischen Mittelpunkt des Behälters erhält man eine kugelförmige Flamme, deren Radius r linear mit der Zeit zunimmt. Da die Flammenoberfläche mit r^2 wächst, nimmt die Geschwindigkeit des Druckanstiegs stetig zu. Der Höchstwert - die maximale Druckanstiegs- geschwindigkeit - wird bei einem kugelförmigen Explosionsgefäß dann erreicht, wenn die Flammenfront die Behälterwand erreicht hat und die Verbrennung abgeschlossen ist.

Die Oberfläche einer Kugel weist im Verhältnis zu ihrem Volumen im Vergleich zu allen sonstigen geometrischen Körpern ein Minimum auf, d.h. jede Verzerrung der zunächst kugelförmigen Flammenfront führt zu einer Oberflächenvergrößerung und damit zu einer beschleunigten Verbrennung bzw. zu einer erhöhten Druckanstiegs- geschwindigkeit. Die Strömungs- geschwindigkeit expandierender Schwaden kann bei der Beugung der Flamme um im Brennraum befindliche Hindernisse, Durchtritt der Flamme durch Verengungen usw. soweit erhöht werden, daß die zunächst laminare Strömung bei Überschreiten der kritischen Reynoldszahl (Erläuterungen hierzu folgen in Abschnitt 2.3.4.) in eine turbulente Strömung umschlägt.

Die turbulente Flammenausbreitung unterscheidet sich von der laminaren dadurch, daß die Reaktionszone (Flammenfront) auch bei ansonsten konstanten Randbedingungen nicht kontinuierlich gleichmäßig fortschreitet, sondern zeitlichen Veränderungen unterliegt. Die

Reaktionszone bildet keine ebene oder einfach sphärisch gewölbte Fläche, vielmehr ist ihre Oberfläche vielfach gewellt und zerklüftet. Damit geht eine Vergrößerung der Flammenfront einher, was dazu führt, daß der Verbrennungsvorgang wesentlich schneller abläuft als in laminar strömenden Gemischen von vergleichbarer Stoffzusammensetzung und geometrischer Ausdehnung.

Als Folge der durch die Turbulenz erhöhten Geschwindigkeit der Flammenausbreitung ergeben sich erhöhte schadenswirksame Druckaufbaugeschwindigkeiten (Druckanstiegsraten) bei Explosionen in Behältern bzw. erhöhte Spitzendrücke in der Druckwelle freier Explosionen [18].

Ähnliche Erhöhungen des zeitlichen Druckanstiegs treten auch bei der Einwirkung großflächiger oder schnell bewegter Zündquellen bzw. Mehrfachzündquellen auf ein ruhendes explosives Gemisch auf. Die wie vorstehend beschrieben beschleunigte, laminar oder turbulent ablaufende Reaktion wird als Deflagration bezeichnet.

Im strömenden, vorgemischten Dampf/Luft-Gemisch kann nach der Entzündung auch eine - zumindest zunächst - ortsfest brennende Flamme (stationäre Flamme) auftreten, bei der also die Strömungsgeschwindigkeit gleich der Flammenfortpflanzungsgeschwindigkeit ist. Diese Erscheinung wird als Dauerbrand bezeichnet und ist der Natur der Sache nach im Hinblick auf explosionsdruckstoßfeste Bauweise von Tanks - nicht jedoch für die Beanspruchung bzw. Auslegung von Flammendurchschlagsicherungen - von untergeordneter Bedeutung.

Die wesentlichsten kennzeichnenden Größen zu den verschiedenen Verbrennungsvorgängen können größenordnungsmäßig der nachfolgenden Tabelle entnommen werden:

Verbrennungsvorgang	Explosion		Dauerbrand
	Deflagration	Detonation	
Kennzeichnende Größe			
Flammengeschwindigkeit	einige m/s bis einige 100 m/s	1500 m/s bis 2000 m/s	0,5 m/s bis * einige m/s
Druck	0,01 bis ** 10 bar	20 bis 100 bar	< 0,01 bar

Tabelle 2.1: Verbrennungsvorgänge und kennzeichnende Größen [16]

In der vorstehenden Tabelle gibt der Wert 0,5 m/s (*) für die Flammengeschwindigkeit die laminare Verbrennungsgeschwindigkeit an. Bei den Druckangaben für Deflagrationen (**) ist zu bemerken, daß der kleinere Wert bei sogenannten „Verpuffungen“ in freier Umgebung und der größere bei Explosionen in druckfesten Räumen erreicht werden kann, wobei größere Drücke auftreten können, falls die Zündung im vorverdichteten Gemisch stattfindet.

Auf die wesentlich knapperen Erläuterungen zu den Begriffen des Explosionsschutzes nach der Norm DIN EN 1127-1 sei der Vollständigkeit halber hingewiesen [19]. Die dort gegebenen stehen also nicht im Gegensatz zu den hier verwendeten, im Detail wesentlich genaueren Definitionen.

2.3. Explosionen in geschlossenen Behältern

Wie erwähnt ist Voraussetzung für die Entstehung von Bränden und Explosionen das Vorhandensein eines Systems, das zur fortschreitenden exothermen Reaktion fähig ist, und die Einleitung einer derartigen Reaktion durch eine Zündquelle, d.h. ein explosives Dampf/Luft-Gemisch wird durch eine Zündung zu einer Reaktion veranlaßt, die pro Zeiteinheit mehr Wärme erzeugt als sie verbraucht.

2.3.1. Explosionsgrenzen

Nabert/Schön [20] folgend muß beim Umgang mit entzündbaren flüssigen Stoffen mit der Bildung explosibler Gemische in gefahrdrohender Menge gerechnet werden, wenn der Flammpunkt bzw. der untere Explosionspunkt des entzündbaren flüssigen Stoffes unter der höchstmöglichen Temperatur liegt, die während der Lagerung oder des Transportes zu erwarten ist. Als höchstmögliche Temperatur gilt hierbei der mögliche Höchstwert der Temperatur, die die Flüssigkeitsoberfläche bei künstlicher oder natürlicher Erwärmung durch die Umgebung (Raum- oder Lufttemperatur) betriebsmäßig annehmen kann (maximale Betriebstemperatur). Liegt beim Umgang mit Gasen und Dämpfen - ohne Anwesenheit von Flüssigkeiten - die zu erwartende Konzentration über der unteren Explosionsgrenze oder beim Umgang mit Flüssigkeiten die maximale Betriebstemperatur über dem Flammpunkt bzw. unteren Explosionspunkt, so ist mit der Bildung explosibler Gemische zu rechnen (s. Bild 2.1). In vielen Fällen herrscht wegen ungleichmäßiger örtlicher Verteilungen explosibler Gemische beispielsweise in einem Behälter auch dann Explosionsgefahr, wenn die durchschnittliche Konzentration über der oberen Explosionsgrenze, unter der unteren Explosionsgrenze oder die minimale Verarbeitungstemperatur über dem oberen Explosionspunkt liegt.

So ist bei der Beurteilung der Gefahren beim Umgang mit entzündbaren flüssigen Stoffen ferner zu beachten, daß die Bildung eines gesättigten Dampf/Luft-Gemisches u.U. sehr lange Zeit benötigt und somit das über der Flüssigkeitsoberfläche befindliche Gemisch explosibel sein kann, obwohl die minimale Verarbeitungstemperatur über dem oberen Explosionspunkt liegt.

Die Explosionsgrenzen schließen dessen ungeachtet das Konzentrationsgebiet des Dampfes (eines entzündbaren flüssigen Stoffes) in Mischung mit Luft - den Ex-

plosions- bzw. Zündbereich - ein, innerhalb dessen mittels einer Zündquelle eine sich selbständig fortpflanzende Reaktion ausgelöst werden kann.

Werte für die Explosionsgrenzen unterliegen vielfältigen äußeren Einflüssen. So ist die angewendete Zündenergie von wesentlichem Einfluß auf die Breite des Explosionsbereichs: Je größer die von einer vorgegebenen Zündquelle auf die angrenzende Schicht des Dampf/Luft-Gemisches übertragene Energie ist, desto weiter wird der Konzentrationsbereich, innerhalb dessen sich die Flamme selbständig fortpflanzen kann; dabei wird besonders die obere Explosionsgrenze Ex_o zu den „fetteren“ Gemischen hin verschoben. Aber auch der Ausgangsdruck p_a , das ist der Anfangsdruck, der beim Wirksamwerden der Zündquelle herrscht, wirkt sich auf die Breite des Explosionsbereiches aus; mit steigendem Anfangsdruck wird im wesentlichen die obere Explosionsgrenze erhöht.

Chemische Reaktionen sind überdies stark temperaturabhängig, daher müssen Angaben über Explosions-

grenzen auf eine festgelegte Ausgangstemperatur des explosiblen Gemisches bezogen werden. Je höher dessen Temperatur ist, desto leichter kann sich die eingeleitete Reaktion fortpflanzen. Ebenso beeinflusst die relative Feuchte der Dampf/Luft-Gemische die Breite des Explosionsbereiches; sie ist bei extremer Trockenheit am größten. Bei Explosionskennzahlen handelt es sich also nicht um physikalische Konstanten. Die Werte sind weitgehend vom Ermittlungsverfahren abhängig. Es ist üblich, die Explosionsgrenzwerte bei Raumtemperatur und Normaldruck in einem geschlossenen Behälter hinreichender Größe (> 1 l) bei zentraler Lage des Zündortes aufzunehmen und eine Funkenstrecke, deren Energie in der Größenordnung von 10 J liegt, als Zündquelle zu verwenden.

Die Zahlenwerte für einige brennbare Gase und Dämpfe können der folgenden Tabelle 2.2 entnommen werden. Weitere Angaben zu sicherheitstechnischen Kennzahlen entzündbarer flüssiger Stoffe und brennbarer Gase sind in einschlägigen Tabellenwerken enthalten [20].

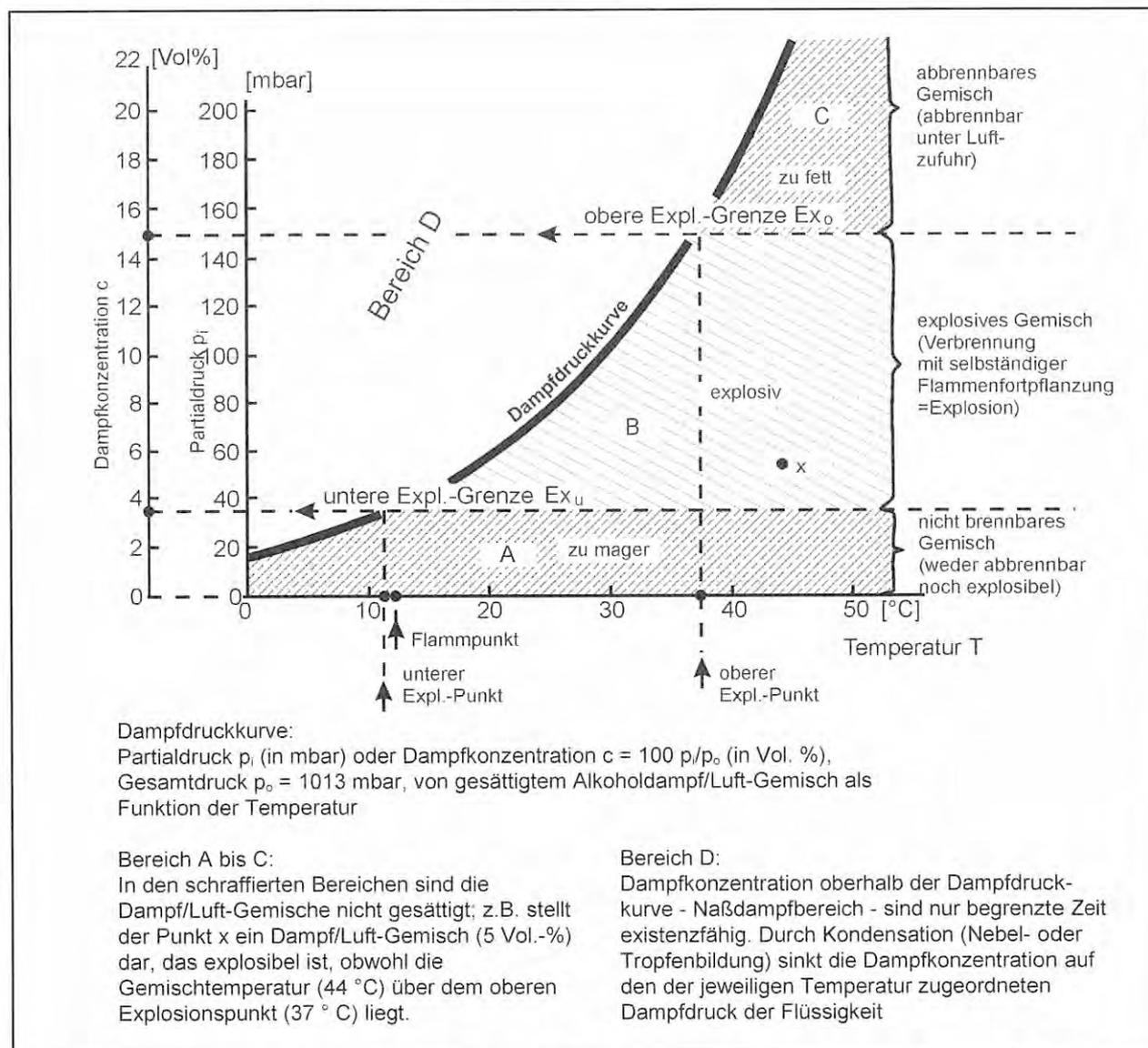


Bild 2.1: Zusammenhang zwischen Explosionen und Explosionspunkten, Bezeichnung der Konzentrationsbereiche und deren Verbrennungseigenschaften für Ethanol als Beispiel [20]

Brennstoff	Untere Explosionsgrenze [Vol. %]	Obere Explosionsgrenze [Vol. %]
Ethan	3,5	15,1
Ethylen	2,7	34
Kohlenoxid	12,5	74
Methan	4,6	14,2
Methanol	6,4	37
Pentan	1,4	7,8
Propan	2,4	8,5
Toluol	1,2	7,0
Wasserstoff	4,0	76

Tabelle 2.2: Explosionsgrenzen von Brenngasen und entzündbaren flüssigen Stoffen bei Normaldruck, Raumtemperatur, $E \approx 10 \text{ J}$ [21]

2.3.2. Explosionsdruck und Explosionsheftigkeit bei Einzelbehältern ¹

Die Verbrennungsgeschwindigkeit ist bei einem bestimmten Mischungsverhältnis von Dampf und Luft am größten (stöchiometrische Verhältnisse): sie vermindert sich zu den Explosionsgrenzen hin.

Verfolgt man einen solchen Verbrennungsablauf in einem geschlossenen Behälter meßtechnisch, dann macht die Druckmessung nicht nur Angaben über den hierbei auftretenden Explosionsdruck (p_{ex}), das ist der Überdruck über dem Anfangsdruck, bei dem das explosive Gemisch gezündet wird, sondern sie gibt auch den zeitlichen Verlauf des Verbrennungsprozesses wieder. Dabei ist der zeitliche Druckanstieg (dp/dt) ein Maß für die Flammengeschwindigkeit und damit für die Explosionsheftigkeit. Der zeitliche Druckanstieg wird definiert (Bild 2.2) als der Anstieg der Tangente im Wendepunkt des aufsteigenden Astes der Druck-Zeit-Kurve der Explosion und ist gleich dem Quotienten aus Druckdifferenz und der dazugehörigen Zeitdifferenz.

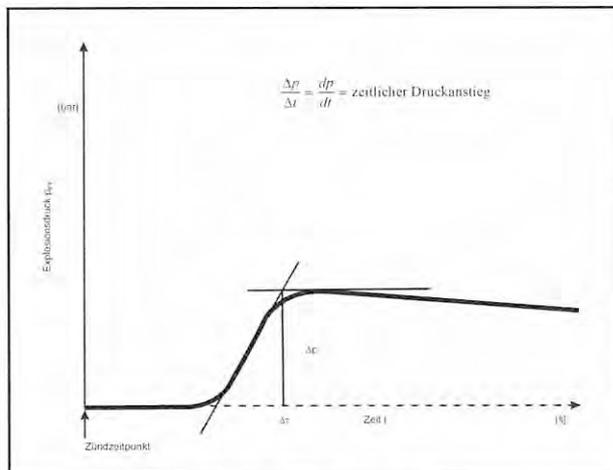


Bild 2.2: Bestimmung des zeitlichen Druckanstieges dp/dt einer Brenngasexplosion

¹ Die nachfolgenden Ausführungen orientieren sich an den Darlegungen von Bartknecht [21], sofern nichts anderes angegeben ist.

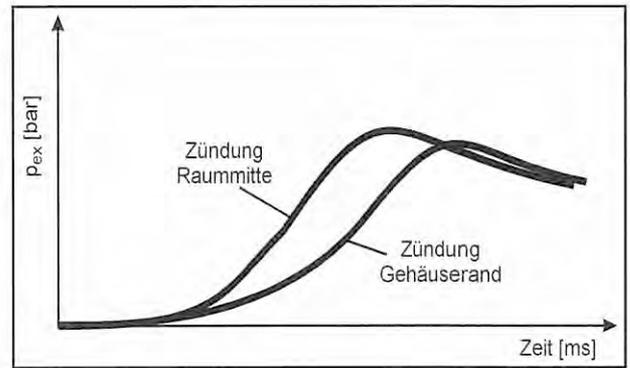


Bild 2.3: Einfluß des Zündortes auf den zeitlichen Druckanstieg einer Dampf-Explosion (schematisch)

Der zeitliche Druckanstieg ist am größten (Bild 2.3), wenn ein explosives Gemisch in Raummitte gezündet wird. Bei einer Zündortverlagerung, z.B. an den Behälterrand kommt die Explosionsflamme sehr viel schneller mit der abkühlenden Wand in Berührung. Die Folge ist ein verminderter zeitlicher Druckanstieg und ein, wenn auch geringfügig, herabgesetzter Explosionsdruck.

Optimalwerte für die Explosionskennzahlen eines vorgegebenen Brenngases (oder Brenndampfes) erhält man daher in einem geschlossenen Behälter von hinreichender Größe ($V > 1 \text{ l}$) bei zentraler Zündortlage aus Messungen über einen ausreichend breiten Konzentrationsbereich und definiert sie als maximaler Explosionsdruck p_{ex0} und maximaler zeitlicher Druckanstieg $(dp/dt)_{\text{max}}$.

Die Maximalwerte stellen sich im Bereich der stöchiometrischen Gemischzusammensetzung ein und vermindern sich zu der unteren bzw. oberen Explosionsgrenze hin.

Von der Definition der Explosion als selbständige Flammenfortpflanzung her sind also auch solche Reaktionen von Dampf/Luft-Gemischen in Behältern als Explosionen anzusehen, die bei einem sehr viel geringeren zeitlichen Druckanstieg nur eine schwache Druckäußerung zeigen. Es hat sich eingebürgert, in solchen Fällen von Verpuffung zu sprechen. Während der maximale Explosionsdruck herkömmlicher Brenngase (und brennbarer Dämpfe) im allgemeinen annähernd mit $p_{\text{ex0}} = 7$ bis 8 bar (derjenige von Ethylen beträgt ca. 10 bar) als konstant anzusehen ist, kann der maximale zeitliche Druckanstieg sehr unterschiedliche Werte unter sonst gleichen Ausgangsbedingungen annehmen (Bild 2.4).

Auch das Behältervolumen ist von wesentlichem Einfluß auf die Explosionsheftigkeit. Wie Bild 2.5 zeigt, geben Propan-Explosionen in geschlossenen Behältern unterschiedlicher Größe zwar den gleichen Enddruck (ca. 7 bar), sie unterscheiden sich jedoch hinsichtlich der Schnelligkeit der Druckäußerung erheblich, wobei im 20 m^3 -Behälter mehr als $0,5 \text{ s}$ vergehen, bevor die Reaktion beendet ist.

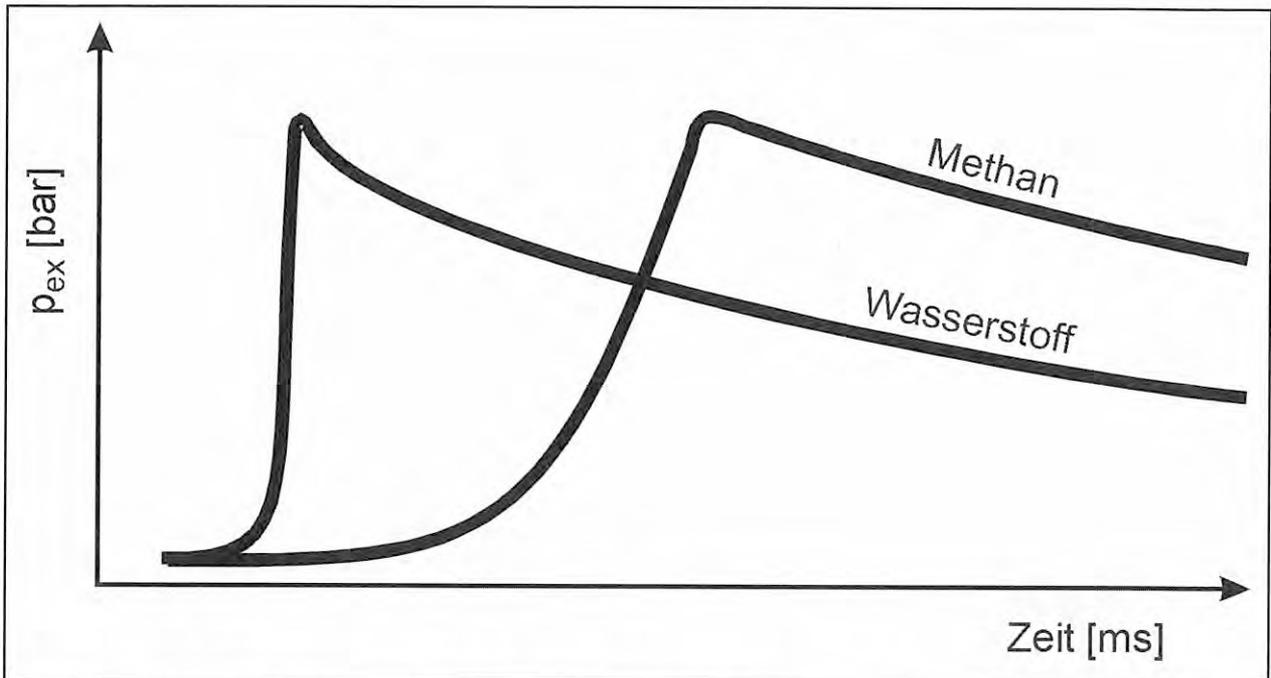


Bild 2.4: Schematischer zeitlicher Ablauf einer Methan- und einer Wasserstoff-Explosion in einem geschlossenen Behälter (stöchiometrisches Gemisch)

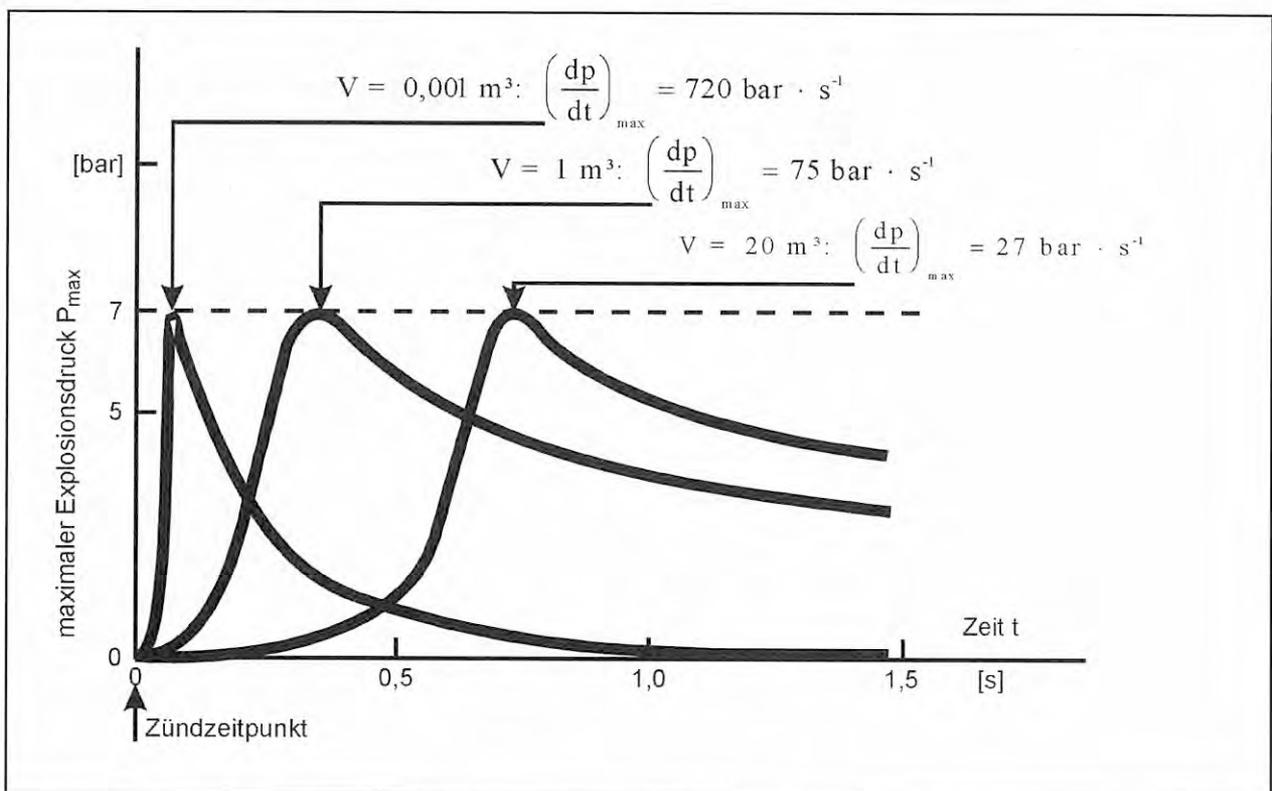


Bild 2.5: Volumeneinfluß auf Propan-Explosionen (stöchiometrisches Gemisch)

Die Volumenabhängigkeit des maximalen zeitlichen Druckanstieges eines vorgegebenen Brenngases (oder brennbaren Dampfes) beschreibt das sogenannte kubische Gesetz:

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

Das kubische Gesetz besagt, daß das Produkt aus maximalem zeitlichen Druckanstieg multipliziert mit der 3. Wurzel aus dem Behältervolumen eine Konstante ist. Es wird angenommen, daß es sich bei dem um eine spezifische Stoffkonstante F handelt, wenn:

1. die gleiche optimale Gemischkonzentration eines Brenngases,

2. die gleiche Behälterform,
3. der gleiche Turbulenzgrad des Gas/Luft-Gemisches und
4. die gleiche Zündart

zugrunde gelegt werden.

Die Angabe des maximalen zeitlichen Druckanstieges ohne gleichzeitige Volumenangabe ist also für explosionstechnische Betrachtungen nicht ausreichend.

Tabelle 2.3 zeigt die K_G -Werte einiger als repräsentativ anzusehender Brenngase bei Mischung mit Luft unter Anwendung einer Funkenstrecke als Zündinitial ($E \approx 10$ J).

Brenngas	K_G -Werte [bar · m · s ⁻¹]
Methan	55
Propan	75
Ethylen	136 ¹⁾
Wasserstoff	550

¹⁾ Mitteilung des Laboratoriums 4.22 der BAM (1984)

Tabelle 2.3: K_G -Werte einiger Brenngase bei ruhend gezündetem Gemisch (Mittelwerte); (Zündenergie: $E \approx 10$ J, $p_{ex0} = 7,4$ bar)

Zur Herleitung des kubischen Gesetzes gibt Heinrich [17] Hinweise.

Unter den genannten Voraussetzungen ist es möglich, aus Versuchsergebnissen, die im Labormaßstab ermittelt werden, Rückschlüsse auf die zu erwartende Explosionsheftigkeit eines Dampf/Luft-Gemisches in einem Großbehälter zu ziehen. Der maximale Explosionsdruck unterliegt dieser Gesetzmäßigkeit nicht und ist praktisch unabhängig vom Behältervolumen.

Auch die Behälterdimensionen stehen in Relation zu der Explosionsheftigkeit eines vorgegebenen Brenngases bzw. Dampfes. Es wird dabei von der Überlegung ausgegangen, daß sich die ursprünglich kugelförmige Flammenfront mit fortschreitender Ausbreitung, entsprechend der Behälterform, immer mehr verzerrt und sich schließlich an die Behälteroberfläche anlegt. Es ergibt sich daher eine Proportionalität zwischen dem maximalen zeitlichen Druckanstieg und dem Quotienten von Oberfläche zu Volumen:

$$(dp/dt)_{\max} \approx \text{Oberfläche/Volumen.}$$

Die die Explosionsheftigkeit charakterisierenden Kennzahlen werden zufolge der Druckabhängigkeit des Reaktionsmechanismus auch vom Ausgangsdruck (p_a) beeinflusst. Eine Anhebung des Druckes über den Normaldruck hinaus bewirkt eine proportionale Zunahme des maximalen Explosionsdruckes sowie des maximalen zeitlichen Druckanstieges und damit auch

des K_G -Wertes. Eine Verringerung des Druckes unter den Normaldruck bewirkt entsprechend eine Abnahme der Kenngrößen bis schließlich die Fähigkeit zur selbständigen Explosionsfortpflanzung aufhört. Dies tritt bei einem bestimmten Grenzdruck ein, der für Brenngase bei Mischung mit Luft in der Größenordnung von einigen mbar liegt. Bei sehr geringen Ausgangsdrücken sind die Explosionskennzahlen unabhängig von der aufgewendeten Zündenergie.

Die optimalen Konzentrationen, bei denen sich die maximalen Kennzahlen des Explosionsablaufes einstellen, werden vom Vordruck praktisch nicht beeinflusst.

Eine Beschleunigung des Verbrennungsprozesses ergibt sich, wenn man die Energie der Zündquelle steigert, mit der die Dampf/Luft-Gemische zur Explosion gebracht werden: Der Konzentrationsbereich, innerhalb dessen Dampf/Luft-Gemische zur Explosion gebracht werden können, also die Explosionsgrenzen, werden aufgeweitet. Bei relativ kleinen Ausgangsdrücken ($p_a \approx 0,2$ bar) ist der maximale Druckanstieg $(dp/dt)_{\max}$ nahezu unabhängig von der aufgewendeten Zündenergie; der maximale Explosionsdruck p_{ex} ist praktisch ausschließlich proportional vom Vordruck abhängig. Die Energie einer Zündquelle ist jedoch ausreichend hoch zu bemessen, um eine exotherme Reaktion in Abhängigkeit bestimmter Randbedingungen (Luftfeuchte usw.) sicher einzuleiten.

Die bisherigen Betrachtungen bezogen sich auf kubische Behälter deren Verhältnis Länge zu Durchmesser zwischen 1:1 bis 5:1 liegt. In geschlossenen langgestreckten Behältern hat man es bei Zündung in der Behältermitte nur im Anfangsstadium des Verbrennungsprozesses mit einer kugelförmigen Ausbreitung der Explosionsflamme zu tun, die dann in axialer Richtung rasch zu den Behälterenden wandert und hier ein bereits vorkomprimiertes Gemisch vorfindet. Dies führt zu einer Steigerung der Explosionsheftigkeit, wobei der Explosionsablauf schwingungsüberlagert ist (s. Abschnitt 2.3.4.).

Bei Normaldruck ($p_a = 1$ bar abs.) wird in einem langgestreckten Behälter ($L/D > 6$) infolge der größeren Verlustwärme der an sich im geschlossenen Behälter zu erwartende maximale Explosionsdruck von bis zu ca. 10 bar zwar nicht ganz erreicht, dennoch ist hier aufgrund des veränderten Verbrennungsablaufes mit ansteigendem Vordruck eine stärkere Zunahme des Explosionsdruckes zu beobachten als im Kugelbehälter; bei einem Vordruck von ca. 20 bar tritt nahezu Verdoppelung ein.

Ähnlich steht es um den maximalen zeitlichen Druckanstieg. Obgleich das kubische Gesetz für den größeren Behälter geringere Werte hinsichtlich des zeitlichen Druckanstieges der Explosionen fordert, sind in langgestreckten 54 l-Behältern - praktisch unabhängig vom Vordruck - etwas mehr als doppelt so hohe Werte wie im 1 l-Kugelbehälter zu beobachten.

Es ist also auch die Behälterform in die sicherheitstechnischen Betrachtungen einzubeziehen.

In diesem Abschnitt wurde bisher davon ausgegangen, daß sich die explosiblen Gemische im Augenblick der Zündung in Ruhe befinden. In der Praxis hat man es jedoch häufig mit bewegten, d.h. gegebenenfalls turbulenten Gemischen zu tun. Wie in Abschnitt 2.2. bereits dargestellt, läuft der Verbrennungsvorgang unter turbulenten Bedingungen wesentlich schneller ab, als es bei einer sphärischen Verbrennung bzw. Reaktion der Fall ist. Aus diesem Grund ergibt sich eine Steigerung der Explosionsheftigkeit, verbunden mit einer Anhebung des maximalen Explosionsdruckes sowie einer geringfügigen Erweiterung der Explosionsgrenzen.

Es gibt Förster/Steen [22] und Degner/Förster [23] folgend jedoch auch Anzeichen dafür, daß bei gleichem Turbulenzgrad die in einem größeren Behälter ermittelten K_G -Werte über denjenigen liegen, die in einem kleineren Behälter ermittelt wurden, d.h. der auf die Druckanstiegsrate bezogene K_G -Wert steigt mit der charakteristischen Behälterabmessung an. Die Erkenntnisse bedürfen jedoch noch stärkerer Absicherung bevor hieraus eine Wertung des kubischen Gesetzes resultieren könnte.

2.3.3. Explosionsdruck und -heftigkeit bei miteinander verbundenen Behältern und Behälterabschnitten ²

In der Industriepraxis sind oft Behälter über Rohrleitungen unterschiedlicher Länge miteinander verbunden, so daß Explosionen von dem einen Behälter in den anderen übertreten können. In solchen Fällen können in ihnen sehr heftige Druckoszillationen auftreten: nach Einleitung der Zündung im ersten Behälter entsteht dort zunächst eine laminare Flamme, die schließlich in das Verbindungsrohr eintritt, sich beschleunigt und turbulent wird. Der dann in den zweiten Behälter eintretende Flammenstrahl kann hier auf ein Gemisch stoßen, das infolge des Vorschubes von unverbranntem Gemisch vor der Flammenfront unter einer mehr oder weniger hohen Vorkompression steht. Der erhöhte Druck und die sehr rasche turbulente Verbrennung führen nun zu einem sehr schnellen Druckanstieg, u.U. auch kurzfristig zu stark überhöhten Spitzendrücken im gesamten Behältersystem, begleitet von heftigen Druckoszillationen.

Sind die miteinander kombinierten Behälter von gleichem Volumen, so ist (Versuche im Kleinmaßstab) die Länge der verbindenden Rohrleitung von nicht entscheidendem Einfluß auf den Explosionsverlauf. Dagegen wirkt sich der Rohrleitungsdurchmesser ganz entscheidend auf die Explosionsheftigkeit in beiden Behältern aus.

² Die nachfolgenden Ausführungen orientieren sich an den Darlegungen von Bartknecht [21], sofern nichts anderes angegeben ist.

Die Druckoszillation hat zur Folge, daß der zeitliche Druckanstieg im Zündbehälter ca. 4 mal so hoch wie im Einzelbehälter ist. Eine Überhöhung des maximalen Explosionsdruckes ist hier jedoch nicht zu beobachten. Die Flammenstrahlzündung bewirkt dagegen im Zweitbehälter eine Verstärkung der Explosionsheftigkeit um den Faktor 3 bis 10, je nach Durchmesser der Verbindungsleitung, wobei trotz der Volumengleichheit hier auch der maximale Explosionsdruck um ca. 10 % überhöht sein kann. Man darf annehmen, daß sich gegenüber dem Explosionsverlauf im Einzelbehälter in kombinierten Behältern von gleichem Volumen eine Steigerung der Explosionsheftigkeit nicht vermeiden läßt, daß sich aber durch entsprechende Wahl des Verhältnisses von Rohrdurchmesser zum Behältervolumen ($f = F/V > 0,4 \text{ m}^2/\text{m}^3$) überhöhte Explosionsdrücke vermeiden lassen.

Ein völlig anderer Explosionsablauf zeigt sich, wenn die durch Rohre verbundenen Behälter von unterschiedlichem Volumen sind (Bild 2.6).

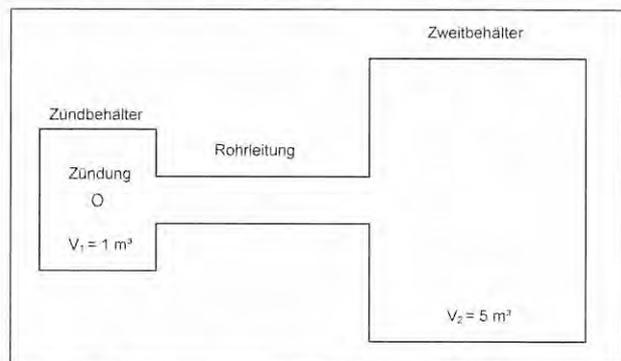


Bild 2.6: Versuchsanordnung (schematisch)

In Bild 2.7 sind die Explosionskennzahlen von Methan für den Fall dargestellt, daß die Explosionen von dem kleineren ($V = 1 \text{ m}^3$) in den größeren Behälter ($V = 5 \text{ m}^3$) über 10 m lange Leitungen übertragen werden. Wiederum hat der Durchmesser der Verbindungsleitung einen Einfluß auf den Verlauf der Reaktion.

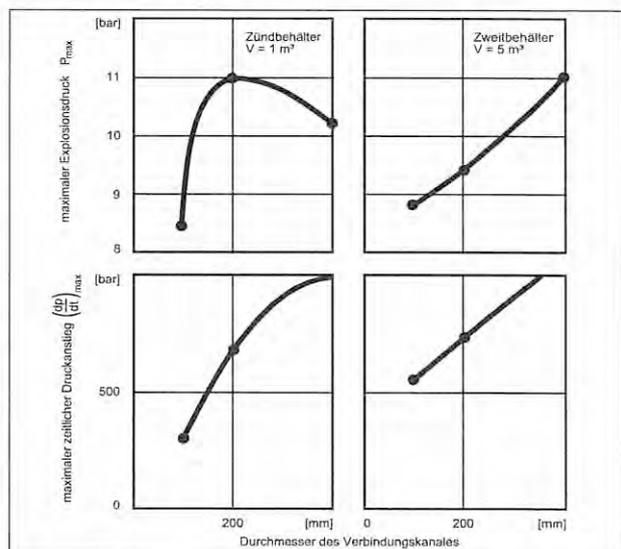


Bild 2.7: Explosionskennzahlen von Methan in kombinierten Behältern ($V = 1 \text{ m}^3 \rightarrow 5 \text{ m}^3$)

Behältervolumen	1 m ³		5 m ³	
	p _{ex} [bar]	$\left(\frac{dp}{dt}\right)_{\max}$ [bar/s]	p _{ex} [bar]	$\left(\frac{dp}{dt}\right)_{\max}$ [bar/s]
Einzelbehälter, Funkenstrecke	7,4	55	7,4	32
Kombinierte Behälter, Funkenstrecke/Flammenstrahl	10,2 ^a	1000 ^a	11,0 ^b	1200 ^b

^a Zündbehälter, ^b Zweitbehälter

Tabelle 2.4: Explosionskennzahlen von Methan in kombinierten Behältern: $V = 1 \text{ m}^3 \rightarrow 5 \text{ m}^3$, Verbindungsleitung DN 400, Länge 10 m, $f = 0,13 \text{ m}^2/\text{m}^3$

Bei kombinierten Behältern mit unterschiedlichem Volumen (Zündquelle in dem kleineren Behälter) ist bei dem vorgegebenen Volumenverhältnis und einem Durchmesser der Verbindungsleitung von 400 mm, im Falle von Methan im gesamten System bei erheblicher Verstärkung der Explosionsheftigkeit mit einer Anhebung des maximalen Explosionsdruckes um 40 bis 50 % zu rechnen.

Werden dagegen die Explosionen von dem größeren ($V = 5 \text{ m}^3$) in den kleineren Behälter ($V = 1 \text{ m}^3$) übertragen, so sind die Explosionskennzahlen von Methan in beiden Behältern sehr unterschiedlich (Bild 2.8).

Die Explosionskennzahlen sind im Zündbehälter gegenüber denjenigen im Zweitbehälter erheblich reduziert und wiederum tritt eine maximale Explosionsverstärkung bei der Verbindungsleitung DN 400 ein. Die zu erwartenden Kennwerte zeigt Tabelle 2.5.

Bei der Anordnung der Zündquelle im größeren Behälter ist somit besonders im kleineren Zweitbehälter eine abnorme Steigerung der Explosionsheftigkeit festzustellen, die mit einer Anhebung des maximalen Explosionsdruckes um mehr als 200 % verbunden ist. Die Gemischzusammensetzung höchster Kennwerte ist nicht

- wie im Einzelbehälter - konstant und im Bereich der stöchiometrischen Zusammensetzung gelegen, son-

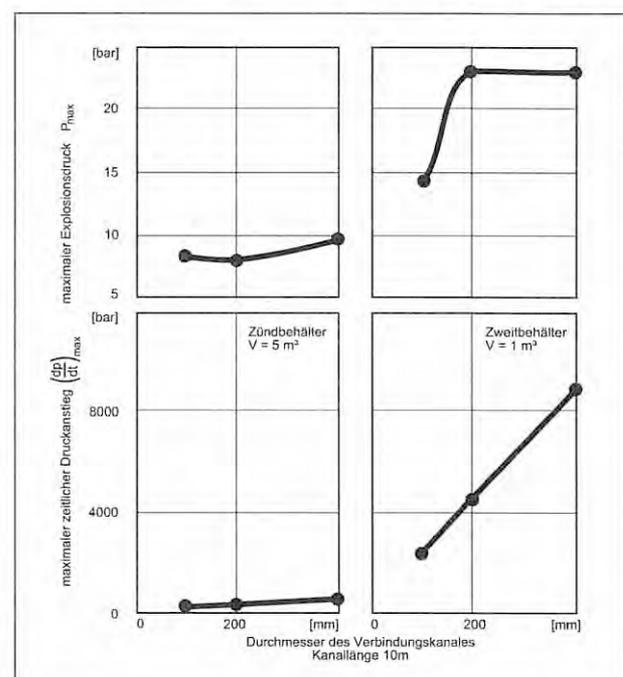


Bild 2.8: Explosionskennzahlen von Methan in kombinierten Behältern ($V = 5 \text{ m}^3 \rightarrow 1 \text{ m}^3$)

Behältervolumen	5 m ³		1 m ³	
	p _{ex} [bar]	$\left(\frac{dp}{dt}\right)_{\max}$ [bar/s]	p _{ex} [bar]	$\left(\frac{dp}{dt}\right)_{\max}$ [bar/s]
Einzelbehälter, Funkenstrecke	7,4	32	7,4	55
Kombinierte Behälter, Funkenstrecke/Flammenstrahl	9,7 ^a	645 ^a	23,0 ^b	10000 ^b
Prozentuale Zunahme	31 %	1900 %	210 %	18000 %

^a Zündbehälter, ^b Zweitbehälter

Tabelle 2.5: Explosionskennzahlen von Methan in kombinierten Behältern: $V = 5 \text{ m}^3$, Verbindungsleitung DN 400, Länge = 10 m, $f = 0,025 \text{ m}^2/\text{m}^3$

dem wird vom Durchmesser der Verbindungsleitung und der örtlichen Lage der Zündquelle im Zündbehälter bestimmt. Maximale Explosionsverstärkung im Zweitbehälter ist immer dann zu beobachten, wenn die Explosion in größtmöglicher Entfernung von der Mündung der Verbindungsleitung im Zündbehälter eingeleitet wird. Für die maximale Druckäußerung im Zündbehälter gilt dies nur bedingt.

Zu nahezu identischen Erkenntnissen kommt auch Heinrich [17], der ebenfalls Untersuchungen mit verschiedensten Kombinationen von mit einer Rohrleitung verbundenen Behältern durchgeführt hat und folgende Zusammenfassung gibt:

Die Versuche machen deutlich, daß der Explosionsablauf in mit Rohrleitungen verbundenen Gefäßen sich beträchtlich vom Explosionsablauf in kubischen Gefäßen unterscheidet. Folgende Phänomene werden beobachtet:

- a) Mit zunehmender Länge und abnehmendem Querschnitt der verbindenden Rohrleitungen steigen die maximalen Druckanstiegsgeschwindigkeiten in den einzelnen Kammern an. Sie liegen ein Vielfaches höher als in kubischen Gefäßen gleichen Volumens. In kubischen Behältern (V_1) findet bei zentraler Zündung eine kugelförmige, laminare Flammenausbreitung statt. Die Gasbewegung ist dabei vor der Flammenfront radialsymmetrisch nach außen gerichtet. Ist an das Gefäß ein Rohr angeschlossen, so wird die Gasströmung unsymmetrisch in Richtung auf die Rohrmündung verzerrt. Die kugelförmige Flammenfront erleidet dabei eine mehr oder minder birnenförmige Ausstülpung in Richtung auf die Rohrmündung unter gleichzeitiger Vergrößerung der Brennfläche. Im Rohr angelangt, wird die Flamme durch die Querschnittsverengung beschleunigt und in Turbulenz versetzt. Beim Eintritt in die zweite Kammer (V_2) findet dort von Anfang an turbulente Verbrennung statt. Das Ausmaß der Turbulenz in der Rohrleitung hängt sowohl vom Rohrquerschnitt als auch von der Rohrlänge ab.
- b) Bei ungleich großen Behältern nimmt unter sonst gleichen Bedingungen bei Zündung im größeren Behälter die maximale Druckanstiegsgeschwindigkeit im kleineren Behälter über alle Maßen zu. Je kleiner das Volumen V_2 bei ungeändertem Querschnitt der Rohrleitung ist, um so stärker wirkt sich eine Vorkompression (s. zu c) des Frischgases aus und um so schneller wird der Behälterinhalt von der ein tretenden turbulenten Flamme verwirbelt.
- c) Liegt der Ort der Zündung weit genug von der Rohrmündung entfernt, so treten im anderen Behälter kurzfristig Drücke auf, die höher sind als sich nach thermodynamischer Rechnung (und Experimenten unter fast idealen Bedingungen im Kugelgefäß) ergeben. Im Verlauf der Explosion wird das vor der Flammenfront befindliche Frischgas komprimiert,

während sich die hinter der Flamme befindlichen Verbrennungsgase ausdehnen. Da sich in kubischen Behältern die laminare Flamme mit einigen m/s fortpflanzt, die Druckausbreitung hingegen mit Schallgeschwindigkeit erfolgt, herrscht dort zu einem gegebenen Zeitpunkt überall im Raum praktisch der gleiche Druck. In mit Rohrleitungen kombinierten Gefäßen ist dieses nicht der Fall. Bei einer Behälterkombination gleich großer Behälter und Zündung am Behälterrund steigt der Druck des Frischgases in V_2 wegen der vorgeschalteten Querschnittsverengung zunächst langsamer an als in V_1 . Die Verzögerung wird dabei um so größer anfallen, je länger die Rohrleitung und je kleiner ihr Querschnitt ist. Die Phase des Druckanstiegs durch bloße Kompression endet mit Eintritt der Flamme in V_2 . Der folgende Druckaufbau in V_2 wird ausschließlich von der hier ablaufenden turbulenten Verbrennung gespeist. Die Rohrleitung drosselt dabei die Rückströmung und läßt den Druck in V_2 u.U. über den in V_1 ansteigen. Dies tritt besonders dann ein, wenn der Rohrquerschnitt klein, die Verbrennung in V_2 schnell und der Grad der Vorkompression in V_2 vor Eintritt der Zündflamme hoch war. Eine hohe Vorkompression ergibt sich dann, wenn der Flammenübertritt erst spät erfolgt, z.B. wenn der Ort der Primärzündung in V_1 von der Rohrmündung weg in Richtung auf die gegenüberliegende Behälterwand verlegt und damit die Wegstrecke für die Flamme verlängert wird. Mitunter erlischt die Flamme in der Rohrleitung. Der Druck verharrt dann in V_2 eine Zeit auf der durch Kompression erreichten Höhe und fällt schließlich wieder ab. Das dort vorhandene Gemisch bleibt unverbrannt.

- d) Die bei Versuchen in kubischen Behältern sehr deutlich ausgeprägten Unterschiede der maximalen Druckanstiegsgeschwindigkeiten von Methan, Propan und Wasserstoff im Gemisch mit Luft verwischen sich bei mit Rohrleitungen verbundenen Behältern.

Die Erläuterungen zu a) - c) machen verständlich, daß die spezifischen Verbrennungseigenschaften der einzelnen Gase in mit Rohrleitungen verbundenen Behältern den Explosionsablauf nicht in dem Maße bestimmen wie in kubischen Gefäßen. Bisher sind Behältervolumina betrachtet worden, die vollständig und homogen mit explosiblem Gemisch befüllt waren. Ist jedoch, wie dies in der Praxis gegeben sein kann, mit einem örtlich begrenzten Auftreten von explosiblem Gemisch zu rechnen, so bestimmt die im Augenblick des Wirksamwerdens der Zündquelle gerade vorhandene Gemischmenge den maximalen Explosionsdruck, wobei ein nahezu linearer Zusammenhang zwischen dem Befüllungsgrad und dem entstehenden Druck besteht. Der maximale zeitliche Druckanstieg vermindert sich entsprechend.

2.3.4. Explosionsdruck und -heftigkeit bei langgestreckten Behältern (beiderseits geschlossenen Rohren) ³

Da es sich beim Verbrennungsablauf von Dampf/Luft-Gemischen um ausgeprägte axiale Strömungen eines Mediums handelt, sei zunächst der Strömungsvorgang in einer Rohrstrecke ohne die Überlagerung einer Verbrennungsreaktion betrachtet. Bei Strömungen in einem Rohr kann es sich um Laminarströmung oder um turbulente Strömung handeln.

Der Übergang von der laminaren in die turbulente Strömung hängt von der dimensionslosen Reynoldsschen Zahl ab:

$$Re = \frac{v \cdot d}{\nu}$$

v = mittlere Geschwindigkeit
 d = Rohrdurchmesser
 ν = kinematische Zähigkeit

Für $Re < 2100$ hat man immer mit einer laminaren Strömung zu rechnen; das Geschwindigkeitsprofil ist bei kreisrunden Rohren parabelförmig.

Die kritische Geschwindigkeit, bei der der Umschlag in die turbulente Strömung erfolgt, ist jene Geschwindigkeit, die dem Wert der kritischen Reynoldsschen Zahl

$$Re = \frac{v_{krit} \cdot d}{\nu} = 2100$$

entspricht. Das Geschwindigkeitsprofil ist nicht mehr parabelförmig, d.h. die Turbulenz wirkt weitgehend ausgleichend.

Der Wert 2100 für den Umschlagspunkt stellt eine untere Grenze dar, unterhalb der selbst bei starken Strömungen nur der laminare Zustand stabil ist. Laminare Strömungen sind jedoch auch selbst bei hohen Re-Zahlen (z.B. $Re < 40\,000$) möglich. Die geringste Störung bedingt jedoch einen sofortigen Umschlag. Allgemein kann gesagt werden, daß unter sonst gleichen Bedingungen der Umschlag von der laminaren Strömung in den turbulenten Zustand um so eher erreicht wird, je größer die Rauigkeit des Rohres ist. Bei der Strömung von Gasen in Rohren von technischem Durchmesser (d = einige 100 mm) erfolgt der Umschlag in den turbulenten Bereich bereits bei Strömungsgeschwindigkeiten in der Größenordnung von 0,1 bis 1,0 m/s, ein Bereich also, der demjenigen der normalen laminaren Verbrennungsgeschwindigkeit der Brenngase entspricht.

Diese Feststellung ist von wesentlicher Bedeutung für die Betrachtung von Verbrennungsvorgängen - Explosionsvorgängen - in Rohrleitungen.

Hinsichtlich des Explosionsablaufes von Brenngasen in Rohren muß man mit zwei Grenzfällen rechnen:

- a) Die Zündung von explosiblem Gemisch am offenen Ende eines am anderen Ende geschlossenen Rohres. Die Flamme läuft zunächst gleichmäßig in das mit Gemisch befüllte Rohr hinein; es verbrennt das gesamte Gemisch in der Rohrstrecke. Da das Verbrannte frei abströmen kann, ist zunächst zu erwarten, daß die „normale Verbrennungsgeschwindigkeit v_n “ (= laminare Flammengeschwindigkeit) nicht überschritten wird, d.h. die „sichtbare Flammengeschwindigkeit v_{ex} “ müßte mit ihr übereinstimmen. Bei der wirklichen Verbrennung ist dies jedoch nur im Anlaufstadium der Fall. Mit fortschreitender Verbrennung wird der Gemischinhalt im Rohr zu Eigenschwingungen angeregt und die Bewegung ist nicht mehr laminar, sondern turbulent. Die Folge ist eine Erhöhung der sichtbaren Verbrennungsgeschwindigkeit (s. Abschnitt 2.2.), wobei die Flammenfront nicht eben, sondern gewölbt ist. Die Brennfäche F ist größer als der Rohrquerschnitt f . Damit aber ist die Explosionsgeschwindigkeit v_{ex} - die sichtbare Flammengeschwindigkeit - im Innern des Rohres um den Faktor F/f größer als die normale Verbrennungsgeschwindigkeit v_n :

$$v_{ex} = \frac{F}{f} \cdot v_n$$

- b) Etwas verwickelter sind die Verhältnisse bei Verbrennungsvorgängen, wenn die Zündung von explosiblem Gemisch am geschlossenen Ende eines am anderen Ende offenen Rohres erfolgt.

Hier ist die Explosionsgeschwindigkeit v_{ex} wesentlich größer als bei der Zündung am offenen Ende, da wegen der starken Volumenzunahme bei der Verbrennung das Unverbrannte eine Geschwindigkeit, die sogenannte Verdrängungsgeschwindigkeit (v_v), annimmt, die 80 bis 90 % der beobachteten, sichtbaren Flammengeschwindigkeit betragen kann. Es verbrennt nur ein Teil (theoretisch $\approx 1/7$) des Gemischinhaltes im Rohr, während der Rest zunächst unverbrannt aus dem offenen Mundloch der Rohrstrecke ausgestoßen und dann durch die nacheilende Flamme außerhalb des Rohres zur Explosion gebracht wird. Die Ursache für die hohe Geschwindigkeit ist aber nicht die Verdrängung allein, sondern auch die von der hohen Verdrängungsgeschwindigkeit v_v angeregte Turbulenz, die sich in einer weiteren Vergrößerung der Brennfäche F äußert. Damit gilt für die Explosionsgeschwindigkeit v_{ex} die Beziehung:

$$v_{ex} = \frac{F}{f} \cdot v_n + v_v$$

wobei zufolge der sehr viel stärkeren Einflußnahme der Turbulenz:

$$\left(\frac{F}{f}\right) \text{ Zündort am geschlossenen Ende} \gg \left(\frac{F}{f}\right) \text{ Zündort am offenen Ende}$$

ist, und meist der Flammenbewegung Schwingungen überlagert sind.

Die allgemeine Gültigkeit dieser sehr vereinfachenden Darstellung von wesentlich komplizierter ablaufenden Verbrennungsvorgängen konnte z.B. von Heinrich [17] für Rohre mit engen Querschnitten, von Bartknecht [21] jedoch auch für Rohre mit großen Querschnitten (DN 1600) bestätigt werden.

Die heftigsten Explosionsauswirkungen in einseitig geschlossenen Rohren treten bei Anordnung der Zündquelle am geschlossenen Rohrende auf. Es konnte festgestellt werden, daß die Explosionsgeschwindigkeit mit steigender Rohrmennweite bzw. größer werdendem Rohrdurchmesser ganz allgemein zunimmt.

Infolge von Schwingungsüberlagerungen und eines sehr großen Oberflächen/Volumen-Verhältnisses ist die Geschwindigkeitsentwicklung in Rohren $< \text{DN } 400$ nicht mehr kontinuierlich steigend, sondern diskontinuierlich. Vermindert man den Rohrdurchmesser weiter, so nimmt die Flammengeschwindigkeit mehr und mehr ab, bis schließlich bei einem endlichen kleinen Durchmesser sich eine Flamme überhaupt nicht mehr fortpflanzt. Dieser kritische Rohrdurchmesser beträgt im Falle von Propan 3 mm bei einer Rohrlänge von mindestens $l = 100$ mm. Eine Verminderung dieser Rohrlänge bedingt ein weiteres Absinken des kritischen Rohrdurchmessers auf 1,5 mm. Selbstverständlich nimmt auch die Art des Brenngases einen Einfluß auf den Explosionsverlauf.

Betrachtet man turbulente Dampf/Luft-Gemische und leitet man die Explosionen mittels eines Flammenstrahls am geschlossenen Ende der einseitig offenen Rohrstrecke ein, so können die Brenngase, insgesamt gesehen, zur Detonation bzw. zu einem detonationsähnlichen Ablauf mit starker Druckäußerung gezwungen werden, wobei sich die Anlaufwege bis zum Erreichen der Detonationsgeschwindigkeit mit abnehmendem Rohrdurchmesser erheblich verkürzen. Detonationen bilden sich also um so schwerer aus, je weiter der Rohrdurchmesser ist.

Derartige Gemische können, wie erwähnt, durch eine sehr kräftige Initialzündung zu einer detonationsähnlichen Verbrennung gebracht werden. Während im Normalfall bei einer stationären Detonation jedoch Stoßwelle und Verbrennungsfront aneinander gekoppelt sind, können bei instationären Detonationen Stoßwelle und Verbrennungsfront wieder auseinanderlaufen und die Detonation zum Abbruch zwingen. Solche Vorgänge werden als Quasidetonationen bezeichnet.

Hinsichtlich des auf die Rohrwand, senkrecht zur Ausbreitungsrichtung der Explosion wirkenden Explosionsdruckes (p_{ex}) ist festzustellen, daß dieser sich in einseitig offenen Rohrstrecken von technischem Durchmesser nahezu linear mit der Explosionsgeschwindigkeit v_{ex} und unabhängig vom Rohrdurch-

messer sowie von der Art des Brenngases ändert. Wegen des diskontinuierlichen Explosionsablaufes infolge von Schwingungsüberlagerungen ist die Streuung der Meßwerte jedoch nicht unerheblich. Allgemein kann man sagen, daß bei einer Explosion ($v_{\text{ex}} < 500$ m/s) 10 bar nicht überschritten werden, während bei einem detonationsähnlichen Ablauf oder bei Detonationen ($v_{\text{ex}} > 1000$ m/s) 25 bis 30 bar auf die Rohrwand wirken.

Umfangreiche experimentelle Untersuchungen haben ergeben, daß Rohre, die für einen Nenndruck von 10 bar ausgelegt sind, die im Detonationsfall sehr kurzfristig auftretenden Spitzendrücke überstehen, ohne zu bersten.

Eine Sonderstellung nehmen die Explosionen von im ruhenden Zustand gezündeten Gemischen ein, die in beiderseits geschlossenen Rohren ablaufen. Auch hier wird die Explosionsgeschwindigkeit v_{ex} von der normalen Verbrennungsgeschwindigkeit v_n des Gemisches von der spezifischen Flammenfläche F/f sowie von der Verdrängungsgeschwindigkeit v_v beeinflusst. Somit gilt wiederum:

$$v_{\text{ex}} = \frac{F}{f} \cdot v_n + v_v$$

Dabei hat im ersten Teil des Verbrennungsvorganges die Flammengeschwindigkeit infolge zunächst hoher Verdrängungsgeschwindigkeit hohe Werte; im letzten Teil wird sie kleiner, da die Verdrängungsgeschwindigkeit zum geschlossenen Rohrende gegen Null abnimmt, so daß sich auch die Turbulenz vermindert, d.h. die Flamme durchläuft einen Bereich abnehmender Reynoldsscher Zahlen. Wiederum überlagern sich Schwingungen.

Treten in geschlossenen Rohren strömende, d.h. turbulente Dampf/Luft-Gemische auf und wird deren Zündung an einem der Rohrenden wiederum durch einen Flammenstrahl eingeleitet, dann ist der beobachtete Bremsseffekt nicht mehr wirksam. Der Explosionsablauf aller Dampf/Luft-Gemische entwickelt sich nun innerhalb einer Rohrlänge von 30 m zur Quasidetonation bzw. zur Detonation, wenngleich die Anlaufwege bis zum Erreichen der sehr hohen Verbrennungsgeschwindigkeiten länger als in einseitig offenen Rohren sind.

Da in geschlossenen Rohren der Ausschub von unverbranntem Gemisch vor der Flammenfront nicht gegeben ist, beteiligt sich das gesamte Gemisch an der Verbrennungsreaktion, so daß bei gleicher Explosionsgeschwindigkeit die Explosionsdrücke um einige bar höher liegen als in einseitig offenen Rohrstrecken. Besonders hohe Drücke stellen sich dann ein, wenn eine Detonation gegen eine feste Wand - z.B. gegen einen Abschlußflansch in einer Rohrleitung - läuft.

Die Dämpfe bzw. deren Verbrennungsprodukte werden hier auf die Geschwindigkeit Null abgebremst und die Stoßwelle wird reflektiert. Der Druck vor der Wand ist dann ca. dreimal so hoch wie der Druck hinter der Detonation.

Zusammenfassend ist festzustellen, daß bei befürchteten Explosionen von Dampf/Luft-Gemischen in Rohrstrecken besonders dann, wenn strömende (turbulente) Gemische vorhanden sind und die Gefahr besteht, daß die Explosion von einem Leitungsteil - gegebenenfalls über Querschnittsveränderungen - in einen anderen Leitungsteil übertragen wird, der Explosionsablauf weitgehend von Verdrängungs-, d.h. Strömungseffekten und den damit verbundenen Turbulenzänderungen der Gemische bestimmt wird. Die normale Verbrennungsgeschwindigkeit ist in diesen Fällen von untergeordneter Bedeutung, d.h. der Verbrennungsablauf ist nahezu unabhängig von der Art des Brenngases und kann besonders in Rohren mit engen Querschnitten nach relativ kurzen Anlaufwegen in eine Detonation (bzw. Quasidetonation) umschlagen.

2.4. Schutzmaßnahmen gegen Explosionen

Schutzmaßnahmen gegen Explosionen - also auch gegen Explosionen von Dampf/Luft-Gemischen - lassen sich wie folgt gliedern [19]:

- a) Vorbeugender Explosionsschutz
 - Maßnahmen, welche die Bildung explosibler Gemische verhindern oder einschränken,
 - Maßnahmen, welche die Zündung explosibler Gemische verhindern,
- b) Konstruktiver Explosionsschutz
 - Konstruktive Maßnahmen, welche die Auswirkung einer Explosion auf ein unbedenkliches Maß beschränken.

2.4.1 Maßnahmen, welche die Bildung explosibler Gemische verhindern oder einschränken

Bei diesen Maßnahmen handelt es sich um Maßnahmen des sogenannten „primären Explosionsschutzes“, mit ihnen können Explosionsgefahren in der Regel vollständig verhindert werden. Unter diesen Maßnahmen versteht man folgendes:

- Vermeidung oder Einschränkung von Stoffen, die explosive Gemische zu bilden vermögen,
- Verhinderung oder Einschränkung der Bildung explosibler Gemische innerhalb von Apparaturen oder Behältern,

- Verhinderung oder Einschränkung der Bildung explosibler Gemische in der Umgebung von Apparaturen oder Behältern,
- Überwachung der Konzentration.

Bei der Vermeidung oder Einschränkung explosibler Gemische wird in erster Linie versucht, z.B. entzündbare flüssige Stoffe durch solche zu ersetzen, die keine explosiblen Gemische bilden können, jedoch die gleiche Wirkung erzielen; etwa durch den Ersatz von entzündbaren Lösungsmitteln durch deren wäßrige Lösungen oder nicht entzündbare adäquate Stoffe.

Bei der Verhinderung oder Einschränkung der Bildung explosibler Gemische im Inneren von Apparaturen oder Behältern wird die Bildung explosibler Gemische beispielsweise durch Begrenzung ihrer Menge bzw. Konzentration oder durch Inertisierung erreicht. Unterschreiten der unteren Explosionsgrenze oder Überschreiten der oberen Explosionsgrenze ist im wesentlichen das Ziel dieser Maßnahmen.

Eine Verhinderung oder Einschränkung der Bildung explosibler Gemische in der Umgebung von Apparaturen oder Behältern kann beispielsweise wegen betrieblichen, nicht vorhergesehenen, aber auch betriebsmäßigen Ausströmens entzündbarer Stoffe aus Apparaturen und Behältern - etwa wegen Undichtigkeiten oder betriebsgemäßer Druckentlastungen - vorgesehen werden. Wesentliche Maßnahmen sind das Vorsehen dichten Verschlusses, soweit dies möglich ist, sowie natürliche und technische Lüftung, damit die untere Explosionsgrenze unterschritten wird.

Bei der Überwachung der Konzentration in der Umgebung von Apparaturen und Behältern werden Gaswarngeräte als Grundlage der Einleitung von Abschalt-, Lüftungs-, Inertisierungsmaßnahmen usw. eingesetzt.

2.4.2. Maßnahmen, welche die Zündung explosibler Gemische verhindern

Als Grundlage für die Beurteilung des Umfangs erforderlicher Schutzmaßnahmen sind explosionsgefährdete Bereiche nach der Wahrscheinlichkeit des Auftretens explosibler Gemische unterteilt. Auf diese „Zoneneinteilung“ soll nicht näher eingegangen werden, da sich die nachfolgenden Darlegungen auf eine Schutzmaßnahme konzentrieren, die bei gleichzeitigem Auftreten explosibler Gemische sowohl im Inneren als auch der Umgebung von Behältern wirksam werden soll.

Wegen des - nicht vorhersehbaren - Einsatzes von Transportbehältern auch in Umgebungen, in denen mit dem Auftreten von verschiedenartigen Zündquellen gerechnet werden muß, kann beispielsweise nicht erreicht werden, daß Zündquellen aus explosionsgefährdeten Bereichen vollständig entfernt werden oder Schutzmaßnahmen ergriffen werden können, die Zünd-

quellen völlig unwirksam machen oder die Wahrscheinlichkeit ihres Wirksamwerdens wesentlich verringern. Deshalb reduzieren sich die Darlegungen in diesem Abschnitt auf die Aufzählung möglicher Zündquellen und einiger grundsätzlich möglicher Schutzmaßnahmen. Es bleibt anzumerken, daß Maßnahmen des primären Explosionsschutzes (z.B. Lüftung in Verbindung mit Konzentrationserfassung) grundsätzlich immer Anwendung finden können, soweit dies bei Transportbehältern vernünftigerweise praktikabel ist. So ist beispielsweise bei Reparaturschweißungen an Transportbehältern eine Zündquelle der Natur der Sache nach nicht vermeidbar, jedoch muß gewährleistet sein, daß sich kein explosives Gemisch im Behälterinneren befindet. Näheres hierzu kann den bereits mehrfach erwähnten Explosionsschutz-Richtlinien [15] entnommen werden. Zündquellenarten und Schutzmaßnahmen werden grob wie folgt unterschieden:

Zündquelle	Wesentliche Schutzmaßnahme
Heiße Oberflächen	Begrenzung der Oberflächentemperatur
Flammen, heiße Gase	Vermeidung
Mechanisch erzeugte Funken	Wasserkühlung, Materialkombinationen
Elektrische Anlagen	Explosionsschutzmittel
Elektrische Ausgleichsströme, kathodischer Korrosionsschutz	Potentialausgleich, Überbrückungen
Statische Elektrizität	Erdung, Leitungsfähigkeit
Blitzschlag	Blitzschutzanlagen, Überspannungsableiter, Potentialausgleich
Elektromagnetische Wellen (Hochfrequenzbereich)	Sicherheitsabstand, Abschirmung
Elektromagnetische Wellen (optischer Spektralbereich)	Einschränkung der Bestrahlungsstärke (Bestrahlung)
Ionisierende Strahlung	Einschränkung der Bestrahlungsstärke/Aktivität
Ultraschall	Einschränkung der Schalleistung
Adiabatische Kompression, Stoßwellen	Vermeidung
Chemische Reaktionen	Vermeidung

Tabelle 2.6: Zündquellen und wesentliche Schutzmaßnahmen

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

Auswirkungsbegrenzende konstruktive Maßnahmen sind:

- Explosionsdruckfeste (explosionsdruckstoßfeste) Bauweise,
- Explosionsdruckentlastung,
- Explosionsunterdrückung
- Flammendurchschlagsichere Einrichtungen

a) Explosionsdruckfeste (explosionsdruckstoßfeste) Bauweise

Bei der explosionsdruckfesten Bauweise werden eine Anlage oder ein Behälter (Tank) so gebaut, daß sie dem maximalen Explosions- oder Detonationsdruck standhalten.

Sind Detonationen nicht zu erwarten, genügt es, die Apparatur für einen Prüfdruck auszulegen, der nach den Explosionsschutz-Richtlinien - mindestens dem achtfachen bzw. dem ungefähr zehnfachen

(Erläuterungen hierzu folgen später) des höchsten absoluten Ausgangsdruckes entspricht. Kann diese Forderung nicht erfüllt werden, muß die Apparatur wenigstens dem unter extremen Betriebsbedingungen zu erwartenden Explosionsdruck ohne undicht zu werden standhalten; eine bleibende Verformung ist hier zulässig (explosionsdruckstoßfeste Bauweise).

In Rohrleitungen oder langgestreckten Apparaturen mit freien Innenräumen (z.B. bei Behältern mit einem Längen/Durchmesser Verhältnis $L/D > 5$) muß bei Entzündung gesättigter Kohlenwasserstoffe im Gemisch mit Luft mit dem Übergang von Explosionen in Detonationen gerechnet werden. Die Ausbildung von Detonationen wird dabei durch Druckstöße, starke Zündquellen (z.B. einen in einen Behälter hineinschlagenden Flammenstrahl) und durch solche Einbauten, die die Flammenturbulenz erhöhen, begünstigt (s. Abschnitt 2.3.). Bei Detonationen entstehen in Flammenfortpflanzungsrichtung kurzzeitig sehr hohe Druckwirkungen, die einem statischen Druck entsprechen, der bis auf das 100fache des absoluten Ausgangsdruckes ansteigen kann. Senkrecht zur Flammenfortpflanzungsrichtung wird dagegen kurzzeitig etwa das 20fache des Ausgangsdruckes wirksam.

Bei teilweiser Unterteilung des Inneren von Apparaturen oder Behältern - zwei Behälter durch ein Rohr, zwei Behälterabschnitte durch eine blendenähnliche Einrichtung miteinander verbunden - kann während der Explosion in dem einen Teilvolumen in dem anderen Teilvolumen der Druck vor Eintritt der Flamme erhöht und dort die Explosion bei erhöhtem Ausgangsdruck eingeleitet werden. Somit entstehen kurzzeitig Druckspitzen, die höher als der maximale Explosionsdruck p_{ex} sein können. Lassen sich derartige Anordnungen nicht vermeiden, sind entsprechende Maßnahmen zu treffen, z.B. verstärkte druck(stoß)feste Bauweise oder das Vorsehen flammendurchschlagsicherer Einrichtungen.

b) Explosionsdruckentlastung

Genügt die Bauweise einer Apparatur nicht den obengenannten Anforderungen, kann die Möglichkeit einer wirksamen Druckentlastung in Betracht gezogen werden.

Der Begriff „Explosionsdruckentlastung“ umfaßt im weitesten Sinne alles, was dazu dient, beim Entstehen oder nach einer gewissen Ausweitung einer Explosion die ursprünglich abgeschlossene Apparatur, in der sich der Explosionsablauf vollzieht, entweder sofort oder erst nach Erreichen eines bestimmten Druckes kurzfristig oder bleibend in ungefährlicher Richtung zu öffnen. Die Entlastungseinrichtung soll bewirken, daß die Apparatur nicht über ihre (reduzierte) Druckstoßfestigkeit hinaus beansprucht wird. Als Entlastungseinrichtungen kön-

nen z.B. Berstscheiben oder Explosionsklappen verwendet werden. Sicherheitsventile sind hierfür un geeignet.

Von wesentlicher Bedeutung für die Dimensionierung solcher Entlastungseinrichtungen sind die zeitlichen Beziehungen, die zwischen dem Fortschreiten einer Explosion und dem Eintreten der Druckentlastung bestehen. Man hat daher zu unterscheiden zwischen einer Explosionsdruckentlastung von Behältern und von Rohrstrecken.

Je kleiner die maximale Explosionsdruckanstiegsgeschwindigkeit des explosionsfähigen Gemisches in einem Behälter ist und je früher und wirksamer die Entlastung einsetzt, um so schneller können Verbrennungsprodukte und unverbrannte Gemische entweichen, ohne zu einer unzulässigen Druckerhöhung in der Apparatur beizutragen. Die erforderlichen Druckentlastungsöffnungen an Apparaturen können berechnet werden, wenn die explosionstechnischen Kenndaten des Gemisches für eine bestimmte Behältergröße bekannt sind.

Bei der Anbringung von Druckentlastungsöffnungen an Apparaturen ist darauf zu achten, daß die Druckentlastung in ungefährlicher Weise so erfolgt, daß Folgeschäden für Personen, z.B. durch Druck- und Flammenwirkung oder durch weggeschleuderte Teile, vermieden werden. Die Druckentlastung soll möglichst auf kurzem geraden Weg ins Freie erfolgen. Sie muß so ausgelegt und befestigt sein, daß sie den bei einer Explosion auftretenden Drücken und Rückstoßkräften standhält.

Druckentlastung in Arbeitsräume ist grundsätzlich zu vermeiden. Es ist zu beachten, daß im Nahbereich der Entlastungsöffnung eine starke Flammenausbreitung durch Nachverbrennung entstehen kann.

Explosionen, die sich in Rohrleitungen oder in langgestreckten Apparaturen ausbreiten, führen - im Vergleich zu Explosionen in Behältern - häufig zu weitaus höheren Flammengeschwindigkeiten sowie Druckanstiegen und können in Detonationen übergehen.

c) Explosionsunterdrückung

Unter besonderen Voraussetzungen können bei Explosionen in Behältern unmittelbar nach Eintritt einer Zündung durch schnelles Einbringen von hierfür geeigneten Löschmitteln die Flammen so frühzeitig gelöscht werden, daß nur eine Teilexplosion erfolgt und somit geringere maximale Drücke auftreten.

Hierzu wird die bei der ersten Teilverbrennung auftretende Druckerhöhung - oder in speziellen Fällen auch die Strahlung der Flamme - von geeignet an-

gebrachten Detektoren erfaßt, die die schnelle Verteilung eines in Vorratsbehältern befindlichen Löschmittels herbeiführen. Für die ausreichende Wirkung solcher „Unterdrückungssysteme“ sind entscheidend u.a.: Wahl des Löschmittels und Art seiner Verteilung (Reichweite und Raumwinkel), Anzahl und Anordnung der Löschmittelvorratsbehälter sowie Art und Anbringungsort der Detektoren. Bisher wurde ein derartiger Schutz bis zu Volumina von einigen 10 m³ erprobt, und zwar bei Gasexplosionen bis zur Explosionsheftigkeit von Propan und Benzin bei Funkenzündung.

Explosionen in Rohren und langgestreckten Apparaturen können durch automatisch arbeitende Löschmittelsperren an einer vorgegebenen Stelle abgelöscht werden, dies gilt in aller Regel jedoch nicht für Detonationen.

d) Flammendurchschlagsichere Einrichtungen

Um Flammendurchschläge durch nicht gasdichte Anlageteile bei Entzündung explosibler Dampf/Luft-Gemische (z.B. Wellendurchführungen, Atmungs-einrichtungen und nicht ständig mit Flüssigkeit gefüllte Füll- und Entleerungsleitungen) zu verhindern, können flammendurchschlagsichere Einrichtungen angewendet werden.

Die Möglichkeit eines Flammendurchschlags ist abhängig

- von den Eigenschaften des jeweiligen Gemisches, insbesondere von Art des Brennstoffes, Konzentration und Druck, bei Gasen und Dämpfen gekennzeichnet durch die zünddurchschlagsichere Grenzspaltweite,
- von der Gestalt der Öffnung, wie Spaltweite und Spatlänge bzw. Rohrdurchmesser und Rohrlänge,
- von den Strömungsverhältnissen im Spalt, beeinflusst von der Gestalt der Öffnung und von der Differenz des Innen- und Außendruckes.

Die im folgenden genannten flammendurchschlagsicheren Einrichtungen eignen sich für die Anwendung bei explosiblen Gemischen aus Gasen und Dämpfen.

Läßt sich z.B. in einem nicht druckfesten Behälter für entzündbare flüssige Stoffe die Bildung gefährlicher explosibler Gemische nicht vermeiden, so sind sämtliche ständig vorhandenen Öffnungen flammendurchschlagsicher zu gestalten, z.B. Be- und Entlüftungseinrichtungen, Füllstandsanzeiger sowie Füll- und Entleerungsleitungen, sofern letztere nicht ständig mit Flüssigkeit gefüllt sind. Oder soll z.B. eine Apparatur in explosiblem Gemisch betrieben werden und kann aus Öffnungen der Apparatur eine Flamme nach außen dringen, so müssen diese Öff-

nungen flammendurchschlagsicher sein; z.B. Wellendurchführungen mit kleinen Druckentlastungsspalten.

Die aus Öffnungen von Anlagen unvermeidbar austretenden Gemische sollten durch geeignete Gestaltung der Armatur ferner so geleitet und abgeführt werden, daß die Bildung gefährlicher explosibler Gemische außerhalb der Apparatur soweit wie möglich eingeschränkt wird, z.B. durch Hochgeschwindigkeits-Überdruckventile.

Die an flammendurchschlagsichere Einrichtungen zu stellenden Anforderungen hängen von den zu erwartenden Betriebsbedingungen ab. Man unterscheidet folgende Bauarten:

- Explosionssichere Armaturen
Öffnungen, die aufgrund der Betriebsverhältnisse nur der kurzzeitigen Flammeneinwirkung einer Explosion ausgesetzt werden, brauchen nur flammendurchschlagsicher bei einmaligen Explosionen zu sein und den dabei auftretenden mechanischen Beanspruchungen standzuhalten.

Die dafür verwendeten Flammensperren, z.B. Bandsicherungen, Plattensicherungen, Sintermetalle, Füllungen mit Kies oder Füllkörpern bestehen aus Bauteilen mit kleinen Kanälen, deren Spaltweiten und -längen einen genügend großen Löscheffekt besitzen. Auch sind hier Flüssigkeitssperren anwendbar. An Apparaturen, z.B. an Füllstandsanzeigern, Peileinrichtungen und Probeentnehmern oder Seildurchführungen, lassen sich häufig schon durch geeignete Gestaltung ausreichend kleine Spaltweiten und große Spaltlängen gewährleisten.

- Dauerbrandsichere Armaturen
Öffnungen, aus denen über längere Zeit - z.B. aus Lüftungseinrichtungen an Tanks während des Atmens und des Befüllens - größere Gemischmengen ins Freie ausströmen können, werden nach der Entzündung dieser Gemische während des Abbrandes einer längeren Flammeneinwirkung ausgesetzt.

Die hierfür vorzusehenden Einrichtungen müssen sowohl einen Flammendurchschlag bei Explosionen als auch eine Entzündung der explosionsfähigen Atmosphäre in der Anlage beim Abbrennen der ausströmenden Gemische - dauernd oder während einer von den jeweiligen Betriebsbedingungen abhängigen Zeit - verhindern.

Diesen Anforderungen genügen z.B. besonders gestaltete Armaturen mit Bandsicherungen und spezielle Hochgeschwindigkeits-Überdruckventile.

- Detonationssichere Armaturen
In Rohrleitungen oder langgestreckten Anlagenteilen ($L/D > 5$) können Explosionen in Detonationen übergehen.

Um einen Flammendurchschlag in angeschlossenen Anlagen- oder Behältern (z.B. durch angeschlossene Rohre) zu verhindern, muß die Armatur den Beanspruchungen von Detonationen standhalten und den Flammendurchschlag bei Explosionen und Detonationen verhindern.

Einsatzbedingungen:

Bei den Armaturen der genannten Bauarten ist die Flammendurchschlagsicherheit nur für (einzeln) definierte Stoffe gewährleistet. Erweiterungen auf andere Stoffe sind ohne Prüfung nur nach Kenntnis der maßgebenden Stoffeigenschaften möglich; häufig ist jedoch eine Nachprüfung erforderlich.

Da flammendurchschlagsichere Armaturen häufig an Apparaten eingesetzt werden, die nur einen geringen Überdruck standhalten, ist beim Einsatz besonders zu beachten, daß die Armaturen nicht den Druckausgleich des Behälters mit der freien Atmosphäre unzulässig erschweren.

Dazu muß der freie Querschnitt der flammendurchschlagsicheren Armatur ausreichend bemessen sein und während des Einsatzes erhalten bleiben, d.h., die Gefahr des Zusetzens durch Schmutz, Korrosion, Polymerisation und Sublimation muß beachtet werden.

2.5. Folgerungen für geschlossene ortsbewegliche Behälter (Transporttanks)

Man kann nach dem kubischen Gesetz die Heftigkeit des Explosionsablaufs explosibler Dampf/Luft-Gemische in einem geschlossenen Behälter rechnerisch abschätzen, wenn

- a) die Art des entzündbaren flüssigen Stoffes,
- b) das Behältervolumen und der Befüllungsgrad an explosiblem Gemisch,
- c) die Turbulenz (der Turbulenzgrad),
- d) der im Augenblick der Zündung vorherrschende (Ausgangs-)Druck,
- e) die Art und Ausdehnung der Zündquelle

bekannt sind:

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

Die notwendigen Ausgangsdaten können in Laborapparaturen ermittelt werden, wobei das Prüfgefäß grundsätzlich von kugelförmiger oder kubischer Gestalt und die Zündquelle im geometrischen Mittelpunkt angeordnet sein sollte. Das Volumen sollte bei Dämpfen entzündbarer flüssiger Stoffe 1 Liter nicht unterschreiten. Ausreichend bemessene Zündenergien sind erforderlich.

Abweichungen von den o.g. Parametern führen zu Explosionsheftigkeiten, die nicht in Übereinstimmung mit den im Labormaßstab ermittelten Werten stehen müssen:

- a) Es besteht begründeter Anlaß zu der Vermutung, daß der Turbulenzgrad bei großen Behältern (Volumen 1 m^3 und größer) allein mit der Behältergröße zunimmt.
- b) Steigerungen des Turbulenzgrades ergeben sich durch Beugung der Flammenfront an Einbauten, beim Durchtritt der Flammenfront durch Blenden, (z.B. Öffnungen von Schwallwänden) oder Rohrstrecken in zweite Behälter oder Behälterabschnitte usw.
- c) Die entstehende Druckwelle pflanzt sich mit Schallgeschwindigkeit fort, die Flammenfront normalerweise jedoch mit geringerer Geschwindigkeit; die Flammenfront schiebt unverbranntes Gemisch vor sich her. Aus diesen Gründen kann es zu Vorverdichtungen - über den eigentlichen Ausgangsdruck hinaus - kommen.
- d) Turbulenzgrad und Höhe der Vorverdichtung können durch Druckoszillationen im Behälter weiter gesteigert werden.
- e) Der Turbulenzgrad und die Höhe der Vorverdichtung können durch die Zündquelle beeinflusst werden. Eine zunächst geometrisch eng begrenzte Zündquelle kann Teile explosiblen Dampf/Luft-Gemisches zünden, die ihrerseits - etwa bei Eintritt der Teile des gezündeten Gemisches in einen Behälter durch eine Armatur oder Rohrleitung - als Flammenstrahl wirken. Ebenso kann es beispielsweise beim Durchtritt der Flammenfront durch mehrere Öffnungen einer Schwallwand zu gleichzeitiger oder zeitlich versetzter Mehrfachzündung kommen.
- f) Der Explosionsablauf in langgestreckten Behältern (Längen/Durchmesser Verhältnis $L/D > 5$) oder Rohrstrecken wird u. U. nicht von der normalen Verbrennungsgeschwindigkeit bzw. Explosionsheftigkeit (K_G -Wert) bestimmt. Verdrängungseffekte und damit verbundene Turbulenzänderungen haben einen stärkeren Einfluß, so daß es gegebenenfalls zu detonationsähnlichen Abläufen oder Detonationen mit entsprechenden Druckäußerungen kommen kann.
- g) In langgestreckten Behältern sind bei Explosionen die Wärmeverluste über die Behälterwände größer als bei sphärischen oder kubischen, was zur Absenkung der Verbrennungsgeschwindigkeit bzw. Explosionsheftigkeit führt.

- h) Es darf vermutet werden, daß bei langgestreckten, großen Behältern der Zündort in bezug auf den Turbulenzgrad und Vorverdichtungen ebenfalls eine große Rolle spielt; Zündungen in der Nähe eines Behälterendes dürften höhere K_G -Werte begünstigen.

Schutzmaßnahmen gegen Explosionen können sinnvollerweise nur in Kenntnis der vorstehend aufgeführten Sachverhalte ergriffen werden. Hierbei müssen jedoch auch Konstruktions- und Betriebsweise einer Apparatur, in deren Inneren mit dem Auftreten explosibler Dampf/Luft-Gemische und damit Explosionsgefahr zu rechnen ist, in Betracht gezogen werden.

Wegen der vorstehend dargestellten Sachverhalte war es bisher auch nicht möglich, in den zu betrachtenden Fällen, mathematische Modellierungen des Ablaufs von Explosionen anzuwenden [24].

In ständig überwachten und laufend gewarteten stationären Anlagen kann im Grunde eine Vielzahl der in Abschnitt 2.4. aufgeführten Schutzmaßnahmen zur Anwendung gelangen. Anders sieht es jedoch aus, wenn es sich bei den gegen Explosionsgefahren zu schützenden Einrichtungen um (ortsbewegliche) Transportbehälter wie Tanks von Straßentankfahrzeugen, Eisenbahnkesselwagen oder Tankcontainern handelt. Derartige Tanks werden in Bereichen, die der allgemeinen Öffentlichkeit zugänglich sind, bei sich ständig ändernder Risikosituation bewegt. Kurze Überwachungs- und Wartungsintervalle, d.h. ständige Überwachung und Wartung sind nicht möglich. Das Ergreifen zusätzlicher Schutzmaßnahmen (Kühlung usw.) ist nur mit großer Zeitverzögerung vorstellbar. Gut geschultes Personal und sonstige Ressourcen stehen oftmals dort, wo sich eine Explosion ereignet oder ereignen könnte, nur äußerst eingeschränkt zur Verfügung. Transporttanks verfügen normalerweise - außer bei Straßentankfahrzeugen, solange beispielsweise die Zugmaschine intakt ist - über keine eigene, unabhängige Energieversorgung, von der verschiedene der in Abschnitt 2.4. aufgeführten Schutzmaßnahmen jedoch abhängig sind. Die Dauer eines Transportes kann - etwa im See-, aber auch im Eisenbahnverkehr - groß sein, so daß eine Versorgung über (schwere) Akkumulatoren ebenfalls schwierig ist. Bei internationalen Transporten unabhängiger Transporteinheiten käme u.U. noch das Sprachproblem hinzu, wenn Überwachungs- oder wartungsbedürftige Schutzmaßnahmen Verwendung fänden.

Eine wesentliche Einschränkung in bezug auf anwendbare Schutzmaßnahmen ergibt sich in der Praxis aus einem viel einfacheren Grund: Im allgemeinen dürfen auf allen Transportwegen neben bestimmten geometrischen Abmessungen bestimmte Masseobergrenzen (zulässiges Gesamtgewicht einer Transporteinheit) ebenfalls nicht überschritten werden; des weiteren ist der Standardisierungsgrad von Transporttanks hoch. Sinn eines Transportes ist es jedoch, möglichst viel von

dem zu befördernden Gut (Nutzlast) und möglichst wenig Leermasse (Umschließung der Nutzlast usw.) zu transportieren. Daher ist die Leermasse (Taragewicht) der Beförderungseinheit bei Transporttanks eine wesentlich kritischer bewertete Größe als bei stationären Behältern oder Anlagen.

Aus diesem Grund ergibt sich ein starkes wirtschaftliches Interesse, das Taragewicht von Beförderungseinheiten und damit auch die Eigenmasse eines Transporttanks klein zu halten, wobei bestimmte Sicherheitsanforderungen selbstverständlich erfüllt werden müssen. Masse- und damit andauernd kosten erhöhende Schutzmaßnahmen jedweder Art stehen also gegen ökonomische Interessen. Im Falle der

Schutzmaßnahmen gegen Explosionen im Tankinneren wurden daher in vielfacher Hinsicht aufwendige, aktive Schutzmaßnahmen zugunsten von vergleichsweise unaufwendigeren passiven Schutzmaßnahmen in den Hintergrund gedrängt, es sei denn, die von den zu befördernden Gütern ausgehenden Gefahren erzwingen weitergehende Schutzmaßnahmen.

In den entsprechenden, überwiegend internationalisierten Rechtsvorschriften wurden daher als Maßnahmen des Schutzes gegen Explosionen im Tankinneren für bestimmte Fälle zunächst das Vorsehen von Flammendurchschlagsicherungen und im Verlaufe der Rechtsfortentwicklung späterhin die explosionsdruckstoßfeste Bauweise von Transporttanks als Alternative verankert.

3. Rechtsvorschriften - Explosionsdruckstoßfestigkeit von Transporttanks

3.1. Grundlagen der Regelungen über die Beförderung gefährlicher Güter

Die Grundlage vielfältiger Industrieproduktion, Energieversorgung usw. wird durch den Umgang mit gefährlichen Stoffen bzw. Gütern charakterisiert, der umfangreichen Regelungen unterliegt.

Zweck aller Regelungen auf dem Gebiet technischer Sicherheit und des Umweltschutzes ist der Schutz von Menschen, Sachgütern und Umwelt vor den Gefahren, die aus natur- und ingenieurwissenschaftlicher Forschung, der Anwendung daraus gewonnener Ergebnisse und technischer Vollzugsweisen entstehen bzw. entstehen können. Diesen Schutzzweck sucht das Technik- und Umweltrecht zunächst mit Mitteln der Gefahrenabwehr im einzelnen zu erfüllen. In vielen Teilbereichen - beispielsweise bei den Regelungen über die Beförderung gefährlicher Güter, dem Immissionschutzrecht und Regelungen über das Inverkehrbringen und den Umgang mit technischen Arbeitsmitteln - wird darüber hinausgegangen, indem ein vorsorgendes Prinzip zur Anwendung gebracht wird, aufgrund dessen Schutzvorkehrungen auch unterhalb einer gewissen, jedoch nicht näher quantifizierten Gefahrenschwelle verlangt werden. Bei den genannten Regelungsbereichen sind daher dem (unbestimmten) Stand der Technik entsprechende Schutzvorkehrungen gegen bestimmte Gefahren zu ergreifen.

Am Beispiel der Beförderung gefährlicher Güter sollen die Grundsätze staatlicher Vorsorge näher erläutert werden:

Wie bereits in Abschnitt 1. kurz erwähnt, weist eine Vielzahl von Rohstoffen und Produkten besondere stoffliche Eigenschaften auf, die als gefährlich einzustufen

sind. Derartiges „Gefahrgut“ umfaßt also Stoffe, die aufgrund ihrer Eigenschaften beim unkontrollierten Auftreten oder bei ihrer Freisetzung Menschen, Sachgüter und Umwelt gefährden und direkt oder indirekt schädigen können, beispielsweise durch Explosionen, Brände, Vergiftungen, Strahlungseinwirkungen oder Verätzungen.

Es sind jedoch zumeist gerade diese gefährlichen Eigenschaften der Stoffe, um derentwillen sie benötigt, also auch transportiert werden. Gefahren ergeben sich hierbei nicht notwendigerweise aus den Eigenschaften des Gefahrgutes allein - dessen Eigenschaften sind üblicherweise bekannt, sein Transport ist zulässig und seine Beherrschbarkeit kann als hinreichend gegeben angenommen werden - sondern vielmehr aus der Tatsache, daß das Gefahrgut in Bereichen, die dem Verkehr der allgemeinen Öffentlichkeit offenstehen, bewegt wird. Der Transport eines Gutes, das ein im Grunde beherrschbares Gefahrenpotential birgt, in einer sich ständig unvorhersehbar ändernden Umgebung führt zu einer sich ständig ändernden Risikosituation. Durch gesetzliche Regelungen, Sicherheitsvorschriften usw. wird versucht, das Transportrisiko zu erfassen und auf ein vertretbares Maß einzuschränken. Der Gesetzgeber - der Staat - nimmt hierbei also Schutzpflichten wahr, um die Grundrechte seiner Bürger in ausreichendem Maße zu sichern. In der Bundesrepublik Deutschland ergibt sich der Auftrag hierzu aus dem Grundgesetz (GG) [25]: Nach Artikel 2 Absatz 2 GG hat jeder Mensch das Recht auf Leben und körperliche Unversehrtheit; in Artikel 14 GG wird festgelegt, daß Eigentum verpflichtet und sein Gebrauch zugleich dem Wohle der Allgemeinheit zu dienen hat; Artikel 20a GG schließlich beschäftigt sich mit dem Schutz der natürlichen Lebensgrundlagen. Die Artikel 70 GG ff. - insbesondere die Artikel 73 und 74 GG, die sich auf die Gegenstände der Gesetzgebung durch Bund und Län-

der und die diesbezügliche Kompetenzverteilung beziehen - sind in diesem Zusammenhang besonders bedeutsam. Diese Artikel sind Grundlage wesentlicher Schutzvorschriften mit Gesetzesrang wie dem Gerätesicherheitsgesetz (GSG) [26] - Grundlage verschiedener technischer Verordnungen im Bereich überwachungsbedürftiger Anlagen und zugleich Instrument zur Inkraftsetzung von EG/EU-Richtlinien technischen Inhaltes - und dem Gesetz über die Beförderung gefährlicher Güter (Gefahrgutbeförderungsgesetz (Gefahrgutgesetz) - GGBefG) [4] sowie dem Gesetz zu dem europäischen Übereinkommen über die internationale Beförderung gefährlicher Güter auf der Straße (Gesetz zum ADR) [27]. Dem GGBefG sind verschiedene Rechtsverordnungen zugeordnet, die sich mit der Beförderung gefährlicher Güter bei verschiedenen Verkehrsträgern beschäftigen (z.B. die Gefahrgutverordnung Straße, Gefahrgutverordnung Eisenbahn und die Gefahrgutverordnung See - GGVS, GGVE, GGVSSee) [28, 29, 30]. Mit dem GGBefG wird das Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen (BMVBW) ermächtigt, die genannten (und weitere) Gefahrgutverordnungen zu erlassen. Die Gefahrgutverordnungen beziehen sich jedoch nicht nur auf innerstaatliche, sondern auch auf grenzüberschreitende Beförderungen gefährlicher Güter und damit ergibt sich die Notwendigkeit, in den internationalen Gremien - auf der Grundlage völkerrechtlicher Verträge - mitzuarbeiten, die mit der Erarbeitung von Empfehlungen, (zu ratifizierenden) Regelungen und Richtlinien befaßt sind.

Für die Bundesrepublik Deutschland sind diese (nationalen) Anstrengungen eingebettet in die Vorgaben, die sich aus ihrer Mitgliedschaft in der Europäischen Gemeinschaft (EG) bzw. Europäischen Union (EU) ergeben. Im EG-Vertrag (EGV) (Vertrag von Maastricht) [31] und im EU-Vertrag (EUV) (Vertrag von Amsterdam) [32], der den EG-Vertrag fortschreibt und unmittelbar vor seiner Ratifizierung durch die Bundesrepublik Deutschland steht, werden im jeweils ersten Teil - Grundsätze - in Artikel 3 die Tätigkeiten der Gemeinschaft bzw. Union beschrieben. Diese beziehen sich u.a. auf:

- einen Binnenmarkt, der durch die Beseitigung der Hindernisse für den freien Warenverkehr usw. gekennzeichnet ist,
- eine gemeinsame Politik auf dem Gebiet des Verkehrs,
- die Angleichung der innerstaatlichen Rechtsvorschriften, soweit dies für das Funktionieren des Gemeinsamen Marktes erforderlich ist,
- eine Politik auf dem Gebiet der Umwelt,
- Maßnahmen in den Bereichen Energie, Katastrophenschutz usw.,

wobei Ungleichheiten zu beseitigen sind. Im dritten Teil, Titel IV, sind nach Artikel 75 EGV bzw. Titel V, Art. 71

EUV im Rahmen einer gemeinsamen Verkehrspolitik beispielsweise für den internationalen Verkehr oder Durchgangsverkehr gemeinsame Regeln aufstellen (also auch für die Beförderung gefährlicher Güter). In Titel V, Artikel 100a EGV bzw. Titel VI, Artikel 95 EUV werden Präzisierungen zur Angleichung von Rechtsvorschriften gegeben.

Da die grenzüberschreitende Beförderung gefährlicher Güter in allen EG- bzw. EU-Mitgliedstaaten bereits auf der Basis völkerrechtlicher Verträge geregelt war, haben EG/EU-Kommission und -Rat auf den Erlass eigener Richtlinien über die Beförderung gefährlicher Güter auf der Straße und auf der Schiene verzichtet, jedoch die diesbezüglichen internationalen Vereinbarungen ADR [33] und RID [34] mit entsprechenden ADR- und RID-Rahmenrichtlinien [35, 36] für die Beförderung gefährlicher Güter in sämtlichen Mitgliedstaaten für nationale und internationale Verkehre für verbindlich erklärt. Für sonstige Angleichungen von Rechtsvorschriften auf Basis der Artikel 100a EGV bzw. 95 EUV erlassen Kommission bzw. Rat „eigene“ Richtlinien, so z.B. für Herstellung und Inverkehrbringen technischer Arbeitsmittel, deren Ratifizierung über die Fortschreibung des Gerätesicherheitsgesetzes und seiner Folgeverordnungen - im allgemeinen im Kompetenzbereich des Bundesministeriums für Arbeit und Sozialordnung (BMA) - erfolgt. Es kommt für eine Darstellung dieser Zusammenhänge erschwerend hinzu, daß viele Sachverhalte, die von EG/EU-Kommission oder -Rat per Richtlinie für sämtliche Mitgliedstaaten „neu“ geregelt werden, in der Bundesrepublik Deutschland auf der Grundlage des Gerätesicherheitsgesetzes und seiner Vorgängerverordnungen (Reichsversicherungsordnung, Gewerbeordnung) bereits geregelt waren. So geht das Recht der überwachungsbedürftigen Anlagen - beispielsweise mit der Verordnung über brennbare Flüssigkeiten und der Druckbehälterverordnung - auf den § 24c der ehemaligen Gewerbeordnung zurück. Zumindest solange die hier geregelten Sachverhalte nicht durch EG/EU-Richtlinien erfaßt werden, gelten diese Verordnungen oder Teile von ihnen fort. Dies ist insofern bedeutsam, als in diesen Verordnungen immer noch Regelungen enthalten sind, die die Beförderung gefährlicher Güter (mit)betreffen, z.B. bei Betrachtung der Schnittstellen „Befüllung eines Transporttanks mit entzündbaren flüssigen Stoffen aus einer stationären Anlage“ und „Entleeren eines Transporttanks in eine stationäre Anlage“ sowie bei Verwendung von Transporttanks als Lagerbehälter (aktive Lagerung). In beiden Fällen sind in Deutschland gleichzeitig Anforderungen nach verkehrsrechtlichen Vorschriften und nach den Folgeverordnungen zum Gerätesicherheitsgesetz zu erfüllen.

Aus bestimmten Passagen der erwähnten grundlegenden Regelungen ergibt sich für die Exekutive - beispielsweise BMVBW und BMA - die Ermächtigung zum Erlass von Rechtsverordnungen und allgemeinen Verwaltungsvorschriften, um die genannten Schutzpflichten wahrnehmen zu können. Diese Ermächtigungen sind

üblicherweise an die Bestimmungen geknüpft, vor Er- laß normativer Regelungen Beteiligte, Betroffene und Interessierte zum zu regelnden Sachverhalt zu hören und sich der in diesem Kreis vorhandenen Kenntnisse zu bedienen. Die Verantwortung bei der Wahrnehmung von Schutzpflichten wird im abgewogenen Verhältnis auf Bund, Länder, Verbände und Unternehmen ver- teilt. Die Ergebnisse des ständigen Bemühens um ef- fektive Regelungen ergeben sich im Rahmen des dies- bezüglichen Auftrages des GG durch die Mitarbeit an internationalen Empfehlungen, deren - zumindest teil- weise - Übernahme in multinationale oder EG/EU-weit geltende Vorschriften und deren Verbindlichmachung (Ratifizierung) auf nationaler Ebene. Verbleibende na- tionale Besonderheiten, Begründungen, Interpretations- hilfen usw. werden überwiegend in den den Vorschrif- ten zugeordneten Richtlinien erfaßt. Diese Zusammen- hänge sind für die Geltungsbereiche von GGBefG und GSG - mit ihren Schnittstellen - in Bild 3.1 und Bild 3.2 schematisch dargestellt. Aus diesen Bildern ist die Kom- plexität und eine daraus resultierende gewisse Un- überschaubarkeit der Vorschriftenlage bei der Beför- derung gefährlicher Güter sehr gut ablesbar. Aus die- sem Grund wird in den für die Beförderung gefährli- cher Güter zuständigen Gremien - im wesentlichen im Committee of Experts on the Transport of of

Dangerous Goods des Economic and Social Council sowie der Gemeinsamen RID/ADR-Tagung des Economic Council for Europe der Vereinten Nationen - an einer Neuformatierung bzw. Restrukturierung der Vorschriften für die Beförderung gefährlicher Güter bei verschiedenen Verkehrsträgern oder für multimodale

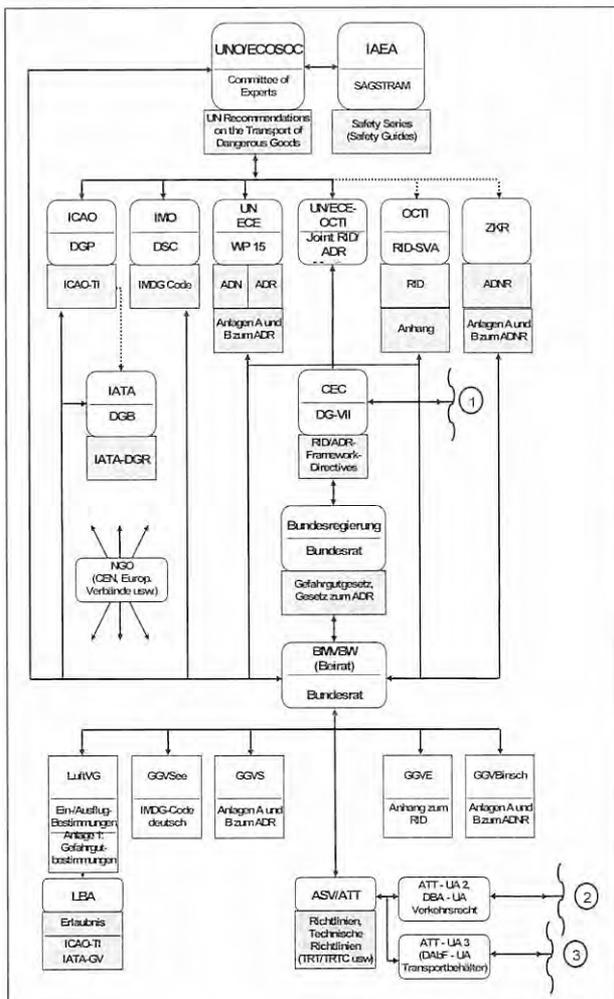


Bild 3.1: Beförderung gefährlicher Güter - Schematische Darstellung von Empfehlungen, Rechtsvorschriften und Richtlinien sowie der zuständigen Organisationen, Behörden und Gremien

UNO	United Nations Organization
ECOSOC	Economic and Social Council
Committee of Experts	Committee of Experts on the Transport of Dangerous Goods
IAEA	International Atomic Energy Agency
SAGSTRAM	Standing Advisory Group on the Safe Transport of Radioactive Material
ICAO	International Civil Aviation Organization
DGP	Dangerous Goods Panel
DGB	Dangerous Goods Board
IMO	International Maritime Organization
DSC	Sub-Committee on Dangerous Goods, Solid Cargoes and Containers
ECE	Economic Council for Europe
WP.15	Working Party 15 (Working Party on the Transport of Dangerous Goods)
OCTI	Office Central des Transports Internationaux par Chemins de Fer
RID-SVA	RID-Sachverständigenausschuß
Joint RID/ADR-Meeting	Gemeinsame RID/ADR-Tagung
ZKR	Zentralkommission für die Rheinschifffahrt
IATA	International Air Transport Association
CEC	Commission of the European Communities (EG/EU-Kommission)
DG VII	Direction General VII "Transport"
NGO	Non-Governmental Organizations (Verbände, CEN usw.)
BMVBW	Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen
Beirat	Beirat "Beförderung gefährlicher Güter" beim BMVBW
LBA	Luftfahrtbundesamt
ASV	Ausschuß Stoffe/Verpackungen des Beirates "Beförderung gefährlicher Güter" beim BMVBW
ATT	Ausschuß Tank/Technik des Beirates "Beförderung gefährlicher Güter" beim BMVBW
ATT-UA 2	ATT-Unterausschuß 2 "Gase"
DBA	Deutscher Druckbehälterausschuß
UA-VR	Unterausschuß "Verkehrsrecht"
ATT-UA 3	ATT-Unterausschuß 3 "Brennbare Flüssigkeiten"
DAbF	Deutscher Ausschuß für brennbare Flüssigkeiten

Zuständige Organisationen, Behörden und Gremien

ICAO-TI	Technical Instructions for the Transport of Dangerous Goods by Air
IMDG-Code	International Maritime Dangerous Goods Code
ADN	Accord Européen Relatif au Transport International des Marchandises Dangereuses par Voie de Navigation
ADR	Accord Européen Relatif au Transport International des Marchandises Dangereuses par Route
RID	Règlement International Concernant le Transport des Marchandises Dangereuses par Chemins de Fer
ADNR	Accord Européen Relatif au Transport International des Marchandises Dangereuses par Voie de Navigation sur le Rhin
IATA-DGR	Dangerous Goods Regulations
RID/ADR-Frame- work Directives	Richtlinie 96/49/EG des Rates zur Angleichung der Rechtsvorschriften der Mitgliedstaaten für die Eisenbahnbeförderung gefährlicher Güter; Richtlinie 94/55/EG des Rates zur Angleichung der Rechtsvorschriften der Mitgliedstaaten für den Gefahrguttransport auf der Straße
Gefahrgutgesetz	Gesetz über die Beförderung gefährlicher Güter
Gesetz zum ADR	Gesetz zu dem Europäischen Übereinkommen über die internationale Beförderung gefährlicher Güter auf der Straße (ADR)
LuftVG	Luftverkehrsgesetz
Ein-/Ausflugbestimmungen	Zusammenfassung der Bestimmungen über Einfluß und Ausflug von Luftfahrzeugen im Bereich der Bundesrepublik Deutschland
Anlage 1: Gefahrgutbestimmungen	Bestimmungen über die Beförderung gefährlicher Güter und Waffen im Luftverkehr
GGVSee	Verordnung über die Beförderung gefährlicher Güter mit Seeschiffen
GGVS	Verordnung über die innerstaatliche und grenzüberschreitende Beförderung gefährlicher Güter auf der Straße
GGVE	Verordnung über die innerstaatliche und grenzüberschreitende Beförderung gefährlicher Güter mit Eisenbahnen
GGVBinSch	Verordnung über die Beförderung gefährlicher Güter auf Binnengewässern (Gefahrgutverordnung Binnenschifffahrt)
Erlaubnis	Allgemeine Erlaubnis zur Beförderung gefährlicher Güter
IATA-GV	IATA-Gefahrgutvorschriften (Dangerous Goods Regulations)
TRT	Technische Richtlinien Tanks
TRTC	Technische Richtlinien Tankcontainer

Empfehlungen, Rechtsvorschriften und Richtlinien

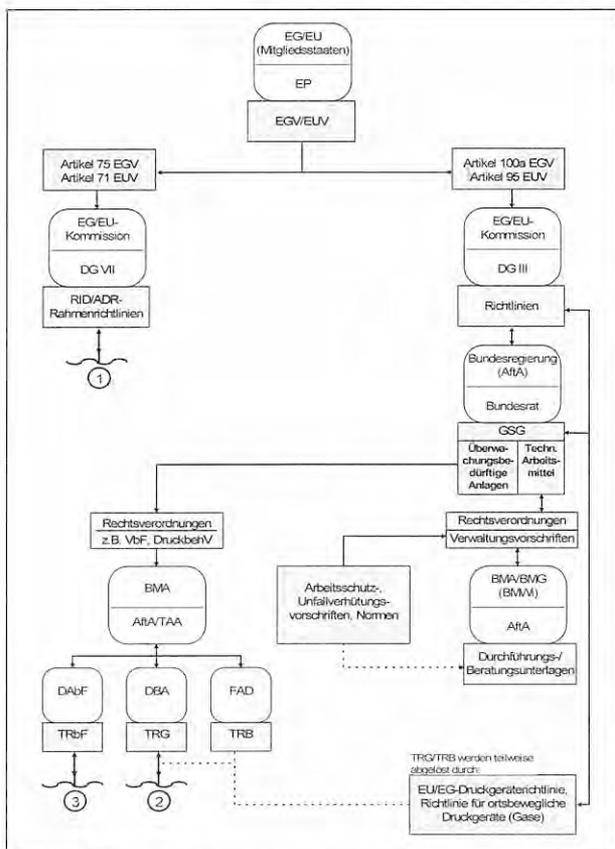


Bild 3.2: Beförderung gefährlicher Güter - EG/EU-Richtlinien und nationale Vorschriften (z.B. GSG) mit Einfluß auf Regelungen für die Beförderung gefährlicher Güter sowie zuständige Organisationen, Behörden und Gremien

Erläuterungen der Abkürzungen in Bild 3.2:

EG	Europäische Gemeinschaften
EU	Europäische Union
EP	Europäisches Parlament
DG III	Generaldirektion III "Industrie"
DG VII	Generaldirektion VII "Verkehr"
AfA	Ausschuß für technische Arbeitsmittel beim BMA
BMA	Bundesministerium für Arbeit und Sozialordnung
BMG	Bundesministerium für Gesundheit
BMWi	Bundesministerium für Wirtschaft
BMU	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit
TAA	Technischer Ausschuß Anlagensicherheit beim BMU
DAbF	Deutscher Ausschuß für brennbare Flüssigkeiten beim BMA
DBA	Deutscher Druckbehälterausschuß beim BMA
FAD	Fachausschuß Druckbehälter beim BMA

Zuständige Organisationen, Behörden und Gremien

EGV	EG-Vertrag
EUV	EU-Vertrag
RID-Rahmenrichtlinie	Richtlinie 96/49/EG des Rates zur Angleichung der Rechtsvorschriften der Mitgliedstaaten für die Eisenbahnbeförderung gefährlicher Güter
ADR-Rahmenrichtlinie	Richtlinie 94/55/EG des Rates zur Angleichung der Rechtsvorschriften der Mitgliedstaaten für den Gefahrguttransport auf der Straße
GSG	Gerätesicherheitsgesetz
VbF	Verordnung über brennbare Flüssigkeiten
DruckbehV	Druckbehälterverordnung
TRbF	Technische Regeln für brennbare Flüssigkeiten
TRG	Technische Regeln Druckgase
TRB	Technische Regeln für Druckbehälter

EG/EU-Richtlinien und nationale Vorschriften mit Einfluß auf Regelungen für die Beförderung gefährlicher Güter

Verkehre gearbeitet. Ziel ist es, eine Vereinfachung und Harmonisierung bisher in weiten Teilen divergierender Empfehlungen und Vorschriften zu erreichen, wobei in den Empfehlungen und Vorschriften i.w. Schutzziele und sicherheitstechnische Eckdaten verankert und dem Normungsbereich künftig verstärkt die Erarbeitung von Beschaffenheitsanforderungen (präzisierende Interpretationen unbestimmter Sachverhalte) anvertraut werden sollen.

3.2. Sicherheitstechnische Anforderungen an Tanks zur Beförderung gefährlicher Güter

3.2.1. Vorbemerkungen

Die Anforderungen, die an Gefahrgutumschließungen wie Tanks gestellt werden, decken üblicherweise deren Unfallrisiko nicht ab. Bis auf wenige Ausnahmen - beispielsweise Umschließungen für bestimmte radioaktive Stoffe - sind Gefahrgutumschließungen also nicht als „unfallsicher“ anzusehen.

Anforderungen orientieren sich also üblicherweise an betrieblichen Gegebenheiten wie Transportbeanspruchungen, Druck und Temperatur aufgrund stofflicher und betriebsbedingter Vorgaben sowie korrosiver Wirkung des Gefahrgutes auf die Umschließungswerkstoffe. Gesichtspunkte erhöhter Unfallsicherheit sind allein deshalb schwer durchsetzbar, weil es aus Wirtschaftlichkeitserwägungen vor dem Hintergrund höchstzulässiger Gesamtgewichte normalerweise nicht im Interesse von Spediteuren und deren Kunden liegt, möglichst viel - wenn auch sicherere - Umschließung zu transportieren, vielmehr soll und muß möglichst viel Gefahrgut befördert werden. Aufgrund dieser Randbedingungen ergeben sich Bestrebungen nach Leichtbauweise und möglichst hohen Füllungsgraden. Die Bestimmungen für den Gefahrguttransport repräsentieren dessen ungeachtet aus den im vorhergehenden Abschnitt genannten Gründen ein gewisses, im großen und ganzen als zufriedenstellend angesehenes Sicherheitsniveau.

3.2.2. Vorschriften über die Beförderung gefährlicher Güter

Die Beförderung gefährlicher Güter unterliegt in der Bundesrepublik Deutschland u.a. den Bestimmungen in den nach verschiedenen Verkehrsträgern gegliederten Gefahrgutverordnungen Eisenbahn (GGVE), Straße (GGVS) und See (GGVSee) - siehe Bild 3.1 [28, 29, 30].

Dem Vorsorgegebot des GG wird nach diesen Verordnungen beispielsweise durch den § 3 „Zulassung zur Beförderung“ der GGVS Rechnung getragen: Hiernach

besteht ein Beförderungsverbot gefährlicher Güter mit Erlaubnisvorbehalt, d.h. ihre Beförderung ist an Bedingungen (in den Anlagen zur GGVS enthalten) geknüpft. Die eigentlichen Vorschriften über die gefährlichen Stoffe und Gegenstände sowie deren Beförderungsmittel und Beförderung finden sich also in allen drei Rechtsverordnungen in deren Anlagen. Diese Anlagen werden durch die auf völkerrechtlicher Basis vereinbarten Abkommen RID und ADR bzw. deren Anlagen und Anhänge sowie den IMDG-Code gebildet [33, 34, 37]. Inhalte von RID, ADR und IMDG-Code ihrerseits gehen mehr oder weniger weitgehend auf die „UN-Recommendations on the Transport of Dangerous Goods“ [38] zurück, d.h. die Versammlungen, die über Inhalte von RID, ADR und IMDG-Code sowie Anlagen und Anhängen hierzu befinden, sind nicht gezwungen, die UN-Empfehlungen vollinhaltlich zu übernehmen.

Oftmals werden durch die Gemeinsame Tagung, den Sachverständigenausschuß des RID, die WP. 15 und das IMO-DSC (s. Bild 3.1) jedoch lediglich Anpassungen der verkehrsträgerneutralen (multimodalen) UN-Empfehlungen an die verkehrsträgerspezifischen Erfordernisse des Eisenbahn-, Straßen und Seeverkehrs vorgenommen, aber im Einzelfall werden auch divergierende Bestimmungen vereinbart. Es sei hervorgehoben, daß UN-Empfehlungen und IMDG-Code der Natur der Sache nach weltweit wirksam sind, RID und ADR sich demgegenüber regional begrenzt nur auf die RID/ADR-Vertragsstaaten - d.h. im wesentlichen auf Europa - beziehen. Vorschläge zur Weiterentwicklung der Gefahrgutbestimmungen bzw. -empfehlungen können von Vertrags- bzw. Mitgliedstaaten und einigen supranationalen Organisationen auf jeder der genannten Ebenen unterbreitet werden. Aus diesem Umstand ergibt sich ein unterschiedlicher Stand der materiellen Ausgestaltung der verschiedenen Empfehlungen und Vereinbarungen, wobei jedoch Harmonisierungsbestrebungen zu verzeichnen sind [39], die in zwei bis drei Jahren greifen werden. Nach diesem Zeitpunkt werden die erwähnten Regelungen und Empfehlungen soweit wie möglich inhaltlich harmonisiert, weitgehend ähnlich formatiert und insbesondere anwenderfreundlich gestaltet sein.

GGVE, GGVS und GGVSee bzw. RID, ADR und IMDG-Code mit Anlagen und Anhängen sowie die UN-Empfehlungen für die Beförderung gefährlicher Güter sind aus der Vielzahl der Gefahrgutregelungen deshalb herausgezogen worden, da sich nur hier explizit Anforderungen für Tanks zur Beförderung gefährlicher Güter - Transporttanks - finden lassen. Soweit nach anderen Bestimmungen Tanktransporte überhaupt zulässig sind, wird auf entsprechende Bestimmungen nach IMDG-Code oder RID/ADR verwiesen.

Auf die eine oder andere Weise enthalten UN-Empfehlungen, IMDG-Code, RID und ADR-Empfehlungen bzw. Vorschriften über

- die gefährlichen Stoffe und Gegenstände sowie

- die zur Beförderung dieser Gefahrgüter möglichen bzw. erforderlichen Beförderungsmittel und Randbedingungen.

Am Beispiel der GGVS bzw. des ADR sei dies näher erläutert. GGVS/ADR sind zwei Anlagen beigegeben. Die Anlage A beschäftigt sich mit den Vorschriften über die gefährlichen Stoffe und Gegenstände. Tabelle 3.1 gibt eine Übersicht über die Gliederung der Anlage A.

Kernstück der Anlage A ist der II. Teil „Stoffaufzählung und besondere Vorschriften für die einzelnen Klassen“. Hier sind alle Stoffe und Gegenstände, die Gefahrgut darstellen, nach der Art ihrer Gefährdung in Gefahrgutklassen gegliedert, aufgeführt und es werden Angaben gemacht wie Stoffe, die (noch) nicht in der Stoffaufzählung enthalten sind, den für sie zutreffenden Klassen zugeordnet werden können.

In der Anlage B sind die Vorschriften für die Beförderungsmittel und die Beförderung enthalten. Eine grobe Gliederung des Aufbaus der Anlage B kann Tabelle 3.2 entnommen werden. Wie aus den Tabellen ersichtlich ist, sind Einzelsachverhalte zum Zwecke des leichteren Auffindens mit einem Randnummernsystem versehen, d.h. um eine bestimmte Fundstelle in den Anlage A und B sowie den jeweiligen Anhängen zu bezeichnen, reicht die Angabe der entsprechenden Randnummer aus.

Anlage A der GGVS/des ADR		
Vorschriften über die gefährlichen Stoffe und Gegenstände		
I. Teil - Begriffsbestimmungen und allgemeine Vorschriften		Randnummern (Rn.)
Begriffsbestimmungen		2000-2001
Allgemeine Vorschriften		2002-2009
II. Teil - Stoffaufzählung und besondere Vorschriften für die einzelnen Klassen		
Klasse 1	Explosive Stoffe und Gegenstände mit Explosivstoff	2100 und ff.
Klasse 2	Gase	2200 und ff.
Klasse 3	Entzündbare flüssige Stoffe	2300 und ff.
Klasse 4.1	Entzündbare feste Stoffe	2400 und ff.
Klasse 4.2	Selbstentzündliche Stoffe	2430 und ff.
Klasse 4.3	Stoffe, die in Berührung mit Wasser entzündbare Gase entwickeln	2470 und ff.
Klasse 5.1	Entzündend (oxidierend) wirkende Stoffe	2500 und ff.
Klasse 5.2	Organische Peroxide	2550 und ff.
Klasse 6.1	Giftige Stoffe	2600 und ff.
Klasse 6.2	Ansteckungsgefährliche Stoffe	2650 und ff.
Klasse 7	Radioaktive Stoffe	2700 und ff.
Klasse 8	Ätzende Stoffe	2800 und ff.
Klasse 9	Verschiedene gefährliche Stoffe und Gegenstände	2900 und ff.
III. Teil - Anhänge der Anlage A		
Anhang A.1	A. Beständigkeits- und Sicherheitsbedingungen für explosive Stoffe und Gegenstände mit Explosivstoff und für nierte Cellulosemischungen	3100 und ff.
	B. Glossar der Benennungen in Rn. 2101	3170
Anhang A.2	A. Vorschriften über die Beschaffenheit der Gefäße aus Aluminiumlegierungen für gewisse Gase der Klasse 2	3200 und ff.
	B. Vorschriften für Werkstoffe und Bau von Gefäßen für tiefgekühlte verflüssigte Gase der Klasse 2	3250 und ff.
	C. Vorschriften für die Prüfung von Druckgaspackungen und von Gefäßen, klein, mit Gas (Gaspatronen) der Klasse 2 Ziffer 5	3291 und ff.
Anhang A.3	A. Prüfungen der entzündbaren flüssigen Stoffe der Klassen 3, 6.1 und 8	3300 und ff.
	B. Prüfung zur Bestimmung des Fließverhaltens	3310 und ff.
	C. Prüfungen zur Bestimmung der Ökotoxizität, der Beständigkeit und der Bioakkumulation von Stoffen in Wasser für die Einordnung in Klasse 9	3320 und ff.
Anhang A.4	(bleibt offen)	3400 und ff.
Anhang A.5	Allgemeine Verpackungsvorschriften, Art, Anforderungen und Vorschriften über die Prüfungen der Verpackungen	3500 und ff.
Anhang A.6	Allgemeine Bestimmungen für die Verwendung von Großpackmitteln (IBC), Arten von Großpackmitteln (IBC), Anforderungen für den Bau der Großpackmittel (IBC) und Vorschriften für die Prüfung der Großpackmittel (IBC)	3600 und ff.
Anhang A.7	Vorschriften für die radioaktiven Stoffe der Klasse 7	3700 und ff.
Anhang A.8	(bleibt offen)	3800 und ff.
Anhang A.9	Vorschriften für die Gefahrzettel; Erläuterung der Bildzeichen und Gefahrzettel	3900 und ff.

Tabelle 3.1: Übersicht über den Inhalt der Anlage A der GGVS/ des ADR

Anlage B der GGVS/des ADR	
Vorschriften für die Beförderungsmittel und die Beförderung	Randnummern (Rn.)
Aufbau der Anlage	10 000
Anwendung anderer nationaler oder internationaler Vorschriften	10 001
Anwendung der Vorschriften des I. Teils dieser Anlage	10 002
I. Teil	
Allgemeine Vorschriften für die Beförderung gefährlicher Güter aller Klassen	
Allgemeines	10 010 und ff.
Abschnitt 1 Beförderungsart des Gutes	10 100 und ff.
Abschnitt 2 Besondere Anforderungen an die Beförderungsmittel und ihre Ausrüstung	10 200 und ff.
Abschnitt 3 Allgemeine Betriebsvorschriften	10 300 und ff.
Abschnitt 4 Besondere Vorschriften für das Beladen, Entladen und für die Handhabung	10 400 und ff.
Abschnitt 5 Besondere Vorschriften für den Verkehr der Fahrzeuge (Tankfahrzeuge), Gefäßbatterien und Container (Tankcontainer)	10 500 und ff.
Abschnitt 6 Übergangsbestimmungen, Abweichungen und Sondervorschriften für bestimmte Staaten	10 600 und ff.
II. Teil	
Sondervorschriften für die Beförderung gefährlicher Güter der Klassen 1 bis 9, durch die die Vorschriften des I. Teils ergänzt oder geändert werden	
Klasse 1 Explosive Stoffe und Gegenstände	11 000 und ff.
Klasse 2 Gase	21 000 und ff.
Klasse 3 Entzündbare flüssige Stoffe	31 000 und ff.
Klasse 4.1 Entzündbare feste Stoffe	41 000 und ff.
Klasse 4.2 Selbstentzündliche Stoffe	42 000 und ff.
Klasse 4.3 Stoffe, die in Berührung mit Wasser entzündliche Gase entwickeln	43 000 und ff.
Klasse 5.1 Entzündend (oxidieren) wirkende Stoffe	51 000 und ff.
Klasse 5.2 Organische Peroxide	52 000 und ff.
Klasse 6.1 Giftige Stoffe	61 000 und ff.
Klasse 6.2 Ekzelerregende oder ansteckungsgefährliche Stoffe	62 000 und ff.
Klasse 7 Radioaktive Stoffe	71 000 und ff.
Klasse 8 Ätzende Stoffe	81 000 und ff.
Klasse 9 Verschiedene gefährliche Stoffe und Gegenstände	91 000 und ff.
III. Teil	
Anhänge der Anlage B	
Anhänge B.1	
Vorschriften für Tanks	
Gemeinsame Vorschriften zu den Anhängen B.1	200 000 ff.
Anhang B.1a Vorschriften für festverbundene Tanks (Tankfahrzeuge), Aufsetztanks und Batterie-Fahrzeuge	211 000 ff.
Anhang B.1b Vorschriften für Tankcontainer	212 000 ff.
Anhang B.1c Vorschriften für festverbundene Tanks und Aufsetztanks aus verstärkten Kunststoffen	213 000 ff.
Anhang B.1d Vorschriften für Werkstoffe und Bau von geschweißten festverbundenen Tanks, geschweißten Aufsetztanks und geweilten Tanks von Tankcontainern, für die ein Prüfdruck von mindestens 1 Mpa (10 bar) vorgeschrieben ist sowie für geschweißte festverbundene Tanks, geschweißte Aufsetztanks und geschweißte Tanks von Tankcontainern für tiefgekühlte verflüssigte Gase der Klasse 2	214 000 ff.
Anhang B.1e Vorschriften für Saug-Druck-Tanks für Abfälle	
Anhang B.2 Einheitliche Vorschriften für den Bau von Fahrzeugen zur Beförderung gefährlicher Güter einschließlich der Vorschriften für die gegebenenfalls erforderliche Typgenehmigung	220 000 ff.
Anhang B.3 Bescheinigung der Zulassung von Fahrzeugen zur Beförderung bestimmter gefährlicher Güter	230 000 ff.
Anhang B.4 Vorschriften für die Schulung der Führer von Fahrzeugen zur Beförderung gefährlicher Güter	240 000 ff.
Anhang B.5 Verzeichnis der Stoffe und Kennzeichnungsnummern	250 000 ff.
Anhang B.6 Bescheinigung über die Schulung der Führer von Fahrzeugen nach Rn. 10 315	260 000 ff.
Anhang B.7 Kennzeichen für Stoffe, die im erwärmten Zustand befördert werden	270 000 ff.

Tabelle 3.2: Übersicht über den Inhalt der Anlage B der GGVS/ des ADR

3.2.3. Vorschriften über die Beförderung gefährlicher Güter in Tanks

Nach GGVS/ADR - also für Beförderungen auf der Straße - findet sich die materielle Ausgestaltung der Anforderungen an festverbundene Tanks (Tankfahrzeuge), Aufsetztanks und Gefäßbatterien - im folgenden als Fahrzeugtanks bezeichnet - sowie an Tankcontainer im wesentlichen in den Anlagen zum Anhang B der GGVS/des ADR; für Fahrzeugtanks ist das der Anhang B.1a und für Tankcontainer der Anhang B.1b. Dem Anhang B.1b des ADR entspricht für Tankcontainer, die im Eisenbahnverkehr befördert werden, der Anhang X der Anlage zum RID und dem Anhang B.1a für Fahrzeugtanks entspricht im Eisenbahnverkehr sinngemäß der Anhang XI der Anlage zum RID für Eisenbahnkesselwagen.

Da sich ADR und RID - das Thema dieser Betrachtungen betreffend - nicht wesentlich unterscheiden, die Bestimmungen des ADR jedoch etwas spezifischer sind, soll für Landverkehre im folgenden nur noch auf GGVS/ADR eingegangen werden.

Zur GGVS gehört als Anlage eine deutsche Übersetzung des IMDG-Codes, der grundsätzlich synonyme Regelungen wie in den Anlagen A und B zum ADR enthalten umfaßt, jedoch anders gegliedert ist. Innerhalb des IMDG-Codes ist für Tankcontainer und

Fahrzeugtanks die „Allgemeine Einleitung“ und hier der Abschnitt 13 „Ortsbewegliche Tanks und Straßentankfahrzeuge“ von bestimmender Bedeutung.

In den UN-Empfehlungen über die Beförderung gefährlicher Güter sind wesentliche Anforderungen an ortsbewegliche Tanks (Tankcontainer) im Kapitel 6.6 „Requirements for the Design, Construction, Inspection and Testing of Portable Tanks“ enthalten, während sich Anforderungen an den Betrieb von Tankcontainern im Kapitel 4.2 „Use of Portable Tanks“ finden.

Der Umfang der besonderen Anforderungen an Fahrzeugtanks und Tankcontainer wiederum soll am Beispiel der Anlagen B.1a und B.1b der Anlage B zum ADR erläutert werden.

Sinngemäß findet sich dieser Umfang sowohl im RID als auch im IMDG-Code und den UN-Empfehlungen wieder.

3.2.4. Die Anhänge B.1a und B.1b der Anlage B des ADR

Die Beförderung gefährlicher Güter in Tanks ist untersagt, sofern dies nicht ausdrücklich nach den Anhängen B.1a oder B.1b zugelassen ist.

Der Aufbau der Anhänge B.1a für Fahrzeugtanks und B.1b für Tankcontainer ist - wie ihr Inhalt - nahezu identisch, d.h. die Anhänge unterscheiden sich lediglich im Hinblick auf einige wenige, fast ausschließlich historisch bedingte Besonderheiten, die für den eigentlichen Gegenstand der hier angestellten Betrachtungen - Explosionsdruckstoßfestigkeit von Transporttanks - von untergeordneter Bedeutung sind.

Die Anhänge B.1a und B.1b sind entsprechend Tabelle 3.3 gegliedert:

Der jeweils I. Teil der Anhänge B.1a/B.1b enthält die Vorschriften, denen grundsätzlich alle Fahrzeugtanks/ Tankcontainer unterliegen. Der jeweilige Abschnitt 2 „Bau“ enthält im ersten Satz der Rn. 21x 120 die Forderung, daß Tanks nach den Bestimmungen eines technischen Regelwerkes entworfen und gebaut sein müssen, das von der zuständigen Behörde - dem Bundesministerium für Verkehr, Bau und Wohnungswesen (BMVBW) - anerkannt ist, wobei jedoch die in den Anhängen B.1a/B.1b im folgenden aufgeführten Mindestanforderungen eingehalten werden müssen. Das durch den BMVBW anerkannte technische Regelwerk besteht aus den sogenannten AD-Merkblättern [40] in Verbindung mit Technischen Richtlinien (beispielsweise für Tanks allgemein - TRT, für Tankcontainer - TRTC) [41]. Die Mindestanforderungen, die der erwähnten Anforderung folgen, beziehen sich auf Werkstoffauswahl, Herstellungsweise, Mindestauslegungsdrücke, Werkstoffausnutzung, Beanspruchungsarten, Mindestwanddicken, zusätzliche Schutzmaßnahmen, Maßnah-

men gegen bestimmte Zusatzbeanspruchungen (z.B. Schwallwirkung des Inhaltes und Unterdruck), Kippstabilität und Schutz von (Bedienungs-)Einrichtungen auf der Oberseite eines Tanks.

In Rn. 211 127 Absatz 7 findet sich beispielsweise folgende Anforderung:

Schwallbleche und Trennwände von Transporttanks müssen auf irgendeine Weise derart gestaltet sein, daß sie eine gleichwertige Widerstandsfähigkeit gegen Druck- und Schwallwirkung wie der eigentliche Tankmantel aufweisen. Die Fläche der Schwallwand muß hierbei mindestens 70 % der Querschnittsfläche des Tanks (bzw. Tanksteils) betragen, in dem sich die Schwallwand befindet.

I. Teil		
Vorschriften für alle Gefahrgutklassen		Randnummern (Rn.)
Abschnitt 1:	Allgemeines, Anwendungsbereich, Begriffsbestimmungen	21x 100 - 21x 102
Abschnitt 2:	Bau	21x 120 - 21x 129
Abschnitt 3:	Ausrüstung	21x 130 - 21x 138
Abschnitt 4:	Zulassung des Baumusters	21x 140
Abschnitt 5:	Prüfungen	21x 160 - 21x 164
Abschnitt 6:	Kennzeichnung	21x 160 - 21x 161
Abschnitt 7:	Betrieb	21x 170 - 21x 178
Abschnitt 8:	Übergangsvorschriften	21x 180 - 21x 186
Abschnitt 9:	Verwendung der für den Seeverkehr zugelassenen Tankcontainer	21x 190
II. Teil		
Sondervorschriften, welche die Vorschriften des I. Teils ergänzen oder ändern		
Klasse 2:	Verdichtete, verflüssigte oder unter Druck gelöste Gase	21x 210 - 21x 279
Klasse 3:	Entzündbare flüssige Stoffe	21x 310 - 21x 373
Klasse 4.1:	Entzündbare feste Stoffe	21x 410 - 21x 475
Klasse 4.2:	Selbstentzündliche Stoffe	
Klasse 4.3:	Stoffe, die in Berührung mit Wasser entzündbare Gase entwickeln	
Klasse 5.1:	Entzündend (oxidierend) wirkende Stoffe	21x 510 - 21x 573
Klasse 5.2:	Organische Peroxide	
Klasse 6.1:	Giftige Stoffe	21x 610 - 21x 672
Klasse 7:	Radioaktive Stoffe	21x 710 - 21x 771
Klasse 8:	Ätzende Stoffe	21x 810 - 21x 871
Klasse 9:	Verschiedene gefährliche Stoffe und Gegenstände	21x 910 - 21x 971

Tabelle 3.3: Vorschriften für Fahrzeugtanks und Tankcontainer (Rn. 211 100 ff. Anhang B.1a und Rn. 212 100 ff. Anhang B.1b der Anlage B zur GGVS/zum ADR)

Im jeweiligen Abschnitt 3 sind Anforderungen aufgeführt, wie die Tanks auszurüsten sind und welche Beschaffenheit die Ausrüstungsteile haben müssen. Nach Rn. 21x 133 müssen Tanks zur Beförderung flüssiger Stoffe mit einem Dampfdruck bei 50 °C bis 1,1 bar (absolut) mindestens eine Lüftungseinrichtung und eine Sicherung gegen Auslaufen des Tankinhaltes beim Umstürzen aufweisen.

Mit dem Inkrafttreten der ADR/RID-Rahmenrichtlinien und den entsprechenden Anpassungen der GGVS/GGVE an das ADR/RID sind bis 1996 in Kraft befindliche (nationale) Anforderungen an die Ausstattung bestimmter Tanköffnungen mit Flammendurchschlagsicherungen, wenn die Tanks insgesamt nicht explosionsdruckstoßfest gebaut waren - sowie verkehrsrechtliche Bestimmungen betroffen sind - hinfällig geworden; näheres hierzu kann dem Abschnitt 3.3. entnommen werden.

Der jeweilige Abschnitt 7 gibt Hinweise darauf, wie Transporttanks zu betreiben sind z.B. im Hinblick auf die Beachtung der korrosiven Wirkung der Inhaltsstoffe und der Einhaltung maximal möglicher Füllungsgrade.

In Rn 21x 173 findet sich hierzu folgende Präzisierung: Soweit Tanks nicht durch Schwall- oder Trennwände in Abteile von höchstens 7500 l Fassungsraum unterteilt sind, muß der Füllungsgrad, wenn die Tanks nicht praktisch leer sind, mindestens 80 % betragen.

Die Vorschriften des I. Teils der Anhänge B.1a/B.1b werden im II. Teil um Sondervorschriften ergänzt. Diese Sondervorschriften beziehen sich zum einen auf die Angabe der Stoffe der einzelnen Gefahrgutklassen, die überhaupt in Tanks befördert werden dürfen und zum anderen auf die besonderen Eigenschaften, die mit der Beförderung gefährlicher Güter der verschiedenen Klassen verbunden sind und die auf unterschiedliche Weise abgedeckt werden müssen.

Besonderen Gefahren - z.B. hohe Giftigkeit, große ätzende Wirkung - wird dadurch Rechnung getragen, daß die Tankauslegung auf einem höheren Niveau - durch Anwendung eines nach der Gefährdung gestaffelten erhöhten (fiktiven) Berechnungsdruckes, losgelöst von den physikalischen Eigenschaften des Stoffes - erfolgt. Flankiert wird diese Maßnahme gegebenenfalls durch gesteigerte Anforderungen an den anzuwendenden Prüfdruck, die Ausrüstung (z.B. luftdichter Verschluss, Öffnungen nicht unterhalb des Flüssigkeitsspiegels), die Betriebsweise, verkürzte Prüfintervalle und erhöhten Prüfaufwand usw.

In den derzeit gültigen Anhängen B.1a/B.1b sind Flammendurchschlagsicherungen bzw. explosionsdruckstoßfeste Bauweise - als Schutz gegen Explosionen im Tankinneren - nach dem letzten Satz der Rn. 21x 332 nunmehr lediglich für Tanks mit nicht absperrbarer Lüftungseinrichtung, in denen entzündbare flüssige Stoffe befördert werden, vorgeschrieben.

Zusammenfassend läßt sich festhalten, daß die verkehrsrechtlichen Vorschriften Anforderungen enthalten, die der Verhinderung von Explosionen im Tankinneren dienen, jedoch auch - schwallhemmende - Maßnahmen festgelegt werden, die den Explosionsablauf im Tankinneren beeinflussen können.

3.3. Vorschriften für den Schutz gegen Explosionen im Tankinneren - Explosionsdruckstoßfestigkeit

Vor der Vereinheitlichung der EG/EU-weit geltenden Regelungen bei der Beförderung gefährlicher Güter auf der Straße und mit Eisenbahnen auch in den einzelnen Mitgliedstaaten der EG/EU gab es bis 1996 für innerstaatliche Beförderungen in den einzelnen Mitgliedstaaten die Möglichkeit, unabhängig von ADR und RID abweichende Vorschriften zur Geltung zu bringen; in der Bundesrepublik Deutschland im Rahmen der bis 1996 geltenden GGVS bzw. GGVE, künftig als GGVS (alt) und GGVE (alt) bezeichnet [42, 42]. Die in GGVS

und GGVE bzw. den Anlagen hierzu enthaltenen Anforderungen an den Explosionsschutz stellten in ihrer Gänze eine nationale Besonderheit dar und standen bis zu diesem Zeitpunkt in Übereinstimmung mit den entsprechenden Regelungen, die für überwachungsbedürftige Anlagen nach der Verordnung über brennbare Flüssigkeiten (VbF) [44] in den Technischen Regeln für brennbare Flüssigkeiten (TRbF) [45] und hier insbesondere die TRbF 120 mit ihrer Anlage 1 [46] für Tanks aus metallischen Werkstoffen Gültigkeit hatten und nach wie vor haben.

Ferner sind Erkenntnisse, die bei der Durchführung der Untersuchungen im Rahmen des Themas dieser Arbeit gewonnen wurden, wegen ihrer - nicht zuletzt wirtschaftlichen - Bedeutung unmittelbar in die Regelungen für explosionsdruckstoßfeste Bauweise eingeflossen, so daß eine etwas ausführlichere Schilderung der Vorschriften für den Schutz von Tanks gegen Explosionen im Tankinneren und ihrer Entwicklung erforderlich ist.

3.3.1. Vorschriften bis 1996

Bis 31.12.1996 erfolgte die Bewertung von Transporttanks im Hinblick auf den Schutz gegen Explosionen im Tankinneren auf der Grundlage folgender Rechtsvorschriften:

Nach den Randnummern 211 137, 211 138 und 212 137 der Anhänge B.1a bzw. B.1b der GGVS (alt) müssen Tanks mit nicht absperrbarer Lüftungseinrichtung und/oder Fördereinrichtungen für flüssige Stoffe mit Flammpunkten bis 55 °C mit Flammendurchschlagsicherungen ausgerüstet sein, wenn sie nicht nachweisbar explosionsdruckstoßfest gebaut sind [42]. Entsprechende Regelungen enthalten die Anhänge X und XI der GGVE (alt) unter den Nummern 1.3.9 bis 1.3.11 [43]. Diese verkehrsrechtlichen Vorschriften gehen zurück auf Bestimmungen des Gewerberechts, die in den der Verordnung über brennbare Flüssigkeiten nachgeordneten Technischen Regeln für brennbare Flüssigkeiten (TRbF) enthalten sind [44, 45].

Beispielhaft sei hier die Randnummer 212 137 des Anhangs B.1b zur GGVS (alt), der die Bestimmungen für Tankcontainer umfaßt, angeführt:

212 137 (1) Sind Tanks für flüssige Stoffe mit einem Flammpunkt bis 55 °C mit einer Gasrückführungseinrichtung ausgerüstet, muß diese flammendurchschlagsicher sein, wenn die Tanks nicht nachweisbar explosionsdruckstoßfest sind.

(2) Tanks für flüssige Stoffe mit Flammpunkt bis 55 °C mit nichtabsperrbarer Lüftungseinrichtung, die bei einem Überdruck unter 150 kPa (1,5 bar) öffnet, müssen in der Lüftungseinrichtung eine flammendurchschlagsichere Armatur haben, wenn die

Tanks nicht nachweisbar explosionsdruckstoßfest sind.

(3) Tanks mit innerem Überdruck müssen gefahrlos entspannt werden können. Bei Tanks zur Beförderung von flüssigen Stoffen mit einem Flammpunkt bis 55 °C muß nachweisbar sichergestellt sein, daß sie explosionsdruckstoßfest gebaut sind oder daß beim Entspannen Flammen nicht in den Tank hineinschlagen können.

Die Ausstattung von Tanköffnungen mit flammendurchschlagsicheren Einrichtungen bzw. die Forderung nach explosionsdruckstoßfester Bauweise von Tanks für brennbare Flüssigkeiten mit Flammpunkten bis 55 °C ist - wie mehrfach erwähnt - wegen der in Abhängigkeit von Öffnungsquerschnitt mit Tankinnendruck nicht auszuschließenden Möglichkeit eines Flammrückschlages in das Tankinnere und der damit verbundenen Gefahren für die Tanksicherheit erforderlich.

Anhand von Auszügen aus der Technischen Richtlinie Tanks TRT 030 (alt) „Lüftungseinrichtungen, Flammendurchschlagsicherungen“ [47] soll diese Problematik deutlicher umrissen werden:

- „1. Lüftungseinrichtungen, Flammendurchschlagsicherungen
- 1.1 Lüftungseinrichtungen sind Einrichtungen, die das Tankinnere belüften oder bei einem Überdruck von weniger als 1,5 bar entlüften. Flammendurchschlagsicherungen sollen den Flammendurchschlag durch die Lüftungseinrichtung in das Tankinnere verhindern. Flammendurchschlagsicherungen sind nur in Lüftungseinrichtungen für Tanks zur Beförderung gefährlicher Stoffe mit einem Flammpunkt von höchstens 55 °C einzubauen.
 - 1.2 Zur Vermeidung von Verschmutzung oder Vereisung müssen die Flammendurchschlagsicherungen gegen das Eindringen von Fremdkörpern und Niederschlag geschützt sein.
 - 1.3 Die Flammendurchschlagsicherungen müssen so eingebaut, betrieben, gewartet und unterhalten werden, daß ihre Wirksamkeit erhalten bleibt. Bei Beschädigungen (z.B. durch Korrosion), die zu einer Beeinträchtigung der Flammendurchschlagsicherheit führen können, müssen die betroffenen Teile erneuert werden.
 - 1.5 Lüftungseinrichtungen, die ausschließlich der Belüftung dienen (Unterdruckventile) und an die an der dem Tank abgewandten Seite keine Rohrleitung angeschlossen ist, müssen explosionsicher sein.
 - 1.6 Lüftungseinrichtungen mit oder ohne Anschluß für Gaspendelleitungen, an die an der dem Tank abgewandten Seite Rohrleitungen angeschlossen sind oder angeschlossen werden können, müssen dauerbrand- und detonationssicher sein. Derartige Einrichtungen an Eisenbahnkesselwagen brauchen nur explosionsicher zu sein.

2. Gutachten

Die Flammendurchschlagsicherungen müssen von der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB) für den vorgesehenen Verwendungszweck begutachtet worden sein. In dem Gutachten werden die Einsatzbedingungen festgelegt. Diese Einsatzbedingungen beziehen sich insbesondere auf die Art der gefährlichen flüssigen Stoffe, für die die Flammendurchschlagsicherung verwendet werden darf.“

In der TRT 030 (alt) finden sich zu den vorstehend aufgeführten Definitionen und Anforderungen umfangreiche Begründungen, deren Wiedergabe hier jedoch nicht erforderlich ist.

Die genannten Definitionen und Anforderungen sind im wesentlichen deshalb angeführt, da aus ihnen einige der Schwierigkeiten, die sich aus der Anwendung des Ausrüstungsteils „Flammendurchschlagsicherung“ ergeben können, ersichtlich sind:

Flammendurchschlagsicherungen können verschmutzen oder vereisen und ihre Wirksamkeit kann bei Beschädigungen beeinträchtigt werden. Sie bedürfen der Wartung. Ihre Einsatzbedingungen sind festgelegt; diese beziehen sich insbesondere auf definierte entzündbare flüssige Stoffe: Die Vielzahl aller möglichen ansonsten in einem Tank transportierbaren und für den Tanktransport zulässigen entzündbaren Flüssigkeiten ist mit einer bestimmten Flammendurchschlagsicherung u.U. nicht absicherbar. Überdies sind Flammendurchschlagsicherungen relativ kostspielige Bauteile (s. hierzu Abschnitt 2.4.3.).

Als Alternative bietet sich an, Tanks zur Beförderung gefährlicher entzündbarer Flüssigkeiten explosionsdruckstoßfest zu gestalten, um auf die Ausstattung mit Flammendurchschlagsicherungen verzichten zu können.

Der Begriff „Explosionsdruckstoßfestigkeit“ bzw. deren Nachweis ist in der Technischen Richtlinie Tanks TRT 006 (alt) - unter Bezugnahme auf die genannten Abschnitte der GGVS (alt) und GGVE (alt) - beschrieben [48, Originalwortlaut s. Anlage I].

Nach TRT 006 (alt) sind Tanks explosionsdruckstoßfest gebaut, wenn nachgewiesen ist, daß sie einer Explosion im Inneren standhalten, ohne aufzureißen; dabei sind bleibende Verformungen zulässig. Der Explosionsdruck ist stoffabhängig und abhängig vom Ausgangsdruck, bei dem die Zündung im Tank erfolgt. Der Ausgangsdruck im Tank ist bei Tanks mit innerem Überdruck der höchste Druck, bei dem eine Flamme in einen Tank zurückschlagen kann. In weiterer Abhängigkeit vom Durchmesser der vorliegenden betriebsmäßig freien Öffnungen von Tanks ist von Ausgangsdrücken zwischen 1,1 und 1,2 bar (absolut) auszugehen (s. Tabelle 3.4). Es ist zulässig, statt Einzelwerte ein Verhältnis Explosionsdruck zu Ausgangsdruck p_{ex0} gleich 10

anzunehmen, so daß den weiteren Betrachtungen tatsächliche Explosionsdrücke zwischen 11 und 12 bar (absolut) zugrunde zu legen sind. Der höchste auftretende Explosionsdruck ergibt sich also durch Multiplikation des maximalen Explosionsdruckes mit dem Ausgangsdruck als Faktor. Der bei einer Beurteilung auf Explosionsdruckstoßfestigkeit zugrunde zu legende höchste auftretende Explosionsüberdruck p_{ex} (in bar) ergibt sich nach folgender Beziehung:

$$p_{ex} = p_{ex0} \cdot p_a - 1 \quad (1)$$

mit

- p_{ex0} = absoluter maximaler Explosionsdruck (in bar) bei einem absoluten Ausgangsdruck von 1 bar
- p_a = absoluter Ausgangsdruck (in bar) entsprechend Tabelle 3.4 als dimensionsloser Faktor

Durchmesser der betriebsmäßig freien Öffnung des Tanks d [mm]	Ausgangsdruck (absolut) p_a [bar]
≤ 25	1,10
≤ 50	1,15
≤ 80	1,20

Tabelle 3.4: Ausgangsdruck als Funktion der betriebsmäßig freien Öffnung eines Tanks

Der Nachweis explosionsdruckstoßfester Bauweise kann rechnerisch oder experimentell erbracht werden. Beim rechnerischen Nachweis erfolgt die Berechnung aller drucktragenden Teile eines Tanks nach den Maßgaben der von der „Arbeitsgemeinschaft Druckbehälter“ herausgegebenen Richtlinien (AD-Merkblätter) [40]. Dabei wird unter Berücksichtigung der guten Verformungsfähigkeit der eingesetzten Tankwerkstoffe eine Sicherheit gegen die Zugfestigkeit R_m von 1,3 für ausreichend gehalten. Der Wert $R_m/1,3$ ersetzt den in den AD-Merkblättern genannten Ausdruck K/S für die zulässige Werkstoffanstrengung. Der Nachweis gilt nur für Tanks ohne Einbauten, die zu einer weiteren Druckerhöhung führen würden, insbesondere Schwallwände. Die Forderung, daß Tanks explosionsdruckstoßfest gebaut sind, gilt ebenfalls als erfüllt, wenn dies experimentell, z.B. durch eine Explosion mit explosionsfähigstem Ethylen/Luft-Gemisch, nachgewiesen wird. Diese Prüfung kann für Tanks, die aufgrund ihrer konstruktiven Gestaltung nicht nach dem genannten Verfahren berechnet werden können oder optimiert werden sollen, durchgeführt werden. Der Ausgangsdruck vor Entzündung des Ethylen/Luft-Gemisches wird - wie vorstehend erwähnt - gewählt. Das Verhältnis Explosionsdruck/Ausgangsdruck liegt bei explosionsfähigstem Ethylen/Luft-Gemisch bei 9,9, also hinreichend genau bei 10 (wie eigentlich gefordert ist).

An dieser Stelle soll jedoch bereits auf die Hauptnachteile der explosionsdruckstoßfesten Bauweise hingewiesen werden:

1. Üblicherweise ist in Zusammenhang mit dieser Bauweise von - wenn auch geringfügig - erhöhten Wanddicken auszugehen, so daß bei vorgegebener Gesamtmasse von Tank und Füllung lediglich etwas geringere Füllmengen zugelassen werden können.
2. Bei der Auslegung eines Transporttanks auf Explosionsdruckstoßfestigkeit ist davon auszugehen, daß ein derartiger Tank, wenn ein Flammenrückschlag in das Tankinnere erfolgt ist, aufgrund der sich ergebenden Verformungen wohl nicht aufge-rissen, jedoch derart verformt sein dürfte, daß eine Weiterverwendung des Tanks nicht mehr möglich ist.

Demgegenüber könnte sich die explosionsdruckstoßfeste Bauweise gegenüber der Ausstattung von Transporttanks mit Flammendurchschlagsicherungen - auf die Gesamtbetriebsdauer eines Tanks bezogen - kostenmäßig grundsätzlich günstiger stellen, da bei explosionsdruckstoßfest gebauten Tanks die Kosten für die Wartung und Reinigung der sonst erforderlichen Flammendurchschlagsicherungen entfallen. Überdies stellt die explosionsdruckstoßfeste Bauweise gegenüber der Ausstattung mit Flammendurchschlagsicherungen eine Sicherheitsmaßnahme dar, die auch dann wirksam ist, wenn sich die Zündquelle im Tankinneren befindet (elektrostatische Aufladung, Reparaturarbeiten usw.). Letztere Gesichtspunkte in Verbindung mit der universelleren Anwendbarkeit dieser Maßnahme hat bei Transporttanks letztendlich dazu geführt, daß die explosionsdruckstoßfeste Bauweise Verbreitung gefunden hat.

3.3.2. Vorschriften ab 1997

Bedauerlicherweise ist es nicht gelungen, die in den seit 1985 gültigen Gefahrgutverordnungen GGVS und GGVE enthaltenen Vorschriften in die seit 1997 auf der Grundlage der ADR- bzw. RID-Anpassungsrichtlinien - Richtlinie 94/55/EG des Rates zur Angleichung der Rechtsvorschriften der Mitgliedsstaaten für den Gefahrguttransport auf der Straße bzw. Richtlinie 96/49/EG für die Eisenbahnbeförderung gefährlicher Güter [35, 36] - neu gefaßten Gefahrgutverordnungen Straße und Eisenbahn [28, 29] vollständig zu übernehmen.

Flammendurchschlagsicherungen bzw. explosionsdruckstoßfeste Bauweise sind beispielsweise nach dem letzten Satz der Randnummer 21x 332 der Anhänge B.1a/B.1b der Anlage B zur GGVS/zum ADR nunmehr lediglich für Tanks mit nicht absperrbarer Lüftungseinrichtung, in denen entzündbare flüssige Stoffe befördert werden, vorgeschrieben. Die Anforderung bezieht sich jetzt jedoch auf entzündbare flüssige Stoffe mit einem Flammpunkt von höchstens 61 °C (bisher 55 °C). Die Änderung wurde aus Gründen der Harmonisierung mit weiteren Rechtsvorschriften (Gefahrgutverordnung See - [30]) erforderlich.

Die entsprechende Regelung ist in den Nummern 3.3.3 der Anhänge X und XI der Anlage zur GGVE/zum RID enthalten.

Für die Förder-, Gasrückführungs- und Entspannungseinrichtungen ist die Anforderung auf Flammendurchschlagsicherheit bzw. Explosionsdruckstoßfestigkeit - soweit verkehrsrechtliche Vorschriften betroffen sind - also entfallen.

Tankcontainer fallen jedoch, wenn sie als Lagerbehälter für brennbare Flüssigkeiten verwendet werden, gegebenenfalls in den Geltungsbereich der VbF bzw. TRbF [44, 45] und im besonderen der TRbF 142 „Tankcontainer“ [49]. Aus den TRbF 142 wird bezüglich der Anforderungen an Flammendurchschlagsicherheit bzw. Explosionsdruckstoßfestigkeit auf die entsprechenden Anforderungen, die in der TRbF 120 und ihrer Anlage 1 enthalten sind [46] verwiesen.

So kommt es, daß in der Bundesrepublik Deutschland wegen der Vorschriften in den TRbF die bis 1996 geltenden verkehrsrechtlichen Vorschriften de facto weiter angewendet werden, obwohl ADR und RID dies nicht (mehr) vorsehen. Dieser Zustand wird solange andauern, bis evtl. abweichende Regelungen durch neue EG/EU-Richtlinien der EG/EU-Kommission das in der Bundesrepublik Deutschland fortgeltende Recht für überwachungsbedürftige Anlagen abändern.

Der Vollständigkeit halber soll erwähnt werden, daß es jedoch gelungen ist, die explosionsdruckstoßfeste Bauweise von Tanks - neben den bisher schon vorgesehenen Flammensperren - als Schutzmaßnahme gegen Explosionen im Tankinneren in die UN-Recommendations on the Transport of Dangerous Goods [38] aufnehmen zu lassen. Der entsprechende Abschnitt 6.6.2.2.11 in den UN-Empfehlungen lautet:

„Vacuum-relief devices used on portable tanks intended for the transport of substances meeting the flash point criteria of Class 3, including elevated temperature substances transported at or above their flash point, shall prevent the immediate passage of flame into the shell or the portable tank shall have a shell capable of withstanding, without leakage an internal explosion resulting from the passage of flame into the shell.“

Es ist mit an Sicherheit grenzender Wahrscheinlichkeit davon auszugehen, daß diese Anforderung in naher Zukunft in den IMDG-Code übernommen und kurz über lang die Anlage zur GGVSSee ergänzen wird, so daß diesbezüglich die vollständige Harmonisierung der verkehrsträgerspezifischen Rechtsvorschriften GGVS, GGVE und GGVSSee bzw. ADR, RID und IMDG-Code erreicht sein wird.

Eines der Ergebnisse der im Rahmen des betrachteten Themas durchgeführten Untersuchungen war, daß die nach der TRT 006 festgelegten Ausgangsüberdrücke für Berechnungen und Versuche um ca. eine Größen-

ordnung zu hoch gewählt wurden, betroffene Tanks also zu scharfen Anforderungen unterworfen worden waren (s. Abschnitt 7. bzw. 7.1.). Ein anderes Untersuchungsergebnis eröffnete die Möglichkeit, die Eignung eines Tanks im Hinblick auf explosionsdruckstoßfeste Bauweise unter bestimmten Umständen anhand eines Wasserdruckversuches feststellen zu können (s. Abschnitte 8.1.2. und 8.2.2.). Wegen der insbesondere wirtschaftlichen Auswirkungen der (alten) Anforderungen war eine sofortige diesbezügliche Überarbeitung der TRT 006 „Explosionsdruckstoßfestigkeit“ unabweisbar, so daß seit August 1997 die TRT 006 mit folgendem Wortlaut (s. auch Anlage I) in Kraft gesetzt wurde [50].

1. Festverbundene Tanks, Aufsetztanks, Tankcontainer und Tanks von Eisenbahnkesselwagen sind z.B. explosionsdruckstoßfest, wenn sie einer Explosion im Innern standhalten, ohne aufzureißen, dabei sind bleibende Verformungen zulässig.

Der für den Nachweis der Explosionsdruckstoßfestigkeit maßgebliche Explosionsdruck ist stoffabhängig und abhängig von dem Ausgangsdruck, bei dem die Zündung im Tank erfolgt. Bei Transporttanks ist davon auszugehen, daß eine störungsbedingte Zündung durch eine betriebsmäßig freie Öffnung erfolgt, für den Ausgangsdruck kann daher der Atmosphärendruck von 1 bar angesetzt werden. Für diesen Ausgangsdruck weist ein Gemisch von 8,0 Vol.-% Ethylen in Luft unter allen bislang untersuchten Stoffen - ausgenommen sind solche Stoffe, die zum Selbstzerfall neigen - den höchsten Explosionsdruck p_{ex0} von 9,7 bar (absolut) auf (Anmerkung: Der Wert = 9,7 bar (absolut) ist aus der Literatur nicht zu ersehen, vielmehr findet sich nach wie vor ein Wert = 9,9 bar (abs.), wie in Abschnitt 2. bereits erwähnt wurde [20, 51]. Für rechnerische Nachweise sollte also nach wie vor von einem Explosionsdruck = 10 bar (abs.) ausgegangen werden).

2. Ein Tank gilt z.B. ferner als explosionsdruckstoßfest, wenn in einer experimentellen Prüfung an einem Baumuster eine Explosion mit dem o.g. Gemisch unter atmosphärischen Ausgangsbedingungen vom Tank ertragen wird, ohne daß er aufreißt. Die Prüfung wird von der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, Berlin, oder der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt, Braunschweig, durchgeführt.
3. Ein Tank gilt z.B. ferner als explosionsdruckstoßfest, wenn die Berechnung aller drucktragenden Teile des Tanks auf der Grundlage eines maximalen Explosionsdruckes von mindestens 9,7 bar (absolut) nach den Maßgaben der von der Arbeitsgemeinschaft Druckbehälter herausgegebenen Richtlinien (AD-Merkblätter) durchgeführt wird (siehe jedoch Anmerkung zu 1.). Unter Berücksichtigung der guten Verformungsfähigkeit der eingesetzten Tankwerkstoffe (Bruchdehnung der verwendeten Metalle mindestens 16 %) ist eine Sicherheit gegen die Zugfestigkeit (R_m) von 1,3 ausreichend. Dieser Wert ($R_m/1,3$) ersetzt den in den AD-Merkblättern genannten Ausdruck K/S für die zulässige Werkstoffanstrengung.
4. Ein Tank gilt z.B. ferner als explosionsdruckstoßfest, wenn nachgewiesen ist, daß er einem Wasserdruckversuch mit dem 1,3fachen des höchsten auftretenden Explosionsdruckes standhält, ohne aufzureißen.
5. Die Nachweise nach 3. und 4. gelten nur für Tanks ohne Einbauten (insbesondere Schwallwände), die zu einer weiteren Druckerhöhung im Explosionsverlauf führen können.

Somit ist nunmehr der rechtliche bzw. verordnungsmäßige Rahmen gespannt, innerhalb dessen die konkrete Ausfüllung der vorgegebenen Anforderungen, die immer noch einige unbestimmte Sachverhalte enthalten, erfolgen kann.

4. Voruntersuchungen und deren Ergebnisse

4.1. Qualifizierung von Transporttanks nach Rechtsvorschriften und hierzu durchgeführte Versuche

In allen Transporttanks, die entzündbare flüssige Stoffe enthalten oder enthalten haben und ungereinigt sind bzw. mit entzündbaren Lösungsmitteln gereinigt wurden, ist unter bestimmten Betriebsbedingungen mit der Möglichkeit eines Flammenrückschlages durch die betriebsmäßig freien Öffnungen eines Transporttanks in das Tankinnere zu rechnen. Führt der Flammenrückschlag tatsächlich zu einer Explosion im Tankinneren, muß für bestimmte Tankbauarten (z.B. Tanks für Mineralölprodukte) mit dem Überschreiten der Versagensgrenze des Tanks gerechnet werden, was dann erhebliche Auswirkungen auf die Tankumgebung haben kann.

Dies hat seit 1985 zur Einführung von Anforderungen geführt, bei deren Erfüllung entweder der zu befürchtende Flammenrückschlag in den Tank durch das Vorsehen von Flammensperren bzw. durchschlagssicherungen vermieden oder der Tank durch entsprechende Konstruktionsweise explosionsdruckstoßfest gestaltet wird, so daß seine Zerstörung mit entsprechenden Auswirkungen auf die Umgebung des Tanks vermieden wird.

Hierbei ist ein Flammenrückschlag aus einer Anlage in einen Transporttank nicht zu betrachten; dieser Sachverhalt wird durch Vorschriften anderer Rechtsbereiche (VbF, TRbF) abgedeckt. Auf diese Weise wird jedoch das hier in Erwägung zu ziehende Druckniveau beschrieben: Es kann sich bei den zu betrachtenden Ereignissen also nur um Explosionen bzw. Brände handeln, deren Flammenfortpflanzungsgeschwindigkeit größer ist als die Ausströmgeschwindigkeit durch die betriebsmäßig freien Öffnungen eines Tanks - beispielsweise bei der Entspannung eines unter Überdruck stehenden Tanks in die ihn umgebende Atmosphäre. Wenn entzündbare Gase oder Dämpfe im Tank vorhanden sind, kann es bei deren Ausströmen in die Atmosphäre durch einen (beliebigen) Zündfunken zur Zündung des entzündbaren Dampf/Luft-Gemisches kommen; wenn sich im Tank bereits entzündbares Dampf/Luft-Gemisch befunden hat, kann sich überdies ein Zurückschlagen der Flamme und eine Explosion im Tankinneren ereignen.

Tankeinbauten wie Schwall- und Trennwände haben einen Einfluß auf die Heftigkeit möglicher Explosionen. Schwall- und/oder Trennwände sind für Tankfahrzeuge vorzusehen, um die dynamische Wirkung des Tankinhaltes während der Beförderung zu behindern. Schwall- und/oder Trennwände müssen vorhanden sein, wenn ein Tank mit einem Füllungsgrad von weni-

ger als 80 % befüllt ist (es sei denn, er ist praktisch leer), wobei Schwall- und/oder Trennwände einen Fahrzeugtank in Abteile von höchstens 7500 l Rauminhalt zu unterteilen haben. Werden Schwallwände vorgeesehen, müssen diese eine Fläche, die mindestens 70 % der Tankquerschnittsfläche entspricht, aufweisen.

Wie der Nachweis explosionsdruckstoßfester Bauweise zu führen ist, kann den Rechtsvorschriften selbst nicht entnommen werden. Das in der Bundesrepublik Deutschland gültige technische Regelwerk, das zur Erfüllung der in den Rechtsvorschriften enthaltenen Anforderungen angewendet wird, gibt auch nur mehr oder weniger detaillierte Hinweise darauf, auf welche Weise der erwähnte Nachweis geführt werden kann, z.B. mit einer experimentellen Explosionsprüfung.

Diese Sachverhalte wurden ausführlich in den Abschnitten 1. bis 3. beschrieben.

Vor diesem Hintergrund wurden zwischen Juni 1984 und März 1997 insgesamt 33 Versuche durchgeführt, davon als

1. Explosionsversuche:

- 20 mit zylinderförmigen Tanks und Tankabschnitten
- 2 mit kofferförmigen Tankabschnitten
- 2 mit sogenannten kubischen Tankcontainern
- 4 mit separaten Domdeckeln bzw. Mannlochbereichen

2. Wasserdruckversuche

- 5 mit zylinderförmigen Tanks und Tankabschnitten.

Zum einen handelte es sich hierbei um Tanks, für die der rechnerische Nachweis der Explosionsdruckstoßfestigkeit nicht erbracht werden konnte, zum zweiten wurden Tanks geprüft, die mit einer oder mehreren Schwallwänden sowie Trennböden unterschiedlichster Bauart versehen waren.

Die Ermittlung folgender Sachverhalte war hierbei von besonderem Interesse:

- das Verhalten des Tankwerkstoffes,
- das Verhalten der Schweißnähte,
- das Verhalten der Domdeckelkonstruktion,
- das Verhalten von Aufsattelungen,
- das Verhalten der Stützen unterschiedlicher Größe
- der Einfluß des Tankdurchmessers und der Tanklänge.

Über die in den Technischen Richtlinien Tanks TRT 006 -alt [48] bzw. 006 [50] enthaltenen Anforderungen hinaus wurde der positive Nachweis der Explosionsdruckstoßfestigkeit wie folgt definiert:

- der Tank darf nicht aufgerissen sein,
- es dürfen keine Bauteile abgerissen sein,
- der Tank darf bleibend verformt sein,
- die Domdeckeldichtung darf herausgedrückt sein, jedoch darf der Domdeckel nicht so verformt sein, daß der Tank erheblich offen ist.

Über die Durchführung und Auswertung von Versuchen soll anhand eines Beispiels (Tank zu Versuch Nummer 2 in Tabelle 4.1) berichtet werden [52]:

Der im folgenden beschriebene Versuch wurde mit einem Tank durchgeführt, wie er in ähnlicher Gestaltung als Straßentankfahrzeug Verwendung findet (Bild 4.1). Der Tank hatte ein Fassungsvermögen von ca. 16 m³, sein Durchmesser betrug 2000 mm und seine Länge 5550 mm. Der Tank hatte keine Einbauten und war an einem Ende mit einer Aufsattelung versehen, die üblicherweise zur Aufnahme des Königszapfens dient. Am anderen Ende war eine Auflagerstütze angebracht. Die Wanddicke des zylindrischen Teils belief sich auf 3,1 bis 3,2 mm. Die Böden waren 3,2 bis 4,0 mm dick und im Bereich der Kreppe wurden 3,9 bis 4,0 mm gemessen. Der Mannlochstützen war 6 mm und der Domdeckel 4,5 mm dick. Der Mannlochausschnitt war durch einen 3 mm dicken und 80 mm breiten Ring verstärkt. Der Tank bestand aus austenitischem Stahl X5CrNi18 9 (Werkstoffnummer 1.4301) nach DIN 17440. Die Auflagerstützen waren aus St 37-2 hergestellt. Der Tank war mit einem Mannloch, das mit einem Domdeckel mit fünf Knebeln geschlossen war, sowie drei im Tankscheitel angeordneten Blockflanschen DN 80 und einem Blockflansch DN 100 - jedoch im Boden angebracht - versehen. Der Tank war für einen Betriebsdruck von 3 bar und einen Prüfüberdruck von 4 bar ausgelegt.



Bild 4.1: Versuchstank vor dem Explosionsdruckstoßversuch

Der Versuchsaufbau war ähnlich dem, wie er Bild 4.2 entnommen werden kann. Der Tank wurde mit einem Gemisch aus ca. 7,4 Volumenprozent Ethylen in Luft bis zu einem Überdruck von 0,25 bar befüllt. Da entsprechend den Vorgaben der TRT 006 das Zurückschlagen einer Flamme in den Tank zu simulieren war, mußte sich die Zündquelle außerhalb des Tanks befinden. Hierzu wurde auf einen der vorhandenen Flansche ein Zündgefäß mit eingebautem Zünder aufge-

setzt. Dieser, wie alle weiteren Versuche, wurden instrumentiert ausgeführt, d.h. es wurden Druckaufnehmer, Dehnungsmeßstreifen, teilweise Wegaufnehmer und Thermolemente am und im Tank angebracht. Versuchsdaten wurden i. a. mit Transientrecordern registriert.

Nach der Zündung ergab sich ein maximaler Explosionsüberdruck von 10,3 bar am Domdeckel und von etwa 12 bar am Tankboden. Wegen Undichtheiten am Domdeckel sank der Druck dort relativ rasch wieder ab. Als maximale Druckanstiegsgeschwindigkeit wurden 53 bar s⁻¹ ermittelt. Hiermit errechnet sich der die Explosionsheftigkeit beschreibende K_G -Wert (s. Abschnitt 2.3.2.) zu

$$K_G = \left(\frac{dp}{dt} \right)_{\max} \cdot V^{1/3} = 133,5 \text{ bar ms}^{-1}.$$

Dieser Wert steht in guter Übereinstimmung mit Laborergebnissen [53].

Aus den gemessenen Dehnungen in Umfangsrichtung im zylindrischen Teil des Tanks in Höhe von 0,2 % (elastisch) und 1,3 % (plastisch) läßt sich aus ermittelter Vergleichsspannung, dem Spannungsdehnungsdiagramm für den verwendeten Werkstoff sowie der „Kesselformel“ ein maximaler Explosionsüberdruck von 11,5 bar errechnen (s. Abschnitt 8.2.1.1.).

Dieser Wert stimmt gut mit dem sich als Produkt aus Anfangsdruck $P_a = 1,25$ bar (absolut) und dem Verhältnis Explosionsdruck/Ausgangsdruck in Höhe von 9,9 für Ethylen/Luft-Gemisch ergebenden maximalen Explosionsüberdruck von $p_{ex} = 11,4$ bar überein.

Weitere Berechnungen auf der Basis der gemessenen Dehnungen brachten den Nachweis der Explosionsdruckstoßfestigkeit auch für Boden-, Kreppe- und Mannlochbereiche des untersuchten Tanks.

Die folgende Tabelle 4.1 enthält unter anderem eine Übersicht über die wesentlichen Parameter der bei 20 Untersuchungen auf diese oder ähnliche Weise geprüften Tanks bzw. Tankabschnitte. Bei 15 dieser Versuche waren die hierbei insgesamt 8 untersuchten Versuchstanks mit Schwallwänden bzw. Schwallblechen ausgerüstet, die sich wiederum bezüglich ihrer Anordnung und Abmessung der Öffnungen unterschieden.

Da auch Unterschiede in den Versuchsbedingungen wie Vordruck, Ethylenkonzentration und Temperatur zu verzeichnen waren, ergaben sich unterschiedliche Ergebnisse, die eine vollständige systematische Auswertung erschweren.

Über die Ergebnisse der durchgeführten Versuche wird in Abschnitt 8.1. ausführlicher berichtet, einige Anmerkungen sind jedoch bereits hier erforderlich: An mehreren dieser Tanks wurden zwei Versuche nacheinan-

Vers. Nr.	Hersteller	Antrag	interne Dokumentation	Versuchsdatum	Volumen V [m ³]	Außen-durchmesser D _a [mm]	Länge L [mm]	Betriebsdruck p _B [bar]	Prüfdruck p _P [bar]	Tankart	mit Schwallwand [Anzahl]	bestanden [x = ja]
1	Linke-Hofmann-Busch	1.5/1570	1.5/416	07.06.84	35	2600	7000	3	4	KW	1	
2	Schwietert	1.5/1621	1.5/420	14.11.84	16	2006	5550	3	4	TA		x
3	Schwietert	1.5/1621	1.5/420	15.11.84	16	2006	5550	3	4	TA		x
4	Hendricks	1.5/10412	1.5/442	02.05.85	30	2000	10220	2,3	4	TA	3	
5	Gofa	1.5/10458	1.5/443	22.05.85	14	2006	5080	3	4	TA	1	x
6	Schwietert	1.5/10638	1.5/444	02.07.85	3,9	1906	1995			TA		
7	Gofa	1.5/10458	1.5/445	03.07.85	14	2006	5080	3	4	TA	1	
8	Rietberg	1.5/10747	1.5/448	25.09.85	0,95	1250	970		3	KTC		x
9	Waldner	1.5/	1.5/449	25.09.85	1	924x1124	1170			KTC		
10	Trinity (Hoechst)	ohne	1.5/474	19.08.86	18,5	1859	7482	17,6	26,4	TA		x
11	Trinity (Hoechst)	ohne	1.5/474A	20.08.86	18,5	1859	7482	17,6	26,4	TA		x
12	Trinity (Hoechst)	ohne	1.5/474B	20.08.86	18,5	1859	7482	17,6	26,4	TA		x
13	LAG	1.5/11238	1.5/475	27.08.86	11,7	1907	4800	3	4	TA	1	x
14	Klaeser	1.5/11464	1.5/491	04.12.86	15	2000	5450	2,3	3	TA	1	
15	LAG	ohne	1.5/492	26.11.86	11,7	1907	4800	3	4	TA	1	?
16	LAG	ohne	1.5/493	02.12.86	11,7	1907	4800	3	4	TA	1	?
17	LAG	ohne	1.5/495	24.03.87	11,7	1907	4800	3	4	TA	1	?
18	Aurepa	1.5/11940	1.5/501	09.09.87	13	1800/2200	5100	3,1	4	TA		x
19	Kässbohrer	1.5/11754	1.5/502	17.09.87	15	1900	5800	3	4	TA	1	
20	Fort Vale - ML	1.5/12049	1.5/503	16.09.87	0,22	512	1400			ML		
21	Magyar	1.5/12554	1.5/626	04.08.88	15	2350	3518	3	4	TA	1	x
22	Van Hool	1.5/12586	1.5/631	13.10.88	15	2106/2306	5305	3	4	TA	1	x
23	Van Hool	1.5/12586	1.5/632	03.11.88	15	2106/2306	5305	3	4	TA	1	
24	Perolo - ML	1.5/13076	1.5/700	21.06.89	0,22	512	1400			ML		
25	Perolo - ML	1.5/13076	1.5/700A	21.06.89	0,22	512	1400			ML		
26	Perolo - ML	1.5/13076	1.5/700B	22.06.89	0,22	512	1400			ML		
27	CPV-Fort Vale	1.5/13375	1.5/702	05.10.89	13,5	2396	3400	3	4	TA		
28	Holvrieka	1.7/40113	1.7/9101	19.09.91	15	1806/2056	5675	2,3	4	TA	1	x
29	Holvrieka	1.7/40113	1.7/9102	19.09.91	15	1806/2056	5675	2,3	4	TA	1	x
30	Holvrieka	ohne	ohne		15	1806/2056	5675	2,3	4	TA	1	x
31	Ellinghaus	ohne	9.2/9416	09.02.94	7,5	2330/1530	2555			KTA		x
32	Ellinghaus	ohne	9.2/9417	09.02.94	7,5	2330/1530	2555			KTA		
33	Feldbinder	III.2/1306	III.2/9701	13.03.97	12	2300	3500	3	4	TA		x

Tabelle 4.1: Aufstellung der durchgeführten Explosionsversuche (Tankart: KW = Eisenbahnkesselwagen; TA = zylindrischer Tankabschnitt; KTC = kubischer Tankcontainer; ML = separates Mannloch; KTA = Koffertankabschnitt)

der durchgeführt. Der Tank zu den Versuchen lfd. Nr. 22 und 23 hielt dem zweiten Versuch nicht stand. Inwieweit dieses Versagen auf die Vorschädigung oder die geänderten Versuchsbedingungen (Zündort) zurückzuführen war, konnte nicht eindeutig geklärt werden. Von den acht Tanks mit Schwallwänden bestanden 3 bzw. 4 Tanks die Versuche nicht. Der Tank zu den Versuchen lfd. Nr. 28 und 29 überstand dagegen zwei Versuche nacheinander ohne Bersten. Es stand also zu vermuten, daß nicht allein das Vorhandensein von Schwallwänden zum Versagen des Tanks bei Explosionen im Inneren führen muß, sondern insbesondere die konstruktive Gestaltung der Tanks und Schwallwände sowie der Ort der Zündung Einfluß haben. Des weiteren zeigte sich, daß auch Tanks ohne Einbauten mit Prüfdrücken von 4 bar die Anforderungen nicht prinzipiell erfüllen müssen. Die bei diesen Versuchen ermittelten K_G -Werte liegen jedoch deutlich unterhalb derer, die bei Tanks mit Schwallwänden zum Versagen führten.

4.2. Diskussion der Versuchsergebnisse

4.2.1. Reale Transporttanks ohne Schwallwände

Anhand der Ergebnisse verschiedener, auf die in Abschnitt 4.1 beschriebene Weise durchgeführter Versuche mit Tanks, die keine Einbauten wie Schwallwände aufwiesen, wurden zunächst folgende, mehr oder weniger gesichert erscheinende Annahmen getroffen:

Die Explosion des zündfähigsten Gemisches, nach Kenntnis zum Zeitpunkt der Durchführung der Versuche besteht aus 7,4 Vol-% Ethylen in Luft, führt in kerbfreien bzw. störstellenfreien Bereichen des zylindrischen Teils von Tanks zu Beanspruchungsverhältnissen, die im wesentlichen denen statischer Druckbeanspruchungen entsprechen, die die gleiche Höhe aufweisen.

Unter dieser Voraussetzung kann dann als gesichert angenommen werden, daß das auf Membranspannungen im elastischen Bereich bezogene Ergebnis auf beliebige Konfigurationen übertragbar ist, die bereits plastische Verformung erlitten haben, d.h. auch in Krepfen- und Mannlochbereichen können Beanspruchungsverhältnisse, wie sie infolge Explosionsdruckes vorliegen, denen statischer Druckbeanspruchung im wesentlichen gleichgesetzt werden.

Für die weitere Betrachtung muß daher zunächst nur noch auf den Zylinder- und Dom- bzw. Mannlochbereich eingegangen werden, da der Bodenbereich (Klöpfer- oder günstigenfalls Korbbogenboden) bei Druckbeanspruchungen über die Streckgrenze hinaus in Richtung auf eine Halbkugelgestalt, d.h. eine spannungsgünstigere Form als im Zylinderbereich des Tanks vorhanden, zu fließen beginnt, ohne daß der Boden aufreißt. Ebenso werden durch plastische Verformung des Krepfenbereichs die dort herrschenden Spannungsspitzen abgebaut.

Die vorstehenden Annahmen sind jedoch an folgende Voraussetzungen gebunden:

1. Für den zylindrischen Teil und die Böden der Tanks muß ein einheitlicher Werkstoff mit vergleichbaren Festigkeitskennwerten verwendet werden.
2. Berechnungen des zylindrischen Teils und der Böden von Tanks, für die Explosionsdruckstoßfestigkeit nachgewiesen werden soll, müssen zunächst auf der Basis der AD-Merkblätter für einen Berechnungs- bzw. Prüfüberdruck von wenigstens 4 bar erfolgen [54].
3. Die Wanddicke der Böden darf nicht kleiner sein als die Wanddicke des zylindrischen Teils, die sich aufgrund ihrer Auslegung auf Explosionsdruckstoßfestigkeit größer ergeben kann als nach AD-Merkblättern für 4 bar Überdruck ermittelt. Andere Zuschläge müssen ebenfalls Berücksichtigung finden.
4. Bei Tanks, die üblicherweise als Schweißkonstruktion ausgebildet sind und bei denen eine Schweißnahtbewertung (Schweißnahtfaktor) v von weniger als 1 zugrunde zu legen ist, ist zu beachten, daß dennoch bezüglich der Versuchsbewertung (fiktiv) von einem Schweißnahtfaktor $v = 1$ auszugehen ist (da kein Aufschluß über die tatsächlich vorliegende Wertigkeit der Schweißnaht zu gewinnen ist, kann diese beim Versuchsobjekt also $v = 1$ gewesen sein). Demzufolge ist für die Beurteilung von Serientanks der entsprechend niedriger gewählte Schweißnahtfaktor - beispielsweise $v = 0,85$ - zusätzlich zu berücksichtigen.

Auflagerbereiche können von den weiteren Betrachtungen ebenfalls ausgenommen werden, wenn ihre konstruktive Gestaltung als spannungsgünstig angenommen werden kann. Dies ist immer der Fall, wenn Aufsattelungen denen entsprechen, die an Tanks vorhanden waren, die einer Prüfung auf Explosionsdruckstoßfestigkeit unterzogen worden waren [56, 57, 58, 59].

Eine Ausführlichere Diskussion der Versuchsergebnisse und bestätigende Schlußfolgerungen hierzu können dem Abschnitt 8. entnommen werden.

4.2.2. Reale Transporttanks mit Schwallwänden

Die beschriebenen Verhältnisse ändern sich jedoch u.U. grundlegend, wenn Tanks mit Einbauten wie Schwallwänden versehen werden. In diesen Fällen kann es beim Fortschreiten der Explosion von einem in den oder die anderen Tankbereiche, die durch Schwallwände „abgeteilt“ sind, zu Vorkomprimierungen und Turbulenzen kommen, die hinsichtlich des sich ergebenden maximalen Explosionsüberdruckes in einzelnen Bereichen zu erheblichen Erhöhungen (bis auf 20 bar) führen können. Derartigen Beanspruchungen sind die Tanks, die auf Explosionsüberdruck bis zu 11 bar aus-

gelegt werden, nicht gewachsen. Als Beispiel sei hier ein Tank angeführt, der mit drei Schwallwänden ausgestattet war (Tank zu Versuch Nr. 4 in der Tabelle 4.1) und die Prüfung auf Explosionsdruckstoßfestigkeit - ausgehend von einem Vordruck von 1,2 bar - aus den genannten Gründen nicht überstand - siehe hierzu Bild 4.2 und Bild 4.3 [55].

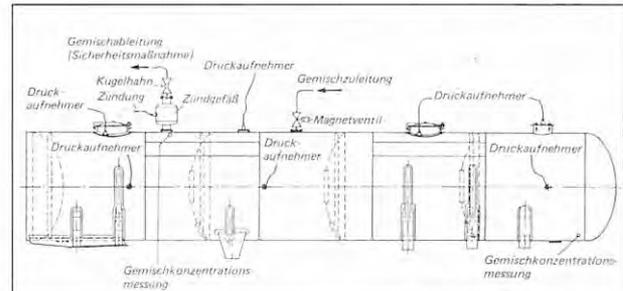


Bild 4.2: Versuchstank mit Einbauten - Versuchsaufbau (schematisch)



Bild 4.3: Versuchstank nach dem Explosionsdruckstoßversuch

Insgesamt 8 Tanks, die mit Schwallwänden ausgestattet waren, sind auf die vorstehend mehrfach erwähnte Weise bisher geprüft worden. 5 dieser Tanks haben die Prüfung bestanden, 3 - einschließlich des eben erwähnten Beispiels - nicht.

Bisher läßt sich hierzu wenig mehr feststellen oder vermuten als daß

- die Anzahl vorhandener Schwallwände,
- die Lage der Durchtrittsöffnungen in jeder Schwallwand,
- ihre Anzahl,
- die Größe einzelner Durchtrittsöffnungen und
- der „Überdeckungsgrad“

bei ansonsten gleichen Versuchsbedingungen das Ergebnis eines Explosionsdruckstoßversuches zu beeinflussen scheinen. Als Überdeckungsgrad wird hierbei das Verhältnis der Gesamtfläche einer Schwallwand abzüglich der Summe der Freiflächen (Flächen der Durchtrittsöffnungen) zur Gesamtfläche des Tankquerschnitts an dieser Stelle bezeichnet. Bedauerlicherweise liegen für diese Fälle noch keine gesicherten Erkenntnisse vor, so daß keine genauen Vorhersagen

getroffen werden können, wie sich Tanks mit Einbauten (Schwallwänden) bei einem Explosionsdruckstoßversuch verhalten werden [56, 57, 58, 59].

Aus bisher durchgeführten Untersuchungen bzw. Vorversuchen allein können also nicht für alle Konstruktionsweisen grundlegende Zusammenhänge abgeleitet werden, die es erlauben, einen Tank bezüglich seiner Explosionsdruckstoßfestigkeit abschließend oder wenigstens sicherer zu bewerten.

Tanks mit Einbauten und solche mit nicht auf Explosionsdruckstoßfestigkeit geprüften Mannloch- bzw. Domkonstruktionen oder berechneten Mannlöchern bzw. Domen, sind also nach wie vor Prüfungen zu unterziehen.

Die ausführliche Diskussion dieser Sachverhalte erfolgt in Abschnitt 9.

4.3. Definitionen zur Zielstellung - Bestimmung offener Fragen

Aus den vorhergehenden Abschnitten lassen sich Schlußfolgerungen ziehen, welche Fragen im Rahmen erweiterter Untersuchungen beantwortet bzw. welche Annahmen einer Bestätigung zugeführt werden müßten, um Aufschluß über die Güte und Anwendbarkeit der Schutzmaßnahme „Explosionsdruckstoßfestigkeit“ zu erlangen:

1. Im Abschnitt 4.2.1. wurde dargelegt, daß für „einfache“ Tanks - Tanks ohne Einbauten und Tankabschnitte ohne wesentliche Störstellen im Hinblick auf die sich betriebs- und auch reaktionsbedingt ergebende Spannungsverteilung in der Tankschale - die Beurteilung ihrer Explosionsdruckstoßfestigkeit aufgrund der bereits durchgeführten Versuche und noch durchzuführender Spannungsbewertungen möglich wäre. Diese Annahme wurde sowohl für Verhältnisse im elastischen als auch plastischen Verformungsbereich der verwendeten Werkstoffe getroffen. Zur Bestätigung wäre eine systematische Aufbereitung der Ergebnisse und die analytische Bewertung der Vorversuche erforderlich (s. Abschnitte 8.1. und 8.2.). Verifizierungen der Vorversuche erschienen sinnvoll (s. Abschnitt 8.4.).
2. Optimierte Auslegungen von Tanks ohne Einbauten auf analytischem Wege erschienen ebenfalls denkbar (s. Abschnitt 8.2.3.).
3. Weiterhin wäre zu prüfen, ob unter bestimmten Bedingungen dynamische Nachweise durch Explosionsdruckstöße nicht vollständig durch (quasistatische) Wasserdruckversuche ersetzt werden könnten. Hiermit ließe sich die Erwartung verbinden, Randbedingungen soweit festlegen zu können, daß zumindest für Einkammertanks und ein-

zelne Konstruktionselemente (Dome, Krageanbindungen von Trennböden usw.) einfachere Nachweismethoden für die Explosionsdruckstoßfestigkeit, als mit der Durchführung von Explosionsdruckstoßversuchen gegeben, gefunden werden könnten (s. Abschnitte 8.1.2. und 8.2.2.).

4. Ausgehend von der Darstellung in Abschnitt 4.2.2. zu den Ergebnissen von Vorversuchen hinsichtlich der Explosionsdruckstoßfestigkeit von Tanks, die durch eine Schwallwand - eventuell sogar mehrere - in Abteile und durch Trennböden eventuell zusätzlich in Kammern unterteilt sind, liegen bisher keine gesicherten Erkenntnisse vor, wie Schwallwände und Trennböden zu gestalten sind, damit keine wesentlichen Druckerhöhungen über den nach Laboruntersuchungen zu erwartenden Explosionsdruck hinaus entstehen können. Es wären also weitergehende Untersuchungen erforderlich. Auch hier sollte ausgehend von einer intensiven Auswertung der Ergebnisse von Vorversuchen deren gesichertere Bestätigung erfolgen bevor konstruktive Optimierungen (in Richtung auf die Absenkung des sich bisher real ergebenden Explosionsenddruckes und die Verminderung der festgestellten Explosionsheftigkeit) erarbeitet und ihrerseits untersucht werden könnten. Die Möglichkeit analytischer Optimierungen sollte zumindest überprüft werden (s. Abschnitt 9.).
5. Die ergänzenden bzw. erweiterten Untersuchungen sollten also primär der Bestätigung der an realen Transporttanks gewonnenen Ergebnisse dienen, wobei die Reproduzierbarkeit von Versuchen und damit auch Ergebnissen beachtet werden müßte. Die Untersuchungen sollten sich auf die Ermittlung des Einflusses von
 - Zündart (innerhalb des Tanks: Brennmomentzündung; außerhalb des Tanks: Flammeneintritt, Flammenstrahlzündung), Zündort (innerhalb des Tanks: zentral bzw. mittig, am Rand; außerhalb des Tanks),
 - Vordruck bzw. Ausgangsdruck (im Rahmen der zu betrachtenden Drücke zwischen 0 und 0,2 bar),
 - Längen/Durchmesser - Verhältnis bis 6 : 1 als Abbild der Verhältnisse bei realen Tanks),
 - Schwallwänden (Mehrfachzündungen, Flammenstrahlzündung, Vorverdichtungen) und ggf. deren Anzahl,
 - Konstruktionsweisen
 beziehen (s. Abschnitte 8.4. und 9.2.).
6. Eine Überprüfung der nach den in Abschnitt 3. beschriebenen Rechtsvorschriften hinsichtlich
 - des tatsächlich erforderlichen Ausgangsdruckes für Explosionsdruckstoßuntersuchungen,

- der Eignung üblicherweise verwendeter Flammensperren,
- des Einflusses großer Öffnungen (geöffnetes Mannloch) auf den Explosionsablauf

sollte die vorstehend aufgezählten Teiluntersuchungen ergänzen, bevor endgültig Empfehlungen für optimierte konstruktive Auslegungen von explosionsdruckstoßfesten Tanks und Tankabschnitten und Hinweise

für die Durchführung qualifizierender Bewertungen von Transporttanks gegeben und daraus resultierende Änderungen der Rechtsvorschriften empfohlen werden (s. Abschnitt 7.).

Zur Durchführung aussagekräftiger, reproduzierbarer Explosionsdruckstoßuntersuchungen muß zunächst jedoch ein entsprechender Versuchstank (Rezipient) zur Verfügung stehen.

5. Entwicklung der Untersuchungskonzeption

5.1. Versuchstank (Rezipient)

5.1.1. Grundsätzliche Anforderungen

Zur Lösung der im vorhergehenden Abschnitt definierten Probleme (Beantwortung offener Fragen) war es erforderlich, auf einen Versuchstank (Rezipienten) zurückgreifen zu können, der die Durchführung einer Vielzahl von Untersuchungen mit der erforderlichen Variation verschiedener Parameter zuläßt, ohne daß die Eigenschaften des Rezipienten durch mechanische oder thermische Belastungen bleibend verändert werden bzw. nicht auf den Ausgangszustand rückführbar sind. Im wesentlichen ließen sich diese Anforderungen durch die druckfeste Gestaltung des Versuchstanks erfüllen, so daß bleibende Verformungen des Tankmantels (zylindrische Teile, Endböden, Deckel) und der festverbundenen Ausrüstung ausgeschlossen werden konnten.

Des weiteren sollte der Rezipient eine dem Zweck der durchzuführenden Untersuchungen angepaßte konstruktive Gestaltung aufweisen, um das Volumen und (bei vorgegebenem Durchmesser) das Längen-/Durchmesser-Verhältnis sowie Einbaumöglichkeiten (Trenn-/Schwallwände) in erforderlicher Weise variieren zu können.

Unter diesen Voraussetzungen ergibt sich die Möglichkeit, die Ergebnisse der Untersuchungen mit dem Rezipienten auf reale Tanks zu übertragen.

Um die erwähnten Einbauten vornehmen, austauschen und notwendige Reinigungs-, Wartungs- und eventuelle Reparaturarbeiten durchführen zu können, war es erforderlich, den Tank mit einer bzw. zwei Öffnungen zu versehen, durch die der gesamte Tankquerschnitt freigegeben wird.

Außerdem sollte eine Variation des Tankvolumens und damit des Längen-/Durchmesser-Verhältnisses ermöglicht werden. Aus diesem Grund wurde für den Rezipienten eine Segmentbauweise gewählt.

Wie vorstehend bereits erwähnt, sollte der Tank u.a. durch die zu erwartenden Druckstöße und den ver-

gleichbaren statischen Druck nicht verformt werden. Ausgehend vom höchsten Explosionsdruck, der bei Vorversuchen unter ungünstigsten Verhältnissen (Tankabschnitt mit 3 Schwallwänden) jemals ermittelt wurde und dessen Wert ungefähr $p_{ex} \geq 20$ bar (Überdruck) betrug [60] sollte der Tank gegen diese Beanspruchung mit 2facher Sicherheit ausgelegt, also für einen Prüfdruck von $p_p = 40$ bar bemessen werden.

Im übrigen sollten realistische Verhältnisse simuliert werden (Volumen von Tanks zur Beförderung gefährlicher Güter, z.B. Tankcontainer oder Tanks von Straßentankfahrzeugen, zwischen $V = 24000$ l und $V = 40000$ l bei Durchmessern zwischen $D = 1800$ mm und $D = 2300$ mm), so daß sich der im folgenden beschriebene prinzipielle Aufbau des Rezipienten als sinnvoll erwies und realisiert wurde. Die Entwicklung und der Bau des Rezipienten bzw. die Realisierung der gesamten Untersuchungskonzeption wurde zwischen 1991 und 1996 zum großen Teil vom Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen (BMVBW) im Rahmen des Vorhabens THEBETA (Thermische Belastbarkeit von Tanks) gefördert. [61]

5.1.2. Prinzipieller Aufbau

Parameter der variablen Tankkonstruktion sind :

- Durchmesser: 2000 mm
- Länge: erste Ausbaustufe (Segmente A und C) ca. 7 m
zweite Ausbaustufe (Segmente A, B und C) ca. 11, 8 m
- Betriebsdruck: 30 bar
- Berechnungsdruck: 40 bar
- Werkstoffe : Kesselblech III und Feinkornbaustahl StE 355
- Nenninhalt: erste Ausbaustufe (Segmente A und C) 22500 l
zweite Ausbaustufe (Segment B) 15000 l
- Bodenform: Korbbogenböden
- Wanddicke: Mantel: 12,9 mm
Böden: 13,4/14,6 mm
(Krempe/Kalotte)
- je 1 Chemiefansch (DN 800 und DN 500) in den Endböden mit jeweils 3 Schaugläsern

Einschweißflansche 1" zur Gemischeinleitung, Konzentrations- und Druckmessung
 pro Tanksegment eine Schwallwandaufnahme
 Auflagekonsolen
 Tankteile mit Endflanschen, zusammenschraubbar

Bild 5.1 zeigt den prinzipiellen Aufbau des Tanks:

Der Tank besteht aus 3 Segmenten A, B und C. Teil A und B haben ein Volumen von 15000 l und Teil C hat einen Inhalt von 7500 l. Der Durchmesser der Segmente beträgt 2000 mm. In den Endböden der Teile A und C sind ein Chemiefansch DN 800 (D) bzw. DN 500 (D) mit jeweils 3 Flanschen DN 80 zum Einbau von druckfesten Schaugläsern (F) vorhanden. Die Segmente sind mit Aufnahmen (E) zum Einbau von Schwallwänden bzw. Trennböden mit Kragen ausgerüstet. Dadurch kann der Tank in Kammern von je 7500 l unterteilt werden.

Dies ist wegen entsprechender Vorgaben nach Rechtsvorschriften erforderlich (s. Abschnitt 3.2.4.). Die Segmente A, B und C sind durch geschraubte Flansche miteinander verbunden.

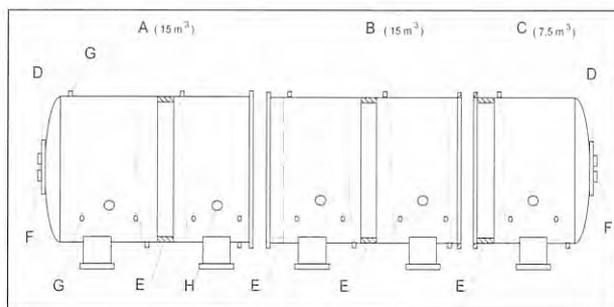


Bild 5.1: Prinzipieller Aufbau des Versuchstanks

Je Kammer ist ein Flansch DN 80 (H) zur Einleitung der Zündung von außen vorhanden. Am Tankmantel befinden sich mehrere Flansche R 1" (G), die zum Anschluß von Druckaufnehmern bzw. zur Gemischeinleitung verwendet werden können. Als Werkstoff wurde aufgrund seiner guten Bearbeitungs- und Verformungseigenschaften Feinkornbaustahl StE 355 verwendet.

In der 1. Ausbaustufe bestand der Tank aus den Abschnitten A und C, so daß das maximale Volumen ca. 22,5 m³ betrug. Der Tank konnte durch Einbau von Schwallwänden bzw. Zwischenböden in maximal 3 Kammern unterteilt werden.

In der 2. Ausbaustufe wurde der Tank durch das Zwischenstück B ergänzt. Dadurch wurde einerseits das Volumen auf ca. 37,5 m³ und andererseits das Längen-Durchmesser-Verhältnis von 3,5 auf 5,9 vergrößert.

Nach Abschluß der Berechnungs- und Projektierungsarbeiten begann die Fertigung des Tanks. Nach

Fertigstellung der ersten Ausbaustufe (Segment A und C) erfolgte im Juni 1993 die Abnahme des Tanks bei der Herstellerfirma. Dabei wurde der Tank ohne Einbauten und Schaugläser einer Wasserdruckprüfung bei einem statischen Prüfüberdruck von 40 bar unterzogen. Der Tank zeigte keine Undichtheiten oder Verformungen. Anschließend erfolgten die weitere Komplettierung. Bild 5.2 zeigt den Tank nach seiner Anlieferung im geteilten Zustand.

Aus fertigungs- und beschaffungstechnischen Gründen konnte mit der Fertigung des Segmentes B erst 1996 begonnen werden. Die Abnahme des Tanksegments erfolgte im März 1997, so daß der komplette Rezipient seit Mitte 1997 für Explosionsversuche zur Verfügung stand (siehe Bild 5.3).



Bild 5.2: Explosionsdruckfester Versuchstank (Segmente A und C)



Bild 5.3: Vollständiger explosionsdruckfester Versuchstank (Segmente A, B und C)

5.1.3. Justier- und Montagevorrichtung

Aufgrund der großen Massen der Tankabschnitte im Vergleich zu herkömmlichen Tanks war mit einer erschwerten Handhabbarkeit zu rechnen. Da die Tankabschnitte zumindest zum Einbau von Schwallwänden oder Zwischenböden voneinander getrennt und wieder zusammengefügt werden müssen, ergab sich die Notwendigkeit des Einsatzes einer Vorrichtung, die diese Arbeiten erleichtert. Die Projektierung einer solchen Vorrichtung wurde von Februar bis Juni 1993 im Rahmen einer Diplomarbeit durchgeführt [62]. Aufgrund der konstruktiven Gestaltung der Verbindungsflansche mit

Vor- und Rücksprung war ein paßgenaues Fügen der Abschnitte erforderlich. Die große Masse des Tanks (in der ersten Ausbaustufe ca. 10 t) stellte ebenfalls hohe Anforderungen an die Tragfähigkeit und Stabilität des Untergrundes.

Nach Vergleich unterschiedlicher Varianten wurde schließlich das im nachfolgenden zu beschreibende Prinzip ausgewählt (Bild 5.4).

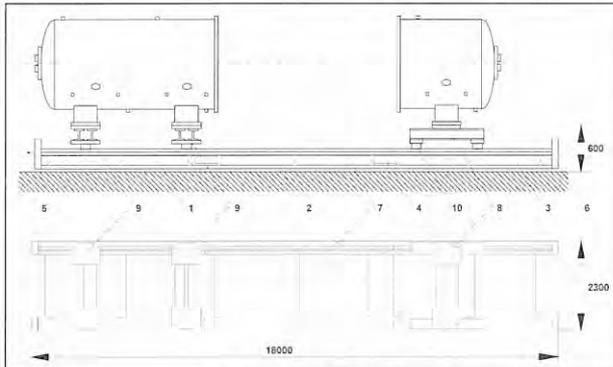


Bild 5.4: Prinzipieller Aufbau der Justier- und Montagevorrichtung

Die Justier- und Montagevorrichtung besteht aus Grundrahmen und Untergestellen. Der Grundrahmen ist in 3 Segmente (1), (2) und (3) unterteilt, die durch je 4 geschraubte Laschen (4) miteinander verbunden sind. Die Segmente bestehen aus verschweißten Doppel-T-Trägern. Die Unterteilung des Grundrahmens erwies sich insbesondere unter dem Aspekt der Handhabbarkeit und Transportierbarkeit als zweckmäßig.

Der Grundrahmen kann mittels 72 Stellschrauben gegenüber dem Untergrund (5) ausgerichtet werden. Damit ist gewährleistet, daß der Versuchstank waagrecht aufgestellt werden kann.

Auf den Grundrahmensegmenten sind Kranschiene (7) mittels Schraubverbindungen befestigt, die ebenfalls in Segmente unterteilt sind. Die Untergestelle (8) und (9), auf denen die Tanksegmente durch Schraubverbindungen befestigt werden, sind mit Wälzwagen (10) ausgerüstet. Durch Einsatz dieser Wälzwagen ist eine im Verhältnis zur relativ großen Tankmasse geringe Verschiebekraft von nur ca. 4 kN erforderlich (s. Bild 5.5).

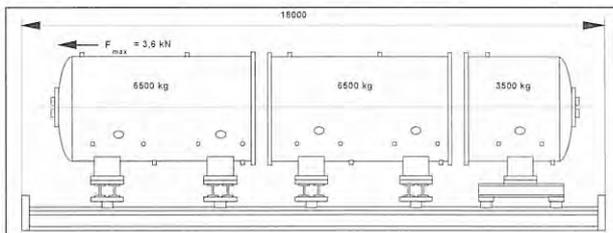


Bild 5.5: Prinzipieller Aufbau der Justier- und Montagevorrichtung (Massen der Segmente und Verschiebekraft)

Die Befestigungsart der Wälzwagen an den Untergestellen mittels Kugelschalen erlaubt es, geringe Unebenheiten der Schienen auszugleichen, so daß eine gleichmäßige Belastung aller Rollen der Wälzwagen gewährleistet ist.

Da die Untergestelle nur an einer Kranschiene seitlich geführt werden, können Abstandstoleranzen der Schienen ausgeglichen werden. Ein Verklemmen beim Verfahren der Tanksegmente wird auf diese Weise vermieden (Bild 5.6).

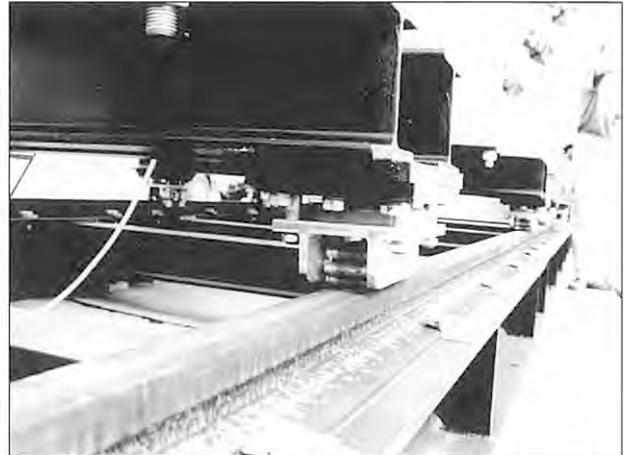


Bild 5.6: Grundrahmen mit aufgesetzten Untergestellen

Die äußeren Grundrahmensegmente (1) und (3) sind außen mit Anschlägen (6) versehen, so daß ein Verfahren der Tankabschnitte über das Ende der Kranschiene hinaus verhindert wird.

Da die Aufstellung des Tanks im Freien erfolgte, wurde eine verfahrbare Zeltkonstruktion als Wetterschutz des gesamten Versuchsstandes aufgebaut (Bild 5.7).

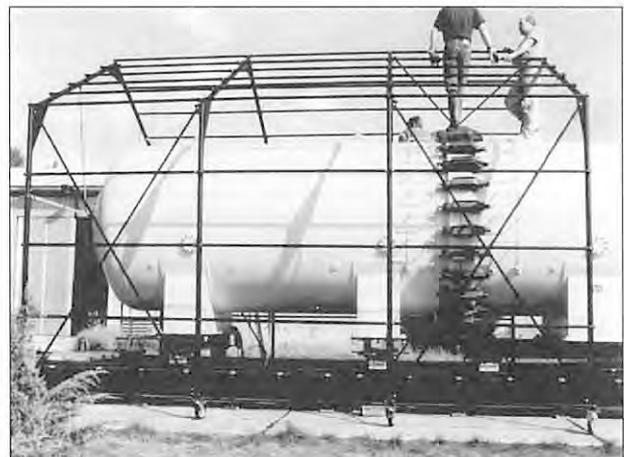


Bild 5.7: Versuchsstand zur Durchführung von Explosionsdruckstoßversuchen

5.1.4. Montage, Dichtheitsprüfung

Nach erfolgter Montage des Versuchsstandes wurde eine Dichtheitsprüfung durchgeführt. Dazu wurden die beiden Tankabschnitte nach Einlegen der Dichtung aus einem IT-Ersatzwerkstoff zusammengefahren und die Flanschverbindung mit den dafür vorgesehenen 28 Klammerschrauben gesichert (Bild 5.8 und Bild 5.9). Die Klammerschrauben wurden mit einem Drehmoment von 5,7 kNm angezogen.

Der Tank wurde mit Hilfe eines Kompressors mit einem inneren Überdruck von 3,5 bar (Luft) beaufschlagt. Nach Ablauf einer Woche war bei gleicher Außentem-

peratur ein Druckabfall auf 3,4 bar zu verzeichnen. Es konnte davon ausgegangen werden, daß sich diese geringe Leckrate nicht negativ auf Explosionsabläufe auswirkt.



Bild 5.8: Anziehen der Klammerschrauben

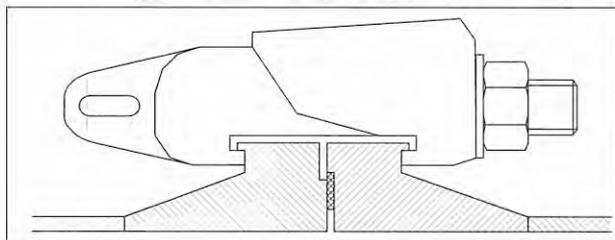


Bild 5.9: Schematische Darstellung der Flanschverbindung

5.2. Konzeption zur Durchführung von Explosionsdruckstoßversuchen

5.2.1. Grundvoraussetzungen

Entsprechend den Vorgaben der zum Zeitpunkt der Konzeption geltenden Technischen Richtlinien Tanks TRT 006 (alt) [48] war es erforderlich, bei Explosionsdruckstoßversuchen das Rückschlagen einer Flamme durch eine betriebsmäßig freie Öffnung in einen Tank zu simulieren.

Die Zündung des explosiblen Gemisches im Tank muß hierbei also durch eine außerhalb des Tanks gelegene

Zündquelle verursacht werden, damit ein Flammendurchtritt in den Tank durch die realer Bauweise entsprechende betriebsmäßig freie Öffnung erfolgt.

Auf diese Weise werden die Verhältnisse wie bei einem leeren ungereinigten Tank dargestellt, in dem sich explosive Atmosphäre unter Überdruck befindet und der durch das Öffnen einer Entspannungseinrichtung druckentlastet wird bzw. werden soll, wobei explosive Atmosphäre in die Tankumgebung geleitet und dort u.U. gezündet wird.

Die Durchführung von Explosionsdruckstoßversuchen ist demzufolge an das Einhalten bestimmter Voraussetzungen gebunden und die reproduzierbare Einhaltung der folgenden Randbedingungen ist zu gewährleisten:

- Bereitstellung des Ethylen-Luft-Gemisches in der erforderlichen (i.a. leicht überstöchiometrischen) Konzentration (s. Abschnitt 2.3.2.),
- Einstellung eines regulierbaren Vordrucks (abhängig von betriebsmäßig freier Öffnung der Tanks),
- Gewährleistung eines homogenen Ethylen/Luft-Gemisches bzw. gleichmäßige Durchmischung von Ethylen und Luft zur Erzielung reproduzierbarer Versuchsbedingungen,
- Zündung des Gemisches außerhalb des Tanks.

5.2.2. Erzeugung des explosiblen Ethylen-Luft-Gemisches

Die Erzeugung eines explosionsfähigen Etylen-Luft-Gemisches ist prinzipiell auf zwei verschiedene Weisen möglich, die mit bestimmten Vor- und Nachteilen behaftet sind. Sie seien im nachfolgenden kurz aufgeführt:

- *Erzeugung des Gemisches und Konzentrationsmessung außerhalb des Versuchsbehälters:*

Da die Zusammenführung der Gemischkomponenten und die Messung der Ethylenkonzentration an einem Ort erfolgt, ist es möglich, die Zusammensetzung des Gemisches vor Beginn der Einleitung einzustellen. Der benötigte Vordruck im Versuchsbehälter ist dann ausschließlich von der zugeführten Gemischmenge abhängig. Prinzipiell ist auch eine Rückführung überschüssigen Gemisches möglich, indem es in einen geeigneten Vorratsbehälter gepumpt wird, der gleichzeitig als Mischbehälter dienen kann.

Da sich bei Einleitungsbeginn bereits Gas (Luft, gegebenenfalls Restgas oder Verbrennungsprodukte) im Versuchstank befindet, muß dieses durch das eingeleitete explosionsfähige Gemisch vollständig er-

setzt werden. Es muß also auch die Ethylenkonzentration des aus dem Versuchstank ausströmenden Gases ermittelt werden. Wenn diese Konzentration mit der des eingeleiteten Gemisches übereinstimmt, kann davon ausgegangen werden, daß der Tank vollständig und homogen mit explosionsfähigem Gemisch gefüllt ist. Vorausgesetzt, daß der Tank zu Einleitungsbeginn mit reiner Luft gefüllt ist, kann dem zu- bzw. rückgeführten Gas solange Ethylen zugegeben werden, bis die gewünschte Konzentration erreicht ist. Die gesamte Einrichtung vom Ort der Zusammenführung von Luft und Ethylen bis zum Versuchstank und zurück muß explosionsdruckstoßfest ausgelegt sein.

• **Zeitlich getrennte Zugabe von Ethylen und Luft, Konzentrationsmessung außerhalb des Versuchsbehälters:**

Durch die zeitlich getrennte Zugabe von Luft bzw. Ethylen durch eine gemeinsame Leitung befindet sich abgesehen von den durch die Umschaltvorgänge entstehenden Grenzschichten kein explosionsfähiges Gemisch außerhalb des Tanks. Dies ermöglicht eine Vereinfachung des Versuchsaufbaus, da auf eine explosionsdruckstoßfeste Auslegung der Leitungen und den Einsatz von Flammendurchschlagsicherungen am Tank verzichtet werden kann. Nachteilig ist, daß sowohl die Gemischkonzentration als auch der Vordruck abhängig von der Menge der zugeführten Komponenten sind. Die bereits durch das erforderliche Spülen vor Versuchsbeginn im Tank befindliche trockene Luft kann zur Gemischaufbereitung verwendet werden. Die Konzentrationsmessung muß direkt im Versuchsbehälter erfolgen. Das über die Meßleitungen austretende Gemisch muß in geeigneter Weise entsorgt werden, indem man es beispielsweise in ausreichender Entfernung vom Versuchsort abblasen läßt.

Wegen der einfacheren Realisierbarkeit wurde für die durchzuführenden Untersuchungen die zweite Variante ausgewählt. Auf Zwangsdurchmischung - Erzeugung eines eventuell homogenen Gemischs mit Hilfe eines im Tankinneren angebrachten Propellers - wurde aufgrund eines Vorkommnisses bei Versuch Nr. 2 (vorzeitige, spontane Zündung, ohne daß dieses also durch einen definierten Zündfunken ausgelöst wurde) bei allen weiteren Versuchen verzichtet.

Die Konzentrationsmessung wird über eine Messung des Restsauerstoffs im explosionsfähigen Gemisch vorgenommen. Die Ausgangskonzentration von Sauerstoff in Luft beträgt 21 Vol.-%. Eine Zündung des Ethylen-Luft-Gemisches ist in der Regel nur möglich, wenn die Ethylenkonzentration zwischen der unteren und oberen Explosionsgrenze liegt.

Diese Grenzkonzentrationen können einschlägigen Tabellenwerken [20, 51]. entnommen werden; sie liegen bei 2,3 bzw. 32,4 Vol.-%. Das zündwilligste Ge-

misch liegt bei einer Konzentration von 8,0 Vol.-% Ethylen vor.

Der Zusammenhang zwischen Ethylenkonzentration und Sauerstoff-Rest-Konzentration ist in der nachfolgenden Tabelle dargestellt.

Zusammenhang von ETHYLEN- und SAUERSTOFF-Rest-Konzentration	
Ausgangskonzentration von Sauerstoff $c_{R_0} = 21 \text{Vol.-%}$	
Restkonzentration von Sauerstoff $c_{R_{E_0}} = (100 - c_{C,H_2}) \cdot c_{R_0}$	
Ethylenkonzentration in Vol.-% (c_{C,H_2})	Sauerstoff-Rest-Konzentration in Vol.-% ($c_{R_{E_0}}$)
7,5	19,43
7,6	19,40
7,7	19,38
7,8	19,36
7,9	19,34
8,0	19,32
8,1	19,30
8,2	19,28
8,3	19,26
8,4	19,24
8,5	19,22

Tabelle 5.1: Beziehung zwischen Sauerstoff-Rest- und Ethylenkonzentration

Aus Sicherheitsgründen ist es ratsam, die Brenngasversorgung (Ethylenzuführung) und die Konzentrationsmessung in ausreichender Entfernung vom Versuchstank durchzuführen. Bei beiden oben beschriebenen Varianten der Gemischaufbereitung ergeben sich deshalb relativ lange Leitungslängen, die aufgrund der geringen Querschnitte zu einer merklichen Verzögerung zwischen der im Versuchstank vorhandenen und der gemessenen Ethylenkonzentration führen.

5.2.3. Einstellung des Vordrucks

Der bei Explosionsdruckstoßversuchen und der Gemischkonzentration in Tanks mindestens einzuhalten erforderliche Vordruck ist nach den TRT 006 (alt) [48] in Abhängigkeit von der betriebsmäßig freien Öffnung des Tanks festzulegen. Der Zusammenhang ist der nachstehenden Tabelle zu entnehmen.

Durchmesser der betriebsmäßig freien Öffnung des Tanks in mm	Vordruck (absolut) in bar
≤ 25	1,10
≤ 50	1,15
≤ 80	1,20

Tabelle 5.2: Abhängigkeit des Vordrucks von der betriebsmäßig freien Öffnung im Tank

Auf diese Weise wird der Grenzdruck im Tank angegeben, bis zu dem nach bisheriger Erkenntnis mit einem Flammenrückschlag in den Tank gerechnet werden muß, wenn das durch die betriebsmäßig freie Öffnung aus dem Tank ausströmende explosive Ethylen/Luft-Gemisch außerhalb des Tanks gezündet wird (Ausströmgeschwindigkeit < Flammenfortpflanzungsgeschwindigkeit).

Die gewählte Variante der Gemischaufbereitung durch getrennte Zugabe von Ethylen und Luft hat, wie be-

reits erwähnt, auch Einfluß auf den Vordruck. Da der Einfluß der zugeführten Ethylenmenge auf den Vordruck aber geringer ist als auf die Gemischkonzentration, ist es zweckmäßig, zunächst die Konzentration bei einem entsprechend hohen Vordruck einzustellen. Der Vordruck kann anschließend durch Ablassen des Gasgemisches auf den gewünschten Wert eingestellt werden.

5.2.4. Gewährleistung eines homogenen Ethylen/Luft-Gemisches

Das Dichteverhältnis von Ethylen zu Luft beträgt bei 0 °C und 1,013 bar nach [63] 0,975. Demzufolge kann davon ausgegangen werden, daß das Ethylen-Luft-Gemisch bei entsprechender Durchmischung homogen ist, eine Entmischung also nicht zu befürchten steht. Bei der Zuführung der Komponenten Luft und Ethylen in den Tank ist eine Schichtung im Tank zu vermeiden, z.B. mittels der Zuführung der Gemischkomponenten an mehreren Stellen im Tank (z.B. über ein mit mehreren Bohrungen geringen Durchmessers versehenes Rohr, das sich parallel zur Tankachse im Tank befindet). Die Gemischkonzentrationserfassung sollte an mehreren Stellen im Tank erfolgen und über Meßleitungen dem Ort der Konzentrationsmessung zugeführt werden.

5.2.5. Zündung des Ethylen-Luft-Gemisches

Da - wie erwähnt - durch die Explosionsdruckstoßversuche das Rückschlagen einer Flamme durch eine betriebsmäßig freie Öffnung in einen Tank simuliert werden soll, ist es erforderlich, daß die Zündung des sich im Tank befindlichen explosiblen Gemisches durch eine externe Zündquelle erfolgt.

Um einen derartigen Vorgang reproduzierbar simulieren zu können, wird an der Öffnung des Rezipienten, über die eine Druckentlastung erfolgt bzw. erfolgen soll oder kann, ein Zündgefäß (Zündtopf) angebracht, das ebenso wie der Rezipient explosionsdruckfest gestaltet ist, um den auftretenden mechanischen und thermischen Belastungen seinerseits sicher widerstehen zu können.

Dazu wird ein Zündtopf verwendet, dessen prinzipieller Aufbau in Bild 5.10 dargestellt ist.

Dieser Zündtopf, hergestellt aus austenitischem Edelstahl, besteht aus einem zylindrischen Mantel, der mit zwei Endböden verschlossen ist. An den Endböden ist je ein DN80- bzw. DN150-Flansch angebracht. Mittig im Mantel befinden sich gegenüberliegend zwei Gewindebohrungen M22x1,5, in die je ein Durchführungsadapter zur Aufnahme der Zünder eingesetzt werden kann.

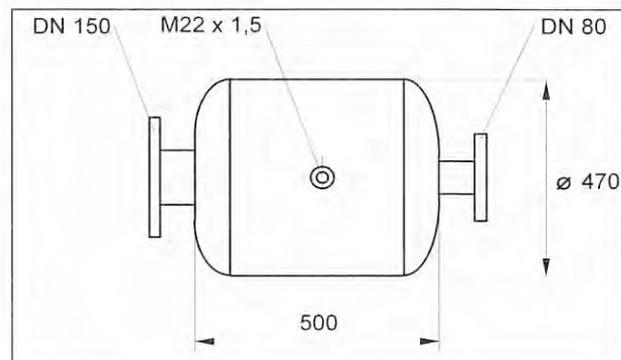


Bild 5.10: Zündtopf

Als Zünder werden Brennmomentzünder (Funkenstrecken) mit einer Zündenergie von 70 bis 90 Joule verwendet, welche elektrisch ferngezündet werden.

Der Zündtopf wird mit Hilfe des DN 80-Flansches am Versuchstank befestigt, so daß sich vor der Zündung sowohl im Versuchstank als auch im Zündtopf explosionsfähiges Gemisch mit gleicher Konzentration und gleichem Druck befindet. Der gegenüberliegende Flansch wird mit einem Kugelhahn verschlossen. Durch Öffnen dieses Kugelhahnes ist nach Versuchsende eine Druckentlastung möglich. Bild 5.11 zeigt den Versuchstank mit angeflanschem Zündtopf.



Bild 5.11: Versuchsbehälter mit angeflanschem Zündtopf

5.2.6. Versuchsaufbau

Die vorstehenden Erwägungen und Festlegungen führen zusammengefaßt zu dem in Bild 5.12 dargestellten Versuchsaufbau.

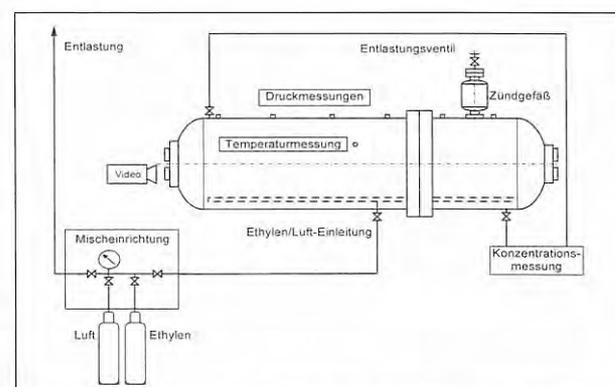


Bild 5.12: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus

Die Gemischzufuhr erfolgte ebenso wie die Konzentrationsmessung über ca. 25 m lange Schläuche. Diese Leitungen waren über fernbetätigbare Kugelhähne absperrbar. Die Gemischverwirbelung wurde über ein parallel zur Tankachse angeordnetes mit Bohrungen versehenes Rohr realisiert.

Über die in den Bodenflanschen befindlichen Schaugläser kann die Flammenausbreitung im Tank beobachtet werden. Dazu wurde eine Video- oder Hochgeschwindigkeitskamera auf einem am Tank befestigten Stativ angebracht. Um Reflexionen zu vermeiden, wurden alle nicht benötigten Schaugläser verdunkelt. Die nicht benutzten Tanköffnungen wurden durch Blindflansche bzw. -stopfen verschlossen. Im wesentlichen wurde also auf die Erfahrungen, die bei Vorversuchen gesammelt werden konnten (s. Abschnitt 4.), zurückgegriffen.

5.3. Meß- und Auswerttechnik

Die Komponenten der für die Versuche bzw. Untersuchungen zur Anwendung gelangten Meß- und Auswerttechnik lassen sich kurz wie folgt beschreiben, wobei auf den in Abschnitt 5.2.6. beschriebenen Versuchsaufbau verwiesen wird:

5.3.1. Meßwertaufnehmer (Sensoren)

Dehnung:

- *Dehnungsmeßstreifen (DMS) LY11*
Hottinger Baldwin Meßtechnik GmbH (HBM),
D-64201 Darmstadt
- k-Faktor (Dehnungsempfindlichkeit): 2
- k-Faktor-Toleranz: $\pm 1\%$
- Widerstandstoleranz: $\pm 0,3\%$

Druck:

- *Absolutdruckaufnehmer P8 AP-221.14-A5-1*
Hottinger Baldwin Meßtechnik GmbH (HBM),
D-64201 Darmstadt
Prinzip: DMS-Sensor mit Empfindlichkeit 2 mV/V
- Genauigkeitsklasse: 0,3
- Meßbereich: 0...20 bar
- Temperaturbereich: - 40..80 °C
- *Absolutdruckaufnehmer P8 AP-225.14-A5-1*
Hottinger Baldwin Meßtechnik GmbH (HBM),
D-64201 Darmstadt
Prinzip: DMS-Sensor mit Empfindlichkeit 2 mV/V
- Genauigkeitsklasse: 0,3
- Meßbereich: 0...50 bar
- Temperaturbereich: - 40...80 °C

Temperatur:

- *Reatec®-Temperaturindikatoren zur Messung der Wandungstemperatur*
REATEC AG, CH-8600 Dübendorf
Prinzip: Farbumschlag
- Reaktionszeit: 1 s
- Meßbereiche: 37,8 ...77 °C sowie 54,4 ...104 °C

Konzentration:

- *Sauerstoffanalysator Servomex® OA 570*
Servomex Ltd., Crowborough, Sussex,
GB-TN6 3DU

Prinzip: Aufgrund der hohen paramagnetischen Volumenssuszeptibilität von Sauerstoff im Vergleich zu Stickstoff werden zwei an einer Drehwaage befindliche mit Stickstoff gefüllte Glaskugeln aus einem zwischen keilförmigen Polschuhen bestehenden Magnetfeld ausgelenkt. Der zur Rückstellung benötigte Strom ist ein Maß für die Sauerstoffkonzentration. Die paramagnetische Volumenssuszeptibilität gibt den Einfluß der vom Vakuum abweichenden Verhältnisse auf das magnetische Feld an bzw. der konzentrationsabhängige Zusatz an magnetischer Induktion (magnetische Polarisation) durch die sich verändernde Sauerstoffkonzentration auf ein magnetisches Feld wird erfaßt.

- Auflösung: 0,1 Vol.-%
- Linearitätsfehler: 0,1 Vol.-%
- Meßbereich: 0 ... 100 Vol.-%
- Temperaturbereich: 0 ... 50 °C

- *Gasanalysator BINOS 100 - 2M*

Rosemount GmbH & Co., D-63410 Hanau

Prinzip: Bei der IR-Messung wird die durch das Meßgas verursachte Absorption von Infrarotstrahlung erfaßt. Die Wellenlänge der Absorptionsbanden charakterisiert dabei die Gasart, während die Stärke der Absorption ein Maß für die Konzentration der Meßkomponente ist. An einem Detektor erhält man zeitlich aufeinanderfolgende Signale, wobei immer ein konzentrationsabhängiges auf ein konzentrationsunabhängiges Signal folgt. Die Differenz beider Signale ist ein Maß für die Konzentration. Die IR-Strahlung gelangt abwechselnd mit gleicher Intensität in die Meß- und Vergleichsseite einer Analysenküvette und anschließend zu einem pneumatischen Detektor. Der Detektor erfaßt die Strahlung aus Meß- und Vergleichsseite und setzt sie über einem Vorverstärker in intensitätsproportionale Spannungssignale um.

- Auflösung: $< 1\%$ vom Endwert
- Linearitätsfehler: $< 1\%$ vom Endwert
- Meßbereich: 0 ... 30 Vol.-%

5.3.2. Meßwertaufzeichnung

- *Meßverstärkersystem MGC*

Hottinger Baldwin Meßtechnik GmbH (HBM),
D-64201 Darmstadt

Prinzip: 12 Kanäle bestückt mit MC10-Gleichspannungsbrückenverstärkern für 6-Leiterschaltung mit Tiefpaßfilter mit Bessel- (50000 ...0.5 Hz) oder Butterworth-Charakteristik (2000...5 Hz) sowie Spitzenwertspeicher

- Meßbereich: $\pm 0,1 \dots 3,06 \text{ mV/V}$
- Linearitätsabweichung: $< 0,03 \%$ vom Endwert

- *Magnetbandgerät V-Store Firma Racal*
Racal Elektronik System GmbH,
D-51427 Bergisch-Gladbach
Prinzip: 24 Kanäle, Frequenzmodulation, transiente Aufnahme und Wiedergabe mit verschiedenen Geschwindigkeiten und Bandbreiten, Wiedergabefilter mit Linear- und Tschebyschev-Charakteristik
- Eingangsspannungsbereich: $\pm 0,1 \dots 20 \text{ V}$
- max. Bandbreite: 64 kHz bei 30 inch/s
- *Digitaler Speicherschreiber HIOKI 8832*
HIOKI E.E. Corporation, J-Nagano 386-11
Prinzip: 6 Kanäle, einstellbarer Pre-Trigger, Tiefpaßfilter (Off, 5, 50 oder 500 Hz)
- Eingangsspannungsbereich: $\pm 0,1 \dots 20 \text{ V}$
- maximale Abtastrate: $2 \mu\text{s}$ im Schreiberbetrieb
- Linearitätsabweichung: $< 1 \%$ vom Endwert

5.3.3. Meßwerterfassung

Die Konzentrationswerte zu Beginn des Versuches werden protokolliert.

Die Dehnungsmeßstreifen und Druckaufnehmer auf DMS-Basis werden in Halbbrückenschaltung mit Temperaturkompensation an einem Brückenverstärkersystem MGC - bestückt mit MC10-Gleichspannungsverstärkern - betrieben. Die Brückenspeisung beträgt dabei 5 V . Die Signale laufen intern über einen 1000Hz -Tiefpaßfilter mit Bessel-Charakteristik (geringes Überschwingen).

Die Ausgangssignale werden auf einem 24-Kanal - Magnetbandgerät V-Store mit Frequenzmodulation aufgezeichnet und parallel dazu mit einem 6-Kanal-Speicherschreiber HIOKI 8832 digital erfaßt.

Alle auf dem Bandgerät aufgezeichneten Kanäle werden nach Abschluß des Versuchs ebenfalls digitalisiert. Die weitere Verarbeitung erfolgt mit diversen Auswerteprogrammen auf PC-Basis.

5.3.4. Dokumentation

- *16mm-High-Speed-Kamera HYCAM 120*
REDLAKE Laboratories Inc., USA-Santa Clara,
California

Prinzip: Hochfrequenz-Rotationsprismen-Kamera verwendete Filme:

- Eastman Kodak 7250 Ektachrome 100 ft Color
- Eastman Kodak 7297 Ektachrome 100 ft Color Daylight Negative
- Eastman Kodak 2253 Ektachrome 125 ft Color Daylight

- *zusätzlich VHS-Video bzw. Digital Video*

5.4. Alternative Zündarten

Für einige Untersuchungen ist es notwendig, die vorstehend beschriebene Untersuchungskonzeption hinsichtlich der Bemessung des Vordruckes und der Zündart zu variieren.

Für eine Reihe von Versuchen wird der Zündtopf abgebaut und der den Zündtopf gegen die Atmosphäre abschließende Kugelhahn mit Hilfe eines Adapters auf den Versuchsbehälterflansch aufgesetzt. Auf der Atmosphärenseite des Kugelhahnes ist ein Propanbrenner angeordnet. Wenn der Versuchsbehälter mit explosiblem Ethylen/Luft-Gemisch unter üblichem Anfangsdruck gefüllt worden ist, wird der Kugelhahn geöffnet. Das aus dem Versuchsbehälter durch den Kugelhahn strömende explosive Gemisch entzündet sich durch die Flamme des Propanbrenners und es bildet sich eine stationäre Flamme aus. Bei entsprechenden Druckverhältnissen tritt die Flamme durch den Kugelhahn ins Behälterinnere und löst dort eine Explosion aus.

Auf diese Weise sollte ein Flammenrückschlag durch eine betriebsmäßig freie Öffnung in das Tankinnere realistischer simuliert werden, als dies bei der Zündung mit einem Brennmomentzünder im Zündtopf der Fall ist.

Bei einigen Versuchen zur Erfassung des Reaktionsablaufs im Behälter selbst wird gänzlich auf eine Zündung außerhalb des Behälters verzichtet. In diesen Fällen ist ein Brennmomentzünder in geeigneter Weise im Tankinneren angeordnet und das sich im verschlossenen Tank befindende explosive Ethylen/Luft-Gemisch wird bei verschiedenen Vordrücken gezündet.

Die sonstige Untersuchungsanordnung bzw. -konzeption bleibt bei diesen Versuchen unverändert. Einzelheiten zu den Versuchsreihen mit veränderten Zündvoraussetzungen können den folgenden Abschnitten entnommen werden.

6. Explosionsdruckstoßversuche und Ergebnisse - Übersichten über die durchgeführten Versuche

Abschnitt 4.3. Nr.1 folgend wurden die Ergebnisse von 33 Vorversuchen bzw. Versuchen mit Realtanks, die größtenteils entsprechend den Abschnitten 4.1. und 4.2. durchgeführt wurden, ausgewertet. Diese Versuche wurden überwiegend mit Tanks, Tankabschnitten und Mannlochkonstruktionen durchgeführt, die auf Antragsbasis hinsichtlich ihrer Explosionsdruckstoßfestigkeit im Sinne der TRT 006-alt [48] bewertet werden sollten. Die eigentlichen Antragsversuche wurden durch Zweitversuche mit Tanks und Tankabschnitten, die den Erstversuch bestanden hatten, sowie weitere Eigenversuche mit Tanks und Tankabschnitten, die von der BAM beschafft oder von Antragstellern in anderem Zusammenhang zur Verfügung gestellt wurden, ergänzt. Von den 33 Vorversuchen wurden 5 als Wasserdruckversuche, 4 als Versuche zur ausschließlichen Bewertung von Mannlochkonstruktionen, 2 als Versuche mit sogenannten kubischen Tankcontainern (KTC), deren Volumen ca. 1 m³ betrug, und 1 Versuch als Wiederholungsversuch wegen vorzeitiger Zündung beim Erstversuch durchgeführt.

Von den 21 verbleibenden Explosionsversuchen konnten 11 der 13 auf Antragsbasis durchgeführten Versuche vollständig, 2 wegen des Berstens der Tanks nur teilweise dokumentiert werden. Zu den 13 Antragsversuchen liegen entsprechend umfangreiche Berichte vor [52, 55, 64 bis 74]. 5 der 8 Eigenversuche konnten vollständig erfaßt werden, wobei keine Dokumentation im Sinne der Berichte [52, 55, 64 bis 74] erstellt wurde.

Von den 5 Wasserdruckversuchen ist aus verschiedenen Gründen (z.B. Überschreiten der Kapazität der zur Verfügung stehenden Pumpe und eingeschränkte meßtechnische Auswertung) nur 1 Versuch verwertbar. Die Versuche zur Bewertung von Mannlochkonstruktionen und einer der Versuche mit kubischen Tankcontainern können ebenfalls für eine Betrachtung der Explosionsdruckstoßfestigkeit realer (großer) Tanks nur eingeschränkt herangezogen werden, da die Versuchsdurchführung in diesen Fällen von der in den Abschnitten 4.1. und 4.2. geschilderten zu stark abwich, Vergleiche also nicht möglich sind. Bei diesen Versuchen wurde lediglich auf das Kriterium „bestanden/nicht bestanden“ abgehoben.

Die Dokumentation dieser Versuche ist - soweit möglich - in den Tabellen 6.1 bis 6.4 zusammengefaßt: Tabelle 6.1 enthält die wesentlichen Angaben zur Tankart bzw. zu den Tankparametern, Tabelle 6.2 Bezeichnungen der Tankwerkstoffe und ihrer Festigkeitskennwerte, Tabelle 6.3 die erforderlichen Angaben zu konstruktiver Gestaltung und Einbauten und Tabelle 6.4 schließlich die Versuchsparameter und -ergebnisse für jeden einzelnen, geprüften Tank, Tankabschnitt bzw. die Mannlochkonstruktionen.

Aus den Tabellen ist ersichtlich, daß von den 21 Explosionsdruckstoßversuchen

- 4 mit zylindrischen Drucktanks ohne Einbauten (Versuche Nr. 1, 3, 10 und 11)
- 3 mit zylindrischen Drucktankabschnitten mit eingebauten Trennböden (Versuche Nr. 18, 27 und 33)
- 12 mit zylindrischen Drucktankabschnitten mit eingebauten Schwallwänden und Trennböden (Versuche Nr. 4, 5, 13, 14, 16, 17, 19, 21 bis 23, 28 und 29)
- 2 mit kofferförmigen, drucklosen Tankabschnitten mit eingebauten Schwallwänden und Trennböden (Versuche Nr. 31 und 32)

durchgeführt worden sind.

In Bild 6.1 sind die unterschiedlichen Versuchstanks schematisch dargestellt.

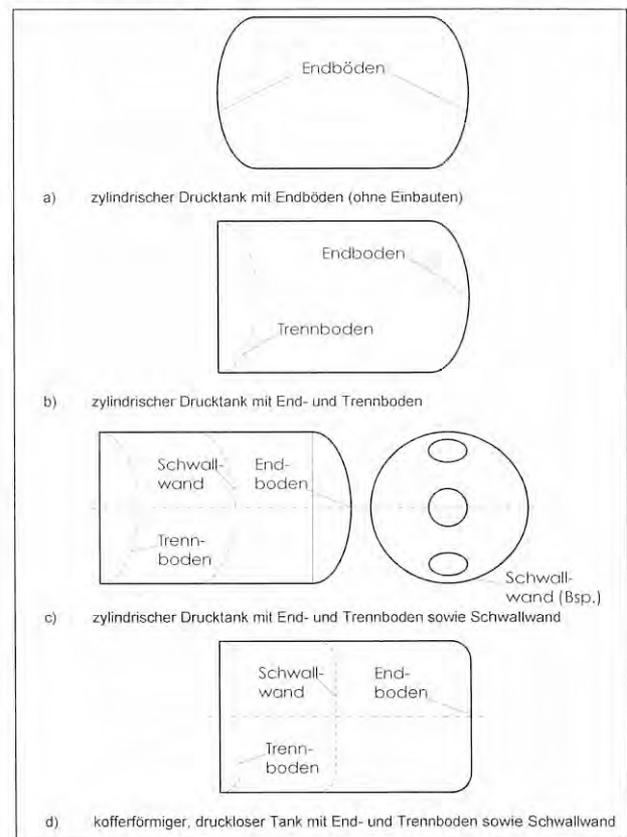


Bild 6.1: Versuchstanks (schematisch)

Hinsichtlich des festzustellenden Reaktionsablaufs und daraus resultierend des Verhaltens der Realtanks empfiehlt es sich, zwischen (Versuchs-)Tanks mit und ohne Einbauten zu unterscheiden, wie später noch ausführlicher aufgezeigt werden wird.

Für nachfolgende Bewertungen werden außerdem ein Wasserdruckversuch (Versuch Nr. 30) und die 2 Explosionsdruckstoßversuche mit KTC (Versuche Nr. 8 und 9) herangezogen.

Das in Abschnitt 4.3. unter Nr. 7 kurz dargestellte Versuchsprogramm wurde grundsätzlich mit einer Untersuchungskonzeption, wie in Abschnitt 5. beschrieben, durchgeführt. Mit dem dort beschriebenen Versuchstank wurden insgesamt 56 Versuche realisiert, mit denen der Einfluß der Zündart, des Zündortes, des Vor-drucks, der geometrischen Verhältnisse, von Schwallwänden und deren Konstruktionsweise ermittelt wurde.

Die wesentlichen Parameter und Ergebnisse der Versuche sind in den Tabellen 6.5 und 6.6 dokumentiert.

Die in Tabelle 6.6 enthaltenen Werte für die Ethylenkonzentration c , den Explosionsdruck p_{ex} , die Druckanstiegsgeschwindigkeit $(dp/dt)_{max}$ und den die Explosionsheftigkeit beschreibende K_G -Wert sind hier als Durchschnittswerte über alle entsprechenden Einzelwerte je Versuch aufgenommen worden. Die vollständige Einzelwertdokumentation für jeden Versuch ist aus der Anlage II ersichtlich, im Einzelfall - zur Beschreibung besonderer Sachverhalte - wird hierauf in den nachfolgenden Abschnitten eingegangen.

Die Untersuchungen zur Erfassung des Einflusses der geometrischen Verhältnisse bzw. des Längen-/Durchmesser-Verhältnisses sind mit den Versuchsaufbauten, wie sie Bild 6.2 entnommen werden können, durchgeführt worden. Hierbei wurden die Ergebnisse von Basisversuchen mit dem aus den Abschnitten A und C bestehenden „kurzen“ Rezipienten mit denen der Versuche mit dem „langen“ Rezipienten (bestehend aus den Abschnitten A, B und C) verglichen. Aus Bild 6.2 können Details der Zündorte, Druckmeßstellen und -ebenen usw. ersehen werden.

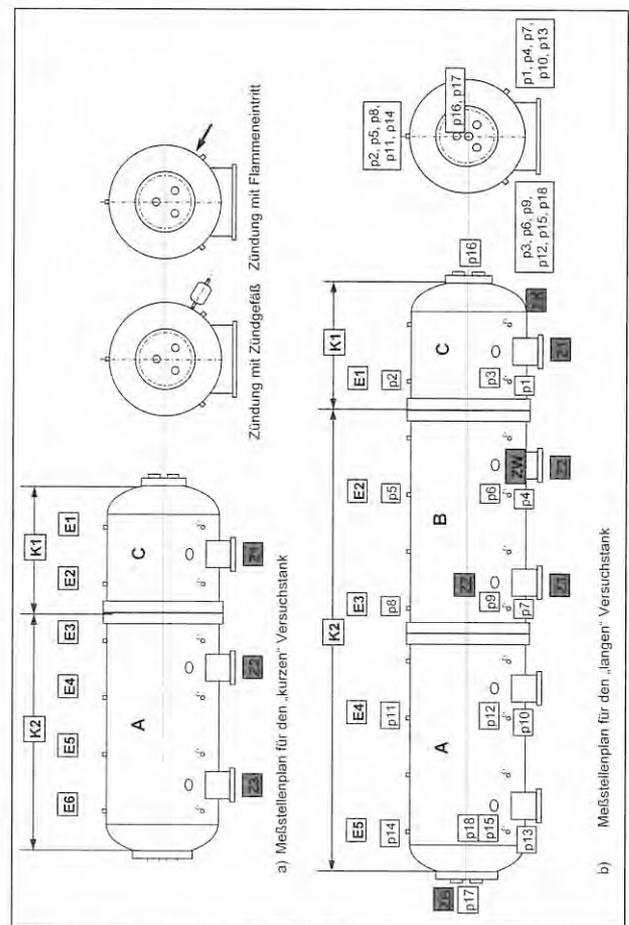


Bild 6.2: Versuchsaufbauten und Meßstellenpläne zur Durchführung der Versuche Nr. 34 bis 89

In den Tabellen 6.5 und 6.6 sind unter den Versuchen Nr. 39, 40, 44 und 53 bis 57 die Versuche mit eingebauten Schwallwänden enthalten, die mit den entsprechenden Versuchen mit Realtanks korreliert werden

Vers. Nr.	Hersteller	Antrag	interne Dokumentation	Versuchsdatum	Volumen V [m³]	Außendurchmesser Da [mm]	Länge L [mm]	Betriebsdruck pB [bar]	Prüfdruck pP [bar]	Tankart	mit Schwallwand [Anzahl]	bestanden [x = ja]
1	Linke-Hofmann-Busch	1.5/1570	1.5/416	07.06.84	35	2600	7000	3	4	KW	1	
2	Schwiertert	1.5/1621	1.5/420	14.11.84	16	2006	5550	3	4	TA		x
3	Schwiertert	1.5/1621	1.5/420	15.11.84	16	2006	5550	3	4	TA		x
4	Hendricks	1.5/10412	1.5/442	02.05.85	30	2000	10220	2,3	4	TA	3	
5	Gofa	1.5/10458	1.5/443	22.05.85	14	2006	5080	3	4	TA	1	x
6	Schwiertert	1.5/10638	1.5/444	02.07.85	3,9	1906	1995			TA		
7	Gofa	1.5/10458	1.5/445	03.07.85	14	2006	5080	3	4	TA	1	
8	Rietberg	1.5/10747	1.5/448	25.09.85	0,95	1250	970		3	KTC		x
9	Waldner	1.5/	1.5/449	25.09.85	1	924x1124	1170			KTC		
10	Trinity (Hoechst)	ohne	1.5/474	19.08.86	18,5	1859	7482	17,6	26,4	TA		x
11	Trinity (Hoechst)	ohne	1.5/474A	20.08.86	18,5	1859	7482	17,6	26,4	TA		x
12	Trinity (Hoechst)	ohne	1.5/474B	20.08.86	18,5	1859	7482	17,6	26,4	TA		x
13	LAG	1.5/11238	1.5/475	27.08.86	11,7	1907	4800	3	4	TA	1	x
14	Klaeser	1.5/11464	1.5/491	04.12.86	15	2000	5450	2,3	3	TA	1	
15	LAG	ohne	1.5/492	26.11.86	11,7	1907	4800	3	4	TA	1	?
16	LAG	ohne	1.5/493	02.12.86	11,7	1907	4800	3	4	TA	1	?
17	LAG	ohne	1.5/495	24.03.87	11,7	1907	4800	3	4	TA	1	?
18	Aurepa	1.5/11940	1.5/501	09.09.87	13	1800/2200	5100	3,1	4	TA		x
19	Kassbohrer	1.5/11754	1.5/502	17.09.87	15	1900	5800	3	4	TA	1	
20	Fort Vale - ML	1.5/12049	1.5/503	16.09.87	0,22	512	1400			ML		
21	Magyar	1.5/12554	1.5/626	04.08.88	15	2350	3518	3	4	TA	1	x
22	Van Hool	1.5/12586	1.5/631	13.10.88	15	2106/2306	5305	3	4	TA	1	x
23	Van Hool	1.5/12586	1.5/632	03.11.88	15	2106/2306	5305	3	4	TA	1	
24	Perolo - ML	1.5/13076	1.5/700	21.06.89	0,22	512	1400			ML		
25	Perolo - ML	1.5/13076	1.5/700A	21.06.89	0,22	512	1400			ML		
26	Perolo - ML	1.5/13076	1.5/700B	22.06.89	0,22	512	1400			ML		
27	CPV-Fort Vale	1.5/13375	1.5/702	05.10.89	13,5	2396	3400	3	4	TA		
28	Holvrieka	1.7/40113	1.7/9101	19.09.91	15	1806/2056	5675	2,3	4	TA	1	x
29	Holvrieka	1.7/40113	1.7/9102	19.09.91	15	1806/2056	5675	2,3	4	TA	1	x
30	Holvrieka	ohne	ohne		15	1806/2056	5675	2,3	4	TA	1	x
31	Ellinghaus	ohne	9.2/9416	09.02.94	7,5	2330/1530	2555			KTA		x
32	Ellinghaus	ohne	9.2/9417	09.02.94	7,5	2330/1530	2555			KTA		
33	Feldbinder	III.2/1306	III.2/9701	13.03.97	12	2300	3500	3	4	TA		x

Tabelle 6.1: Zusammenstellung der Explosionsdruckstoßversuche mit Realtanks - Wesentliche Tankparameter (Tankart: KW = Eisenbahnkesselwagen; TA = zylindrischer Tankabschnitt; KTC = kubischer Tankcontainer; ML = separates Mannloch; KTA = Koffertankabschnitt)

können. Hierzu kann auf die Ausführungen in Abschnitt 9. verwiesen werden. Mit den Ergebnissen zu den Versuchen Nr. 41 bis 43, Versuch Nr. 51 und den Versuchen Nr. 30 und 31 lassen sich nunmehr auch die

nach Abschnitt 4.3. erforderlichen Überprüfungen von bestimmten Anforderungen nach Rechtsvorschriften vornehmen (s. Abschnitt 7.).

Vers. Nr.	interne Dokumentation	Hersteller	Werkstoff	Zugfestigkeit R _m (Mantel) [N/mm ²]	Bruchdehnung A ₅ (Mantel) [%]	Zugfestigkeit R _m (Boden) [N/mm ²]	Bruchdehnung A ₅ (Boden) [%]
1	1.5/416	Linke-Hofmann-Busch	St37-2	403...406	29,2...31,5		
2	1.5/420	Schwietert	1.4301	597	61...69,5	587/613	59/66
3	1.5/420	Schwietert	1.4301	597	61...69,5	587/613	59/66
4	1.5/442	Hendricks	1.4541	592	57	591/611	57/63
5	1.5/443	Gofa	1.4541	615	56	600	56
6	1.5/444	Schwietert	1.4301				
7	1.5/445	Gofa	1.4541	615	56	600	56
8	1.5/448	Rietberg	RSt37-2	400	37	391/400	37/41
9	1.5/449	Waldner	1.4571				
10	1.5/474	Trinity (Hoechst)	SA-455-B				
11	1.5/474A	Trinity (Hoechst)	SA-455-B				
12	1.5/474B	Trinity (Hoechst)	SA-455-B				
13	1.5/475	LAG	1.4541	588	54	590/594	52
14	1.5/491	Klaeser	1.4301	591/599	67	575/613	63/66
15	1.5/492	LAG	1.4541	588	54	590/594	52
16	1.5/493	LAG	1.4541	588	54	590/594	52
17	1.5/495	LAG	1.4541	588	54	590/594	52
18	1.5/501	Aurepa	1.4541	586	62	592/610	43/54
19	1.5/502	Kässbohrer	Hll	482	35	352/339	36/34
20	1.5/503	Fort Vale - ML	1.4571			623/630	61
21	1.5/626	Magyar	1.4301	607	55	660/690	50/53
22	1.5/631	Van Hool	1.4404	608	55	602-615	54-56
23	1.5/632	Van Hool	1.4404	608	55	602-615	54-56
24	1.5/700	Perolo - ML	1.4571			623-630	61
25	1.5/700A	Perolo - ML	1.4571			623-630	61
26	1.5/700B	Perolo - ML	1.4571			623-630	61
27	1.5/702	CPV-Fort Vale	AlSi304	627	54	616/617	57/60
28	1.7/9101	Holvrieka	1.4404	575/581	53/54	572/595	51/54
29	1.7/9102	Holvrieka	1.4404	575/581	53/54	572/595	51/54
30	ohne	Holvrieka	1.4404	575/581	53/54	572/595	51/54
31	9.2/9416	Ellinghaus	AlMg 4.5 Mn W28				
32	9.2/9417	Ellinghaus	AlMg 4.5 Mn W28				
33	III.2/9701	Feldbinder	1.4571	591/600	56,1..56,9	591/600	56,1..56,9

Tabelle 6.2: Zusammenstellung der Explosionsdruckstoßversuche mit Realtanks - Materialkennwerte

Vers. Nr.	interne Dokumentation	Hersteller	Mantel		vorderer Endboden		hinterer End- bzw Trennboden		Mannloch / Domdeckel				Schwallwände				
			e _m [mm]	Art	e _b [mm]	Art	e _b [mm]	e _g [mm]	Durchmesser bzw. Art [mm]	Befestigung	e _d [mm]	e _v [mm]	e _k [mm]	Anzahl	Öffnungen [mm]	e _s [mm]	e _g [mm]
1	1.5/416	Linke-Hofmann-Busch	5,2..5,8	Klöppler	7,5..8,0	Klöppler	7,5..8,0		530	Dreiknebel dom	7,0..7,4		6	1	Schwalbleche unterhalb ML, 200 hoch, gewinkelt		
2	1.5/420	Schwietert	3,1..3,2	Korbbogen	3,2..4,0	Korbbogen	3,2..4,0		DN 500	5 x M20	4,5	3 x 80					
3	1.5/420	Schwietert	3,1..3,2	Korbbogen	3,2..4,0	Korbbogen	3,2..4,0		DN 500	5 x M20	4,5	3 x 80					
4	1.5/442	Hendricks	3,0..3,1	Korbbogen	4	Korbbogen			2 x DN 500	5 x M24	6	3	10	3	600 + 230/195 + 100 entgegen der Druckrichtung gewölbt	4	3
5	1.5/443	Gofa	3	Klöppler	5,6..6,1	Korbbogen	6	3,6	DN 500	7 x M24	8,0..8,6	3 x 100	10	1	600 + 400/200 + 300 entgegen der Druckrichtung gewölbt	4	3,6
6	1.5/444	Schwietert	3	Korbbogen	6	Korbbogen (konkav)	4,4..5,0		DN 500	20 x M16	20	100	3				3,6
7	1.5/445	Gofa	3	Korbbogen	5,6..6,1	Korbbogen	6	3,6	DN 500	7 x M24	8,0..8,6	3 x 100	10	1	600 + 400/200 + 300 entgegen der Druckrichtung gewölbt	4	3,6
8	1.5/448	Rietberg	3/2	flachgewölbt nach VdTUV 302	4/2	flachgewölbt nach VdTUV 302	3/2		DN 500	5 x M24	8,0..8,6	3 x 100	10				
9	1.5/449	Waldner	2,5							6 x M10	2						
10	1.5/474	Trinity (Hoechst)	13,4..13,7	elliptisch	14..14,0	elliptisch	12,7			24 x 5/8"	43	31,8					
11	1.5/474A	Trinity (Hoechst)	13,4..13,7	elliptisch	14..14,0	elliptisch	12,7			24 x 5/8"	43	31,8					
12	1.5/474B	Trinity (Hoechst)	13,4..13,7	elliptisch	14..14,0	elliptisch	12,7			24 x 5/8"	43	31,8					
13	1.5/475	LAG	3,1	Korbbogen	6,7	Korbbogen (konkav)	6,7		500	6 x M20	3,5		12	1	900/850 + 450/315 in Druckrichtung gewölbt	4	
14	1.5/491	Klaeser	3	Korbbogen	4	Korbbogen	6		500	6 x M24	15	3	8	1	500 + 2 x 500/2 entgegen der Druckrichtung gewölbt	6	3
15	1.5/492	LAG	3,1	Korbbogen	6,7	Korbbogen (konkav)	6,7		500	6 x M20	3,5		12	1	900/850 + 450/315 in Druckrichtung gewölbt	4	
16	1.5/493	LAG	3,1	Korbbogen	6,7	Korbbogen (konkav)	6,7		500	6 x M20	3,5		12	1	900/850 + 450/315 in Druckrichtung gewölbt	4	
17	1.5/495	LAG	3,1	Korbbogen	6,7	Korbbogen (konkav)	6,7		500	6 x M20	3,5		12	1	900/850 + 450/315 in Druckrichtung gewölbt	4	
18	1.5/501	Aurepa	3	Korbbogen	4	Korbbogen	3,7..7		500	4 x M24	>=3	6	12				
19	1.5/502	Kässbohrer	4	Klöppler	6,9..7,1	Klöppler	10,2		500	5 x M24	6	4	10	1	600 + 500/2 + 100 entgegen der Druckrichtung gewölbt	4	
20	1.5/503	Fort Vale - ML							500	6 x 3/4"			8				
21	1.5/626	Magyar	3	Klöppler	4,5	Korbbogen	7,5..7,8		500	6 x M18	4,4	3	8	1	500 + 2 x (230 x 200) entgegen der Druckrichtung gewölbt	3	
22	1.5/631	Van Hool	3	Korbbogen		Korbbogen		3	500	6 x M20	4	3	8	1	480+2 x 220/2 entgegen der Druckrichtung gewölbt	3	3,6
23	1.5/632	Van Hool	3	Korbbogen	7-8	Korbbogen	7-8	3,5	500	6 x M20	4	3	8	1	480+2 x 220/2 entgegen der Druckrichtung gewölbt	3	3,6
24	1.5/700	Perolo - ML							512	6 x 3/4"	5		5				
25	1.5/700A	Perolo - ML							512	6 x 3/4"	5		5				
26	1.5/700B	Perolo - ML							512	6 x 3/4"	5		5				
27	1.5/702	CPV-Fort Vale	3,2	R/Da=0,96	4,7-5,2	r/Da=0,84	7,8-8,6	5	500	6 x ????			8				
28	1.7/9101	Holvrieka	3,2	Korbbogen	4,9-5,1	Korbbogen	8,2-8,5	3,9	500	6 x M20	4		10	1	500 + 2 x 400/2 entgegen der Druckrichtung gewölbt	4	4,9
29	1.7/9102	Holvrieka	3,2	Korbbogen	4,9-5,1	Korbbogen	8,2-8,5	3,9	500	6 x M20	4		10	1	500 + 2 x 400/2 entgegen der Druckrichtung gewölbt	4	4,9
30	ohne	Holvrieka	3,2	Korbbogen	4,9-5,1	Korbbogen	8,2-8,5	3,9	500	6 x M20	4		10	1	500 + 2 x 400/2 entgegen der Druckrichtung gewölbt	4	4,9
31	9.2/9416	Ellinghaus	5,2	Kofferboden	5,2	Doppel-S-Boden	5,2		500	-	-	-	-				
32	9.2/9417	Ellinghaus	5,2	Kofferboden	5,2	Doppel-S-Boden	5,2		500	-	-	-	-				
33	III.2/9701	Feldbinder	3	Korbbogen	3,1	Korbbogen	8,9		500	6 x ????			6				

Tabelle 6.3: Zusammenstellung der Explosionsdruckstoßversuche - Wanddicken (e) der Tanks und Einbauten - Indizes: m - Mantel, b - Boden, g - Gegenkragen, d - Deckel, v - Verstärkung, k - Kragen, s - Schwallwand

Der Vollständigkeit halber ist zu erwähnen, daß sich die Versuche Nr. 34 bis 38, 41 bis 43, 45 bis 52 und 58 bis 89 auf Tanks ohne Einbauten beziehen und im Zusammenhang mit den entsprechenden Versuchen mit Realtanks in Abschnitt 8. ausführlicher diskutiert wer-

den. Die Versuche Nr. 34 bis 44 sind im übrigen bereits im Rahmen des vom Bundesministerium für Verkehr geförderten Vorhabens THEBETA (Thermische Belastbarkeit von Tanks - [61]) durchgeführt und teilweise ausgewertet worden.

Vers. Nr.	interne Dokumentation	Hersteller	Ausgangsdruck p_a (abs) [bar]	Konzentration Ethylen c [Vol.-%]	Explosionsdruck p_e (abs) [bar]	Druckanstiegsgeschwindigkeit $(dp/dt)_{max}$ [bar/s]	Explosionsheftigkeit K_G - Wert [bar·m/s]	Zündort	Überdeckungsgrad f [%]	Ergebnis	Besonderheit
1	1.5/416	Linke-Hofmann-Busch	1,2	8,2	11,4	49	160	Tankscheitel		ML-Deckel weggefliegen	
2	1.5/420	Schwiertert	ca. 1,2	ca. 6,0..6,5	ca. 11,6			Tankscheitel		vorzeitige Zündung durch Ventilator	
3	1.5/420	Schwiertert	1,25	6,7/8,4	11,3	53	135	Tankscheitel		bestanden	
4	1.5/442	Hendricks	1,2	7,5	>12	>2000	>4000	Tankscheitel in 1. Kammer (mit Trennboden)	ca. 0,93	Trennboden und 2 Schwallwände herausgerissen	3 Schwallwände mit 3 Öffnungen, starre Anbindung Trennboden-Gegenkragen
5	1.5/443	Gofa	1,2	8,0	11,3	95	180	Tankscheitel gegen Schwallwand mit Trennboden	ca. 0,87	bestanden	1 Schwallwand mit 3 Öffnungen
6	1.5/444	Schwiertert	-	-	14,7					Trennboden umgeklappt	Wasserdruckversuch
7	1.5/445	Gofa	-	-	15,6 (18,3)				ca. 0,87	Trennboden umgeklappt, Tank gerissen	Wasserdruckversuch
8	1.5/448	Rietberg	1,2	7,5	11,9	400	400	Mitte Oberboden		bestanden	
9	1.5/449	Waldner	1,15	8,3				Oberboden		ML-Deckel weggefliegen	KTC
10	1.5/474	Trinity (Hoechst)	1,2	7,4	9,3	35	95	Tankscheitel		bestanden	
11	1.5/474A	Trinity (Hoechst)	1,2	7,4	10,3	60	125	Tankscheitel		bestanden	50% Wasserfüllung
12	1.5/474B	Trinity (Hoechst)								bestanden	Wasserdruckversuch
13	1.5/475	LAG	1,2	7,8	11,6	200	360	Tankscheitel in Kammer mit Endboden	ca. 0,85	bestanden	1 Schwallwand mit 2 Öffnungen
14	1.5/491	Klaeser	1,2	7,5	>12				ca. 0,9	nicht bestanden, Stromausfall bei der Tankexplosion infolge Aufheizung auf 100° C	1 Schwallwand mit 3 Öffnungen, starre Anbindung Trennboden-Gegenkragen
15	1.5/492	LAG			13				ca. 0,85	Wasserdruckversuch	
16	1.5/493	LAG	1,2		14,4			Tankscheitel in Kammer mit Endboden	0,85		1 Schwallwand mit 2 Öffnungen
17	1.5/495	LAG			12			Tankscheitel in Kammer mit Endboden	0,85		1 Schwallwand mit 2 Öffnungen

Tabelle 6.4 -1: Zusammenstellung der Explosionsdruckstoßversuche mit Realtanks - Versuchsparameter und Ergebnisse (Teil 1)

Vers. Nr.	interne Dokumentation	Hersteller	Ausgangsdruck p_a (abs) [bar]	Konzentration Ethylen c [Vol.-%]	Explosionsdruck p_e (abs) [bar]	Druckanstiegsgeschwindigkeit $(dp/dt)_{max}$ [bar/s]	Explosionsheftigkeit K_G - Wert [bar·m/s]	Zündort	Überdeckungsgrad f [%]	Ergebnis	Besonderheit
18	1.5/501	Aurepa	1,2	7,5	11,7	80	185	seitlich am Tankabschnitt Nähe Endboden (Tankende)		bestanden	Doppelkonus
19	1.5/502	Kässbohrer	1,2	7,5	11,7	555	1085	seitlich am Tankabschnitt Nähe Endboden (Tankende)	0,89	nicht bestanden; Meßleitungen abgerissen	1 Schwallwand mit 3 Öffnungen, kein Gegenkragen
20	1.5/503	Fort Vale - ML	1,2	7,3..7,6	10,9; 10,8; 12,05			Rohrkonstruktion		es wurde nur die Deckelkonstruktion geprüft	
21	1.5/626	Magyar	1,2	7,5	11,3	205	400		ca. 0,93	bestanden, Deckel undicht	1 Schwallwand mit 3 Öffnungen
22	1.5/631	Van Hool	1,2	7,5	10,2	100	195	seitlich in kleinerer Kammer	ca. 0,91	bestanden, Deckel undicht	Tank gekröpft, 1 Schwallwand mit 3 Öffnungen
23	1.5/632	Van Hool			15	1430/1130	3525/2800		ca. 0,91	Tank zerstört, keine Aufzeichnungen von Meßwerten	Tank gekröpft, 1 Schwallwand mit 3 Öffnungen
24	1.5/700	Perolo - ML	1,25	7,5	10,75			Rohrkonstruktion		nur Deckelkonstruktion	
25	1.5/700A	Perolo - ML	1,35	7,5	12			Rohrkonstruktion		nur Deckelkonstruktion	
26	1.5/700B	Perolo - ML	1,25	7,5	10,25			Rohrkonstruktion		nur Deckelkonstruktion	
27	1.5/702	CPV-Fort Vale	1,2	7,6	11,6	45	105	seitlich in der Nähe des Endbodens		Deckel abgerissen, Behälter geborsten	starre Anbindung Trennboden-Gegenkragen
28	1.7/9101	Holvrieka	1,2	ca.7,5	11,6	130	250	seitlich Nähe Endboden gegen Schwallwand	ca. 0,89	bestanden	Tank gekröpft, 1 Schwallwand mit 3 Öffnungen
29	1.7/9102	Holvrieka	1,2	ca. 7,5	11,9	130	250	seitlich Nähe Trennboden mit Schwallwand	ca. 0,89	bestanden	Tank gekröpft, 1 Schwallwand mit 3 Öffnungen
30	ohne	Holvrieka			15,5				ca. 0,89	Flanschschweißnaht undicht	Wasserdruckversuch
31	9.2/9416	Ellinghaus	0	ca. 8,0	2,3	24	47	Zündung in Mannlochebene		keine sichtbare Verformung	Koffertankabschnitt, offen
32	9.2/9417	Ellinghaus	0	ca. 8,1	6,5	23	45	Zündung ca. 1m oberhalb Mannlochebene		Tank überschlagen	Koffertankabschnitt, offen
33	III.2/9701	Feldbinder	1,3	ca. 8,1	12	75	170	seitlich Nähe Endboden		bestanden, Dichtung defekt	

Tabelle 6.4 - 2: Zusammenstellung der Explosionsdruckstoßversuche mit Realtanks - Versuchsparameter und Ergebnisse (Teil 2)

Vers. Nr.	interne Dokumentation	Versuchsdatum	Volumen V [m ³]	Außendurchmesser D _a [mm]	Länge l [mm]	Betriebsdruck p _B [bar]	Prüfdruck p _p [bar]	Schwallwandanzahl [-]	Anzahl der Öffnungen [-]
34	III.2/ 9441	29.09.94	22,5	2000	7748	30	40	0	0
35	III.2/ 9460	15.12.94	22,5	2000	7748	30	40	0	0
36	III.2/ 9509	02.03.95	22,5	2000	7748	30	40	0	0
37	III.2/ 9518	22.05.95	22,5	2000	7748	30	40	0	0
38	III.2/ 9519	23.05.95	22,5	2000	7748	30	40	0	0
39	III.2/ 9521	21.06.95	22,5	2000	7748	30	40	1	3
40	III.2/ 9530	08.11.95	22,5	2000	7748	30	40	1	3
41	III.2/ 9615	14.05.96	22,5	2000	7748	30	40	0	0
42	III.2/ 9636	16.07.96	22,5	2000	7748	30	40	0	0
43	III.2/ 9637	17.07.96	22,5	2000	7748	30	40	0	0
44	III.2/ 9641	06.08.96	22,5	2000	7748	30	40	1	3
45	III.2/ 9719	19.09.97	37,5	2000	12668	30	40	0	0
46	III.2/ 9720	01.10.97	37,5	2000	12668	30	40	0	0
47	III.2/ 9721	06.10.97	37,5	2000	12668	30	40	0	0
48	III.2/ 9722	07.10.97	37,5	2000	12668	30	40	0	0
49	III.2/ 9723	09.10.97	37,5	2000	12668	30	40	0	0
50	III.2/ 9724	20.10.97	37,5	2000	12668	30	40	0	0
51	III.2/ 9726	28.10.97	37,5	2000	12668	30	40	0	0
52	III.2/ 9727	05.11.97	37,5	2000	12668	30	40	0	0
53	III.2/ 9807	28.04.98	37,5	2000	12668	30	40	1	1
54	III.2/ 9808	30.04.98	37,5	2000	12668	30	40	1	1
55	III.2/ 9809	06.05.98	37,5	2000	12668	30	40	1	1
56	III.2/ 9811	19.05.98	37,5	2000	12668	30	40	1	1
57	III.2/ 9812	25.05.98	37,5	2000	12668	30	40	1	1
58	III.2/ 9813	05.06.98	37,5	2000	12668	30	40	0	0
59	III.2/ 9814	12.06.98	37,5	2000	12668	30	40	0	0
60	III.2/ 9815	16.06.98	37,5	2000	12668	30	40	0	0
61	III.2/ 9816	19.06.98	37,5	2000	12668	30	40	0	0
62	III.2/ 9817	24.06.98	37,5	2000	12668	30	40	0	0
63	III.2/ 9818	01.07.98	37,5	2000	12668	30	40	0	0
64	III.2/ 9823	07.07.98	37,5	2000	12668	30	40	0	0
65	III.2/ 9829	04.08.98	37,5	2000	12668	30	40	0	0
66	III.2/ 9830	07.08.98	37,5	2000	12668	30	40	0	0
67	III.2/ 9831	11.08.98	37,5	2000	12668	30	40	0	0
68	III.2/ 9832	13.08.98	37,5	2000	12668	30	40	0	0
69	III.2/ 9835	19.08.98	37,5	2000	12668	30	40	0	0
70	III.2/ 9836	21.08.98	37,5	2000	12668	30	40	0	0
71	III.2/ 9846	12.10.98	37,5	2000	12668	30	40	0	0
72	III.2/ 9847	16.10.98	37,5	2000	12668	30	40	0	0
73	III.2/ 9848	20.10.98	37,5	2000	12668	30	40	0	0
74	III.2/ 9849	22.10.98	37,5	2000	12668	30	40	0	0
75	III.2/ 9850	26.10.98	37,5	2000	12668	30	40	0	0
76	III.2/ 9852	29.10.98	37,5	2000	12668	30	40	0	0
77	III.2/ 9856	02.11.98	37,5	2000	12668	30	40	0	0
78	III.2/ 9857	04.11.98	37,5	2000	12668	30	40	0	0
79	III.2/ 9858	09.11.98	37,5	2000	12668	30	40	0	0
80	III.2/ 9866	16.11.98	37,5	2000	12668	30	40	0	0
81	III.2/ 9879	30.11.98	37,5	2000	12668	30	40	0	0
82	III.2/ 9880	02.12.98	37,5	2000	12668	30	40	0	0
83	III.2/ 9881	15.12.98	37,5	2000	12668	30	40	0	0
84	III.2/ 9882	21.12.98	37,5	2000	12668	30	40	0	0
85	III.2/ 9901	05.01.99	37,5	2000	12668	30	40	0	0
86	III.2/ 9902	07.01.99	37,5	2000	12668	30	40	0	0
87	III.2/ 9903	11.01.99	37,5	2000	12668	30	40	0	0
88	III.2/ 9904	19.01.99	37,5	2000	12668	30	40	0	0
89	III.2/ 9905	22.01.99	37,5	2000	12668	30	40	0	0

Tabelle 6.5: Zusammenstellung der Versuche mit dem Rezipienten - Wesentliche Tankparameter

Vers. Nr.	Ausgangsdruck p_a (abs.) [bar]	Konzentration c (Ethylen) [Vol.-%]	Explosionsdruck p_{ex} (abs.) [bar]	Druckanstiegsgeschwindigkeit $(d_p/d_t)_{max}$ [bar/s]	Explosionsheftigkeit K_G -Wert [bar·m/s]	Zündart	Zündort	Überdeckungsgrad f [%]
34	1,25	8,0	11,7	35	98	Zündgefäß	Z1	
35	1,25	8,0	10,9	28	78	Zündgefäß	Z1	
36	1,20	7,9	10,9	31	86	Zündgefäß	Z1	
37	1,20	7,9	10,9	43	121	Zündgefäß	Z1	
38	1,20	8,0	10,8	37	103	Zündgefäß	Z1	
39	1,20	7,7	12,9	533	1505	Zündgefäß	Z1	ca. 92
40	1,20	7,7	12,9	844	2384	Zündgefäß	Z1	ca. 92
41	1,00	7,9	9,3	22	61	Flammeneintritt	DN50 / Z1	
42	1,00	7,9	9,2	30	84	Flammeneintritt	DN50 / Z1	
43	1,00	7,9	9,1	30	84	Flammeneintritt	DN50 / Z1	
44	1,00	8,0	9,8	385	1088	Flammeneintritt	DN50 / Z1	ca. 92
45	1,00	8,0	8,3	12	41	Flammeneintritt	DN50 / Z1	
46	1,00	8,0	9,0	23	76	Flammeneintritt	DN50 / Z1	
47	1,00	8,0	8,5	20	66	Flammeneintritt	DN80 / Z1	
48	1,00	8,0	8,6	20	68	Flammeneintritt	DN80 / Z1	
49	1,00	8,0	8,5	20	67	Flammeneintritt	DN80 / Z1	
50	1,00	8,0	8,9	27	91	Flammeneintritt	DN50 / Z1	
51	1,00	8,0	9,9	28	93	Flammeneintritt	DN80 / Z1 Flammensieb	
52	1,20	8,0	10,8	37	123	Zündgefäß	Z1	
53	1,00	8,0	9,6	68	228	Flammeneintritt	DN80 / Z1	ca. 71
54	1,00	8,0	9,1	46	156	Flammeneintritt	DN80 / Z1	ca. 71
55	1,00	8,0	9,2	50	166	Flammeneintritt	DN80 / Z1	ca. 71
56	1,00	8,0	10,1	263	881	Flammeneintritt	DN80 / Z1	ca. 93
57	1,00	8,0	9,9	175	586	Flammeneintritt	DN80 / Z1	ca. 93
58	1,20	8,1	10,6	26	88	innen	ZZ3	
59	1,20	8,1	10,9	31	102	innen	ZZ3	
60	1,00	8,1	9,1	17	58	innen	ZZ3	
61	1,00	8,1	9,2	21	70	innen	ZZ3	
62	1,00	8,0	9,4	26	87	innen	ZW3	
63	1,00	8,1	9,2	24	80	innen	ZW3	
64	1,00	8,1	8,8	20	68	innen	ZZ2	
65	1,20	8,0	10,6	41	138	innen	ZZ2	
66	1,20	8,1	10,5	29	98	innen	ZZ2	
67	1,00	8,1	9,0	24	81	innen	ZZ2	
68	1,00	8,1	8,9	21	72	innen	ZW2	
69	1,00	8,1	8,8	24	81	innen	ZW2	
70	1,00	8,1	8,8	20	67	innen	ZB	
71	1,20	7,9	10,7	24	80	innen	ZB	
72	1,20	7,9	11,5	44	146	innen	ZB	
73	1,00	8,1	9,3	22	74	innen	ZB	
74	1,00	7,9	8,4	15	52	innen	ZK	
75	1,00	7,9	8,6	16	55	innen	ZK	
76	1,00	7,9	9,1	35	117	Zündgefäß	Z3	
77	1,20	7,9	11,6	50	168	Zündgefäß	Z3	
78	1,20	7,9	11,4	60	202	Zündgefäß	Z3	
79	1,00	7,9	9,6	31	103	Zündgefäß	Z3	
80	1,20	7,9	11,8	28	95	Zündgefäß	Z2	
81	1,20	7,9	11,6	33	109	Zündgefäß	Z2	
82	1,00	8,1	10,1	33	111	Zündgefäß	Z2	
83	1,00	7,9	9,1	19	64	Zündgefäß	Z2	
84	1,00	8,1	10,1	61	203	Zündgefäß	ZB	
85	1,20	8,1	10,8	22	73	Zündgefäß	ZB	
86	1,20	8,1	10,9	27	90	Zündgefäß	ZB	
87	1,20	8,1	10,8	22	74	Zündgefäß	ZB	
88	1,20	8,1	11,7	63	211	Zündgefäß	ZB	
89	1,00	7,9	9,6	41	139	Zündgefäß	ZB	

Tabelle 6.6: Zusammenstellung der Versuche mit dem Rezipienten - Versuchsparameter und Ergebnisse

7. Überprüfung der Voraussetzungen nach Rechtsvorschriften

7.1. Tatsächlich erforderlicher Ausgangsdruck

7.1.1. Vorbemerkungen

Wird ein Tank bzw. Versuchsbehälter, der unter Überdruck steht, über eine betriebsmäßig freie Öffnung (z.B. einen Kugelhahn) entspannt, strömt der (explosible) Inhalt des Tankes mit einer bestimmten, vom Druck im Tank abhängigen Geschwindigkeit durch diese Öffnung. Grundvoraussetzung für das Einlaufen einer Reaktion durch eine betriebsmäßig freie Öffnung in einen Tank ist, daß die Reaktionsgeschwindigkeit (Flammenfortpflanzungsgeschwindigkeit) größer ist als die Geschwindigkeit des explosiblen Dampf/Luft-Gemisches, welches aus dem Tank durch die Öffnung in die Umgebung gelangt. Nach den Technischen Richtlinien Tanks TRT 006-alt [48] ist der Ausgangsdruck (Anfangsdruck), bei dem eine Reaktion in einen Tank eingeleitet werden kann, u.a. abhängig vom Durchmesser der betriebsmäßig freien Öffnung des Tanks. Die durchmesserabhängigen Anfangsdrücke liegen nach Tabelle 3.4 bzw. 5.2 zwischen 1,1 und 1,2 bar (absolut). Die Annahmen oder Voraussetzungen, die diesen Angaben zugrunde liegen, sind nicht (mehr) nachvollziehbar, so daß eine Überprüfung erforderlich wurde.

7.1.2. Analytische Abschätzung des Ausgangsdruckes

Zunächst wurde die Richtigkeit der vorstehend angeführten Festlegungen anhand einer theoretischen Betrachtung überprüft.

Ein ideales Gas ströme durch eine adiabate Düse aus einem großen Behälter aus, in welchem stets der Zustand (p_1, T_1) aufrecht erhalten werde (Bild 7.1).

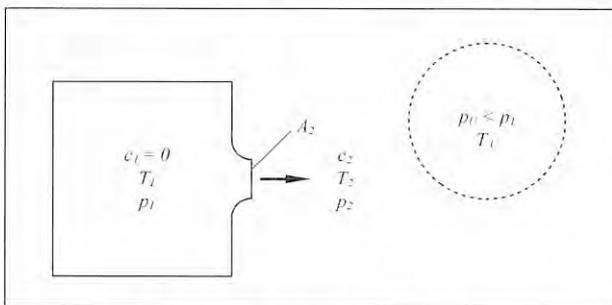


Bild 7.1: Ausfluß aus einem Druckbehälter

Die Eintrittsgeschwindigkeit in die Düse kann dann $c_1 = 0$ gesetzt werden. Das Gas gelange weiterhin mit der Strömungsgeschwindigkeit c_2 durch den engsten Strömungsquerschnitt A_2 in die Umgebung in der der Zustand (p_u, T_u) herrsche, wobei p_u kleiner als p_1 sei. Das ideale Gas wird also adiabatisch entspannt. Für sogenannte unterkritische Druckverhältnisse (was bedeutet, daß c_2 kleiner als die Schallgeschwindigkeit des

ausströmenden Gases ist) wird das Gas auf $p_2 = p_u$ entspannt.

Der Mengenstrom \dot{m} , der durch die Düse in die Umgebung gelangt, bemißt sich nach [75] und der dort zitierten, umfangreichen Literatur zu

$$\dot{m} = A_2 \cdot p_1 \cdot \psi \cdot \alpha \cdot \sqrt{\frac{2 M}{R_o \cdot T_1 \cdot Z}} \quad (1)$$

Hierin bedeuten:

- \dot{m} = Mengenstrom in [kg/s]
- A_2 = Düsenquerschnitt in [m²]
- p_1 = Ausgangsdruck im Behälter in [bar]
- ψ = Ausflußfunktion [-]
- α = Durchflußziffer, Verlustziffer [-]
- M = Molare Masse in $\left[\frac{\text{kg}}{\text{kmol}} \right]$
- R_o = allgemeine Gaskonstante $\left[8314,3 \frac{\text{J}}{\text{kmol} \cdot \text{K}} \right]$
- T_1 = Temperatur im Behälter in [K]
- Z = Realgasfaktor [-]

Unter diesen Bedingungen wird (1) zu

$$\dot{m} = 1551 \cdot A_2 \cdot p_1 \cdot \psi \cdot \alpha \cdot \sqrt{\frac{M}{T_1 \cdot Z}} \quad \left[\frac{\text{kg}}{\text{s}} \right] \quad (2)$$

Zur Abschätzung der Strömungsverhältnisse soll als Medium Luft herangezogen werden. Ausgehend von

$$p_1 = 1,15 \text{ bar (abs.) nach TRT 006-alt}$$

$$p_2 = p_u = 1,0 \text{ bar (abs.)}$$

und einem Isentropenexponenten $\kappa = 1,4$ für Luft folgt mit der Ausflußfunktion

$$\psi = \sqrt{\frac{\kappa}{\kappa - 1}} \sqrt{\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{2}{\kappa}} - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\kappa+1}{\kappa}}} \quad (3)$$

ein Wert $\psi = 0,335$.

Dem Ausgangsdruck $p_1 = 1,15 \text{ bar (abs.)}$ entspricht nach TRT 006-alt eine betriebsmäßig freie Öffnung DN 50, so daß sich für $A_2 = 0,001963 \text{ m}^2$ ergibt.

Mit einer geschätzten Verlustziffer $\alpha = 0,75$

der molaren Masse für Luft

$$M = 29 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}}$$

einer Temperatur $T_1 = 288 \text{ K}$ und einem angenommenen Realgasfaktor $Z = 1$ ergibt sich unter Verwendung von (2)

$$\dot{m} = 0,28 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

Unter Verwendung der Durchflußgleichung [76]

$$\frac{\dot{m}}{\rho} = c \cdot A \quad (4)$$

folgt

$$c_2 = \frac{\dot{m}}{A_2 \cdot \rho}$$

Mit der Dichte von Luft bei $T = 288 \text{ K}$

$$\rho = 1,2237 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

erhält man für die Geschwindigkeit c_2 von \dot{m} in A_2

$$c_2 = 116 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Der Wert für die Ausströmgeschwindigkeit aus einem Behälter, in dem der Zustand (p_1, T_1) wie vorstehend beschrieben herrscht, beträgt also ein Vielfaches der laminaren Verbrennungsgeschwindigkeit nach Tabelle 2.1 in Höhe von

$$c_{lam} \approx 1 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Daher ist von vornherein zu unterstellen, daß der anzunehmende Ausgangsdruck nach TRT 006-alt in Höhe von 1,1 bis 1,2 bar (abs.) ebenfalls wesentlich zu hoch angesetzt ist, als daß eine Reaktion aus der Umgebung durch eine Tanköffnung in das Tankinnere treten kann.

7.1.3. Experimentelle Bestätigung des Ausgangsdruckes

Der Druck im Behälterinneren, bei dem durch eine freie Öffnung üblicher Größe eine Reaktion in den Rezipienten übertragen wird, wurde mit Hilfe der Versuche Nr. 41 bis 43 wie folgt ermittelt:

Mittels eines Adapters wurde ein Kugelhahn DN 50 am Behälter befestigt. Das durch den geöffneten Kugelhahn strömende Ethylen/Luft-Gemisch wurde durch

einen Propanbrenner gezündet und mit einem vom Meßbereich her angepaßten Druckaufnehmer der Druck gemessen, bei dem die Flamme in den Behälter schlug. Der Vorgang ist in Abschnitt 5.4. genauer beschrieben, Einzelheiten können dem folgenden Bild 7.2 entnommen werden.

In den Versuchen 41 bis 43 (s. Tabellen 6.5 und 6.6) wurde also untersucht, bei welchem Ausgangsdruck die Flamme in den Versuchsbehälter eintritt und inwieweit der Explosionsablauf durch den ständigen Druckabbau eventuell beeinflusst wird. Der Ausgangsdruck nach TRT 006-alt ist, wie bereits in Abschnitt 3.3.1. aufgeführt, vom Querschnitt der freien Öffnung abhängig, durch die das im Rezipienten vorhandene Gasgemisch ausströmt. Bei einem Öffnungsdurchmesser von 50 mm ist nach TRT 006-alt ein absoluter Ausgangsdruck von 1,15 bar anzusetzen. Bei den Versuchen wurde im Behälter ein Vordruck von ca. 0,2 bar eingestellt. Nach der Zündung des Propanbrenners wurde der Kugelhahn geöffnet. Die Zündung des austretenden Ethylen/Luft-Gemisches erfolgte sofort. Dabei befand sich die Flamme zunächst in ca. 1 m Entfernung von der Kugelhahnöffnung und näherte sich dieser über einen Zeitraum von rund 25 s bei abnehmendem Behälterinnendruck an (s. beispielsweise Bild 7.3).



Bild 7.2: Kugelhahn und seitlich angeordneter Propanbrenner

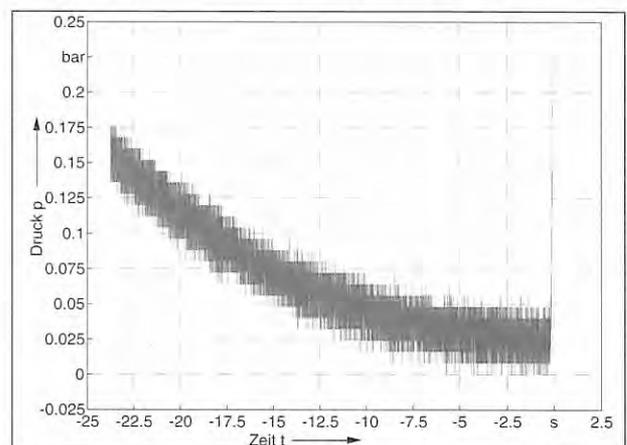


Bild 7.3: Vordruck bzw. Ausgangsdruck bei Versuch Nr. 41

Der zum Zeitpunkt des Eintritts der Flamme im Rezipienten vorhandene (Ausgangs-)Druck lag dabei mit jeweils ca. 0,025 bar erheblich unter dem nach TRT 006-alt anzusetzenden Wert in Höhe von 0,15 bar. Der geringe Ausgangsdruck bewirkte einen gegenüber den

Versuchen, die bei höheren Ausgangsdrücke durchgeführt wurden, geringeren Explosionsenddruck bei ansonsten nahezu gleichen Versuchsbedingungen. Er liegt bei den Versuchen Nr. 41 bis 43 mit 8,1 und 8,2 bar unterhalb des nach Gleichung (1) in Abschnitt 3.3.1. theoretisch zu erwartenden Wertes in Höhe von 9,25 bar (siehe Bild 7.4). Auch die maximalen Druckanstiegsgeschwindigkeiten und die daraus resultierenden K_G -Werte (s. Abschnitt 2.) sind niedriger als nach Vorversuchen mit Zündungen im Zündbehälter usw. zu erwarten gewesen wäre. Dieses Ergebnis wird in Abschnitt 8. in Zusammenhang mit der Diskussion sonstiger Versuchsergebnisse eingehender betrachtet.

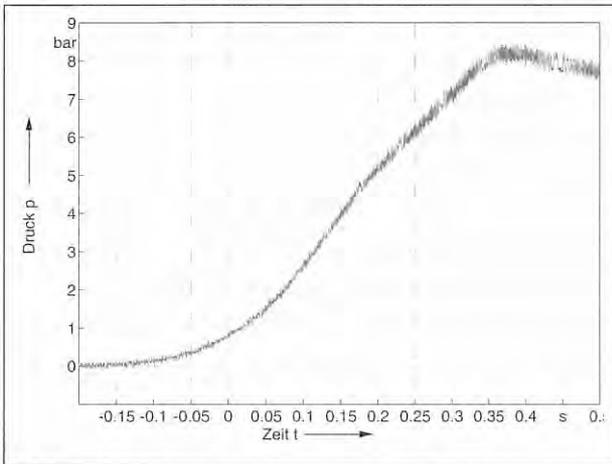


Bild 7.4: Verlauf des Explosionsdruckes im Rezipienten bei Versuch Nr. 41

Die wesentlichen Daten und Versuchsergebnisse der Versuche Nr. 41 bis 43 sind in der Tabelle 7.1 zusammengefaßt.

Versuchsnummer	Ethylen-Konzentration c [Vol %]	Eintrittsdruck p_a [bar]	Explosionsdruck p_{ex} [bar]	Druckanstiegsgeschwindigkeit $(dp/dt)_{max}$ [bar/s]	K_G -Wert [bar m/s]
41	7,9	0,025	8,2	22	62
42	7,9	0,025	8,2	30	86
43	7,9	0,026	8,1	30	84
Mittelwerte	7,9	0,025	8,2	27	77

Tabelle 7.1: Ergebnisse der Versuche Nr. 41 bis 43

Der Eintrittsdruck der Flamme in den Tank und zugleich der Ausgangsdruck der Explosion im Tankinneren belief sich also ungefähr auf

$$p_a = 0,025 \text{ bar.}$$

7.1.4. Diskussion der Ergebnisse

Berechnet man mit diesem gegenüber den ursprünglichen Anforderungen nach TRT 006-alt wesentlich reduzierten Ausgangsdruck $p_a = 1,025 \text{ bar}$ (abs.) die sich nunmehr ergebende Ausflußgeschwindigkeit im engsten Querschnitt der betriebsmäßig freien Öffnung, die im vorliegenden Fall durch den Öffnungsquerschnitt des Kugelhahnes gegeben ist, auf die im vorhergehenden Teilabschnitt geschilderte Weise, ergibt sich für die Ausflußfunktion

$$\psi' = 0,154$$

und den beim reduzierten Ausgangsdruck durch den Kugelhahn tretenden Mengenstrom

$$\dot{m}' = 0,115 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

Somit errechnet sich für die Strömungsgeschwindigkeit im Austrittsquerschnitt A_2 ein Wert in Höhe von

$$c_2' = 48 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Die Flammenfortpflanzungsgeschwindigkeit beläuft sich also auf einen Wert, der mindestens der Größe von c_2' entspricht. In anderer Schreibweise lassen sich die Zusammenhänge wie folgt darstellen:

$$c_{lam.} < c_2' < c_2 \quad (5)$$

Zunächst läßt sich also der Schluß ziehen, daß der tatsächliche Ausgangsdruck einer Explosion im Behälterinneren, die durch eine Reaktion außerhalb des Behälters verursacht wird und durch eine betriebsmäßig freie Öffnung in den Behälter gelangt, relativ geringe Werte annimmt. Diese festgestellten Werte sind unter realistischen Verhältnissen hinsichtlich der Strömung durch Ausrüstungsteile jedoch größer als es den Voraussetzungen für laminare Verbrennungen bzw. Strömungen entspricht.

Die in den Behälter eintretende Flamme pflanzt sich auch nach den Ergebnissen der genannten Versuche in einer die Reaktion begünstigenden turbulenten Strömung explosiblen Dampf/Luft-Gemisches fort.

Andererseits ergeben sich bei der Explosion im Behälterinneren Explosionsdrücke, die geringer sind, als es den theoretisch berechneten Werten entspricht. Unter Anwendung der Gleichung (1) aus Abschnitt 3.3.1. müßte sich für ein maximaler Explosionsdruck in Höhe von

$$p_{ex} = 9,25 \text{ bar}$$

ergeben. Nach Tabelle 7.1 wurden jedoch nur Explosionsdrücke in Höhe von

$$p_{exgem} = 8,2 \text{ bar}$$

ermittelt.

Es ist also davon auszugehen, daß die permanent offene Kugelhahnöffnung (= betriebsmäßig freie Öffnung) zu einer - wenn auch geringfügigen - Druckentlastung des Behälters führt und die Reaktion im Behälter etwa wegen stärkerer Wärmeableitung über die Behälterwand, anders als dies bei ideal-kubischen Laborbehältern der Fall ist, eben nicht ideal abläuft. Abweichungen vom stöchiometrischen Gemisch und Konzentrationsschwankungen im Gemisch selbst spielen sicher auch eine Rolle.

Dies führt zu der Schlußfolgerung, daß es für theoretische Beurteilungen der Explosionsdruckstoßfestigkeit

von Tanks ausreichend ist, von Ausgangsdrücken in Höhe des Umgebungsdruckes bzw.

$$p_a = 1 \text{ bar (abs.)}$$

auszugehen und maximale Explosionsdrücke p_{ex0} zugrunde zu legen, die unter idealen Verhältnissen im Labormaßstab ermittelt wurden (und einschlägigen Tabellenwerten entnommen werden können [20]). Für Ethylen/Luft-Gemische mit einem Wert

$$p_{ex0} = 9,9 \text{ bar (abs.)}$$

ergibt sich nämlich auf diese Weise ein theoretischer Wert für den Explosionsdruck in Höhe von

$$p_{ex} = 8,9 \text{ bar,}$$

also ein größerer Wert, als unter Versuchsbedingungen wie vorstehend beschrieben im Großmaßstab ermittelt wurde (s. Tabelle 6.5 und 6.6, Versuche Nr. 41 bis 43 und 45 bis 50).

Für experimentelle Nachweise der Explosionsdruckstoßfestigkeit von Tanks ist es überdies ausreichend, künftig von einer Versuchsanordnung wie hier und in Abschnitt 5.4. beschrieben auszugehen.

7.2. Wirksamkeit von Flammensperren

7.2.1. Vorbemerkungen

In den Abschnitten 2. und 3. war umfänglich dargelegt worden, daß zur Verhinderung einer Reaktionsübertragung aus der Umgebung durch betriebsmäßig freie Öffnungen ins Innere von Transporttanks aktive und passive Einrichtungen verwendet werden können. Des weiteren war aufgezeigt worden, daß für Transporttanks aus verschiedenen Gründen zweckmäßigerweise passive Maßnahmen zur Anwendung kommen sollten. Passive Maßnahmen des Explosionsschutzes reduzieren sich sinnvoll wiederum auf die Verwendung von Flammendurchschlagsicherungen bzw. Flammensperren und das Vorsehen explosionsdruckstoßfester Bauweise. Bei Verwendung von Flammendurchschlagsicherungen (Flammensperren) wären aus den unter a) des Abschnittes 2.4.3. aufgeführten Gründen für betriebsmäßig freie Öffnungen von Transporttanks dauerbrandsichere Armaturen anzuwenden.

Die an Transporttanks für multimodale Verwendung (Tankcontainer auf Straße, Schiene und Seeweg) üblicherweise verwendeten Flammensperren (englisch: flame traps) entsprechen ihrem Aufbau nach nicht den in Deutschland für derartige Zwecke eingesetzten, baumustergeprüften und -zugelassenen Flammendurchschlagsicherungen, deren Wirksamkeit als Dauerbrandsicherung also nachgewiesen ist. Flammendurchschlagsicherungen werden als Bandsicherungen oder

Sintermetallsperren u.ä. ausgeführt, Flammensperren international üblicher Bauweise bestehen lediglich aus einem Gehäuse, das mit großen Öffnungen versehen ist und dessen Öffnungen mit einem relativ grobschichtigen Sieb abgedeckt sind (s. Bild 7.6). Aus diesem Grund haben sich Zweifel an der tatsächlichen Wirksamkeit derartiger Flammensperren gegenüber Flammenrückschlägen ergeben, die Anlaß für eine entsprechende Überprüfung waren.

7.2.2. Versuch mit einer Flammensperre (Flammensieb)

Der Versuch Nr. 51 wurde auf ähnliche Weise durchgeführt, wie die unter 7.1.3 beschriebenen Untersuchungen.

Mittels eines Adapters wurde ein Kugelhahn DN 80 am Behälter befestigt. An der behälterabgewandten Seite des Kugelhahns wurde an dessen Flansch eine Aufnahmevorrichtung für das Flammensieb montiert. Das durch den geöffneten Kugelhahn strömende Ethylen/Luft-Gemisch trat seitlich durch das Flammensieb in die Umgebung und wurde dort durch einen Propanbrenner gezündet. Bei dem Versuch war im Behälter ein Vordruck von 0,2 bar eingestellt worden. Nach Ablauf einiger Sekunden erreichte die zunächst in einiger Entfernung vor dem Flammensieb brennende Flamme das Flammensieb und wurde dort zunächst für ca. 10 sec. aufgehalten. Hierbei wurde das eigentliche Sieb der Flammensperre bis zur Weißglut erhitzt und schmolz abschließend durch bzw. verbrannte. Bei einem Ausgangsdruck von ca. 0,03 bar trat die Flamme an diesen Vorgang anschließend durch die Kugelhahnöffnung ins Tankinnere und löste dort eine Explosion aus. Es wurde ein Explosionsenddruck von 9,9 bar gemessen. Der Explosionsenddruck, die Druckanstiegsgeschwindigkeit und der zugehörige K_G -Wert lagen deutlich über den Werten, die bei ähnlichen Versuchen mit einer Öffnung DN80 - jedoch ohne vorgesetztes Flammensieb - ermittelt wurden, wie ein Vergleich der Ergebnisse der Versuche Nr. 47 bis 49 (s. Tab. 6.5 und 6.6) zeigt.

Der Versuchsaufbau und der Zustand des Flammensiebes vor und nach dem Versuch kann aus den Bildern 7.5 bis 7.7 ersehen werden.



Bild 7.5: Versuchsaufbau vor Versuch Nr. 51



Bild 7.6: Zündbrennerposition am Versuchsaufbau vor Versuch Nr. 51 (Seitenansicht)



Bild 7.7: Flammensiebkörper nach Versuch Nr. 51

7.2.3. Diskussion des Ergebnisses

Flammensperren, die den gleichen konstruktiven Aufbau aufweisen wie die im Versuch Nr. 51 geprüfte, können nicht als Explosionsschutzmaßnahme im Sinne der in Abschnitt 3. aufgeführten Rechtsvorschriften angesehen werden. Obwohl diese und ähnliche Bauarten weltweite Verbreitung haben und somit auch in Deutschland zulässig sind, sind sie nicht in der Lage eine Reaktionsübertragung (einen Flammenrückschlag) aus der Umgebung in das Innere eines Tanks zu verhindern.

Es wäre also darauf hinzuwirken, daß als Flammendurchschlagsicherungen für betriebsmäßig freie Öffnungen von Transporttanks ausschließlich dauerbrandsichere, der Bauart nach geprüfte und zugelassene Einrichtungen Verwendung finden.

Es kann abschließend angemerkt werden, daß Probleme der vorstehend beschriebenen Art bei Anwendung der Explosionsschutzmaßnahme „explosionsdruckstoßfeste Bauweise“ von vornherein nicht auftreten.

7.3. Wirkung großer freier Tanköffnungen (offenes Mannloch)

7.3.1. Vorbemerkungen

Gegen deutsche Vorstellungen zur Durchsetzung von Maßnahmen des Explosionsschutzes an Transporttanks - Flammendurchschlagsicherungen bzw. Flammensperren und explosionsdruckstoßfeste Bauweise - wurde häufig das Argument vorgebracht, daß wohl kleine betriebsmäßig freie Öffnungen von Entspannungs-, Befüll- und Entleereinrichtungen usw. abgesichert werden könnten, nicht jedoch große Besichtigungsöffnungen bzw. Mannlöcher. Es ist unzweifelhaft richtig, daß Mannlöcher, die üblicherweise einen Durchmesser von 500 mm aufweisen, aus Platz-, Gewichts-, Kosten- und Handhabungsgründen nicht mit Flammendurchschlagsicherungen bzw. Flammensperren ausgestattet werden können, insofern bei der Anwendung dieser Maßnahme eine Absicherungslücke bezüglich der Mannlöcher besteht. Dies gilt jedoch nicht in gleicher Weise für explosionsdruckstoßfeste Bauweisen, wenn sichergestellt ist, daß der Mannlochbereich (Dombereich) entsprechend gestaltet ist und insbesondere der Mannlochdeckel (Domdeckel) derart befestigt ist, daß er auch im Falle einer Explosion im Tankinneren gegen Abreißen geschützt ist. Es erschien in diesem Zusammenhang jedoch sinnvoll, den experimentellen Nachweis zu liefern, daß ein explosionsdruckstoßfester gestalteter Tank auch oder gerade einem Flammenrückschlag aus der Umgebung in das Tankinnere durch das geöffnete Mannloch gewachsen ist. Für den maximalen Explosionsdruck eines drucklosen Tanks () ergibt sich ein theoretischer Wert in Höhe von 8,9 bar. Dies gilt für einen abgeschlossenen Behälter. Bei geöffnetem Mannloch ist mit geringeren Werten zu rechnen, da der sich durch die Explosion ergebende Überdruck teilweise durch die Öffnung abgebaut werden kann (Explosionsdruckentlastung). Ziel der nachfolgend beschriebenen Versuche war es, den sich ergebenden Explosionsdruck zu erfassen, der bei geöffnetem Mannloch auftritt.

7.3.2. Versuche mit einem Aluminiumkoffertank

Zu den Versuchen Nr. 31 und 32 wurde der Abschnitt eines Koffertanks verwendet, wie er beispielsweise zur Versorgung von Tankstellen mit Kfz.-Kraftstoffen benutzt wird. Der Tankabschnitt bestand aus der Aluminium-Knetlegierung Al Mg 4,5 Mn W 28 und hatte ein Volumen von 7500 l. Der Durchmesser des Mannlochs betrug 500 mm und die Tankwanddicke (einschließlich der Böden) belief sich auf 5,2 mm. Der Tank war auf einer Seite mit einem für Koffertanks üblichen Endboden, auf der gegenüberliegenden Seite mit einem sogenannten Doppel-S-Trennboden versehen.

Meß- und Versorgungseinrichtungen entsprachen sinngemäß den in Abschnitt 5. geschilderten bis auf folgende Abweichung: Um das explosible Gemisch im

Tank bei offenem Mannloch davon unbeeinflusst einzustellen und aufrecht zu erhalten, wurde am Mannloch ein Polyethylen-Sack (PE-Sack) mit den (Leer-)Abmessungen 2 m x 3 m mit Klebeband befestigt.

Die Zündung des Gemisches erfolgte elektrisch über Brennmomentzündler mit einer Zündenergie von 70 - 90 Joule. Um das im Tank enthaltene explosionsfähige Gemisch sicher zünden zu können, wurden vier Brennmomentzündler verwendet, die einzeln aktiviert werden konnten. Die Hauptabmessungen des Tanks sowie die Positionen der Druckmeßstellen I bis V können Bild 7.8 entnommen werden.

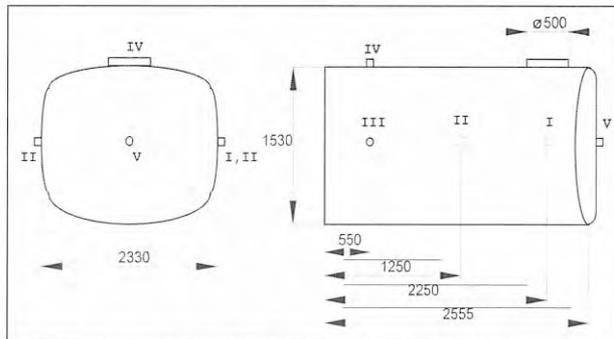


Bild 7.8: Versuchstank mit Hauptabmessungen

Mit dem Tankabschnitt wurden insgesamt 2 Versuche durchgeführt, für beide wurde derselbe Tankabschnitt verwendet.

Beim Versuch Nr. 31 (s. Tabellen 6.1 bis 6.4) erfolgte die Zündung des Gemisches in der Mannlochebene. Bild 7.9 zeigt die Position der verwendeten Brennmomentzündler. Der PE-Sack lag dabei - wie Bild 7.10 entnommen werden kann, auf der Oberseite des Tankabschnittes. Die ermittelte Ethylenkonzentration betrug 8,0 Vol.-%. Nach der Zündung brannte das Gemisch über einen Zeitraum von ca. 5 s in den Tank hinein ab, wobei es zur Zerstörung des Sackes kam. Der Tank wurde weder plastisch verformt noch bewegt. Bild 7.11 zeigt die Mannlochöffnung nach dem Versuch.



Bild 7.9: Position der Brennmomentzündler bei Versuch Nr. 31

Im Unterschied zum Versuch Nr. 31 erfolgte beim Versuch Nr. 32 die Zündung ca. 1 m oberhalb der Mannlochöffnung in der Mitte des aufrecht stehenden PE-Sackes (Bild 7.12). Die ermittelte Ethylenkonzentration betrug 8,1 Vol.-%.



Bild 7.10: Aluminiumkoffertank vor Versuch Nr. 31



Bild 7.11: Mannlochöffnung nach Versuch Nr. 31



Bild 7.12: Aluminiumkoffertank vor Versuch Nr. 32



Bild 7.13: Position des Tanks nach Versuch Nr. 32

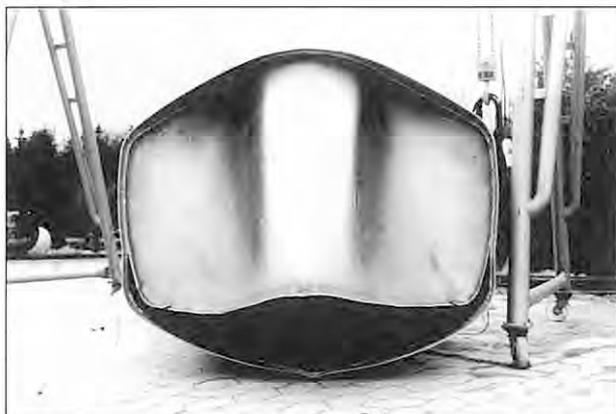


Bild 7.14: Ausgerissener Doppel-S-Boden nach Versuch Nr. 32

Bei der Zündung kam es zunächst zum Abbrennen des im PE-Sack enthaltenen Gemisches. Nach 1,1 Sekunden schlug die Flamme in den Tank hinein. Der Tank riß auf der Seite des Doppel-S-Bodens oben auf. Durch den bei dieser Entlastung entstehenden Impuls hob der Tank vom Boden ab, drehte sich und kam schließlich mit dem Mannloch nach unten wieder auf dem Boden auf (Bild 7.13).

Bild 7.14 zeigt den aufgerissenen Doppel-S-Boden nach dem Versuch.

Bei Versuch Nr. 31 brannte das Gasgemisch bedingt durch den Zündort gleichermaßen sowohl in den Tank als auch nach außen ab. Auf den angefertigten Film- und Videoaufnahmen ist zu erkennen, daß der PE-Sack sofort nach Zündung über der Mannlochöffnung zerstört wurde, das darin enthaltene Gemisch brannte außerhalb des Tanks ab. Innerhalb des Tanks pflanzte sich die Flammenfront fort, aber nur mit verhältnismäßig geringer Geschwindigkeit.

Bei dem zweiten durchgeführten Versuch Nr. 32 blieb der PE-Sack relativ lange unzerstört, so daß das Gemisch ca. 0,5 s lang über dem Mannloch abbrannte, die Flammenfront hatte demzufolge schon beim Eintritt in den Tank eine wahrscheinlich größere Geschwindigkeit als beim ersten Versuch. Dies bewirkte einen größeren Druckanstieg bzw. Explosionsdruck als beim ersten Versuch. Die Bilder 7.15 und 7.16 zeigen die bei beiden Versuchen registrierten Druckverläufe.

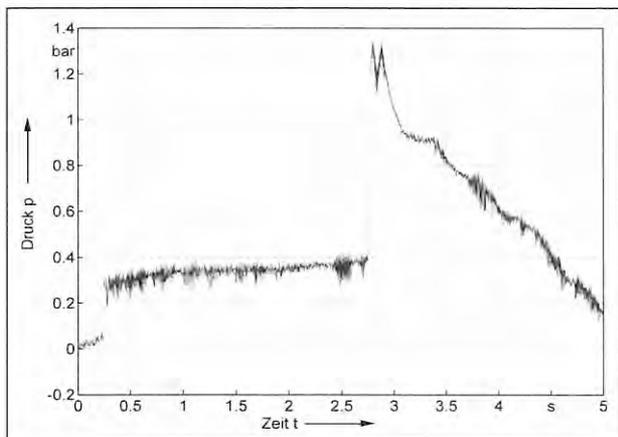


Bild 7.15: Drucksignal bei Versuch Nr. 31

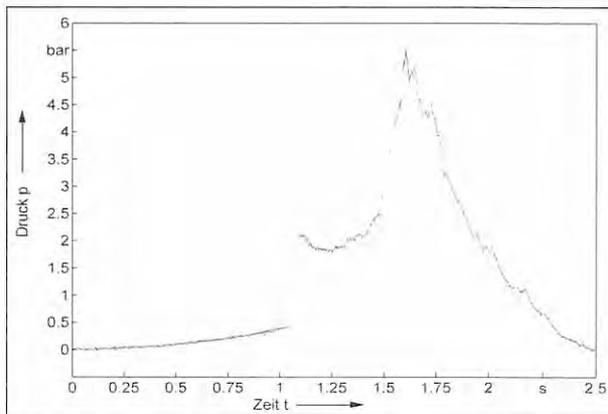


Bild 7.16: Drucksignal bei Versuch Nr. 32

Die Druckverläufe zeigen deutliche Unterschiede bezüglich des maximal auftretenden Druckes; die maximalen Druckanstiegsgeschwindigkeiten sind hingegen nahezu gleich.

Für Versuch Nr. 31 ergibt sich ein Wert von ca. $24 \frac{\text{bar}}{\text{s}}$ und für Versuch Nr. 32 ca. $23 \frac{\text{bar}}{\text{s}}$.

Damit ergibt sich bei einem Behältervolumen von 7,5 m³ für Versuch Nr. 31 ein K_G-Wert von $47 \frac{\text{bar} \cdot \text{m}}{\text{s}}$ und für Versuch Nr. 32 von $45 \frac{\text{bar} \cdot \text{m}}{\text{s}}$.

Die ermittelten Werte sind kleiner als die bei geschlossenen Tanks ermittelten. Der gemessene Maximaldruck liegt mit 5,5 bar deutlich unter dem für einen geschlossenen Tank zu erwartenden Wert von 8,9 bar.

Dies ist im wesentlichen auf den ständigen Abbau des Überdruckes durch das offene Mannloch zurückzuführen.

7.3.3. Diskussion der Ergebnisse

Aus den Versuchen Nr. 31 und insbesondere Nr. 32 lassen sich folgende Schlußfolgerungen ziehen:

Tritt eine Verbrennungsreaktion durch eine relativ große freie Öffnung - z.B. ein Mannloch - in einen Tank, in welchem sich ein explosives Dampf/Luft-Gemisch befindet, führt dies bei ansonsten gleichen Randbedingungen im Tankinneren zu einer Explosion, deren Explosionsdruck und -heftigkeit geringer sind, als dies sonst bei Tanks zu verzeichnen ist, die mit einer kleinen freien Öffnung versehen oder gänzlich abgeschlossen sind.

Hieraus folgt, daß Tankschalen, die grundsätzlich gegen eine Explosion im Tankinneren durch das Vorsehen explosionsdruckstoßfester Bauweise bis zu einem Explosionsdruck entsprechend Gleichung (1) im Abschnitt 3.3.1.

$$p_{ex} = p_a \cdot p_{ex0} - 1$$

geschützt sind, auch einer derartigen Beanspruchung standhalten. Wenn die Befestigung des Mannlochdeckels im Falle einer Explosion im Tankinneren ein Abreißen zu verhindern in der Lage ist, ist der gesamte Tank grundsätzlich als explosionsdruckstoßfest anzusehen.

Unabhängig davon, daß Stichflammen und heiße Reaktionsprodukte aus dem Tankinneren durch das Mannloch treten und Einfluß auf die Umgebung des Tanks haben können, ist ein vollständiges Versagen des Tanks als Folge der Explosion nicht zu befürchten.

Insofern stellt die explosionsdruckstoßfeste Bauweise die einzige vollständige Explosionsschutzmaßnahme für Transporttanks dar, da Flammendurchschlagsicherungen bzw. Flammensperren für große Tanköffnungen wie Mannlöcher nicht anwendbar, zumindest nicht verfügbar sind.

Tanks, die nicht explosionsdruckstoßfest gestaltet sind und deren betriebsmäßig freie Öffnungen (bis auf das Mannloch) aus diesem Grund mit Flammendurchschlagsicherungen bzw. Flammensperren versehen werden, müßten also wenigstens gegen den Druck ausgelegt sein, der sich bei einer Explosion im Tankinneren aufgrund der druckreduzierenden Wirkung des geöffneten Mannlochs ergibt.

Eine derartige Anforderung ist bisher in keiner Rechtsvorschrift, technischen Regel usw. enthalten.

Überdies muß - den Darlegungen in Abschnitt 7.2. folgend - bezweifelt werden, ob die derzeit üblicherweise bei Transporttanks zur Absicherung kleiner betriebsmäßig freier Öffnungen angewendeten Flammen-

sperren überhaupt genügend wirksam sind. Hier wären in Zukunft also zumindest Eignungsnachweise unter Zugrundelegung realistischer Anforderungen zu fordern.

7.4. Schlußfolgerungen

Die Erkenntnisse, die aus den Ergebnissen von Untersuchungen gewonnen wurden, wie sie in den Abschnitten 7.2. und 7.3. beschrieben wurden, hatten keinen Einfluß auf den Fortgang der Untersuchungen zu Explosionen der Dämpfe entzündbarer flüssiger Stoffe in Tanks. Hier wäre lediglich darauf hinzuwirken, daß die Schlußfolgerungen aus der Diskussion der Ergebnisse (vgl. Abschnitt 7.2.3. und 7.3.3.) Eingang in die entsprechenden Rechtsvorschriften fänden. Entsprechende Vorschläge werden in Abschnitt 11. formuliert.

Obwohl auch die Ergebnisse der Untersuchungen, die in Abschnitt 7.1. beschrieben sind, zu Änderungen der entsprechenden Vorschriften führen müßten, ergaben sich außerdem Rückwirkungen auf das Programm der Untersuchungen. Es erscheint nach diesen Ergebnissen ausreichend, den Nachweis explosionsdruckstoßfester Bauweise auf die in den Abschnitten 7.1.3. bzw. 5.4. beschriebene Weise zu führen, was zu einer nicht unerheblichen Erleichterung beim Vorsehen dieser Schutzmaßnahme zur Folge hätte. Daher wurden Untersuchungen auf der genannten Grundlage in das Untersuchungsprogramm aufgenommen, um sicherzustellen, daß diese Nachweismethode tatsächlich den Ersatz für die bisher angewandte darstellen kann. Hierauf wird in den nachfolgenden Abschnitten eingehender eingegangen.

8. Tanks ohne Einbauten

8.1. Versuche und Ergebnisse mit realen Transporttanks

8.1.1. Explosionsversuche

Im Rahmen dieses Abschnittes sind also die Versuche Nr. 1, 3, 10 und 11 mit zylindrischen Drucktanks qualitativ und quantitativ zu beschreiben und zu bewerten, wobei gewisse Aufschlüsse auch aus den Ergebnissen der Versuche Nr. 8 und 9 mit kubischen Tankcontainern und der Versuche Nr. 31 und 32 mit einem kofferförmigen Tankabschnitt gezogen werden können. Vor einer eingehenderen Betrachtung dieser Versuche soll auf das in Abschnitt 2.3.2. bereits erwähnte „Kubische Gesetz“ zurückgegriffen werden:

$$K_{G'} = \left(\frac{dp}{dt} \right)_{\max} \cdot V^{1/3} = \text{const},$$

welches besagt, daß das Produkt aus Druckanstiegsgeschwindigkeit multipliziert mit der dritten Wurzel aus

dem Behältervolumen unter bestimmten Bedingungen eine Konstante ist. Unter anderem ist der K_G -Wert (= Explosionsheftigkeit) stoffabhängig. Im Labormaßstab ermittelt, ergibt sich für das bei allen Versuchen verwendete (zündwilligste) Ethylen/-Luft-Gemisch nach Tabelle 2.3 eine Explosionsheftigkeit von

$$K_{G'} = 136 \frac{\text{bar} \cdot \text{m}}{\text{s}}$$

bei einem maximalen Explosions(end)druck

$$p_{\text{ex0}} = 9,9 \text{ bar (abs.)}$$

Bei Diskussionen der im Rahmen dieser Arbeiten gewonnenen Ergebnisse ist zunächst also festzustellen, ob Abweichungen von diesen Werten zu verzeichnen sind und, wenn ja, mit welcher Begründung, um in eine zutreffende Bewertung von Tankkonstruktionen im Hinblick auf explosionsdruckstoßfeste Bauweise eintreten zu können.

Die Versuche wurden mit einer Versuchsanordnung durchgeführt, wie sie grundsätzlich in Abschnitt 4. beschrieben ist und Bild 4.2 bzw. näherungsweise auch Bild 5.12 entnommen werden kann.

Wesentliche Versuchsergebnisse sind in Tabelle 8.1 enthalten:

Versuchs- Nummer	Ethylen- Konzentration c [Vol.-%]	Ausgangs- druck p_a [bar]	Explosions- druck p_{ex} [bar]	Druckanstiegs- geschwindigkeit (dp/dt) _{max} [bar/s]	K_G -Wert [bar · m/s]
1	8,2	0,2	10,4	49	160
3	6,7/8,4	0,25	10,3	53	135
10	7,4	0,2	8,3	35	95
11	7,4	0,2	9,3	60	125
8	7,5	0,2	10,9	400	400
9		0,15	7,3		
31	8,0	0,0	1,3	24	47
32	8,1	0,0	5,5	23	45

Tabelle 8.1: Versuchsergebnisse von Tanks ohne (wesentliche) Einbauten

Abmessungen und weitere konstruktive Details können aus den Tabellen 6.1 bis 6.3 ersehen werden.

Es läßt sich feststellen, daß die angestrebten bzw. zu erwartenden Explosionsdrücke

$$p_{ex} = p_a \cdot p_{ex0} - 1$$

mit p_a und p_{ex0} als Absolutwerten (ausgehend vom jeweiligen Ausgangsdruck) in Höhe von 10,9 bar (bei den Versuchen Nr. 1, 10 und 11) bzw. 11,4 bar (beim Versuch Nr. 3) nicht erreicht wurden, obwohl die Explosionsheftigkeiten zumindest bei den Versuchen Nr. 1 und 3 in der zu erwartenden Größenordnung lagen.

Das Erreichen des theoretischen Explosionsdruckes wurde bei den Versuchen Nr. 1 und 3 mit Sicherheit dadurch verhindert, daß in beiden Fällen eine Druckentlastung über die undichten Mannlochdeckel zu verzeichnen war. Bei Versuch Nr. 1 wurde der Mannlochdeckel sogar vollständig abgerissen, die Prüfung des Kesselwagens mußte daher als nicht bestanden gewertet werden. Inhomogenitäten im Ethylen-/Luft-Gemisch und Wärmeableitungen über die Tankwandung der nicht-kubischen Tanks werden diesen Effekt begünstigt haben. Die Ergebnisse der Dehnungsmessungen haben jedoch Teile der unter Abschnitt 8.2.1. beschriebenen Spannungsbewertung ermöglicht.

Bei den Versuchen Nr. 10 und 11 wurde der theoretische Explosionsdruck ebenfalls nicht erreicht, obwohl der geprüfte Tank vollständig dicht blieb. Ursache hierfür dürfte die vom für optimale Reaktionen erforderlichen Gemisch abweichende Ethylen-Konzentration in Höhe von lediglich 7,4 Vol.-% in Luft gewesen sein.

Von besonderem Interesse ist in diesem Zusammenhang das Ergebnis des Versuches Nr. 8. Dieser Versuch wurde mit einem fast ideal-kubischen, näherungsweise sogar kugelförmigen Behälter mit einem Volumen von 1 m³ durchgeführt. Obwohl die Ethylen-Konzentration auch in diesem Fall nicht optimal eingestellt

werden konnte, wurde dennoch der auch theoretisch zu erwartende Explosionsdruck von 10,9 bar erreicht. Die ermittelte Explosionsheftigkeit lag mit

$$K_G = 400 \frac{\text{bar} \cdot \text{m}}{\text{s}}$$

wesentlich über dem Laborwert

$$K_G = 136 \frac{\text{bar} \cdot \text{m}}{\text{s}}$$

Es kann anhand dieses Versuches als gesichert angenommen werden, daß die Zündung in einem Behälter (Zündtopf), der über eine (wenn auch kurze) Rohrstrecke mit einem zweiten Behälter verbunden ist, zu einer wesentlich heftigeren Reaktion im Zweitbehälter führt, als dies beim Eintritt der Reaktion aus der Umgebung des Zweitbehälters durch dieselbe Öffnung ins Behälterinnere der Fall ist (s. hierzu Abschnitt 7.1.). Bei einer Anordnung, wie sie beim Versuch Nr. 8 verwendet wurde, tritt die Reaktion bei höherem Druck mit größerer Geschwindigkeit in den Zweitbehälter ein und dürfte dort nicht als punktförmige Zündquelle wirken, sondern vielmehr als turbulenter Flammenstrahl eine wesentlich heftigere Reaktion auslösen. Dieser Effekt kommt im vorliegenden Fall auch deshalb deutlich zum Tragen, da keine Druckentlastung zu verzeichnen und eine homogene Gemischeinstellung in diesem relativ kleinen Behälter zuverlässiger möglich war. Die Überprüfung dieses Vorganges ist in Abschnitt 8.4. beschrieben.

Die Versuche Nr. 9, 31 und 32 sind mit nicht gegen inneren Überdruck ausgelegten kubischen Tankcontainern bzw. Koffertankabschnitten, also mit nichtzylindrischen, drucklosen Behältern durchgeführt worden. Diese Tanks bzw. Tankabschnitte sind nicht in der Lage, Innendrücken in der Größenordnung der sich auf Basis von Ethylen/Luft-Explosionen ergebenden Explosionsdrücke von 8,9 bar oder mehr zu widerstehen.

Hieraus leitet sich ab, daß es sich bei Tanks, die explosionsdruckstoßfeste Bauweise gewährleisten sollen, immer um Drucktanks handeln muß.

Wegen der in bezug auf Explosionen nicht optimalen Gestaltung üblicher Tanks, sind -obwohl das Reaktionsinitial (Flammenstrahlzündung, leicht angehobener Ausgangsdruck) dies bei ideal-kubischen Behältern hervorrufen könnte - keine Explosionsdrücke und -heftigkeiten zu verzeichnen, die wesentlich von den zu erwartenden, berechenbaren Werten abweichen.

Aufgrund der Unwägbarkeiten bei der Durchführung von Explosionsversuchen und des kaum vorhersehbaren Verhaltens von Realtanks und ihrer Komponenten bei Explosionen im Tankinneren, werden die nach Rechtsvorschrift (TRT 006-alt) erforderlichen Drücke und Explosionsheftigkeiten oftmals sogar nicht erreicht. Eine Bewertung, ob eine Tankkonstruktion als explosionsdruckstoßfest anzusehen ist oder nicht, kann daher aus dem Ergebnis eines Explosionsversuches al-

lein meist nicht getroffen werden. Mit Hilfe von Spannungsbewertungen auf der Grundlage von Dehnungsmessungen bei den Explosionsversuchen, wie sie in Abschnitt 8.2. beschrieben sind, ist jedoch eine vollständige Bewertung möglich.

8.1.2. Ersetzensgleiche Wasserdruckprüfung

Der versuchstechnische Aufwand zur Durchführung von Explosionsversuchen ist relativ hoch und es sind umfangreiche Sicherheitsvorkehrungen zu treffen. Falls die Geschwindigkeit der Tankverformungen genügend klein wäre (quasistatisch), könnte unter Umständen die Möglichkeit aufgezeigt werden, Explosionsdruckstoßversuche durch Wasserdruckversuche zu ersetzen. Um hierüber Aufschluß zu gewinnen, wurden verschiedene Tanks und Tankabschnitte, die zuvor einem Explosionsversuch unterzogen worden waren und diese bestanden hatten, einem Wasserdruckversuch unterzogen. Aus versuchstechnischen Gründen konnte lediglich das Ergebnis des Versuches Nr. 30 für eine derartige Betrachtung verwendet werden.

Da Einbauten bei Wasserdruckversuchen keinen Einfluß auf die Druckhöhe haben, konnte ein Tankabschnitt verwendet werden, der mit einer Schwallwand und einem Trennboden (Zwischenboden) ausgestattet war. Der gekröpfte, zylindrische Tankabschnitt ist in Bild 8.1 und 8.2 dargestellt und wesentliche technische Daten können den Tabellen 6.1 bis 6.3 entnommen werden.



Bild 8.1: Versuchstank vor dem Wasserdruckversuch

Der Tankabschnitt war nach den in Abschnitt 4. genannten Kriterien mit der dort ebenfalls beschriebenen Versuchsanordnung zweimal auf Explosionsdruckstoßfestigkeit geprüft worden und hatte die Versuche bestanden. Nach diesen Versuchen wurde im ungestörten Zylinderbereich eine bleibende Gesamtdehnung in Umfangsrichtung in Höhe von $\epsilon_{x1} = 0,0125$ gemessen.

Der Innendruck im Tank wurde während des Versuches langsam gesteigert. Das erste Versagensmerkmal trat bei 13 bar und 8 % Tankmanteldehnung auf. Der angeschweißte Kragen der Tankschwallwand im Inneren des Tanks riß vom Tankmantel ab. Registriert wurde dieses Versagen durch austretendes Wasser aus den Belüftungsöffnungen des Raumes zwischen

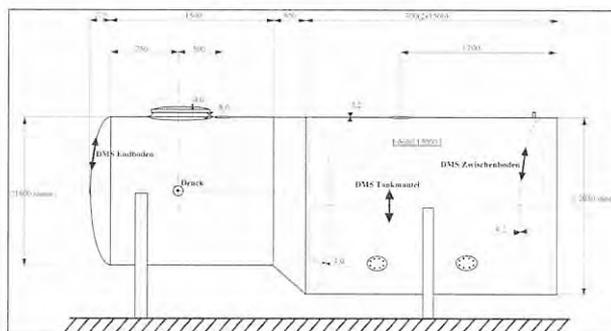


Bild 8.2: Abmessungen und Instrumentierung des Versuchstanks

Schwallwand und dem diese stabilisierenden Stützkragen. Ein derartiges Versagen hätte unter Betriebsbedingungen noch keine Freisetzung von Gefahrgut nach außen zur Folge gehabt, da sich die Belüftungsöffnung im Tankscheitel befand. Nach dem Abdichten der Belüftungsöffnungen wurde der Versuch fortgesetzt. Das zweite Versagensmerkmal trat bei 15,5 bar Tankinnendruck und 11 % Manteldehnung auf. Es kam zu einem Tankmantelriß im Bereich einer Flanschschweißnaht (Bild 8.3).



Bild 8.3: Tankversagen im Flanschbereich bei 15,5 bar

Den über der Zeit aufgetretenen Dehnungsverlauf im ungestörten Zylinderbereich zeigt Bild 8.4.

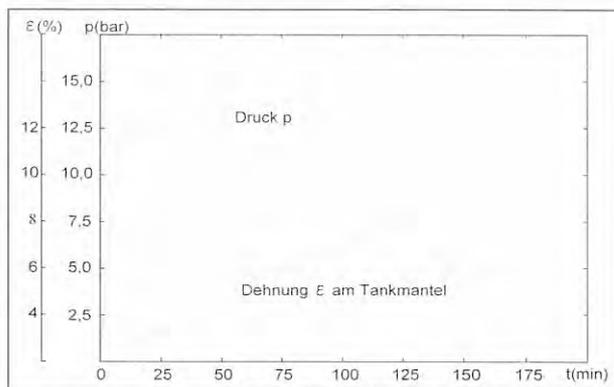


Bild 8.4: Zeitliche Darstellung des Druck- und Dehnungsverlaufs

Aus der Darstellung ist ersichtlich, daß sich das Material der Tankwandung in seinem Fließbereich befand, geringe Drucksteigerungen hatte eine hohe Dehnung zur Folge.

Die Dehnungen des Zwischen- und Endbodens lagen dagegen in einem unkritischeren Bereich.

Bild 8.5 zeigt den Tank nach dem Versuch.



Bild 8.5: Tank nach dem Innendruckversuch (15,5 bar/11 % Manteldehnung)

8.2. Reale Transporttanks ohne Einbauten - analytische Betrachtung

Auf der Basis durchgeführter Versuche zur Explosionsdruckstoßfestigkeit - insbesondere mit realen Transporttanks bzw. repräsentativen Transporttankabschnitten - kann definiert werden, welche Tanks aufgrund der erzielten Ergebnisse unabhängig von der nach Vorschriften ebenfalls möglichen Berechnung als explosionsdruckstoßfest anzusehen sind. Ergänzend hierzu kann überprüft werden, ob (dynamische) Explosionsversuche durch (quasistatische) Wasserdruckversuche ersetzt werden können.

Ausgangspunkt einer derartigen Betrachtung ist die Bewertung von Versuchsergebnissen (Druck- und Dehnungsmessungen) in bezug auf die in den unge-

Explosionsdruckstoßversuche

Ungestörter Zylinderbereich											
Vers. Nr.	Druck (gem.)		Dehnungen (gemessen)								Druck (ber.)
	Nr. der Meßstelle	p _{ex gem.} [bar]	Nr. der Meßstelle	ε _{x ges}	ε _{xe}	ε _{xp}	Nr. der Meßstelle	ε _{y ges}	ε _{ye}	ε _{yp}	
1	-	-	2 (außen)	0,00085	0,00085	-	2 (außen)	0,00025	0,00025	-	9,0
3	11	>10,3 *	5	0,0127	0,0019	0,0108	4,2	0,0015	0,0015	-	11,4
5	4	10,3	8	0,0093	0,003	0,0063	9	< 0,0030	< 0,0030	-	10,6
21	4	9,1	8, 18	0,0157	0,0096	0,0061	7, 17	0,0013	0,0007	0,0006	9,2

* Druckaufnehmer bei 10,3 bar ausgefallen

Krempenbereich des Endbodens											
Vers. Nr.	Druck (gem.)		Dehnungen (gemessen)								Druck (ber.)
	Nr. der Meßstelle	p _{ex gem.} [bar]	Nr. der Meßstelle	ε _{x ges}	ε _{xe}	ε _{xp}	Nr. der Meßstelle	ε _{y ges}	ε _{ye}	ε _{yp}	
1	Nähe Nr. 10 (Wanddicke)	10,4	3 (innen)	0,0062	0,0016	0,0046	3 (innen)	0,0041	0,0016	0,0025	10,4

Wasserdruckversuch

Ungestörter Zylinderbereich											
Vers. Nr.	Druck (gem.)		Dehnungen (gemessen bzw. aus Messungen bestimmt)								Druck (ber.)
	Nr. der Meßstelle	p _{ex gem.} [bar]	Nr. der Meßstelle	ε _{x ges}	ε _{xe}	ε _{xp}	Nr. der Meßstelle	ε _{y ges}	ε _{ye}	ε _{yp}	
30	-	15,5	-(Zyl.)	-	-	0,123	-(Zyl.)	-	-	0,029	14,8

Tabelle 8.2: Versuche mit realen Transporttanks - Gemessene und aus gemessenen Dehnungen errechnete Drücke als Teil der Spannungsbewertung

störten Bereichen der zylindrischen Teile der Tanks bzw. Tankabschnitte und der Böden herrschenden Spannungen (Spannungsbewertung). Als ungestörte Bereiche der zylindrischen Teile der Tanks und der Böden gelten die Bereiche, die sich in genügender Entfernung von Verformungen behindernden „Störstellen“ wie Schweißnähten, Wanddickenänderungen, Ausschnitten usw. befinden. Anschließend kann die Übertragbarkeit der aus Versuchen an einzelnen Tanks gewonnenen Ergebnisse auf Tanks gleicher oder ähnlicher Bauart geprüft und eine Generalisierung im Sinne einer allgemeinen Werkstoffbewertung für zylindrische Teile und Böden von Tanks versucht werden.

Die für eine Spannungsbewertung herangezogenen Meßergebnisse sind in der nachfolgenden Tabelle 8.2 aufgeführt.

8.2.1. Explosionsversuche - Spannungsbewertung

8.2.1.1. Ungestörte Zylinderbereiche bei elastischer Verformung

Für diese Betrachtung wurde der Versuch Nr. 1 (s. Tabelle 8.2) herangezogen.

In diesem Fall kann auf die Grundlagen der Elastizitätstheorie zurückgegriffen werden [77, 78].

Das Hooke'sche Gesetz für den Zylinderbereich lautet für einen mehrachsigen Spannungszustand

$$\epsilon_x = \frac{1}{E} [\sigma_x - \nu (\sigma_y + \sigma_z)] \quad (1),$$

$$\epsilon_y = \frac{1}{E} [\sigma_y - \nu (\sigma_z + \sigma_x)] \quad (2),$$

$$\varepsilon_z = \frac{1}{E} [\sigma_z - \nu (\sigma_x + \sigma_y)] \quad (3)$$

mit

$\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$ = elastische Dehnungen in den Hauptspannungsrichtungen,
 E = Elastizitätsmodul,
 $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ = Hauptspannungen,
 ν = Querkontraktion.

Für den dünnwandigen Hohlzylinder lassen sich folgende Vereinfachungen treffen (Membranspannungstheorie)

$$\sigma_y = \frac{1}{2} \sigma_x,$$

$$\sigma_z = 0.$$

Mit den vorstehenden Vereinfachungen und den bekannten Werten ν für Querkontraktion und Elastizitätsmodul E für Stahlwerkstoffe

$$\nu = 0,3$$

und

$$E = 206.000 \text{ N/mm}^2$$

ergibt sich

$$\varepsilon_x = \frac{1}{E} (\sigma_x - \nu \sigma_y) = \frac{1}{E} (\sigma_x - 0,15 \sigma_x),$$

also

$$\varepsilon_x = \frac{0,85}{E} \cdot \sigma_x \quad (4)$$

bzw.

$$\sigma_x = \frac{E \cdot \varepsilon}{0,85} \quad (5)$$

Mit der gemessenen (elastischen) Dehnung in Umfangsrichtung (x-Richtung) des ungestörten zylindrischen Bereichs zum Versuch Nr. 1 (s. Tabelle 8.2)

$$\varepsilon_{xgem.} = 0,085 \cdot 10^{-2}$$

folgt

$$\sigma_x = 205 \text{ N/mm}^2.$$

Nach der Kesselformel für den Innendruck an der Stelle, an der gemessen wurde

$$p = \frac{20 \cdot e \cdot \sigma_x \cdot \nu}{D_a} \quad (6),$$

wobei

p = Tankinnendruck [bar],
 e = Wanddicke [mm],
 σ_x = Spannung in Umfangsrichtung [N/mm²],
 ν = Schweißnahtfaktor (Schweißnahtwertigkeit)
 D_a = Außendurchmesser des Tanks [mm],

folgt mit

$$e = 5,7 \text{ mm}$$

und

$$D_a = 2600 \text{ mm}$$

sowie

$$\nu = 1$$

also der aus gemessenen Dehnungen berechnete Druck

$$p_{ex\text{ber}} = 9,0 \text{ bar}$$

Dieser Wert dürfte mit guter Näherung dem an der Meßstelle für die Dehnungen zu erwartenden Druck entsprechen.

Nach der Gestaltänderungsenergiehypothese (v. Misesches Fließkriterium) läßt sich bei mehrachsigen Spannungszuständen eine auf den einachsigen Spannungszustand reduzierte Vergleichsspannung angeben

$$2\sigma_v^2 = (\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 \quad (7).$$

Unter der bereits erwähnten Randbedingung

$$\sigma_z = 0$$

ergibt sich

$$\sigma_v = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 - \sigma_x \sigma_y} \quad (8).$$

Hiermit wird besagt, daß Verformen (Fließen) eines metallischen Körpers (in diesem Fall des Mantels eines dünnwandigen Tanks) zu erwarten steht, wenn der Vergleichsspannungswert σ_v den Festigkeitskennwert des Werkstoffes - die Fließ- bzw. Streckgrenze - erreicht hat.

Mit

$$\sigma_y = \frac{1}{2} \sigma_x$$

folgt hieraus

$$\sigma_v = \frac{\sqrt{3}}{2} \sigma_x \quad (9)$$

bzw.

$$\sigma_x = \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_v \quad (10).$$

Die für die Berechnung der Wanddicke maßgebende höchstzulässige Spannung in Umfangsrichtung (x-Richtung) kann also um den Faktor $2/\sqrt{3}$ größer angenommen werden als es der Vergleichsspannung und damit der im einachsigen Zugversuch ermittelten Zugspannung bzw. dem Festigkeitskennwert R_e entspricht.

Der Vergleichsspannung entsprechend läßt sich eine Vergleichsdehnung angeben:

$$\varepsilon_v = \frac{\sigma_v}{E} \quad (11)$$

Auf die Bestimmungsmöglichkeit der einachsigen Vergleichsdehnung unter Zuhilfenahme entsprechender Dehnungsmessungen aus

$$\varepsilon_v = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\varepsilon_x - \varepsilon_y)^2 + (\varepsilon_y - \varepsilon_z)^2 + (\varepsilon_z - \varepsilon_x)^2} \quad (12)$$

sei nur aus Vollständigkeitsgründen hingewiesen.

Mit der für den Tankwerkstoff des zylindrischen Bereichs des Tanks, der der Explosionsdruckstoßprüfung Vers. Nr. 1 unterzogen wurde (s. Tabelle 8.2), im Zugversuch ermittelten Streckgrenze

$$\sigma_{zul} \leq \frac{R_c}{1,0} = \sigma_v = 330 \text{ N / mm}^2$$

ergibt sich

$$\sigma_v \leq \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \sigma_v = 380 \text{ N / mm}^2.$$

Wird dieser Wert in Gleichung (6) eingesetzt, folgt somit

$$p_{ex} = 17,7 \text{ bar},$$

d.h. der maximal „verträgliche“ Explosionsüberdruck des als Versuch Nr. 1 (s. Tabelle 8.2) geprüften Tanks bis zu dessen Erreichen bleibende Verformungen des zylindrischen Teils des Tanks ausgeschlossen werden können. Es läßt sich abschließend also feststellen, daß der geprüfte (Einzel-)Tank (unter Zugrundelegung der für den Mantelwerkstoff St 37-2 ermittelten hohen Streckgrenze $R_e = 330 \text{ N/mm}^2$) in seinem zylindrischen Bereich sicher als explosionsdruckstoßfest bzw. sogar explosionsdruckfest zu bezeichnen ist.

8.2.1.2. Ungestörte Zylinderbereiche bei plastischer Verformung

Die Grundlage für die folgende Betrachtung wurde durch die Versuche Nr. 3, 5 und 21 (s. Tabelle 8.2) gegeben. Im plastischen Bereich der Verformung metallischer Werkstoffe lassen sich für Zugbeanspruchungen (Hauptspannungen) analoge Gleichungen zum Hook'schen Gesetz der Elastizitätstheorie, das Gesetz von Hencky [79], angeben

$$\varepsilon_{xp} = \frac{1}{3 G_p} \left(\sigma_x - \frac{\sigma_y + \sigma_z}{2} \right) \quad (13),$$

$$\varepsilon_{yp} = \frac{1}{3 G_p} \left(\sigma_y - \frac{\sigma_x + \sigma_z}{2} \right) \quad (14),$$

$$\varepsilon_{zp} = \frac{1}{3 G_p} \left(\sigma_z - \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} \right) \quad (15).$$

Mit der Vereinfachung (Membranspannungszustand)

$$\sigma_z = 0$$

ergeben sich

$$\varepsilon_{xp} = \frac{1}{3 G_p} \left(\sigma_x - \frac{\sigma_y}{2} \right) \quad (16)$$

und

$$\varepsilon_{yp} = \frac{1}{3 G_p} \left(\sigma_y - \frac{\sigma_x}{2} \right) \quad (17)$$

mit

$\varepsilon_{xp}, \varepsilon_{yp}, \varepsilon_{zp}$ = plastische Dehnungen in den Hauptspannungsrichtungen,
 G_p = (variabler) Plastizitätsmodul,
 $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ = Hauptspannungen.

Durch Umformung und Kombination von (16) und (17) folgt

$$\sigma_x = G_p (4 \varepsilon_{xp} + 2 \varepsilon_{yp}) \quad (18)$$

und

$$\sigma_y = G_p (2 \varepsilon_{xp} + 4 \varepsilon_{yp}) \quad (19).$$

Zur Bestimmung des Plastizitätsmoduls G_p kann wie folgt vorgegangen werden:

Aus der Forderung nach Volumenkonstanz für Formänderungen bei plastischer Verformung (Volumendilatation) ergibt sich

$$\phi_x + \phi_y + \phi_z = 0 \quad (20)$$

mit $\phi_x + \phi_y + \phi_z$ = Formänderungen in den Hauptspannungsrichtungen, wobei

$$\phi = \ln(1 + \varepsilon_p) \quad (21)$$

ist [80].

Liegen beispielsweise Meßwerte für die Dehnungen in den Hauptspannungsrichtungen x und y für den ungestörten Tankmantelbereich vor, können die bleibenden Dehnungen ermittelt werden, da

$$\varepsilon_{ges.} = \varepsilon_e + \varepsilon_p$$

mit

$\varepsilon_{ges.}$ = Gesamtdéhnung,
 ε_e = elastische Déhnung,
 ε_p = plastische Déhnung

bzw.

$$\varepsilon_p = \varepsilon_{ges.} - \varepsilon_e \quad (22).$$

Die elastische Déhnung läßt sich hierbei aus

$$\varepsilon_e = \frac{\sigma}{E} = \frac{R_c}{E} \quad (23),$$

also aus im Zugversuch festgestellter Streckgrenze und Elastizitätsmodul errechnen.

Aus (20) folgt

$$\phi_z = -(\phi_x + \phi_y) \quad (24)$$

Es läßt sich eine auf den einachsigen Spannungszustand bezogene Vergleichsformänderung angeben [81]

$$\phi_v = \sqrt{\frac{2}{3}(\phi_x^2 + \phi_y^2 + \phi_z^2)} \quad (25)$$

Da die Formänderungen nunmehr bekannt sind, läßt sich ϕ_v der Größe nach ermitteln und weil nach (20)

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

ergibt sich eine Vergleichsdehnung

$$\varepsilon_{vp} = e^{\phi_v} - 1 \quad (26)$$

Aus dem mit dem Zugversuch ermittelten Spannungs-Dehnungs-Diagramm für den Tankmantelwerkstoff läßt sich mit ε_{vp} die zugehörige Vergleichsspannung σ_v berechnen.

Der bereits erwähnte Plastizitätsmodul G_p ergibt sich nach Hencky dann zu

$$G_p = \frac{1}{3} \frac{\sigma_v}{\varepsilon_{vp}} \quad (27)$$

und bei bekannten Dehnungen ε_{xp} und ε_{yp} läßt sich unter Zuhilfenahme von (18) die Spannung σ_x berechnen.

Anhand der ermittelten Werte von σ_x und σ_v läßt sich nunmehr bewerten, ob der betrachtete zylindrische (Mantel-)Teil des Versuchstanks als explosionsdruckstoßfest gelten kann. Ferner kann mit (6) der Druck berechnet werden, der an der Stelle der Dehnungsmessungen während des Versuchs geherrscht hat, und es läßt sich ein Vergleich mit dem Ergebnis der direkten Druckmessung ziehen.

Die vorstehend geschilderte Vorgehensweise soll anhand verschiedener Beispiele erläutert werden.

a) Versuch Nr. 3, Tabelle 8.2

Bei diesem Versuch wurden an den Meßstellen 5 und 4.2 im ungestörten zylindrischen Bereich folgende bleibende Dehnungen ermittelt:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{xp} &= 0,0108, \\ \varepsilon_{yp} &= 0. \end{aligned}$$

Wegen der Volumenkonstanz bei der Verformung (Volumendilatation) ergibt sich

$$\varepsilon_{zp} = -0,0108.$$

Aus (25) folgt nunmehr die Vergleichsformänderung

$$\phi_v = 320 \text{ N/mm}^2$$

und mit (26) die Vergleichsdehnung

$$\varepsilon_{vp} = 0,0125.$$

Dem Spannungs-Dehnungs-Diagramm für den Tankmantelwerkstoff kann die zugehörige Vergleichsspannung entnommen werden:

$$\sigma_v = 320 \text{ N/mm}^2.$$

Entsprechend (27) wird der Plastizitätsmodul zu

$$G_p = 8533 \text{ N/mm}^2$$

und die Spannung in Umfangsrichtung zu

$$\sigma_x = 369 \text{ N/mm}^2$$

bestimmt.

Unter Verwendung von (6) ist es nunmehr möglich, daß an der Meßstelle für die Dehnungen herrschenden Druck (Explosionsdruck) zu berechnen:

$$p_{ex\ ber} = 11,4 \text{ bar.}$$

Auf die mit einem Druckaufnehmer vorgenommene Druckmessung an der Meßstelle 11 kann bedauerlicherweise nur bedingt zurückgegriffen werden, da der Druckaufnehmer bei Erreichen eines Wertes von $p = 10,3 \text{ bar}$ ausfiel, somit also nur ausgesagt werden kann, daß der direkt gemessene Druck

$$p_{ex\ gem} > 10,3 \text{ bar.}$$

Dessen ungeachtet ergibt sich der Tendenz nach Übereinstimmung zwischen dem aus Dehnungsmessungen ermitteltem und dem direkt gemessenen Druck.

Entsprechend der vorgesehenen kleinsten betriebsmäßig freien Öffnung mit einem Durchmesser

$$D \leq 50 \text{ mm}$$

ist von einem theoretisch zu erwartenden Explosionsdruck in Höhe von

$$p_{ex} = 10,5 \text{ bar}$$

auszugehen (vgl. TRT 006-alt [48]). Für den geprüften Einzeltank ergibt sich bei diesem Druck unter Verwendung von (6) eine erforderliche Spannung

$$\sigma_{ert} = 340 \text{ N/mm}^2.$$

Ausgehend von der für den Zylindermantelwerkstoff ermittelten Zugfestigkeit

$$R_m = 598 \text{ N/mm}^2$$

berechnet sich die zulässige Spannung nach TRT 006 [50]

$$\sigma_{zul} \leq \frac{R_m}{1,3}$$

$$\leq 460 \text{ N/mm}^2.$$

Da die erforderliche deutlich kleiner als die zulässige Spannung ist, kann der geprüfte Tank bezüglich seines Zylindermantels als uneingeschränkt explosionsdruckstoßfest bezeichnet werden; Der Zylinder weist eine Sicherheit von $S = 1,76$ gegenüber der Zugfestigkeit auf, also deutlich mehr als $S = 1,3$ (wie nach TRT 006 mindestens gefordert).

b) Versuch Nr. 5, Tabelle 8.2

Bei diesem Versuch wurden an den Meßstellen 8 und 9 im ungestörten zylindrischen Bereich folgende bleibende Dehnungen ermittelt:

$$\varepsilon_{xp} = 0,0063,$$

$$\varepsilon_{yp} = 0.$$

Wegen der Volumenkonstanz bei der Verformung ergibt sich

$$\varepsilon_{zp} = -0,0063.$$

Aus (25) folgt die Vergleichsformänderung

$$\phi_v = 0,0073$$

und damit aus (26) die Vergleichsdehnung

$$\varepsilon_{vp} = 0,0073.$$

Dem Spannungs-Dehnungs-Diagramm für den Tankmantelwerkstoff kann somit die zugehörige Vergleichsspannung entnommen werden:

$$\phi_v = 307 \text{ N/mm}^2.$$

Aus (27) folgt nunmehr für den Plastizitätsmodul

$$G_p = 14018 \text{ N/mm}^2$$

und es ergibt sich daraus mit (18) für die Spannung in Umfangsrichtung

$$\sigma_x = 3535 \text{ N/mm}^2.$$

Unter Verwendung von (6) kann jetzt der bei der Explosion an den Meßstellen 8 und 9 für die Dehnungen herrschende Explosionsdruck berechnet werden:

$$p_{ex.ber} = 10,6 \text{ bar}.$$

Ein Vergleich mit dem an der Meßstelle 4 direkt gemessenen Druck ($p_{ex.ber} = 10,3 \text{ bar}$) ergibt somit gute Übereinstimmung. Entsprechend einer kleinsten betriebsmäßig freien Öffnung mit einem Durchmesser

$$D \leq 80 \text{ mm}$$

ist von einem theoretisch zu erwartenden Explosionsdruck in Höhe von

$$p_{ex} = 11 \text{ bar}$$

auszugehen (s. TRT 006 - alt [48]). Für den geprüften Einzeltank ergibt sich bei diesem Druck unter Anwendung von (6) eine erforderliche Spannung

$$\sigma_{erf} = 368 \text{ N/mm}^2.$$

Der Zylindermantelwerkstoff weist eine Zugfestigkeit

$$R_m = 615 \text{ N/mm}^2$$

auf.

Damit berechnet sich die zulässige Spannung mit TRT 006

$$\sigma_{zul} \leq \frac{R_m}{1,3}$$

$$\leq 473 \text{ N/mm}^2.$$

Die erforderliche Spannung ist deutlich kleiner als die zulässige Spannung und somit kann der geprüfte Tank hinsichtlich seines Zylindermantels als uneingeschränkt explosionsdruckstoßfest bezeichnet werden; Der Zylinder weist eine Sicherheit von $S = 1,67$ gegenüber der Zugfestigkeit auf, also deutlich mehr als $S = 1,3$ wie nach TRT 006 [50] mindestens gefordert wird.

c) Versuch Nr. 21, Tabelle 8.2

Ausgehend von gemessenen bleibenden Dehnungen

$$\varepsilon_{xp} = 0,0061$$

und

$$\varepsilon_{yp} = 0,0009$$

an den Meßstellen 8, 18, 7 und 17 kann eine Vergleichsspannung

$$\varepsilon_{vp} = 0,0076$$

ermittelt werden. Durch lineare Interpolation zwi-

schen den Proportionalgrenzen des verwendeten Werkstoffes

$$R_{p0,2} = 297 \text{ N/mm}^2$$

mit $\varepsilon_{vp0,2} = 0,002$

und $R_{p1,0} = 322 \text{ N/mm}^2$

mit $\varepsilon_{vp1,0} = 0,01$

ergibt sich daraus eine Vergleichsspannung,

$$\sigma_v = 315 \text{ N/mm}^2,$$

da ein Spannungs-Dehnungs-Diagramm für den Werkstoff des Zylindermantels nicht aufgenommen wurde.

Obwohl der Werkstoff im Bereich der Dehnungen zwischen $\varepsilon_{p0,2}$ und $\varepsilon_{p1,0}$ dem Hookschen Gesetz ($\sigma = E \cdot \varepsilon$) nicht mehr vollständig linear folgt, dürfen sich die Abweichungen in vertretbar engen Grenzen halten, so daß die Ermittlung von σ_v auf die beschriebene Weise hinreichend genau erfolgt.

Der Plastizitätsmodul G_p berechnet sich auf dieser Grundlage zu

$$G_p = 13816 \text{ N/mm}^2$$

und für die Spannung in Umfangsrichtung folgt

$$\sigma_x = 362 \text{ N/mm}^2.$$

Der an den Meßstellen für die genannten Dehnungen herrschende Druck berechnet sich zu

$$p_{\text{ex ber}} = 9,2 \text{ bar}$$

Ein Vergleich mit dem an der Meßstelle 4 tatsächlich gemessenen Druck in Höhe von

$$p_{\text{ex gem}} = 9,1 \text{ bar}$$

zeigt Übereinstimmung der Druckwerte.

Ausgehend von einem theoretisch zugrunde zu liegenden Explosionsdruck

$$p_{\text{ex}} = 11 \text{ bar}$$

wird die erforderliche Spannung

$$\sigma_{\text{erf}} = 431 \text{ N/mm}^2.$$

Da die ermittelte Streckgrenze einen Wert von

$$R_m = 607 \text{ N/mm}^2$$

aufweist folgt für die zulässige Spannung

$$\sigma_{\text{zul}} \leq \frac{R_m}{1,3} \\ \leq 467 \text{ N/mm}^2.$$

Wegen $\sigma_{\text{erf}} < \sigma_{\text{zul}}$ kann der geprüfte Tank als explosionsdruckstoßfest bezeichnet werden, wobei die Sicherheit gegen Streckgrenze im vorliegenden Fall $S = 1,41$, also größer als $S = 1,3$ wie nach TRT 006 [50] gefordert.

8.2.1.3. Krepfenbereiche von Böden bei plastischer Verformung

Die grundsätzliche Vorgehensweise unterscheidet sich zunächst nicht von der anhand dreier Beispiele im vorhergehenden Abschnitt erläuterten Vorgehensweise, die im vorliegenden Fall wiederum am Beispiel des Versuchs Nr. 1 (nunmehr für den Krepfenbereich) erläutert werden soll.

An der Meßstelle 3 wurden folgende bleibenden Dehnungen ermittelt:

$$\varepsilon_{xp} = 0,0046$$

und

$$\varepsilon_{yp} = 0,0025.$$

Auf die bereits mehrfach geschilderte Art und Weise läßt sich hieraus eine Vergleichsdehnung

$$\varepsilon_{vp} = 0,00725$$

errechnen, mit der sich aus dem Spannungs-Dehnungs-Diagramm des verwendeten Werkstoffes St 37-2 eine Vergleichsspannung

$$\sigma_v = 330 \text{ N/mm}^2,$$

ergibt (in etwa der ermittelten Streckgrenze R_e entsprechend).

Mit dem nunmehr erfaßbaren Plastizitätsmodul

$$G_p = 15170 \text{ N/mm}^2$$

ergeben sich in Meridianrichtung

$$\sigma_x = 355 \text{ N/mm}^2.$$

und in Umfangsrichtung

$$\sigma_y = 291 \text{ N/mm}^2.$$

Der der Spannung σ_x entsprechende Innendruck (Explosionsdruck) bemißt sich jedoch wie folgt:

$$p = \frac{40 \cdot \sigma_x \cdot e}{D_a \cdot \beta},$$

da es sich bei den verwendeten sogenannten Klöpperböden um sphärisch gewölbte, mit Übergängen auf die zylindrische Form (Krempen) versehene Tankendböden handelt.

Hierbei ist β ein Berechnungsbeiwert, mit dem Biegebeanspruchungen erfaßt werden, und für den sich nach AD-Merkblatt B 3 [83] für das Verhältnis $e/D_a = 0,00292$ (für $e = 7,6 \text{ mm}$ und $D_a = 2600 \text{ mm}$) ein Wert

$$\beta = 4,0$$

ergibt.

Somit folgt für

$$p_{ex,ber} = 10,4 \text{ bar},$$

also ein aus Dehnungsmessungen errechneter Wert, der in vollständiger Übereinstimmung mit dem in der Nähe der Meßstelle 10 (des Bodenbereichs) gemessenen Explosionsdruckes steht:

$$p_{ex,gem} = 10,4 \text{ bar}.$$

Da die hohen Spannungen in der Krempe vorwiegend auf Biegebeanspruchungen zurückzuführen sind, ist mit einer erhöhten Tragfähigkeit der Krempe bei überelastischer Beanspruchung, die durch eine gleichförmige Zugspannung im beanspruchten Querschnitt hervorgerufen wird, zu rechnen. Bei ansonsten gleichen Randbedingungen können die im Boden durch reine Zugspannung hervorgerufenen maximalen Dehnungen nicht höher sein als die sich im Membranspannungsbereich des Zylinders bei gleicher Innendruckbelastung ergebenden. Die infolge der Biegebeanspruchung hervorgerufenen Verformungen führen im überelastischen Bereich zu einem Spannungsausgleich bzw. zu einer Spannungsbegrenzung, da der Werkstoff in Richtung auf eine spannungsgünstigere Form (Kugel) fließt. Es stellen sich also Verhältnisse ähnlicher Größenordnung ein wie die, die an Störstellen (Schweißnähten usw.) im zylindrischen Bereich auftreten.

8.2.1.4. Mannlochstützen, Tragarme, Aufsattelungen usw.

Mannlochstützen, Tragarme, Aufsattelungen aber auch Flansche, Stützen, Wanddickenänderungen und Schweißnähte wirken als - gleichmäßige (ungestörte) Verformungen behindernde - Störstellen in der Tankschale. In der Umgebung dieser Störstellen ist die Membranspannungstheorie nur bedingt anwendbar, weil dort im allgemeinen Zugbeanspruchungen durch Biegebeanspruchungen überlagert werden. Wenn kein Werkstofffehler vorliegt, wird das explosionsbedingte oder durch Einwirkungen von außen verursachte Tankversagen in der Wärmeinflußzone einer der Schweißnähte seinen Anfang nehmen, da dort ein u.U. starker Wechsel der Verformungseigenschaften gegenüber den normalerweise als günstig einzustufenden Verformungs-

eigenschaften der Basiswerkstoffe des Tankmantels vorliegt. Auswahl und Qualität der Schweißverbindungen und ihre spannungsgünstige Gestaltung spielen in diesem Zusammenhang also eine große Rolle.

Von spannungsgünstigen Gestaltungen abgesehen (z.B. Kehlnähte bei Mantelblechverbindungen und T-Stöße beim Einbau von Schwall- und Trennböden) wird die explosionsbedingte Verformung bis zum Erreichen des Abbruchkriteriums $R_m / 1,3$ - hiernach ist entsprechend TRT 006 bei Berechnungen die 1,3fache Sicherheit gegen Erreichen der Zugfestigkeit vorzusehen - klein genug bleiben, um Biegebeanspruchungen, die an Störstellen zum Versagen des Tankmantels führen können, auszuschließen. Auf die Versagenssicherheit kann durch die Auswahl verformungsfähigerer (duktilerer) Werkstoffe zusätzlich begünstigend eingewirkt werden.

Spannungsbewertungen anhand von Dehnungsmessungen sind für Mannloch-, Tragarm- und Sattelbereiche grundsätzlich möglich. Diese können bei Vorliegen von Ergebnissen von Dehnungsmessungen auf die bereits mehrfach dargestellte Weise für Verformungen im überelastischen Bereich vorgenommen werden (mit $\epsilon_{yp} = 0$ bei Biegung [79]).

Ihre Aussagekraft wird jedoch wesentlich dadurch eingeschränkt, daß nicht genau genug zwischen Zugspannungs- und Biegespannungsanteil unterschieden werden kann und für Dehnungsmessungen der Ort höchster Beanspruchung schwer festzulegen ist. Soweit möglich sollte daher auf Berechnungen (z.B. für Mannlochbereich nach AD-Merkblatt B 9 [84]) unter Anwendung der 1,3fachen Sicherheit gegen den Festigkeitskennwert R_m - wie nach TRT 006 [50] vorgesehen - zurückgegriffen werden.

In Tragarm- und Sattelbereichen ergeben sich zwangsläufig Ungleichmäßigkeiten der Spannungsverteilung. Es ist anzunehmen, daß bei Tankinnenbeanspruchungen durch Explosionen der Tankmantelwerkstoff an diesen Stellen früher zu fließen beginnt als in ungestörten Bereichen des Tanks. Wegen des großen plastischen Formänderungsvermögens üblicher Tankwerkstoffe kann jedoch davon ausgegangen werden, daß durch Fließen zunächst vorhandene Ungleichmäßigkeiten der Spannungsverteilung abgebaut werden und sich eine Sicherheit gegen Versagen (Bruch) ergibt, die der in ungestörten Bereichen vergleichbar ist. Die Richtigkeit dieser Annahme kann durch Untersuchungsergebnisse und Darlegungen zur Stützwirkung in Bereichen inhomogener Spannungsverteilung bei plastischer Beanspruchung als belegt gelten; bei statischer (quasistatischer) Beanspruchung ist die Bruchfestigkeit ausreichend fließfähiger, mit Störstellen versehener Konstruktionen nicht geringer als die ungestört gestalteter Konstruktionen unter gleichen geometrischen Voraussetzungen [82, 85]. Dies bedeutet für die Praxis: Auflagerbereiche (Tragarm-, Sattelbereiche) können von einer expliziten Spannungsbewertung ausge-

nommen werden, wenn ihre konstruktive Gestaltung als spannungsgünstig angenommen werden kann. Das ist immer dann der Fall, wenn Auflagerbereiche denen entsprechen, die an Tanks vorhanden waren, die einem Explosionsversuch unterzogen worden waren.

In von den Abmessungen her kleinen Bereichen, die durch hohe Spannungsgradienten gekennzeichnet sind, ist es schwierig über Dehnungsmessungen Stellen höchster Beanspruchung aufzufinden, also eine quantitativ vollständig zutreffende Spannungsbewertung anhand von Messungen zu erzielen. Es bietet sich daher an, konstruktive Gestaltungen dieser Bereiche auf der Basis von Finite-Element-Rechnungen vorzunehmen und deren Ergebnisse bei Bedarf mit den Ergebnissen einzelner Messungen zu korrelieren, also verifizierende Einzelversuche durchzuführen.

8.2.2. Wasserdruckversuch - Spannungsbewertung für den ungestörten Zylinderbereich bei plastischer Verformung

Der für den Wasserdruckversuch (Versuch Nr. 30, s. Tabelle 8.2) nach Abschnitt 8.1.2. herangezogene Tank war zuvor zwei Explosionsversuchen (s. Versuch Nr. 28 und 29, Tabelle 6.1 bis 6.4) unterzogen worden, was im ungestörten Zylinderbereich zu einer bleibenden Gesamtdehnung in Umfangsrichtung in Höhe von

$$\varepsilon_{x1} = 0,0125$$

geführt hat.

Der Wasserdruckversuch wurde wegen des Versagens der Tankwand bei einem Druck von

$$p_{gem} = 15,5 \text{ bar}$$

abgebrochen. Durch diesen Druck wurde eine bleibende Dehnung in Umfangsrichtung in Höhe von

$$\varepsilon_{x2} = 0,11$$

hervorgerufen, so daß sich eine plastische Gesamtdehnung

$$\varepsilon_{xp} = \varepsilon_{x1} + \varepsilon_{x2} = 0,1225 \approx 0,123$$

ergab (s. Tabelle 8.2).

Dehnungen in Längsrichtung ε_{yp} wurden bei diesem Versuch nicht gemessen. ε_{yp} kann dennoch aus der Zunahme des Umfanges des Tanks infolge der Druckbeanspruchung und der damit verbundenen Dehnung des Zylindermantels in Längsrichtung durch Berechnung der Bogenlänge zwischen den sich nicht plastisch verformenden Störstellen ermittelt werden. Es ergibt sich auf diese Weise ein Wert von

$$\varepsilon_{yp} = 0,029.$$

Mit den nunmehr vorliegenden Werten für ε_{xp} und ε_{yp} läßt sich unter Zuhilfenahme von (20) ϕ_z und daraus

$$\varepsilon_{yp} = 0,166$$

berechnen. Durch lineare Interpolation zwischen den vorliegenden Wertepaaren für

$$R_{p3,0} = 370 \text{ N/mm}^2$$

$$\text{bei } \varepsilon_{vp3,0} = 0,03$$

$$\text{und } R_m = 598 \text{ N/mm}^2$$

$$\text{bei } A_5 = 0,557$$

des verwendeten Werkstoffes - wobei A_5 die gemessene Bruchdehnung ist - ergibt sich daraus (näherungsweise) eine Vergleichsspannung

$$\sigma_v = 429 \text{ N/mm}^2.$$

Der Plastizitätsmodul G_p läßt sich mit (27) nunmehr zu

$$G_p = 861 \text{ N/mm}^2$$

bestimmen.

Mit (18) folgt hieraus die Umfangsspannung

$$\sigma_x = 474 \text{ N/mm}^2.$$

und unter Verwendung der Kesselformel (6) kann der sich aus ermittelten Dehnungen berechnete Wasserdruck

$$p_{ber} = 14,8 \text{ bar}$$

festgelegt werden. Ein Vergleich mit dem direkt gemessenen Druck

$$p_{gem} = 15,5 \text{ bar}$$

ergibt genügend genaue Übereinstimmung eingedenk der Tatsache, daß sich der tatsächliche Wert für die Vergleichsspannung σ_v bei Bestimmung aus dem Spannungs-Dehnungs-Diagramm des Werkstoffes höher ergeben müßte als er sich durch lineare Interpolation - wie zwangsläufig vorgenommen - ergeben hat.

8.2.3. Verallgemeinerung der Versuchsergebnisse an Einzeltanks

8.2.3.1. Übertragbarkeit der an Einzeltanks gewonnenen Versuchsergebnisse auf Tanks gleicher Bauart

Die Übertragbarkeit der Ergebnisse von Explosionsdruckstoßversuchen mit realen Tanks bzw. Tankabschnitten auf Tanks gleicher Bauart soll im folgenden kurz untersucht werden. Im Gegensatz zu tatsächlich geprüften Tanks kann hierbei nicht mehr von den an diesen Tanks ermittelten Festigkeitskennwerten ausgegangen werden, die Betrachtung ist vielmehr auf der Basis von Normmindestwerten für den jeweiligen Werkstoff oder günstigstenfalls auf der Grundlage von Kennwerten, die durch Werksprüfzeugnisse für die eingesetzten Werkstoffe als nachgewiesen gelten können, vorzunehmen. Die Übertragung der Versuchsergebnisse erfolgt zunächst unter Anlegen der Gestaltungsenergiehypothese, der anschließend die Auslegung gemäß TRT 006 [50] gegenübergestellt wird. Der Einfachheit halber wird die Betrachtung für den zylindrischen Teil des als lfd. Nr. 1 geprüften Tanks durchgeführt.

Normmindestwerte für Baustahl St 37-2 - wie beim Bau des geprüften Kesselwagens verwendet - sind

$$R_e = 235 \text{ N/mm}^2,$$

$$R_m = 340 \text{ N/mm}^2.$$

a) Gestaltungsänderungsenergiehypothese

Hierbei ist von einer maximal zulässigen Spannung

$$\sigma_{zul} = \frac{R_e}{1,0} = 235 \text{ N/mm}^2$$

auszugehen. Wie in Abschnitt 6.2.1.1. beschrieben wurde, ist mit (9)

$$\sigma_{zul} \leq \frac{R_e}{1,0} = \sigma_v = \frac{\sqrt{3}}{2} \sigma_x.$$

Hiermit und mit den Abmessungen des untersuchten Kesselwagens

$$e = 5,7 \text{ mm},$$

$$D_a = 2600 \text{ mm}$$

und einem anzunehmenden (tatsächlich nachgewiesenen) Schweißfaktor gemäß AD-Merkblättern

$$v = 0,85,$$

der beim Versuchstank nicht berücksichtigt werden mußte sowie dem gemäß TRT 006-alt [48]

zugrunde zu legenden maximalen Explosionsenddruck in Höhe von

$$p_{ex} = 11 \text{ bar}$$

ergibt sich aus (6)

$$\sigma_x = \frac{p \cdot D_a}{20 \cdot e \cdot v} = 295 \text{ N/mm}^2$$

und damit

$$\sigma_v = 256 \text{ N/mm}^2.$$

Die Vergleichsspannung σ_v beläuft sich also auf einen Wert, der unter den aufgeführten Voraussetzungen über dem Normmindestwert für die Streckgrenze R_e liegt.

b) TRT 006

Betrachtet man die Verhältnisse entsprechend TRT 006 [50] für die Zugfestigkeit R_m und einen Sicherheitsbeiwert $S = 1,3$ ergibt sich als maximal zulässige Spannung

$$\sigma_{zul} = \frac{R_m}{1,3} = \sigma_v = \sigma_x = 262 \text{ N/mm}^2.$$

$\sigma_v = \sigma_x$ stellt eine konservative Ausnahme dar, die jedoch erforderlich ist, da σ_x im rein plastischen Bereich ($R_e < \sigma_v < R_m$) in kein eindeutiges Verhältnis zu σ_v zu bringen ist (Plastizitätsmodul G_p variabel).

Hiervon ausgehend ergibt sich bei $p = 11 \text{ bar}$ als erforderliche Membranspannung

$$\sigma_x = 295 \text{ N/mm}^2,$$

also ein Wert, der über dem für die zulässige Vergleichsspannung liegt.

Als Fazit der vorstehenden Beurteilung läßt sich also die Aussage treffen, daß weder für

$$\sigma_{zul} \leq \frac{R_e}{1,0}$$

bei Anwendung der Gestaltungsenergiehypothese noch für

$$\sigma_{zul} \leq \frac{R_m}{1,3}$$

als Auslegungskriterium für die Bauart der Kesselwagen, von der ein Exemplar im Vers. Nr. 1 geprüft wurde, als explosionsdruckstoßfest anzusehen ist, wenn der Bewertung Normmindestwerte für R_e und R_m und geringer als $v = 1$ bewertete Schweißnähte zugrunde gelegt werden müssen. Auf diese Weise lassen sich sämtliche Bauarten von Tanks, von

denen jeweils ein Muster quasi stellvertretend geprüft wurde, abschließend bewerten.

8.2.3.2. Allgemeine Werkstoffbewertung für Transporttanks

Wie aus den Abschnitten 2., 3. und den bisherigen Darstellungen im Abschnitt 8.2. hervorging, läßt sich eine Bewertung der Explosionsdruckstoßfestigkeit der Bauart eines Tanks - zunächst für den zylindrischen Bereich eines Tanks - auf drei unterschiedliche Arten vornehmen.

1. Es wird mit einfacher Sicherheit gegen die Streckgrenze gerechnet ($R_e/1,0$). Dies führt für den berechneten Bereich zwar zur Explosionsdruckfestigkeit, kann dessen ungeachtet aber bei Werkstoffen, die ein extremes (nach anderen Auslegungskriterien u. U. zu großes) Streckgrenzenverhältnis R_e/R_m aufweisen, zu günstigen Ergebnissen führen.
2. Es wird mit einfacher Sicherheit gegen die Streckgrenze unter Anlegen der Gestaltänderungsenergie-

hypothese gerechnet. Dieser Hypothese liegt die Annahme zugrunde, daß es wegen des Einflusses der Mehrachsigkeit einer jeden Verformung zur „Vergrößerung“ der maximal möglichen Werkstoffanstrengung gegenüber der Betrachtung als (fiktivem) eindimensionalem Spannungs- bzw. Verformungsfall kommt (Stützwirkung der Umgebung). Es konnte auf der Grundlage der durchgeführten Versuche gezeigt werden, daß die Gestaltänderungsenergiehypothese im vorliegenden Fall anwendbar ist.

Eine Berechnung nach vorstehender Methode führt für den betrachteten Bereich ebenfalls zur Explosionsdruckfestigkeit, ist jedoch gegenüber Möglichkeit 3 in Einzelfällen nochmals als günstiger anzunehmen als Berechnungsmöglichkeit 1.

3. Es wird TRT 006 [50] dem Wortlaut nach mit 1,3facher Sicherheit gegen Zugfestigkeit gerechnet ($R_m/1,3$).

In Tabelle 8.3 sind die drei beschriebenen Berechnungsmöglichkeiten für das Beispiel St 37-2 dargestellt.

$\frac{D_a}{e} =$ Druckstufe nach TRT 006	$f\left(\frac{R_e}{1,0}; p_{ex}\right)$	$f\left(\frac{R_e}{1,0}; GE-Hyp.; p_{ex}\right)$ GE-Hyp. = Gestaltänderungsenergiehypothese	$f\left(\frac{R_m}{1,3}; p_{ex}\right)$
	$\sigma_v = \sigma_x$ $\sigma_v = \frac{p_{ex} \cdot D_a}{20 \cdot e \cdot v}$ $\frac{D_a}{e} \cdot p_{ex} = 20 \cdot \sigma_v \cdot v$ $\sigma_v = R_e = 235 \frac{N}{mm^2}$ $v = 0,85$ $\frac{D_a}{e} \cdot p_{ex} = 3995$	$\sigma_v = \frac{\sqrt{3}}{2} \sigma_x$ $\sigma_v = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{p_{ex} \cdot D_a}{20 \cdot e \cdot v}$ $\frac{D_a}{e} \cdot p_{ex} = \frac{40}{\sqrt{3}} \cdot \sigma_v \cdot v$ $\sigma_v = R_e = 235 \frac{N}{mm^2}$ $v = 0,85$ $\frac{D_a}{e} \cdot p_{ex} = 4613$	$\sigma_v = \sigma_x$ $\sigma_v = \frac{p_{ex} \cdot D_a}{20 \cdot e \cdot v}$ $\frac{D_a}{e} \cdot p_{ex} = 20 \cdot \sigma_v \cdot v$ $\sigma_v = \frac{R_m}{1,3} = \frac{340}{1,3} = 262 \frac{N}{mm^2}$ $v = 0,85$ $\frac{D_a}{e} \cdot p_{ex} = 4454$
$p_{ex} = 9,0 \text{ bar}$	$\frac{D_a}{e} = 443,9$	$\frac{D_a}{e} = 512,6$	$\frac{D_a}{e} = 494,9$
$p_{ex} = 10,0 \text{ bar}$	$\frac{D_a}{e} = 399,5$	$\frac{D_a}{e} = 461,3$	$\frac{D_a}{e} = 445,4$
$p_{ex} = 10,5 \text{ bar}$	$\frac{D_a}{e} = 380,5$	$\frac{D_a}{e} = 439,3$	$\frac{D_a}{e} = 424,2$
$p_{ex} = 11,0 \text{ bar}$	$\frac{D_a}{e} = 363,2$	$\frac{D_a}{e} = 419,4$	$\frac{D_a}{e} = 404,9$

Tabelle 8.3: Bestimmung des günstigsten Durchmesser-Wanddickenverhältnisses im Hinblick auf Explosionsdruckstoßfestigkeit für St 37-2

$\frac{D_a}{e} = f\left(\frac{R_e}{10}; \text{GE-Hyp.}; \nu = 0,85; p_{\text{ex}}\right)$ GE-Hyp. = Gestaltänderungsenergiehypothese						Werkstoff	$\frac{D_a}{e} = f\left(\frac{R_m}{1,3}; \nu = 0,85; p_{\text{ex}}\right)$						
$\sigma_v = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \sigma_s = R_c$	$\frac{D_a}{e} \cdot p_{\text{ex}}$	$\frac{D_a}{e} = 19,63 \cdot \frac{\sigma_v}{p_{\text{ex}}}$					R_m	$\sigma_v = \frac{R_m}{1,3}$	$\frac{D_a}{e} \cdot p_{\text{ex}}$	$\frac{D_a}{e} = 17 \cdot \frac{\sigma_v}{p_{\text{ex}}}$			
[N/mm ²]		$p_{\text{ex}} = 9,0$	$p_{\text{ex}} = 10,0$	$p_{\text{ex}} = 10,5$	$p_{\text{ex}} = 11,0$		[N/mm ²]	[N/mm ²]		$p_{\text{ex}} = 9,0$	$p_{\text{ex}} = 10,0$	$p_{\text{ex}} = 10,5$	$p_{\text{ex}} = 11,0$
235	4613	512,3	461,3	439,3	419,4	St 37-2	340	262	4454	494,9	445,4	424,2	404,9
355	6969	774,3	696,6	663,7	633,5	St 52-3	490	377	6409	712,1	640,9	610,4	582,6
265	5202	578,0	520,2	495,4	472,9	H II	410	315	5355	595,0	535,5	510,0	486,8
355	6969	774,3	696,6	663,7	633,5	StE 355	490	377	6409	712,1	640,9	610,4	582,6
460	9030	1003,3	903,0	860,0	820,9	StE 460	560	431	7327	814,1	732,7	697,8	666,1
225	4417	490,8	441,7	420,7	401,5	1.4301	500	385	6545	727,2	654,5	623,3	595
265	5202	578,0	520,2	495,4	472,9	1.4571	500	385	6545	727,2	654,5	623,3	595

Tabelle 8.4: Optimierung des Durchmesser-Wanddickenverhältnisses im Hinblick auf Explosionsdruckstoßfestigkeit des zylindrischen Teils von Tanks aus verschiedenen Werkstoffen; Vergleich von D_a/e als Funktion von $(R_e/1,0)$ unter Anlegen der Gestaltänderungsenergiehypothese mit D_a/e als Funktion von $(R_m/1,3)$

Hieraus läßt sich ersehen, daß sich das „günstigste“ Verhältnis D_a/e (größtmöglicher Außendurchmesser eines Tanks bei vorgegebener Wanddicke) im Hinblick auf Explosionsdruckstoßfestigkeit für St 37-2 bei Berechnung mit einfacher Sicherheit gegen die Streckgrenze unter Anlegen der Gestaltänderungsenergiehypothese ergibt.

Diese Vorgehensweise stellt gegenüber dem in TRT 006 [50] beschriebenen Verfahren eine Modifikation dar, die jedoch wegen theoretischer und experimenteller Bestätigung als gesichert anwendbar bezeichnet werden kann (keine oder sehr geringe Verformungen, da die Fließgrenze des Werkstoffes nicht nennenswert, d.h. nur örtlich überschritten wird). In gleicher Weise werden im folgenden die Verhältnisse D_a/e für verschiedene Werkstoffe nach den verschiedenen Berechnungsmöglichkeiten ermittelt, so daß der jeweils günstigste Wert für die Auslegung von Tanks hinsichtlich Explosionsdruckstoßfestigkeit entnommen werden kann.

Hierbei wird auf die weitere Berücksichtigung der Berechnungsmethode 1 verzichtet, da die Methode 2 bei annähernd gleichen Voraussetzungen immer zu günstigeren Verhältnissen führt. In der Tabelle 8.4 wird demzufolge die für tatsächliche Auslegungen von Tanks anzuwendende optimale Gegenüberstellung des Verhältnisses D_a/e als Funktion von $R_e/1,0$ bei Anlegen der Gestaltänderungsenergiehypothese bzw. $R_m/1,3$ gegeben.

Aus der Tabelle 8.3 folgt, daß das Kriterium $R_m/1,3$ sinnvollerweise nur angewendet werden muß bei Werkstoffen, die ein relativ kleines Streckgrenzenverhältnis aufweisen.

Tabelle 8.4 kann also beispielhaft unmittelbar zur Dimensionierung des ungestörten zylindrischen Bereiches von Tanks herangezogen werden. Die Wanddickenberechnung gegenüber Berechnungsdruck bleibt hiervon selbstverständlich unberührt.

Für die bei Transporttanks üblicherweise verwendeten Korbbojen- oder Klöpperböden ist davon auszugehen, daß bei Berücksichtigung verkehrsrechtlicher Vorschriften und des AD-Regelwerkes Wanddicken erforderlich werden, die implizit Explosionsdruckstoßfestigkeit gewährleisten, wenn dies für die Wanddicken der zylindrischen Teile durch Berechnung auf vorstehend beschriebene Weise nachgewiesen ist und überdies die in Abschnitt 4. bereits angedeuteten und in diesem Abschnitt erläuterten Voraussetzungen eingehalten sind.

Domausführungen von Tanks lassen sich ebenfalls rechnerisch festlegen. Die Berechnung von Domhals-, Domdeckel- und Domverschlußausführungen hat hierbei im wesentlichen auf der Grundlage der AD-Merkblätter B 7 [86] und B 9 [87] zu erfolgen, jedoch immer unter Berücksichtigung eines Festigkeitskennwertes K/S entsprechend $R_m/1,3$ nach TRT 006-alt [48], falls Zug- oder Biegespannungen zu berücksichtigen sind (bzw. durch Ansetzen eines Festigkeitskennwertes K/S entsprechend $R_m/2$, wenn Schubspannungen als vorherrschend angenommen werden müssen).

8.3. Schlußfolgerungen aus Versuchsergebnissen und Spannungsbewertungen von realen Transporttanks

Aus den Versuchsergebnissen für Realtanks bzw. -tankabschnitte ohne Einbauten konnte entnommen werden, daß nur die erwarteten, berechenbaren maximalen Explosionsenddrücke auftraten und schnell - bzw. explosionsartig ablaufende Druckbeanspruchungen, die bezüglich des Tankmaterials zu Dehnungsgeschwindigkeiten (Verformungsgeschwindigkeiten) in der Größenordnung

$$\dot{\varepsilon} < 10^{-1} [1/s]$$

geführt haben, solchen gleichzusetzen gehen, die statisch aufgebracht werden. Die Verhältnisse lassen sich daher für kerbfreie Bereiche von Tanks auf der Grundlage einfacher Berechnungsverfahren der Mechanik für statische bzw. quasistatische Fälle beschreiben und auf Tanks gleicher oder ähnlicher Geometrie - zunächst ohne Einbauten wie Trenn- bzw. Schwallwände - aus üblichen ferritischen und austenitischen Stählen übertragen. Die Grenzen der Übertragbarkeit konnten mit den Explosionsversuchen an Realtanks z.B. hinsichtlich des eventuellen Einflusses des Längen/Durchmesser-Verhältnisses der Tanks nicht vollständig festgelegt werden, unter anderem hierzu waren Versuche mit dem Rezipienten (s. nächster Abschnitt) erforderlich.

Auf der Grundlage der vorstehenden Aussage läßt sich also für Tanks gleicher Geometrie ohne Einbauten ein Explosionsversuch durch einen Wasserdruckversuch ersetzen.

Berechnungen bezüglich der Explosionsdruckstoßfestigkeit von Transporttanks können ohne Einschränkungen nur auf konservative Weise erfolgen, d.h. es ist von einem Festigkeitskennwert

$$\sigma_{zul} \leq R_m / 1,3$$

nach TRT 006 auszugehen.

Für (ungestörte) Zylinderbereiche kann dagegen von einem Berechnungskennwert

$$\sigma_{zul} \leq \frac{2}{\sqrt{3}} R_e \approx 1.155 \cdot R_e$$

ausgegangen werden, der sich bei Anwendung der Gestaltänderungsenergiehypothese ergibt. Dies führt bezüglich der Explosionsdruckstoßfestigkeit bei Werkstoffen, die ein Streckgrenzenverhältnis

$$\frac{R_e}{R_m} > 0,66$$

aufweisen zu günstigeren Durchmesser/Wanddicken-Verhältnissen, d.h. bei vorgegebenen Außendurch-

messern zu kleineren erforderlichen Wanddicken (s. Tabelle 8.4).

Kleinere erforderliche Wanddicken wären weiterhin dann möglich, wenn statt von Normmindestwerten für die Kennwerte R_m bzw. R_e von erhöhten, an den verwendeten Blechen tatsächlich vorhandenen, d.h. ermittelten Kennwerten ausgegangen werden könnte. Hierzu wäre u.U. die Vorlage entsprechender Prüfzeugnisse erforderlich.

Weitere Optimierungen lassen sich durch die bessere Bewertung von Schweißverbindungen, d. h. mit Schweißnahtfaktoren

$$\nu > 0,85,$$

erzielen, wenn der hierfür erforderliche Aufwand nachgewiesen wird.

Eine gesonderte Betrachtung der Bodenbereiche von konzentrischen Endböden z.B. in Klöpper- oder Korb-bogenform kann entfallen, da der Bodenbereich bei Druckbeanspruchungen über die Streck- bzw. Fließgrenze hinaus in Richtung auf eine Halbkugelgestalt, d.h. eine spannungsgünstigere Form als im Zylinderbereich der Tanks vorhanden, zu fließen beginnt, ohne daß der Boden aufreißt. Ebenso werden durch plastische Verformung des Krepfenbereichs die dort herrschenden Spannungsspitzen abgebaut; bezogen auf die Berechnungsgrundlage für Endböden, das AD-Merkblatt B 3 [87], bedeutet dies dem Sinne nach, daß der Berechnungsbeiwert β quasi kleiner wird.

Die vorstehende Aussage stützt sich wie erwähnt auf Versuchsergebnisse. Sie kann jedoch nur unter folgenden Voraussetzungen als vollgültig angesehen werden:

- Für den zylindrischen Teil und die Böden der Tanks muß ein einheitlicher Werkstoff mit vergleichbaren Festigkeitskennwerten verwendet werden.
- Berechnungen des zylindrischen Teils und der Böden von Tanks, für die Explosionsdruckstoßfestigkeit nachgewiesen werden soll, müssen zunächst auf der Basis der AD-Merkblätter B 1 [83] und B 3 [87] für einen Berechnungs- bzw. Prüfüberdruck von wenigsten 4 bar erfolgen.
- Die Wanddicke der Böden darf nicht kleiner sein als die Wanddicke des zylindrischen Teils, die sich aufgrund ihrer Auslegung auf Explosionsdruckstoßfestigkeit größer ergeben kann als nach AD-Merkblatt B 1 [83] für 4 bar Prüfdruck ermittelt. Andere Zuschläge müssen ebenfalls Berücksichtigung finden.
- Zuschläge (Korrosionszuschläge usw.) zur berechneten Wanddicke der zylindrischen Teile der Tanks müssen bei der Bemessung der Wanddicke der Böden (wenn Zylinder- und Bodenwand die gleiche

Dicke aufweisen müssen, siehe c)) ebenfalls Berücksichtigung finden.

Auflagerbereiche können von einer gesonderten Betrachtung ebenfalls ausgenommen werden, wenn ihre konstruktive Gestaltung als spannungsgünstig angenommen werden kann. Dies gilt in allen Fällen als nachgewiesen, in denen Auflagerbereiche (Aufsattelungen, Tragarme) solchen entsprechen, die an Tanks vorhanden waren, die einer Prüfung auf Explosionsdruckstoßfestigkeit mit positivem Ergebnis unterzogen worden waren oder deren Eignung z.B. durch eine Finite-Elemente-Berechnung belegt wird.

Abschließend soll auf die Möglichkeit einer stoffbezogenen Optimierung der für die Explosionsdruckstoßfestigkeit von Transporttanks erforderlichen Wanddicke hingewiesen werden. In Abschnitt 2. und 3. war erläutert worden, daß der maximale Explosionsdruck stoffabhängig, abhängig von seiner Konzentration in Luft und abhängig vom Ausgangsdruck ist, bei dem die Zündung im Tank erfolgt. Jeder entzündbare flüssige bzw. dampfförmig vorliegende Stoff weist unabhängig vom jeweiligen Ausgangsdruck einen bestimmten maximalen Explosionsdruck auf, der auch als stoffbezogener Explosionsdrucksteigerungsfaktor p_{ex0} bezeichnet werden kann, so daß sich der tatsächlich erreichbare maximale Explosionsdruck als Produkt aus stoffbezogenem Explosionsdruck (Steigerungsfaktor) und Ausgangsdruck ergibt $p_{ex} = p_{ex0} \cdot p_a - 1$ wobei p_{ex0} und p_a als absolute Drücke einzusetzen sind.

Es gibt der Literatur [20] folgend keinen hier zu betrachtenden dampf-/gasförmigen Stoff, der ein p_{ex0} von mehr als 10 bar aufweist. Der TRT 006 [50] folgend war daher bei allen bisherigen Betrachtungen als Maximalforderung von einem

$$p_{ex0} = 10 \text{ bar (absolut)}$$

ausgegangen worden. Werden nun Tanks im Hinblick auf Explosionsdruckstoßfestigkeit bewertet, die ausschließlich für die Beförderung von flüssigen (oder gasförmigen) Stoffen bestimmt sind, deren Stoffeigenschaft

$$p_{ex0} < 10 \text{ bar (absolut)}$$

ist, kann dementsprechend von einem geringeren maximalen Explosionsdruck ausgegangen werden, was wiederum zu entsprechend geringerer erforderlicher Wanddicke führt. Entsprechend sind die dieserart ausgelegten Tanks nur noch für bestimmte Stoffe einsetzbar, also nicht mehr universell verwendbar; daher ist von dieser Möglichkeit der Optimierung augenscheinlich auch noch kein Gebrauch gemacht worden.

8.4. Versuche mit dem Versuchstank (Rezipienten)

8.4.1. Erläuterungen und Vorbemerkungen

Nach Abschnitt 4.3. sollten mit dem Versuchstank ohne Einbauten die folgenden Einflußgrößen untersucht werden:

- Zündart (Brennmomentzündung innerhalb des Rezipienten, („druckloser“) Flammeneintritt und Flammenstrahlzündung von außerhalb des Rezipienten),
- Zündort (zentral bzw. mittig, am Rand, außerhalb des Tanks),
- Längen/Durchmesser-Verhältnis,
- Vordruck bzw. Ausgangsdruck und Ethylen-Konzentration

a) Zündart

Als „druckloser“ Flammeneintritt (in den betreffenden Tabellen Flammeneintritt genannt) wurde hierbei der Vorgang bezeichnet, wie er in Abschnitt 7.1. bereits beschrieben wurde: Ausgehend von einem Vordruck im Rezipienten in Höhe von ca. 0,2 bar konnte sich das durch eine Kugelhahnöffnung in die Umgebung des Rezipienten strömende explosive Ethylen-Luft-Gemisch entspannen, wobei es außerhalb des Tankes durch einen Propanbrenner gezündet wurde; bei Vordrücken (Ausgangsdrücken) um 0,025 bar reichte die Flammenfortpflanzungsgeschwindigkeit aus, um gegen das strömende Ethylen-Luft-Gemisch ins Innere des Rezipienten zu gelangen und dort eine Explosion zu initiieren. Der Einfachheit halber ist in den Tabellen der Ausgangsdruck in diesen Fällen mit „0“ (= auf Ausgangsdruck entspannt) bezeichnet worden.

Brennmomentzündungen innerhalb des Tankes wurden bei Ausgangsdrücken in Höhe von 0 und 0,2 bar durchgeführt.

Als „Flammenstrahlzündung“ wird hier die nach TRT 006-alt [48] übliche Zündweise bezeichnet: Ausgehend von Ausgangsdrücken in Höhe von 0 und 0,2 bar fand die Zündung mit einem Brennmomentzünder im Zündgefäß (Zündtopf) statt und die Explosion trat über eine kurze Rohrstrecke als Flammenstrahl ins Innere des Rezipienten ein.

b) Zündort

Als Zündort „zentral“ wird die Anordnung des verwendeten Brennmomentzünders in der Tankachse bezeichnet, wobei diese zentrale Anordnung längs

des Tanks variiert wurde. Die Zündorte der zentralen Zündung sind Bild 8.6 folgend für den aus den Abschnitten A, B und C bestehenden (langen) Rezipienten mit ZZ1 bis ZZ3 bezeichnet (Beispiel: ZZ1 = Zentrale Zündung in Ebene 1 usw.). Für die Betrachtung zentraler Zündungen fand auch die Zündung am Zündort ZB (Zündung Boden) Verwendung, die der Natur der Sache nach zwangsläufig an der Wandung des Rezipienten stattfand.

Zündungen mit dem Brennmomentzündler an der Wandung des Rezipienten (am Rand) sind mit ZW bezeichnet. Je nach Ort der Zündung sind diese mit ZW1 bis ZW3, ZK (Zündung Krempe des Rezipienten) und ZB benannt.

Die Orte der Zündungen mit dem Zündgefäß sowie der Zündungen über Flammeneintritt sind mit Z1 bis Z3 angegeben. Diese letzteren Bezeichnungen treffen auch für den aus den Segmenten A und C bestehenden (kurzen) Rezipienten zu.

c) Längen/Durchmesser-Verhältnis

Das Längen/Durchmesser-Verhältnis wurde durch Einsetzen des Segmentes B in die Anordnung bestehend aus den Segmenten A und C von 3,5 auf 5,9 erhöht.

d) Ausgangsdruck

Der Ausgangsdruck wurde zwischen 0 bis 0,2 bar (entsprechend TRT 006-alt [48]) variiert, wobei der sich bei den Versuchen mit Flammeneintritten ergebende Ausgangsdruck von ca. 0,025 bar in den Tabellen zur Vereinfachung aus dem in Abschnitt 7.1.4. genannten Grund gleich 0 bar gesetzt wurde.

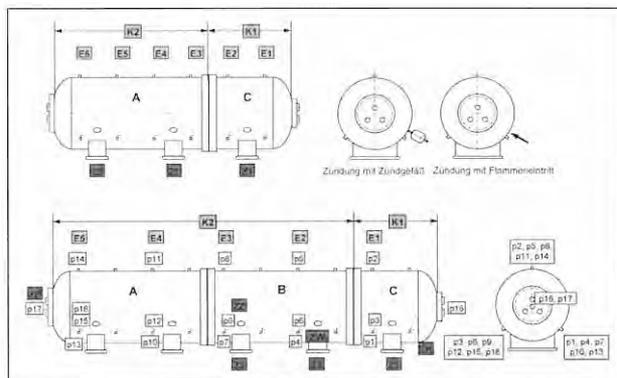


Bild 8.6: Tanksegmente, Tankkammern, Zündorte, Meßstellen und Einzelmeßstellen

Beim kurzen Rezipienten sind die Ebenen, in denen zumindest bei manchen Versuchen über den Umfang des Rezipienten um 120° versetzt Druckaufnehmer angeordnet waren, mit E1 bis E6 angegeben. Die Bezeichnung der entsprechenden Ebenen beim langen Rezipienten läuft von E1 bis E5; hier waren auch die einzelnen Druckaufnehmer bei allen Versuchen gleichartig angeordnet und dementsprechend gleichartig benannt (p1 bis p18).

In Tabelle 6.6 und den nachfolgenden Auszügen aus dieser Tabelle sind die Angaben zum Explosionsdruck, zur maximalen Druckanstiegsgeschwindigkeit und zur Explosionsheftigkeit Durchschnittsangaben über alle diesbezüglichen Meßwerte. Details können dem Anhang II entnommen werden, in dem die Einzelversuche eingehender beschrieben sind.

8.4.1. Beschreibung der durchgeführten Versuche

Mit dem Versuchstank wurden insgesamt 56 Versuche durchgeführt, 48 davon mit dem Tank ohne Einbauten (s. Tabellen 6.5 und 6.6).

Von diesen 48 Versuchen wurden 11 mit dem kurzen (bestehend aus den Segmenten A und C) und 37 mit dem langen Rezipienten (bestehend aus den Segmenten A, B und C) absolviert.

Variiert wurden die in Abschnitt 8.4.1. unter a) bis d) aufgeführten Parameter. Bei jedem dieser Versuche ergab sich eine hinreichend genaue Übereinstimmung der gemessenen Druckverläufe in allen Meßebenen bzw. an allen Meßstellen.

Den Druckverlauf bzw. die Druckverläufe bei Versuch Nr. 38 (kurzer Rezipient, Zündtopf, Ausgangsdruck 0,2 bar, Z1) zeigt Bild 8.7. Druckanstiege und damit Druckanstiegsgeschwindigkeiten liegen für alle Meßstellen eng beieinander. Die Explosionsdrücke weisen Werte zwischen 9,4 und 10,1 bar auf, wobei die höchsten Werte in der Ebene 6 auftreten, ansonsten jedoch unsystematisch um den Durchschnittswert 9,8 bar schwanken (s. Tabelle 8.5). Die Abweichungen bezüglich der Einzelwerte des Explosionsdruckes vom Durchschnittswert betragen weniger als $\pm 4\%$ und dürften damit innerhalb der Meßgenauigkeiten der Anordnung liegen. Schwankungen der Druckmessungen innerhalb der Ebenen ließen jedoch auch den Schluß zu, daß diese durch unvermeidliche Konzentrationsschwankungen innerhalb des Ethylen/Luft-Gemisches bedingt sein könnten. Aus den Druckverläufen je Meßstelle lassen sich zumindest keine signifikanten Erkenntnisse über Abweichungen der Druckverläufe längs des Rezipienten gewinnen.

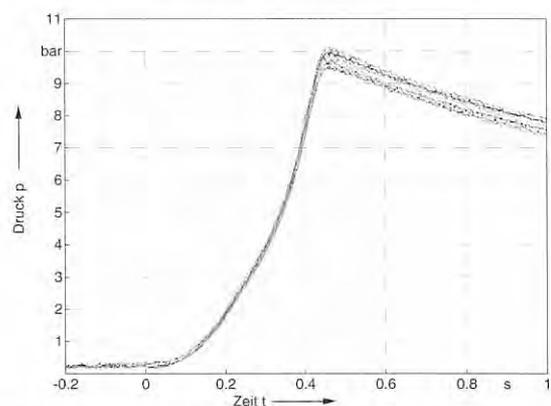


Bild 8.7: Druckverlauf bei Versuch Nr. 38 (kurzer Rezipient, Zündgefäß, Ausgangsdruck 0,2 bar, Z1)

Meß-stelle	Ebene	p_{max} in bar	$(dp/dt)_{max}$ in bar/s	K_G -Wert in bar*m/s
1	6	10,10	33	94
2	6	10,00	33	93
3	4	9,50	35	99
4	4	9,80	29	83
5	2	9,90	36	103
6	2	9,60	35	99
7	2	9,70	35	100
8	1	9,90	40	114
9	1	9,90	40	113
10	1	9,40	39	109
11	6	9,90	40	113
12	4	9,80	42	118

Mittelwerte	p_{max} in bar	$(dp/dt)_{max}$ in bar/s	K_G -Wert in bar*m/s
Ebene 1	9,73	40	112
Ebene 2	9,73	36	101
Ebene 3	-	-	-
Ebene 4	9,70	35	100
Ebene 5	-	-	-
Ebene 6	10,00	35	100
Kammer 1	9,73	37,70	106,44
Kammer 2	9,85	35,42	100,00
Gesamt	9,79	37	103

Tabelle 8.5: Versuchsergebnisse Versuch Nr. 38

Entsprechende Aussagen lassen sich zu den Versuchen treffen, die mit anderen Ausgangsdrücken, Zündarten usw. bzw. dem langen Rezipienten durchgeführt wurden. Einige Beispiele mögen dies verdeutlichen: Im folgenden können die Druckverläufe der Versuche Nr. 41, 50, 52 und 65 den Bildern 8.8 bis 8.11 entnommen werden, wobei die Kurvenverläufe unterschiedlich bzw. nicht gefiltert dargestellt sind. Die Versuchsparameter hierzu sind in Tabelle 6.6 enthalten.

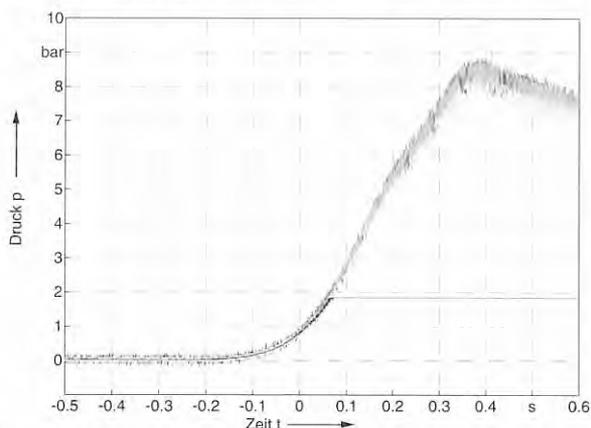


Bild 8.8: Druckverläufe bei Versuch Nr. 41 (kurzer Rezipient, Flammeneintritt DN 50, Ausgangsdruck 0,025 bar, Z1)

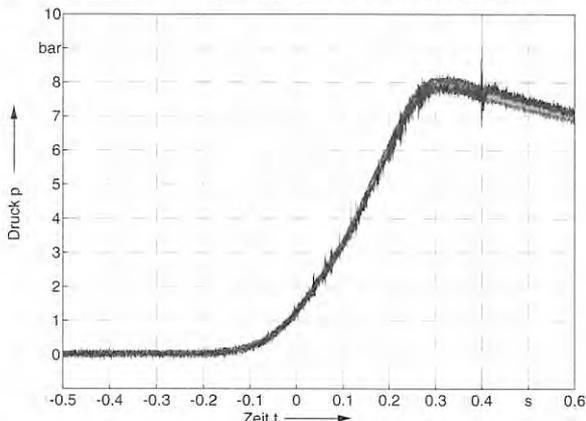


Bild 8.9: Druckverläufe bei Versuch Nr. 50 (langer Rezipient, Flammeneintritt DN 50, Ausgangsdruck 0,024 bar, Z1)

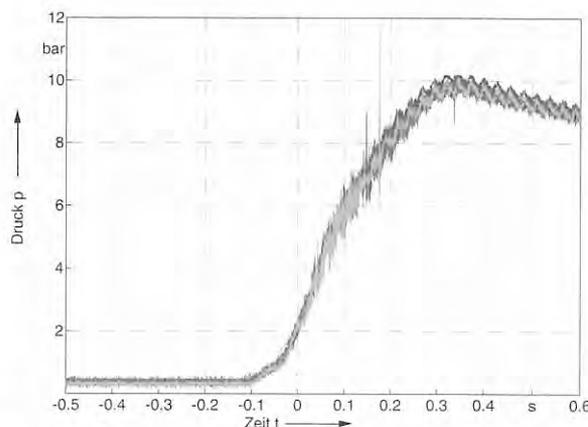


Bild 8.10: Druckverläufe bei Versuch Nr. 52 (langer Rezipient, Zündgefäß, Ausgangsdruck 0,2 bar, Z1)

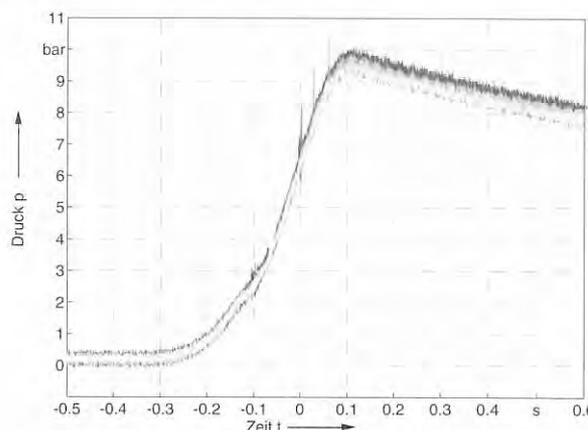


Bild 8.11: Druckverläufe bei Versuch Nr. 65 (langer Rezipient, Brennmomentzünd, Ausgangsdruck 0,2 bar, Z22)

Kurvenverläufe bzw. Versuchsergebnisse gestatten es also, für Bewertungen der Versuche und ihrer Ergebnisse von den zu jedem Versuch in Tabelle 6.6 aufgeführten durchschnittlichen Werten für Explosionsdruck, Druckanstiegsgeschwindigkeit und Explosionsheftigkeit auszugehen.

8.4.3. Einfluß der Zündart

Hierzu wurde eine Reihe von Versuchen mit dem aus den Segmenten A, B und C bestehenden langen Rezipienten durchgeführt. Die Versuche, die zu einer Beurteilung des Einflusses der Zündart zunächst herangezogen werden können, sind in Tabelle 8.6 aufgeführt. Bei diesen Versuchen lag die Ethylen-Konzentration um 8 Vol-% und der Ausgangsdruck betrug 0 bar.

Eine Auswertung der Tabelle 8.6 führt zu dem Ergebnis, daß bei Zündungen über Flammeneintritte die niedrigsten, bei Zündungen mit Brennmomentzündern - unabhängig davon, ob an der Wandung oder in der Behältermitte - mittlere und bei Zündungen mit Brennmomentzündern im Zündbehälter die höchsten Werte für Explosionsdruck, Druckanstiegsgeschwindigkeiten und Explosionsheftigkeit zu verzeichnen sind. Mit steigendem Ausgangsdruck scheint der Einfluß der Zünd-

Vers. Nr.	Ausgangsdruck p_a (abs.) [bar]	Konzentration c (Ethylen) [Vol.-%]	Explosionsdruck p_{ex} (abs.) [bar]	Druckanstiegsgeschwindigkeit $(d_p/d_t)_{max}$ [bar/s]	Explosionsheftigkeit K_{st} -Wert [bar·m/s]	Zündart	Zündort
76	1,00	7,9	9,1	35	117	Zündgefäß	Z3
79	1,00	7,9	9,6	31	103	Zündgefäß	Z3
82	1,00	8,1	10,1	33	111	Zündgefäß	Z2
83	1,00	7,9	9,1	19	64	Zündgefäß	Z2
47	1,00	8,0	8,5	20	66	Flammeneintritt	DN80 / Z1
48	1,00	8,0	8,6	20	68	Flammeneintritt	DN80 / Z1
49	1,00	8,0	8,5	20	67	Flammeneintritt	DN80 / Z1
68	1,00	8,1	8,9	21	72	innen	ZW2
69	1,00	8,1	8,8	24	81	innen	ZW2
64	1,00	8,1	8,8	20	68	innen	Z22
67	1,00	8,1	9,0	24	81	innen	Z22

Tabelle 8.6: Versuchsergebnisse nach der Zündart (Ausgangsdruck 0 bar)

art - zumindest was Druckanstiegsgeschwindigkeit und Explosionsheftigkeit anbelangt - geringer zu werden, wie aus Tabelle 8.7 zu ersehen ist. Bei diesen Versuchen wurde als Ausgangsdruck ein Wert von 0,2 bar eingestellt.

Vers. Nr.	Ausgangsdruck p_a (abs.) [bar]	Konzentration c (Ethylen) [Vol.-%]	Explosionsdruck p_{ex} (abs.) [bar]	Druckanstiegsgeschwindigkeit $(d_p/d_t)_{max}$ [bar/s]	Explosionsheftigkeit K_{st} -Wert [bar·m/s]	Zündart	Zündort
80	1,20	7,9	11,8	28	95	Zündgefäß	Z2
81	1,20	7,9	11,6	33	109	Zündgefäß	Z2
65	1,20	8,0	10,6	41	138	innen	Z22
66	1,20	8,1	10,5	29	98	innen	Z22

Tabelle 8.7: Versuchsergebnisse nach Zündart (Ausgangsdruck 0,2 bar)

Bei Flammeneintritten durch unterschiedlich große betriebsmäßig freie Öffnungen geht augenscheinlich mit zunehmendem Öffnungsquerschnitt ein Absinken des Explosionsdruckes einher: die druckentlastende Wirkung größer werdender Öffnungen kommt zum Tragen (s. Tabelle 8.8):

Vers. Nr.	Ausgangsdruck p_a (abs.) [bar]	Konzentration c (Ethylen) [Vol.-%]	Explosionsdruck p_{ex} (abs.) [bar]	Druckanstiegsgeschwindigkeit $(d_p/d_t)_{max}$ [bar/s]	Explosionsheftigkeit K_{st} -Wert [bar·m/s]	Zündart	Zündort
45	1,00	8,0	8,3	12	41	Flammeneintritt	DN50 / Z1
46	1,00	8,0	9,0	23	76	Flammeneintritt	DN50 / Z1
50	1,00	8,0	8,9	27	91	Flammeneintritt	DN50 / Z1
47	1,00	8,0	8,5	20	66	Flammeneintritt	DN80 / Z1
48	1,00	8,0	8,6	20	68	Flammeneintritt	DN80 / Z1
49	1,00	8,0	8,5	20	67	Flammeneintritt	DN80 / Z1

Tabelle 8.8: Einfluß der Größe betriebsmäßig freier Öffnungen

Zum besseren Verständnis des Ablaufs von Explosionen in Abhängigkeit von der Zündart wurde ein Versuch mit einer Hochgeschwindigkeitskamera dokumentiert.

In diesem Zusammenhang wurde der Versuch Nr. 35 gefilmt, bei dem ein stöchiometrisches Ethylen/Luft-Gemisch bei einem Ausgangsdruck von 0,25 bar mit einem Brennmomentzündler im Zündgefäß außerhalb des Rezipienten gezündet wurde. Die Sequenz ist in Einzelbilder zerlegt den Bildern 8.12/1 und 8.12/2 zu entnehmen, wobei der zeitliche Abstand zwischen den einzelnen Bildern 8 ms beträgt. Deutlich erkennbar ist, daß bereits nach dem Eintritt der Reaktionsfront durch die Querschnittsverengung zwischen Zündgefäß und Rezipient in den Versuchstank keine laminare Strömung mehr vorliegt. Die entstandenen Verwirbelungen sind als weißer Fleck um die Eintrittsöffnung herum sichtbar. Sobald die Flammenfront die der Eintrittsöffnung gegenüberliegende Tankwand erreicht, löst sich der relativ eng begrenzte Flammenstrahl auf und die Reaktionsfront wird vergrößert. Die Flammenfront pflanzt sich dann in axialer Richtung fort, bis schließlich der gesamte Tankquerschnitt als Reaktionsfront wirkt.

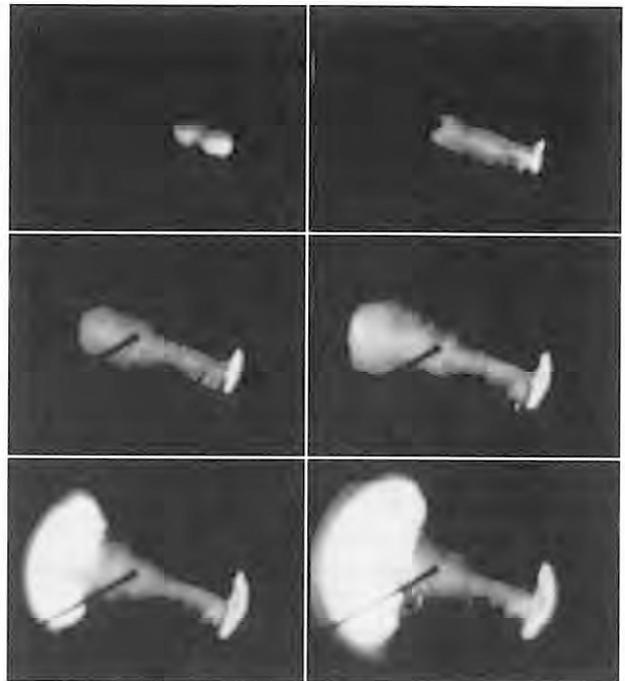


Bild 8.12/1: Flammeneintritt in den Versuchstank bei Versuch Nr. 35 (Teil 1)

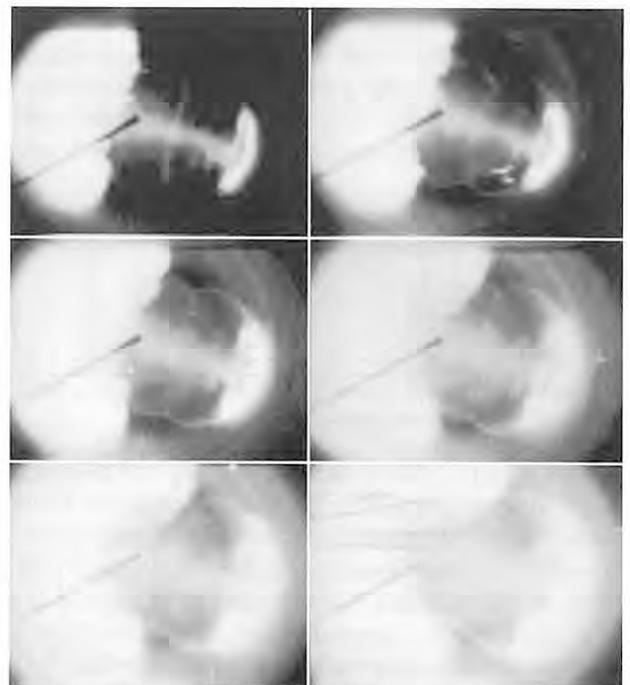


Bild 8.12/2: Flammeneintritt in den Versuchstank bei Versuch Nr. 35 (Teil 2)

8.4.4. Einfluß des Zündortes

Um Aufschluß über den eventuellen Einfluß des Zündortes zu erlangen, wurden Versuche mit verschiedenen Zündarten (Zündung im Zündgefäß und Zündung mit dem Brennmomentzündler im Tankinneren an der Wandung oder zentral in der Achse des Tanks) an verschiedenen Zündorten längs des langen Tankes durchgeführt. Zur Verdeutlichung diene Bild 8.13.

In Bild 8.13 sind mit Z1, Z2, Z3 und ZB die Zündorte der Zündungen über das Zündgefäß mit ZW1, ZW2, ZW3 und ZB die Zündorte mit Brennmomentzündern

an der Tankwand und mit ZZ1, ZZ2, ZZ3 und ZB die Zündorte in der zentralen Tankachse bezeichnet. Außerdem wurde für Zündungen über das Zündgefäß und Zündungen in der zentralen Tankachse der Ausgangsdruck variiert (0 bar und 0,2 bar).

Zunächst sollen die Ergebnisse der Versuche mit Zündungen über das Zündgefäß betrachtet werden (s. hierzu Tabellen 8.9 und 8.10).

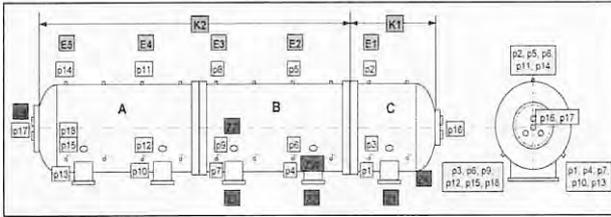


Bild 8.13: Variation der Zündart und Zündorte

Vers. Nr.	Ausgangsdruck p_a (abs.) [bar]	Konzentration c (Ethylen) [Vol.-%]	Explosionsdruck p_{ex} (abs.) [bar]	Druckanstiegsgeschwindigkeit $(d_p/d_t)_{max}$ [bar/s]	Explosionsheftigkeit $K_{G\text{-Wert}}$ [bar·m/s]	Zündart	Zündort
78	1,00	7,9	9,1	35	117	Zündgefäß	Z3
79	1,00	7,9	9,6	31	103	Zündgefäß	Z3
82	1,00	8,1	10,1	33	111	Zündgefäß	Z2
83	1,00	7,9	9,1	19	64	Zündgefäß	Z2
84	1,00	8,1	10,1	61	203	Zündgefäß	ZB
89	1,00	7,9	9,6	41	139	Zündgefäß	ZB

Tabelle 8.9: Zündung mit dem Zündgefäß, Variation des Zündortes bei 0 bar Ausgangsdruck

Nach Tabelle 8.9 sind die höchsten Explosionsheftigkeiten bei Einleitung der Explosion im Tankinneren durch eine Flammenstrahlzündung aus dem am Tankboden (ZB) angeordneten Zündgefäß zu verzeichnen.

Vers. Nr.	Ausgangsdruck p_a (abs.) [bar]	Konzentration c (Ethylen) [Vol.-%]	Explosionsdruck p_{ex} (abs.) [bar]	Druckanstiegsgeschwindigkeit $(d_p/d_t)_{max}$ [bar/s]	Explosionsheftigkeit $K_{G\text{-Wert}}$ [bar·m/s]	Zündart	Zündort
77	1,20	7,9	11,6	50	168	Zündgefäß	Z3
78	1,20	7,9	11,4	60	202	Zündgefäß	Z3
80	1,20	7,9	11,8	28	95	Zündgefäß	Z2
81	1,20	7,9	11,6	33	109	Zündgefäß	Z2
85	1,20	8,1	10,8	22	73	Zündgefäß	ZB
86	1,20	8,1	10,9	27	90	Zündgefäß	ZB
87	1,20	8,1	10,8	22	74	Zündgefäß	ZB
88	1,20	8,1	11,7	63	211	Zündgefäß	ZB

Tabelle 8.10: Zündung mit dem Zündgefäß, Variation des Zündortes bei 0,2 bar Ausgangsdruck

Nach Tabelle 8.10 ließe sich annehmen, daß die größte Explosionsheftigkeit bei Zündungen über das in der Tankmitte (Z3) angeordnete Zündgefäß erzielt werden. Diese Schlußfolgerungen lassen sich durch die Ergebnisse der Zündungen in der zentralen Tankachse bei verschiedenen Ausgangsdrücken mit Brennmomentzündern nicht bestätigen wie die Tabellen 8.11 und 8.12 zeigen

Vers. Nr.	Ausgangsdruck p_a (abs.) [bar]	Konzentration c (Ethylen) [Vol.-%]	Explosionsdruck p_{ex} (abs.) [bar]	Druckanstiegsgeschwindigkeit $(d_p/d_t)_{max}$ [bar/s]	Explosionsheftigkeit $K_{G\text{-Wert}}$ [bar·m/s]	Zündart	Zündort
60	1,00	8,1	9,1	17	58	innen	ZZ3
61	1,00	8,1	9,2	21	70	innen	ZZ3
64	1,00	8,1	8,8	20	68	innen	ZZ2
67	1,00	8,1	9,0	24	81	innen	ZZ2
70	1,00	8,1	8,8	20	67	innen	ZB
73	1,00	8,1	9,3	22	74	innen	ZB

Tabelle 8.11: Brennmomentzündler, Variation des Zündortes in der Tankachse bei 0 bar Ausgangsdruck

Vers. Nr.	Ausgangsdruck p_a (abs.) [bar]	Konzentration c (Ethylen) [Vol.-%]	Explosionsdruck p_{ex} (abs.) [bar]	Druckanstiegsgeschwindigkeit $(d_p/d_t)_{max}$ [bar/s]	Explosionsheftigkeit $K_{G\text{-Wert}}$ [bar·m/s]	Zündart	Zündort
58	1,20	8,1	10,5	26	88	innen	ZZ3
59	1,20	8,1	10,9	31	102	innen	ZZ3
65	1,20	8,0	10,6	41	138	innen	ZZ2
66	1,20	8,1	10,5	29	98	innen	ZZ2
71	1,20	7,9	10,7	24	80	innen	ZB
72	1,20	7,9	11,5	44	146	innen	ZB

Tabelle 8.12: Brennmomentzündler, Variation des Zündortes in der Tankachse bei 0,2 bar Ausgangsdruck

Interessanter dagegen ist das Ergebnis der Versuche mit Zündungen mit Brennmomentzündern an der Tankwandung (s. Tabelle 8.13).

Vers. Nr.	Ausgangsdruck p_a (abs.) [bar]	Konzentration c (Ethylen) [Vol.-%]	Explosionsdruck p_{ex} (abs.) [bar]	Druckanstiegsgeschwindigkeit $(d_p/d_t)_{max}$ [bar/s]	Explosionsheftigkeit $K_{G\text{-Wert}}$ [bar·m/s]	Zündart	Zündort
62	1,00	8,0	9,4	26	87	innen	ZW3
63	1,00	8,1	9,2	24	80	innen	ZW3
66	1,00	8,1	8,9	21	72	innen	ZW2
69	1,00	8,1	9,8	24	81	innen	ZW2
74	1,00	7,9	8,4	15	62	innen	ZK
75	1,00	7,9	8,6	16	55	innen	ZK
70	1,00	8,1	8,8	20	67	innen	ZB
73	1,00	8,1	9,3	22	74	innen	ZB

Tabelle 8.13: Brennmomentzündler, Variation des Zündortes längs der Tankwandung bei 0 bar Ausgangsdruck

In diesem Fall sind die höchsten Explosionsheftigkeiten ebenfalls dann zu verzeichnen, wenn der Brennmomentzündler in der Tankmitte an der Wandung angeordnet ist (ZW3, s. Ergebnisse nach Tabelle 8.10).

Dessen ungeachtet läßt sich jedoch auch anmerken, daß beispielsweise die Schwankungen des Explosionsdruckes in Abhängigkeit vom Zündort außerordentlich gering sind und der unter Laborbedingungen ermittelte K_G -Wert in Höhe von $K_G = 136 \text{ bar} \cdot \text{m/s}$ und der dementsprechende maximale Explosionsdruck in Höhe von $p_{ex0} = 9,9 \text{ bar (abs.)}$ bei den Versuchen im Großmaßstab selten erreicht oder überschritten werden.

8.4.5. Einfluß des Längen/Durchmesser-Verhältnisses

Zur Beurteilung des Einflusses geometrischer Verhältnisse im Rahmen der bei Transporttanks üblichen Abmessungen kann davon ausgegangen werden, daß bei real ausgeführten Transporttanks ein Längen/Durchmesser-Verhältnis von 6 nicht überschritten wird. Entsprechend wurden die Abmessungen des Versuchstanks gewählt. In kurzer Anordnung (bestehend aus den Segmenten A und C) weist der Rezipient ein L/D (kurz) = 3,5 auf und in langer Anordnung (bestehend aus den Segmenten A, B und C) liegt ein L/D (lang) = 5,9 vor. Ob das Längen/Durchmesser-Verhältnis die Ergebnisse von Explosionsversuchen tangiert, kann durch eine Gegenüberstellung vergleichbarer Ergebnisse, die sowohl mit der kurzen als auch der langen Anordnung gewonnen wurden, ermittelt werden (s. Tabellen 8.14 und 8.15)

Vers. Nr.	Ausgangsdruck p_a (abs.) [bar]	Konzentration c (Ethylen) [Vol.-%]	Explosionsdruck p_{ex} (abs.) [bar]	Druckanstiegsgeschwindigkeit $(d_p/d_t)_{max}$ [bar/s]	Explosionsheftigkeit $K_{G\text{-Wert}}$ [bar·m/s]	Zündart	Zündort	Länge
41	1,20	7,9	9,3	22	61	Flammeneintritt	DN50 / Z1	kurz
42	1,20	7,9	9,2	30	84	Flammeneintritt	DN50 / Z1	kurz
43	1,20	7,9	9,1	30	84	Flammeneintritt	DN50 / Z1	kurz
45	1,00	8,0	8,3	12	41	Flammeneintritt	DN50 / Z1	lang
46	1,00	8,0	9,0	23	76	Flammeneintritt	DN50 / Z1	lang
50	1,00	8,0	8,9	27	91	Flammeneintritt	DN50 / Z1	lang

Tabelle 8.14: Zündung durch Flammeneintritt, Variation des Längen/Durchmesser-Verhältnisses, 0 bar Ausgangsdruck

Vers. Nr.	Ausgangsdruck p_a (abs.) [bar]	Konzentration c (Ethylen) [Vol.-%]	Explosionsdruck p_{ex} (abs.) [bar]	Druckanstiegsgeschwindigkeit $(d_p/d_t)_{max}$ [bar/s]	Explosionsheftigkeit $K_{G\text{-Wert}}$ [bar·m/s]	Zündart	Zündort	Länge
36	1,20	7,9	10,9	31	86	Zündgefäß	Z1	kurz
37	1,20	7,9	10,9	43	121	Zündgefäß	Z1	kurz
38	1,20	8,0	10,8	37	103	Zündgefäß	Z1	kurz
80	1,20	7,9	11,8	28	95	Zündgefäß	Z2	lang
81	1,20	7,9	11,6	33	108	Zündgefäß	Z2	lang

Tabelle 8.15: Zündung mit dem Zündgefäß, Variation des Längen/Durchmesser-Verhältnisses, 0,2 bar Ausgangsdruck

Auch in diesem Fall ist der Einfluß der Zündart und des Vordrucks dominierend. Die Variation der geometrischen Verhältnisse führt zu keinen signifikanten Änderungen des Reaktionsablaufs im Inneren des Rezipienten. Die relativ hohen Werte für den Explosionsdruck bei den Versuchen Nr. 80 und 81 mögen dadurch begründet sein, daß die Zündorte gegenüber den Versuchen Nr. 36 und 38 geringfügig anders gewählt wurden.

8.4.6. Einfluß des Ausgangsdruckes und der Ethylen-Konzentration

Eine Steigerung des Ausgangsdruckes - im Rahmen der hier beschriebenen Arbeiten - von 0 auf 0,2 bar - geht immer mit einer entsprechenden Steigerung des Explosionsdruckes einher wie beispielsweise aus den Tabellen 8.9 bis 8.12 ersehen werden kann.

Meistens gehen hiermit auch Erhöhungen der Druckanstiegsgeschwindigkeit und der Explosionsheftigkeit einher, wobei diese Effekte nicht mit der gleichen Stringenz auftreten, wie sie bei der Steigerung des Explosionsdruckes zu verzeichnen ist.

Abweichungen der Ethylen-Konzentration von der des zündwilligsten Ethylen/Luft-Gemisches - hier beträgt sie 8-Vol. % Ethylen in Luft - haben augenscheinlich auch starken Einfluß auf die Kennwerte von Explosionen. Hierzu kann beispielsweise auf die Ergebnisse zu den Versuchen 82 und 83 bzw. 84 und 89 (s. Tabelle 6.6) verwiesen werden. Hiernach gehen die Werte für den Explosionsdruck, die Druckanstiegsgeschwindigkeit und die Explosionsheftigkeit mit den Werten der Ethylenkonzentration zurück.

Die relativ großen Schwankungen bei den Explosionskennwerten bei nach Messung gleichartig oder sogar optimal eingestellter Ethylen-Konzentration unter ansonsten gleichbleibenden Randbedingungen läßt sich nur mit lokalen Konzentrationsschwankungen, also Inhomogenitäten des Ethylen/Luft-Gemisches erklären.

8.5. Schlußfolgerungen - Bewertung von Tanks ohne Einbauten

Aus den Ergebnissen der Versuche mit dem Rezipienten entsprechend Abschnitt 8.4. kann in Übereinstimmung mit den Darlegungen in Abschnitt 2. gefolgert werden, daß die Höhe des Ausgangsdruckes einer Explosion und die Zündart (Höhe des Energieniveaus des Zündinitials, Flammenstrahl als ausgedehnte und turbulente Zündquelle) direkten und meßbaren Einfluß auf Explosionsdruck, Druckanstiegsgeschwindigkeit und Explosionsheftigkeit haben.

Es steht jedoch nicht zu befürchten, daß die Reaktion aus einem Zweitbehälter oder einer Rohrleitung in einen unter erhöhtem Druck stehenden Tank einläuft,

da dies durch die Betriebsweise bei Befüll- und Entleervorgängen verhindert wird oder die Absicherung gegen Explosionen anlagenseitig erfolgt. Explosionen im Transporttank können also nur über betriebsmäßig freie Öffnungen eingeleitet werden.

Ist also davon auszugehen, daß die Explosion im Tankinneren durch eine weniger turbulente, direkt aus der Umgebung des Tanks durch eine betriebsmäßig freie Öffnung tretende Flamme als Zündquelle ausgelöst wird, beträgt der Ausgangsdruck einer Explosion im Tankinneren nahezu 0 bar und der Eintritt der Reaktion in den Tank erfolgt langsamer als bei einer Flammenstrahlzündung; die eintretende Flamme wirkt als punktförmigere, zumindest enger umrissene Zündquelle (s. Abschnitt 7.1. und 8.4.3.). Außerdem wirkt die betriebsmäßig freie Öffnung (geringfügig, je nach Öffnungsgröße) als Druckentlastung.

Die Parameter Ausgangsdruck und Zündart können daher bei Beurteilungen von Transporttanks künftig also unberücksichtigt bleiben.

Der Einfluß des Verhältnisses aus Oberfläche (O) und Volumen (V) eines Behälters auf die Druckanstiegsgeschwindigkeit und damit Explosionsheftigkeit spielt im Rahmen der durchgeführten Untersuchungen mit realitätsnahen Versuchstanks (O/V ungefähr 2,1 bis 2,2) ebenfalls keine nachweisbare Rolle.

Da aus den Ergebnissen nach Abschnitt 8.4. auch kein signifikanter Einfluß des Zündortes und der Tankgeometrie - zumindest für Tanks deren Längen/Durchmesser-Verhältnis 6 oder weniger beträgt - abgeleitet werden kann, hängt damit der Explosionsablauf in Transporttanks ohne Einbauten nur von der Ethylenkonzentration bzw. von der Konzentration des brennbaren Dampfes oder Gases eines explosiblen Dampf/Luft-Gemisches im Transporttank ab.

Bei den meisten der durchgeführten Versuche bzw. bei allen Versuchen, bei denen die Explosion im Rezipienten nicht durch die Zündung im Zündgefäß ausgelöst wurde, ergeben sich mehr oder weniger starke Abweichungen von den Idealwerten für Explosionen mit dem zündwilligsten Ethylen/Luft-Gemisch. Weder wird der Explosionsdruck $p_{\text{exo}} = 9,9 \text{ bar (abs.)}$ noch eine Explosionsheftigkeit

$$K_G = 136 \frac{\text{bar} \cdot \text{m}}{\text{s}}$$

erreicht: Unter den hier vorliegenden Versuchsbedingungen haben sich teilweise - wenn auch geringfügige - Abweichungen vom zündwilligsten Ethylen/Luft-Gemisch und mit großer Wahrscheinlichkeit zudem (örtliche) Inhomogenitäten des Gemischs im Rezipienten ergeben. Wie bereits mehrfach erwähnt, dürfte außerdem bei Einleitung einer Reaktion in den Rezipienten über eine freie Öffnung eine gewisse Druckentlastung während der Explosion aufgetreten sein. Der Einfluß

dieser Störgrößen dürfte zumindest größer als der Einfluß von Zündort und Geometrie unter den hier gewählten Versuchsbedingungen sein.

Die in Abschnitt 5. beschriebene Untersuchungskonzeption, deren Anwendung entsprechend Abschnitt 7.1. künftig zu modifizieren ist (keine externe Zündung in einem Zündgefäß, sondern Zündung an der betriebsmäßig freien Öffnung in der atmosphärischen Umgebung des Tanks), führt also zu Ergebnissen, auf deren Grundlage Bewertungen von Transporttanks im Hinblick auf explosionsdruckstoßfeste Gestaltung möglich sind. Wegen des unter Versuchsbedingungen möglichen Abweichens der erreichten bzw. erreichbaren Werte für Explosionsdruck, Druckanstiegsgeschwindigkeit und Explosionsheftigkeit von den erwähnten Idealwerten, aber auch wegen der erforderlichen Übertragung der Versuchsergebnisse auf Serientanks (Berücksichtigung von Schweißnahtgüten usw.) ist Explosionsdruckstoßversuchen von Realtanks immer eine Spannungsbewertung entsprechend Abschnitt 8.2. beizugeben.

Den Ergebnissen des Abschnittes 8.1.2 und den Aussagen des Abschnittes 8.3. folgend kann ein Explosionsdruckstoßversuch für Realtanks ohne Einbauten durch eine Wasserdruckprüfung bei entsprechender Druckhöhe ersetzt werden. Berechnungsmöglichkeiten nach Abschnitt 8.2. sind zwar uneingeschränkt anwendbar, aber zur Erfassung des Verhaltens bestimmter Tankkomponenten (Mannlochbereiche, Aufsattelungen usw.) im Falle einer Explosion im Tankinneren bzw. zu deren Optimierung sind Versuche (Explosionsdruckstoß- oder Wasserdruckversuche) oder die Anwendung erweiterter Berechnungsmethoden (Finite-Element-Rechnungen) erforderlich.

Die sonstigen in Abschnitt 8.3. gezogenen Schlußfolgerungen aus den Ergebnissen der Versuche mit Realtanks und den zugehörigen Spannungsbewertungen bleiben ebenfalls weiterhin gültig und ergänzen die in diesem Abschnitt gezogenen Schlußfolgerungen aus den Ergebnissen der Versuche mit dem Rezipienten gemäß Abschnitt 8.4.

9. Tanks mit Einbauten

9.1. Versuche und Ergebnisse mit realen Transporttanks

9.1.1. Tanks mit Trennboden

Im Rahmen dieses Abschnittes sind die Versuche Nr. 18, 27 und 33 mit zylindrischen Tankabschnitten, die mit je einem End- und je einem Trennboden versehen waren, zu beschreiben und zu bewerten (s. Bild 6.1 b)).

Bei diesen Versuchen erfolgte die Zündung bei Anfangsdrücken zwischen 0,2 und 0,3 bar im Zündgefäß außerhalb des jeweiligen Tankabschnitts und die Reaktion wurde über einen kurzen Rohrabschnitt und Flansche DN80 in die Versuchstanks übertragen. Die wesentlichen Ergebnisse der Untersuchungen sind in Tabelle 9.1 zusammengestellt (Auszug aus Tabelle 6.4):

Vers. Nr.	Ausgangsdruck p_a [bar]	Konzentration Ethylen c [Vol.-%]	Explosionsdruck p_{ex} [bar]	Druckanstiegsgeschwindigkeit $(dp/dt)_{max}$ [bar/s]	Explosionsheftigkeit K_G - Wert [bar·m/s]	bestanden [x=ja]
18	0,2	7,5	10,7	80	185	x
27	0,2	7,6	10,6	45	105	
33	0,3	8,1	11	75	170	x

Tabelle 9.1: Versuchsergebnisse an Tanks mit verschiedenen Trennböden

Es ist festzustellen, daß die zu erwartenden Explosionsdrücke in Höhe von 10,9 bar – der Formel (1) aus Abschnitt 3.3.

$$p_{ex} = p_a \cdot p_{ex0}^{-1}$$

entsprechend - mit guter Näherung erreicht wurden, obwohl relativ große Abweichungen vom zündwilligsten Gemisch (zumindest bei den Versuchen Nr. 18 und 27) vorlagen.

Explosionsdrücke, Druckanstiegsgeschwindigkeiten und Explosionsheftigkeiten lagen im Durchschnitt etwas über den Werten für Tanks ohne Einbauten und somit auch über dem - Wert für stöchiometrische Ethylen/Luft-Gemische nach Tabelle 2.3 in Höhe von

$$K_G = 136 \frac{\text{bar} \cdot \text{m}}{\text{s}}$$

Diese erhöhten Werte dürften ihre Ursache bei Versuch Nr. 18 [68] im wesentlichen in der gegenüber anderen Tanks abweichenden Behältergeometrie haben: Der Tankabschnitt bestand aus einem Doppel-Konus, was zur Folge gehabt haben dürfte, daß die Reaktionsfront beim Einlaufen in den sich verjüngenden Teil des Versuchstanks beschleunigt wurde. Die Beschleunigung der Flammenfront müßte zu einem leicht erhöhten Turbulenzgrad der Reaktion geführt haben, so daß sich entsprechend erhöhte Explosionsheftigkeiten einstellen konnten.

Beim Versuch Nr. 33 [74] wurde ein gegenüber den Anforderungen nach TRT 006-alt erhöhter Ausgangsdruck von $p_a = 0,3 \text{ bar}$ eingestellt, um sicherzustellen, daß der vorgesehene Explosionsdruck $p_{ex} = 10,9 \text{ bar}$ sicher erreicht werden könnte, selbst wenn eine geringfügige Druckentlastung über den Dom- bzw. Mannlochdeckel erfolgen würde. Mit der Erhöhung des Ausgangsdrucks ging eine zu erwartende Erhöhung der Explosionsheftigkeit einher.

Aus den Versuchen mit Tanks, die mit einem Trennboden ausgestattet waren, lassen sich hinsichtlich des Reaktionsablaufs demzufolge keine signifikanten Unterschiede zu Tanks, die mit 2 Endböden versehen waren herleiten (s. Abschnitt 8.1.1.)

Dessen ungeachtet ist Tabelle 9.1 zu entnehmen, daß es bei Versuch Nr. 27 [72] zu einem Behälterversagen kam: Während des Versuches ergab sich nach der Reaktionsübertragung in den Versuchstank explosionsbedingt ein Umklappen des Trennbodens und der Trennboden riß - ausgehend von der Bodenmitte und in einem Abstand von ca. 100 mm von der Bodenschweißnaht des aus 2 Teilen zusammengesetzten Endbodens - in vertikaler Richtung auf.

Als Ursache für das Bodenversagen wird folgendes angenommen: Der Tank wies den größten Durchmesser aller in gleicher Weise geprüften Tanks auf (Außendurchmesser $D_a = 2400 \text{ mm}$ gegenüber Außendurchmessern von $D_a = 2000 \text{ mm}$ bei den anderen Versuchen - s. Tabelle 6.1), so daß explosionsbedingt wesentlich größere Kräfte auf den Endboden einwirkten. Überdies werden auch fertigungsbedingte Spannungserhöhungen beim Formen und Fügen des Trennbodens in Verbindung mit der gegenüber dem Grundmaterial des Bodens eingeschränkteren Verformbarkeit der Bodenschweißnaht eine Rolle gespielt haben.

Es kann angenommen werden, daß ein Behälterversagen bei geringerem Außendurchmesser und anderer Fertigungsweise des Trennbodens (Boden in einem Stück kaltgerollt statt mit einer Schweißnaht aus 2 Teilen gefügt) vermieden worden wäre.

9.1.2. Tanks mit einer oder mehreren Schwallwänden und Trennboden

Nunmehr sind die Versuche Nr. 4, 5, 13, 14, 19, 21, 22 und 28 zu betrachten (s. Tabellen 6.1 bis 6.4)

9.1.2.1. Grundvoraussetzungen und allgemeine Ergebnisse

Bei diesen Versuchen erfolgte die Zündung durchgehend bei Anfangsdrücken von 0,2 bar, so daß grundsätzlich - d.h. homogenes, stöchiometrisches Ethylen/Luft-Gemisch und Vermeiden von Druckentlastungen vorausgesetzt - mit Explosionsdrücken von 10,9 bar und Explosionsheftigkeiten um zu rechnen gewesen wäre, falls sich durch die eingebauten Schwallwände keine Änderungen des Reaktionsablaufs ergeben hätten.

Auch bei diesen Versuchen fand die Zündung im außerhalb des jeweiligen Tankabschnittes angeordneten Zündgefäß mittels eines Brennmomentzünders statt und die Reaktion wurde ebenfalls über einen kurzen

Vers. Nr.	Ausgangsdruck p_a [bar]	Konzentration Ethylen c [Vol-%]	Explosionsdruck p_{ex} [bar]	Druckanstiegsgeschwindigkeit $(dp/dt)_{max}$ [bars]	Explosionsheftigkeit K_{St} - Wert [bar·m/s]	Schwallwand/Öffnungsanzahl [- / -]	Überdeckungsgrad f [%]	bestanden [ja]
4	0,2	7,5	>11	>2000	>4000	3/3	93	
5	0,2	8,0	10,3	95	160	1/3	87	x
13	0,2	7,8	10,6	200	360	1/2	85	x
14	0,2	7,5	>11			1/3	90	
19	0,2	7,5	10,7	555	1085	1/3	89	
21	0,2	7,5	10,3	265	400	1/3	93	x
22	0,2	7,5	9,2	100	195	1/3	91	x
28	0,2	7,5	10,6	130	250	1/3	89	x

Tabelle 9.2: Versuchsergebnisse an Tanks mit verschiedenen Schwallwänden und Trennböden

Rohrabschnitt und Flansche DN 80 in die Versuchstanks übertragen. Die wesentlichen Versuchsergebnisse sind in Tabelle 9.2 aufgeführt.

Als erstes Ergebnis ist festzuhalten, daß die zu erwartenden Explosionsdrücke in Höhe von 10,9 bar - außer bei Versuch Nr. 22 - wenigstens näherungsweise erreicht und bei den Versuchen Nr. 4 und 14 mit an Sicherheit grenzender Wahrscheinlichkeit überschritten wurden.

Druckanstiegsgeschwindigkeiten und Explosionsheftigkeiten lagen jedoch deutlich - teilweise bis zu einer Größenordnung - über den Werten, die bei Tanks ohne Einbauten zu verzeichnen gewesen waren. 3 der 8 mit Schwallwänden versehenen Tankabschnitte versagten.

Bei allen Versuchen (bis auf Versuch Nr. 5) war ein zu mageres, unterstöchiometrisches Gemisch eingestellt worden, so daß allein deshalb normalerweise ein Explosionsdruck in Höhe von $p_{ex} = 10,9 \text{ bar}$ nicht erreicht werden konnte. Darüber hinaus war bei allen mit positivem Ergebnis abgelaufenen Versuchen festzustellen, daß sich eine geringfügige Druckentlastung über die sich explosionsdruckbedingt verformenden Domdeckel ergab. Diese Versuchsbedingungen waren also denen bei Tanks ohne Einbauten durchaus vergleichbar. Insofern kann festgestellt werden, daß im vorliegenden Fall (gegenüber den Versuchsergebnissen bei Tanks ohne Einbauten - s. Tabelle 8.1) leicht erhöhte Werte im Hinblick auf den Explosionsdruck, jedoch deutlich größere Werte bezüglich Druckanstiegsgeschwindigkeit und Explosionsheftigkeit ermittelt wurden.

Das Vorsehen von Schwallwänden mit einem relativ großen Überdeckungsgrad (womit das Verhältnis der Schwallwandfläche zur Querschnittsfläche eines Tanks bezeichnet wird), d.h. das Vorsehen von Schwallwänden mit relativ kleinen Öffnungen führt also zu geringfügigen Erhöhungen des Explosionsdruckes, aber zu deutlichen Erhöhungen der Explosionsheftigkeit.

Entsprechend den in Tabelle 9.2 aufgeführten Versuchsergebnissen scheint es zu Tankversagen nicht wegen des Explosionsdruckes sondern vielmehr wegen der u.U. stark erhöhten Explosionsheftigkeit zu kommen. Daher sollen zunächst die Ergebnisse zu den Versuchen Nr. 4, 14 und 19 näher betrachtet werden.

9.1.2.2. Ergebnisse der Versuche mit Tankversagen

Der im Versuch Nr. 4 [55] untersuchte Tankabschnitt war mit 3 Schwallwänden, die ihrerseits mit je 3 Öffnungen versehen waren, ausgestattet. Den Abschluß der Tanks bildeten je ein Trenn- und Endboden in Korbform. Die Schwallwände wiesen einen Überdeckungsgrad von 93% auf, hatten also 3 relativ kleine Öffnungen. Nähere Angaben zum Tank können den Tabellen 6.1 bis 6.3 und dem Bild 4.2 entnommen werden.

Nach erfolgter Zündung wurden durch die vorhandenen Tankeinbauten (Schwallwände) in dieser Höhe nicht vorhersehbare Drücke und Druckanstiegsgeschwindigkeiten erreicht, die das Abreißen der in Druckrichtung gewölbten Trennwand und zwei der drei Schwallwände zur Folge hatten.

Der Tankmantel, die im Tank verbliebene Schwallwand sowie der den Tank abschließende, nach außen gewölbte Korbbogenboden zeigten sichtbare plastische Verformungen bzw. starke Faltenbildung. Die nach dem Versuch im zylindrischen Bereich festgestellten Risse im Bereich der die Schwallwände und den Trennboden stützenden Gegenkragen sind auf die teilweise herausgeschleuderten Schwallwände zurückzuführen.

Aufgrund der hohen Explosionsheftigkeit und der Tankbewegung mit anschließendem Abreißen der Meßleitungen, konnten die tatsächlich aufgetretenen Drücke und Dehnungen mit den vorhandenen Meßwertaufnehmern nur unvollständig bzw. nicht ermittelt werden.

Nach Auswertung von Meßschieben und Filmaufzeichnungen in Verbindung mit der Ermittlung tatsächlich vorhandener Spannungen aufgrund der Messungen bleibender Verformungen nach dem Versuch konnte festgestellt werden, daß der Trennboden bei einem Druck oberhalb der geforderten 10,9 bar, d.h. nach Faltenbildung in der Krempe des nach außen stehenden Korbbogenbodens und sichtbarer plastischer Verformungen des Zylinders abriß (s. Bild 4.3).

Den Darlegungen nach Abschnitt 2. folgend, darf vermutet werden, daß es zu (mehreren) Mehrfachzündungen in den einzelnen Tankabschnitten mit entsprechender Steigerung des Turbulenzgrades der Reaktionsfront gekommen sein dürfte. Außerdem ist anzunehmen, daß sich Vorverdichtungen durch die wie Schubkolben wirkenden, losgerissenen Schwallwände ergeben haben, die zu Ausgangsdruckerhöhungen in einzelnen Tankschnitten geführt haben müßten.

Auf das Problem der Größe und Anzahl von Schwallwandöffnungen und ihrer Wirkung auf den Reaktionsablauf wird in Abschnitt 9.2. näher eingegangen.

Bei Versuch Nr. 14 [67] fand ein Tankabschnitt Verwendung, der mit nur einer Schwallwand mit 3 Öffnungen ausgestattet war. Der Überdeckungsgrad der Schwallwand betrug 90%. Der Tank war jedoch zusätzlich mit einer Einrichtung zur örtlichen Aufheizung des im Tank befindlichen Ethylen/Luft-Gemisches versehen. Derartige Heizungen werden bei Transporttanks zur Verflüssigung kristallisierbaren Ladeguts oder zur Herabsetzung von dessen Zähigkeit zum Zwecke der Entleerung benutzt. Mit dieser elektrischen Heizung wurde die Tankwand (und damit das sich im Tank befindliche explosive Gemisch) örtlich bis auf 100°C erwärmt.

Unmittelbar nach erfolgter Zündung barst der Tank.

Nach Auswertung der Filmaufzeichnungen, wiederum in Verbindung mit der Ermittlung tatsächlich vorhandener Spannungen anhand der Messungen bleibender Verformungen nach dem Versuch konnte festgestellt werden, daß der Tank nach sichtbarer plastischer Verformung an mehreren Stellen bei einem Druck oberhalb der geforderten 10,9 bar aufriß. Der in dieser Höhe nicht vorhersehbare Druck sowie die hohe Druckanstiegsgeschwindigkeit bzw. Explosionsheftigkeit sind mit großer Wahrscheinlichkeit auf die konstruktive Gestaltung der eingebauten Schwallwand und die örtliche Aufheizung des Tanks und somit die örtliche Erwärmung des explosiblen Gemisches zurückzuführen, wobei der Reaktionsablauf ähnlich dem bei Versuch Nr. 4 gewesen sein dürfte.

Dem Versuch Nr. 19 [69] wurde ein Tank unterzogen, der mit einer Schwallwand mit 3 Öffnungen und einem Überdeckungsgrad von 89 % ausgerüstet war.

Auch bei diesem Versuch wurden nach der Zündung der Trennboden und die Schwallwand bei sichtbar bleibender Verformung (Umklappen) herausgerissen.

Der während des Versuches gemessene Druck erreichte einen Maximalwert von 10,7 bar. Dieser Wert entspricht somit annähernd dem theoretisch zu erwartenden Explosionsdruck in Höhe von 10,9 bar.

Die Versagensursache dürfte ähnlich der sein, die bereits vorher beschrieben wurde, wobei in diesem Fall die konstruktive Gestaltung der Verbindungen von Trennboden und Schwallwand mit dem Zylindermantel des Tanks von ausschlaggebender Bedeutung gewesen sein dürfte, worauf später noch näher eingegangen werden wird.

9.1.3. Schlußfolgerungen aus den Versuchen mit realen Transporttanks

Bei den Versuchen Nr. 5, 13, 21, 22 und 28 ergab sich kein Tankversagen, obwohl diese Tanks ebenfalls jeweils mit einer Schwallwand ausgestattet waren, deren Überdeckungsgrade zwischen 85 und 93% lagen, also diesbezüglich kaum Abweichungen gegenüber Tanks bestanden, die einem Explosionsdruckstoßversuch nicht standhielten. Auch die Anzahl der Schwallwandöffnungen - bis auf eine Schwallwand hatten alle 3 Öffnungen - unterschied sich praktisch nicht.

Hieraus könnte der Schluß gezogen werden, daß weniger das Vorsehen einer Schwallwand (mit bis zu 3 Öffnungen) zu kritischen Versuchsergebnissen führt als vielmehr Konstruktions- und Herstellungsgegebenheiten, zumindest, wenn vorausgesetzt werden kann, daß die Versuchsbedingungen bei allen Versuchen mehr oder weniger gleichartig waren.

Auch wenn die Tanks, die den Versuchen Nr. 5 usw. unterzogen wurden, gewisse konstruktive Vorteile

(Zylinderüberstände, Kröpfungen, Lage von Aufsattelungen) hatten, so daß Verformungen des Zylindermantels, die zum Abreißen von Einbauten führen könnten, stärker behindert wurden, sind an diese Voraussetzung jedoch gewisse Zweifel zu knüpfen, wie schon den Versuchsergebnissen bei Tanks ohne Einbauten (s. Tabelle 8.1) zu entnehmen war: Die Explosionsheftigkeiten unterschieden sich um bis zu 70 %.

Mit anderen Worten:

Auch wenn gewisse konstruktive Gesichtspunkte - insbesondere die Verbindung von Schwallwänden und Trennböden mit dem Zylindermantel des Tanks betreffend, die selbst bei Verwendung hochgradig formänderungsfähiger Werkstoffe immer auch verformungsgünstig gestaltet sein sollte - eine bedeutende Rolle spielen, läßt sich anhand der Versuche mit Realtanks nicht mit genügender Sicherheit ausschließen, daß die Schwallwandgeometrie bedeutsamen Einfluß auf den Reaktionsablauf, vor allem im Hinblick auf Explosionsheftigkeit hat. Hierüber können Versuche mit dem Rezipienten, bei dem gleichartige Versuchsbedingungen leichter einzuhalten gehen, Aufschluß geben.

9.2. Versuche und Ergebnisse mit dem Versuchstank (Rezipienten)

9.2.1. Erläuterungen, Vorbemerkungen und allgemeine Ergebnisse

In Abschnitt 4.3. war die Vermutung geäußert worden, daß

- die Anzahl vorhandener Schwallwände
- die Lage der Durchtrittsöffnungen in jeder Schwallwand
- die Anzahl der Durchtrittsöffnungen
- die Größe einzelner Durchtrittsöffnungen
- der Überdeckungsgrad

bei ansonsten gleichen Versuchsbedingungen das Ergebnis eines Explosionsdruckstoßversuches zu beeinflussen scheinen.

Aus dem Ergebnis des Versuches Nr. 4 läßt sich die Erkenntnis ziehen, daß zumindest unter bestimmten Bedingungen die Anzahl vorhandener Schwallwände Einfluß auf Explosionsdruck und -heftigkeit haben kann.

Schwallwände werden üblicherweise mit 3 Öffnungen versehen: Die zentrale Öffnung, zugleich die größte, erlaubt es der sich im Tank befindlichen Flüssigkeit partiell durch Schwallwand hindurchzutreten (s. beispielsweise Bild 9.1 a)). Die obere kleine Öffnung wird für den daraufhin eventuell erforderlichen Druckausgleich vorgesehen, die untere kleine Öffnung dient als Abfluß, um den Tank vollständig entleeren zu können.

Daher kann die Lage der Durchtrittsöffnungen als näherungsweise vorgegeben angenommen werden; sie

werden so weit auseinanderliegend wie möglich angeordnet. Zugleich sind auf diese Weise die für einen Explosionsablauf ungünstigsten Verhältnisse angegeben, da sich eine wechselseitige Reaktionsbeeinflussung (Mehrfachzündung, örtliche Drucksteigerung) am ehesten bei weit auseinanderliegenden Öffnungen ergeben wird.

Somit bleibt primär der Einfluß der Anzahl und Größe der Durchtrittsöffnungen sowie des Überdeckungsgrads auf den Reaktionsablauf im Tank zu betrachten.

Es wurden Versuche mit 4 unterschiedlichen Schwallwänden durchgeführt, wovon 2 sich nur geringfügig unterschieden.

Die Schwallwand, die beim Versuch Nr. 39 Verwendung fand, hatte 3 Öffnungen, wovon die Zentralöffnung einen Durchmesser von 500 mm aufwies und die kleineren Öffnungen oben und unten einen Durchmesser von 100 bzw. 150 mm hatten. Der Überdeckungsgrad betrug in diesem Fall 92 %. Die Schwallwand wurde bei diesem Versuch irreparabel beschädigt, so daß bei den Versuchen Nr. 40 und 44 eine Schwallwand eingebaut wurde, die mit einer Zentralöffnung von 500 mm Durchmesser und oben und unten mit 2 kleinen Öffnungen mit einem Durchmesser von je 150 mm versehen war, so daß sich ein Überdeckungsgrad von ebenfalls ungefähr 92 % ergab.

Bei den Versuchen 56 und 57 wurde eine Schwallwand verwendet, die lediglich über eine Zentralöffnung mit einem Durchmesser von 500 mm verfügte. Der Überdeckungsgrad belief sich somit auf 93 %.

Die Versuche 53, 54 und 55 wurden mit einer Schwallwand durchgeführt, die mit einer großen, nahezu rechteckigen Öffnung mit den Abmessungen 1800 mm (Höhe) x 500 mm (Breite) ausgestattet war, was einen Überdeckungsgrad von 71 % zur Folge hatte. Die schematischen Darstellungen dieser vier Schwallwände können Bild 9.1 entnommen werden.

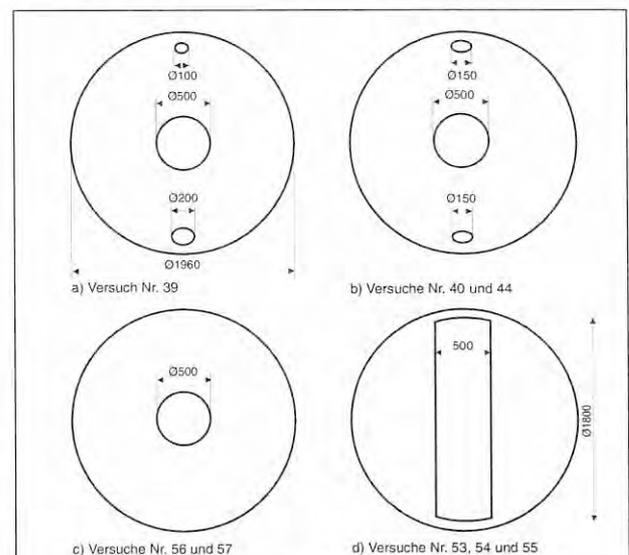


Bild 9.1: Versuche mit verschiedenen Schwallwänden

Die zusammengefaßten wesentlichen Ergebnisse der Versuche sind aus Tabelle 9.3 zu ersehen.

Vers. Nr	Ausgangsdruck p_0 [bar]	Konzentration Ethylen c [Vol.-%]	Explosionsdruck p_m [bar]	Druckanstiegsgeschwindigkeit $(dp/dt)_{max}$ [bar/s]	Explosionsheftigkeit K_{st} - Wert [bar·m/s]	Schwallwand-Öffnungsanzahl [-/-]	Überdeckungsgrad β [%]	Zündart
39	0,2	7,7	11,9	333	1505	1/3	92	Zündstift/Zündkerze
40	0,2	7,7	11,9	844	2384	1/3	92	Zündstift/Zündkerze
44	0,0	8,0	8,8	385	1088	1/3	92	Flammeneintritt
53	0,0	8,0	8,5	68	229	1/3	71	Flammeneintritt
54	0,0	8,0	8,1	48	155	1/1	71	Flammeneintritt
55	0,0	8,0	8,2	50	166	1/1	71	Flammeneintritt
56	0,0	8,0	9,1	263	881	1/1	93	Flammeneintritt
57	0,0	8,0	8,9	175	585	1/1	93	Flammeneintritt

Tabelle 9.3: Versuchsergebnisse am Rezipienten mit verschiedenen Schwallwänden

9.2.2. Versuchsdurchführung und -ergebnisse

9.2.2.1. Versuche mit einer Schwallwand mit 3 Öffnungen

Wie zu erwarten war, zeigt das Ergebnis des Versuchs Nr. 39, daß der Explosionsablauf durch Tankeinbauten (s. Bild 9.1a) stark beeinflusst wird. Der Mittelwert der Explosionsdrücke liegt hier mit 11,9 bar um ein von ca. 2 bar höher als bei entsprechenden Tanks ohne Einbauten. Ein weiteres wesentliches Kennzeichen für den Reaktionsablauf sind kurze Druckanstiegszeiten, d.h. eine hohe Druckanstiegsgeschwindigkeit und damit zusammenhängend eine entsprechende Explosionsheftigkeit.

Bei diesem Versuch löste sich durch die Explosionswirkung die über den Umfang des Rezipienten mit dessen Wand verschraubte Schwallwand aus ihrer Befestigung und drehte sich um ihre vertikale Achse. Hierdurch bedingt fiel ein Druckaufnehmer aus. Die Bewegung der Schwallwand führte zu nicht vorgesehenen Druckspitzen und starken Druckoszillationen, wodurch die Schaugläser des Rezipienten zerstört wurden. Die Bilder 9.2 bis 9.4 illustrieren die Lage der Schwallwand vor dem Versuch bzw. die Auswirkungen der Explosion auf die Schaugläser. Der Versuchsablauf war derart weder vorgesehen noch erwartet worden und da die Ergebnisse für Vergleichszwecke deshalb nur eingeschränkt Verwendung finden konnten, soll auf diesen Versuch quantitativ nicht weiter eingegangen werden.

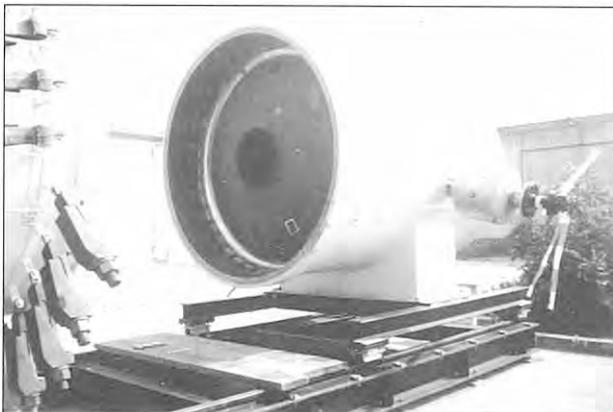


Bild 9.2: Tanksegment mit eingebauter Schwallwand

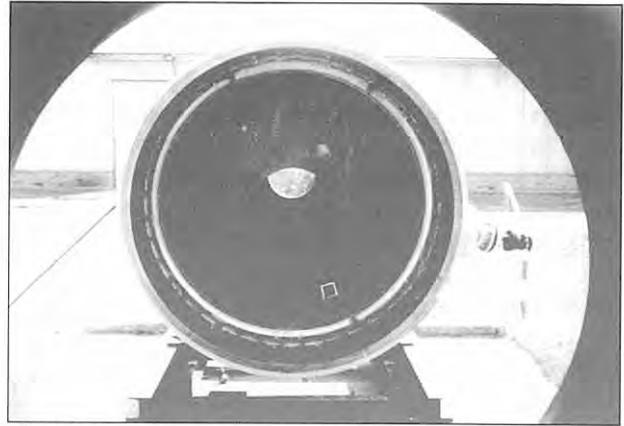


Bild 9.3: Schwallwand bei Versuch 39

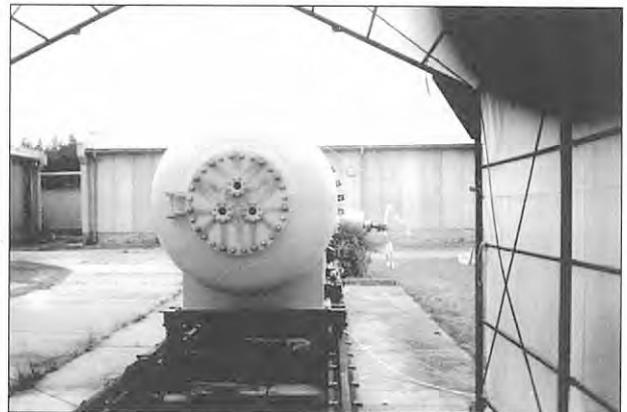


Bild 9.4: Zerstörte Schaugläser nach dem Versuch Nr. 39 mit Austrittsspuren des verbrannten Gemisches

Über die Schaugläser wurde jedoch der Reaktionsablauf im Rezipienten - zumindest bis zum Versagen der Gläser - mit einer High-Speed-Kamera aufgezeichnet. Bild 9.5 zeigt die bei Versuch 39 entstandene Sequenz des Flammendurchtritts durch die Schwallwandöffnungen, wobei der zeitliche Abstand zwischen den einzelnen Bildern im Gegensatz zu Bild 8.12 statt 8 ms hier lediglich 1 ms beträgt.

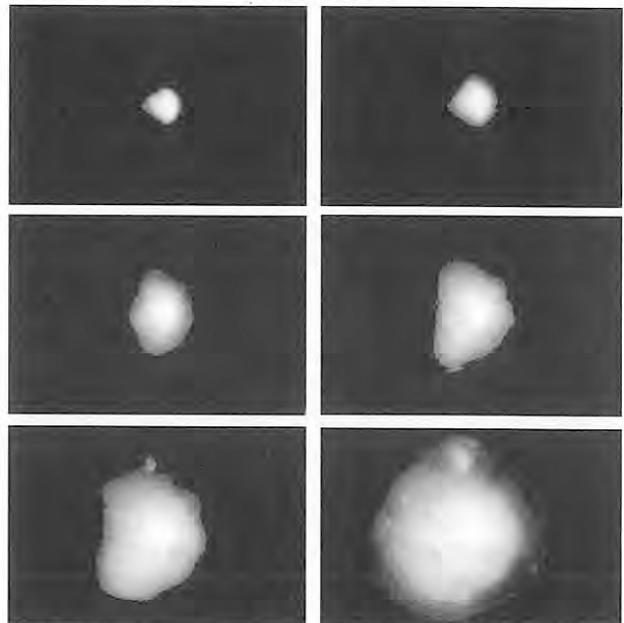


Bild 9.5/1: Durchtritt der Flammenfront durch die Schwallwand mit 3 Öffnungen

Deutlich zu erkennen ist, daß die Flammenfront zuerst durch die Mittelöffnung der Schwallwand von der Zündkammer in die zweite Kammer übergreift. Als nächstes erfolgt, bedingt durch die Strömung im Tank aufgrund der Position des Zündgefäßes, der Durchgang der Flammenfront durch die obere Öffnung der Schwallwand. Aufgrund der Helligkeitsdifferenzen im letzten Teil der Sequenz kann vermutet werden, daß im weiteren Verlauf der Explosion die Strömung in den Randbereichen durch die obere und untere Öffnung der Schwallwand eine größere Geschwindigkeit aufwies als die durch die mittlere Öffnung.

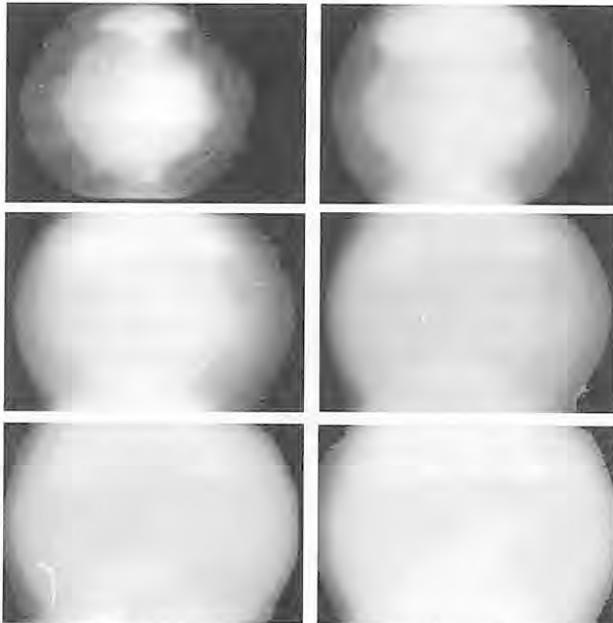


Bild 9.5/2: Durchtritt der Flammenfront durch die Schwallwand mit 3 Öffnungen

Dies ist auf den geringen Querschnitt dieser Öffnungen zurückzuführen, der eine höhere Strömungsgeschwindigkeit bewirkt.

Um für weitere Versuche von reproduzierbaren Randbedingungen ausgehen zu können, wurde bei Versuch 40 (und allen weiteren mit Schwallwänden durchgeführten Versuchen) eine andere Befestigungsvariante - Klemmung der jeweiligen Schwallwand im Verbindungsflansch der Tanksegmente A und C (kurzer Tank) usw. B und C (langer Tank) - gewählt (s. Bild 9.6, entsprechend Bild 8.6)

Die Versuche Nr. 40 und 44 wurden mit einer Schwallwand entsprechend Bild 9.1 b) durchgeführt.

Bei Versuch Nr. 40 erfolgte die Zündung mittels Brennmomentzündler im außerhalb des kurzen Rezipienten angeordneten Zündgefäß und die Reaktion wurde durch eine kurze Rohrstrecke und Flansche DN 80 in den Rezipienten übertragen. Der Ausgangsdruck der Explosion betrug 0,2 bar und die Ethylenkonzentration lag bei 7,7 Vol-%.

Trotz des unterstöchiometrischen Gemisches im Rezipienten ergab sich genau wie bei Versuch Nr. 39 ein Explosionsdruck von 11,9 bar als Mittelwert.

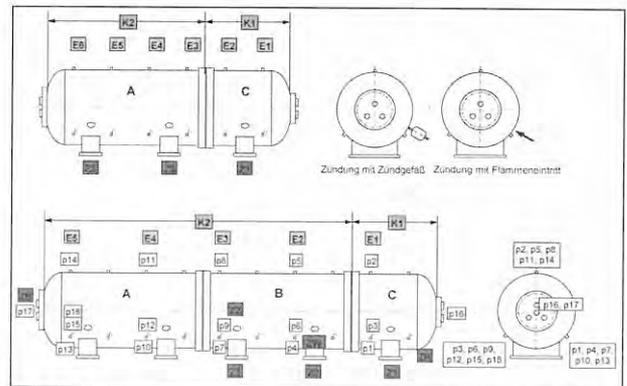


Bild 9.6: Tanksegmente, Tankkammer, Zündorte, Meßstellen-ebenen und Einzelmeßstellen

Zur Ermittlung der Explosionskennwerte wurden die Druckverläufe mit einem 100 Hz-Tiefpaß geglättet. Dies wurde notwendig, da die Druckverläufe nach Beginn der Explosion starke Schwankungen aufwiesen. Ungefiltert wurden sehr schmale Druckspitzen bis über 20 bar registriert. Niedrige Filterfrequenzen liefern zwar glatte und damit gut auswertbare Druckverläufe, das Druckmaximum wird jedoch deutlich verringert. Der verwendete Filterwert 100 Hz stellt bei Berücksichtigung der eingeschränkten Verformungsfähigkeit der beim Rezipienten dicken Tankwandung einen guten Kompromiß dar.

Inwieweit diese Druckspitzen aufgrund der Beschleunigungsempfindlichkeit der Druckaufnehmer durch Vibrationen der Tankwandung verursacht wurden oder auf Druckoszillationen der im Tank ablaufenden Reaktion zurückzuführen sind, konnte nicht eindeutig ermittelt werden.

Es ist festzustellen, daß die Druckverläufe in den beiden, jeweils durch die Schwallwand „begrenzten“ Kammern unterschiedlich sind (Bild 9.7).

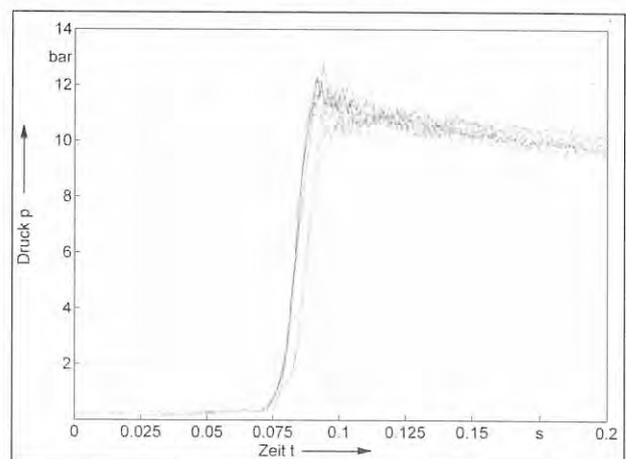


Bild 9.7: Druckverläufe bei Versuch Nr. 40

Der Druck in der Zündkammer (K 1) steigt zwar früher an als der in Kammer 2 (K 2), das Druckmaximum wird in K 1 jedoch erst später erreicht.

Infolge des Durchtritts von Druckwelle und Flammenfront durch die Öffnungen der Schwallwand ergeben sich sodann wechselseitig beeinflussende Vor-

verdichtungen, Steigerungen des Turbulenzgrades und „Mehrfachzündungen“, die den Explosionsverlauf in K 2 beschleunigen, so daß die Werte für Explosionsdruck und Druckanstiegsgeschwindigkeit zumindest über den entsprechenden Werten in K 1 lagen. Die Druckverläufe in den verschiedenen Ebenen der gleichen Kammer sind dagegen nahezu identisch.

Bei Versuch Nr. 44 erfolgte die Zündung im Rezipienten durch nahezu „drucklosen“ Flammeneintritt (Zündung des aus dem über einen Kugelhahn aus dem Rezipienten strömenden explosiblen Gemisches durch einen Propanbrenner), d.h. bei einem Ausgangsdruck von $p_a = 0,028 \text{ bar}$. Die Ethylen-Konzentration betrug 8 Vol-%.

Der Mittelwert des Explosionsdruckes ergab sich zu $p_{\text{ex}} = 8,8 \text{ bar}$. Er lag damit um mehr als 3 bar niedriger als der bei Versuch Nr. 40 ermittelte.

Der Mittelwert der Druckanstiegsgeschwindigkeit $(dp/dt)_{\text{max}} = 385 \text{ bar/s}$ wurde ebenfalls zu einem deutlich niedrigeren Wert als bei Versuch Nr. 40 ermittelt. Des weiteren kann festgestellt werden, daß der Reaktionsablauf innerhalb des Rezipienten anders vonstatten ging: Explosionsdruck, Druckanstiegsgeschwindigkeit und Explosionsheftigkeit sind bei Versuch Nr. 44 in Kammer 1 (Zündkammer) deutlich größer als in Kammer 2. Der höhere Vordruck und die Zündart (Flammenstrahlzündung) bei Versuch Nr. 40 führen augenscheinlich zu einem wesentlich dynamischeren Reaktionsablauf als der, der bei Versuch Nr. 44 zu beobachten war. Viele der bei Versuch Nr. 40 zu unterstellenden Effekte traten bei Versuch Nr. 44 nicht oder nur stark abgeschwächt auf (den Einfluß von Vorverdichtungen, Turbulenzgrad und Mehrfachzündungen betreffend). Der „mildere“ Verlauf der Reaktion kann auch den aufgezeichneten Druckverläufen entnommen werden, wie Bild 9.8 zeigt:

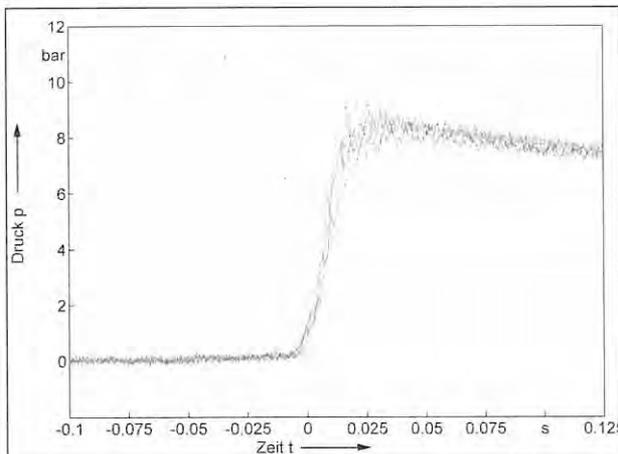


Bild 9.8: Druckverläufe bei Versuch Nr. 44

9.2.2.2. Versuche mit einer Schwallwand mit zentraler Öffnung

Um den Einfluß der Anzahl der Öffnungen in einer Schwallwand auf den Reaktionsablauf im Rezipienten zu ermitteln, wurde bei den Versuchen Nr. 56 und 57 eine Schwallwand, die nur mit einer zentralen Öffnung von 500 mm Durchmesser versehen war, in den Verbindungsflansch zwischen den Tanksegmenten B und C eingebaut (s. Bild 9.1 c)). Die Versuchsbedingungen wurden ansonsten denen bei Versuch Nr. 44 entsprechend gewählt.

Bei Versuch Nr. 56 erfolgte der Flammeneintritt in den Rezipienten bei einem Ausgangsdruck von $p_a = 0,032 \text{ bar}$. Es ergaben sich als Mittelwerte für den Explosionsdruck $p_{\text{ex}} = 9,1 \text{ bar}$, für die Druckanstiegsgeschwindigkeit $(dp/dt)_{\text{max}} = 263 \text{ bar/s}$ und für die Explosionsheftigkeit $K_G = 881 \text{ bar} \cdot \text{m/s}$, also gegenüber den bei den Versuchen Nr. 40 und Nr. 44 ermittelten nochmals geringere Werte für die Explosionskennzahlen. Trotz ungünstigeren Überdeckungsgrades führt die Reduzierung der Anzahl der Schwallwandöffnungen zu einem weniger heftigen Reaktionsablauf, wie auch die Ergebnisse des Versuchs Nr. 57 (unter gleichen Bedingungen durchgeführt) bestätigen. Die Druckverläufe bei Versuch Nr. 56 können aus Bild 9.9 ersehen werden.

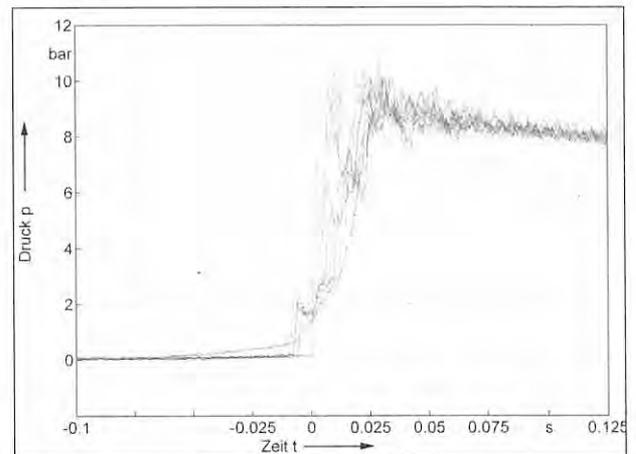


Bild 9.9: Druckverläufe bei Versuch Nr. 56

Bild 9.9 kann entnommen werden, daß die kammerbezogenen Druckverläufe ähnlich denen bei Versuch Nr. 40 sind: In der Kammer 2 liegen die Explosionskennzahlen sämtlich geringfügig höher als in der Zündkammer (Kammer 1).

Die geringere Öffnungsanzahl einer Schwallwand hat also Einfluß auf einen günstigeren Reaktionsablauf in einem Tank.

9.2.2.3. Versuche mit einer Schwallwand mit großer Längsöffnung

Mit den Versuchen Nr. 53, 54 und 55 wurde zusätzlich untersucht, ob die Öffnungsgröße bzw. ein kleinerer Überdeckungsgrad zusätzlichen Einfluß auf die Explosionskennwerte hat.

Bei diesen Versuchen fand eine Schwallwand Verwendung, die mit einer großen, (nahezu) rechteckigen zentralen Öffnung entsprechend Bild 9.1 d) versehen war. Mit den Abmessungen dieser Öffnung ergab sich ein Überdeckungsgrad von 71 %, also ungefähr der nach Rechtsvorschrift für Transporttanks zulässige Mindestwert von 70 % (s. Abschnitt 3.2.4.).

Die Versuche wurden unter den Bedingungen wie bei Versuch Nr. 44 durchgeführt. Dies soll am Beispiel des Versuchs Nr. 53 näher beschrieben werden.

Der Ausgangsdruck bei der in den Rezipienten eintretenden Reaktion lag bei 0,032 bar. Es ergaben sich als Mittelwerte für den Explosionsdruck $p_{ex} = 8,6 \text{ bar}$, für die Druckanstiegsgeschwindigkeit $(dp/dt)_{max} = 68 \text{ bar/s}$ und für die Explosionsheftigkeit $K_G = 228 \text{ bar} \cdot \text{m/s}$. Die (diesmal ungefilterten) Druckverläufe können Bild 9.10 entnommen werden.

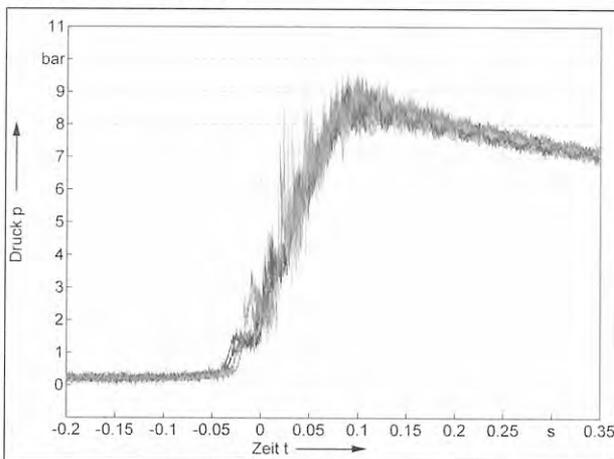


Bild 9.10: Druckverläufe bei Versuch Nr. 53

Im einzelnen konnte ermittelt werden, daß diesmal bei sehr geringen Differenzen der Explosionsdruck in der Zündkammer (K 1) zwar größer als der in Kammer K 2 war, dort jedoch die größere Druckanstiegsgeschwindigkeit und Explosionsheftigkeit zu verzeichnen war.

Dessen ungeachtet lagen die Explosionskennzahlen bei diesem Versuch sämtlich unter denen, die bei den Versuchen mit realen Transporttanks, die mit einer Schwallwand ausgestattet waren und den Explosionsdruckstoßversuch überstanden hatten, ermittelt wurden.

Das Ergebnis des Versuchs Nr. 53 wurde durch die (noch günstigeren) Ergebnisse der Versuche Nr. 54 und Nr. 55 bestätigt.

Bei Versuch Nr. 55 wurde der Reaktionsablauf (Durchtritt der Reaktion durch die Schwallwand) erneut mit der High-Speed-Kamera dokumentiert. Bild 9.11 zeigt die entsprechende Bildsequenz.

Der zeitliche Abstand zwischen den einzelnen Bildern beträgt hier ca. 2,7 ms, im Gegensatz zu 8 ms bei Bild 8.12 (Versuch Nr. 35, Tank ohne Einbauten, Flammstrahlzündung) bzw. 1 ms bei Bild 9.5 (Versuch Nr. 39, Tank mit einer Schwallwand mit 3 Öffnungen, Flamm-

strahlzündung). Somit ist alleine schon optisch der mildere Verlauf der Reaktion bei Versuch Nr. 55 als Folge der günstigen Schwallwandgestaltung ersichtlich.

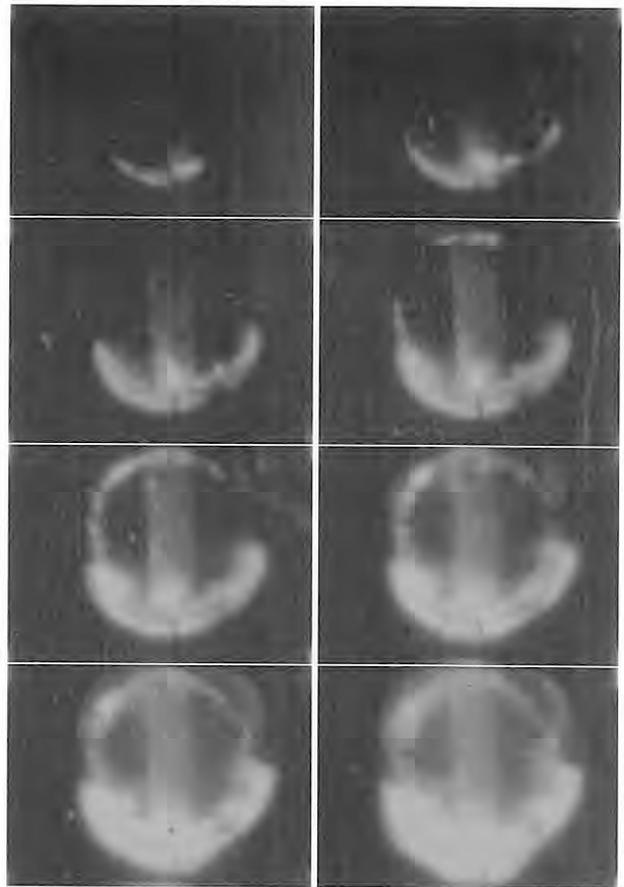


Bild 9.11/1: Durchtritt der Flammenfront durch die Schwallwand mit einer Öffnung

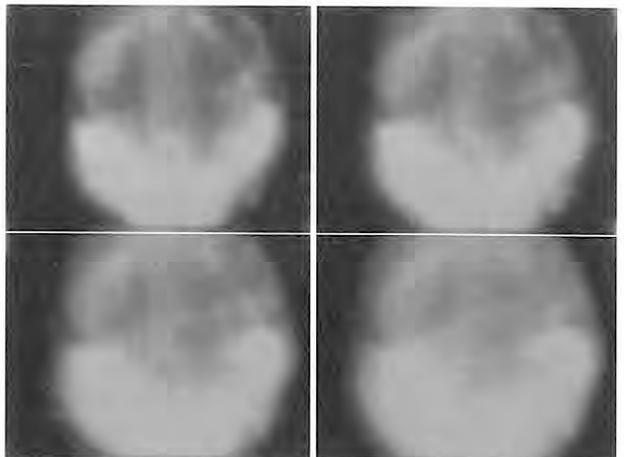


Bild 9.11/2: Durchtritt der Flammenfront durch die Schwallwand mit einer Öffnung

9.2.3. Schlußfolgerungen aus den Versuchen mit dem Rezipienten

Aus den Versuchsergebnissen mit dem Rezipienten mit Schwallwänden unterschiedlicher Bauweise kann geschlossen werden, daß ein erhöhter Ausgangsdruck p_a (z.B. $p_a = 0,2 \text{ bar}$) - zumindest in Verbindung mit einer Flammstrahlzündung (Übertritt der Reaktion in den Rezipienten aus dem Zündgefäß über eine kurze

Rohrstrecke) - zu einer überproportionalen Steigerung der Reaktionskennwerte Explosionsdruck (p_{ex}), Druckanstiegsgeschwindigkeit $(dp/dt)_{max}$ und Explosionsheftigkeit (K_G -Wert) führt. Da es nach den in den Abschnitten 7.1. und 8.4. beschriebenen Untersuchungen und den aus den entsprechenden Ergebnissen gezogenen bzw. zu ziehenden Schlußfolgerungen (vergleiche Abschnitte 7.4. und 8.5.) als ausreichend anzusehen ist, von einem sehr geringen Ausgangsdruck nahe $p_a = 0 \text{ bar}$ und einer Reaktionsübertragung in den Rezipienten durch einfachen, relativ langsam ablaufenden Flammeneintritt auszugehen, wurde der Einfluß von Vordruck und Zündart im Rahmen dieser Arbeit aus versuchstechnischen Gründen - hoher Arbeits- und Materialaufwand - nicht weiter untersucht.

Es ist weiterhin zu schlußfolgern, daß trotz der reduzierten Versuchsbedingungen die Anzahl der Öffnungen in einer Schwallwand und deren Größe Einfluß auf den Reaktionsablauf im Rezipienten haben:

- a) Die höchsten Werte für die Druckanstiegsgeschwindigkeit und Explosionsheftigkeit ergaben sich bei den Versuchen mit einer Schwallwand, die mit 3 Öffnungen entsprechend Bild 9.1 b) versehen war.
- b) Bei den Versuchen mit einer Schwallwand mit nur einer zentralen kreisförmigen Öffnung nach Bild 9.1 c), deren Größe mit der der zentralen Öffnung der Schwallwand nach Bild 9.1 b) übereinstimmte, ergab sich zwar ein Explosionsdruck gleicher Höhe, jedoch lagen in diesem Fall die Werte für Druckanstiegsgeschwindigkeit und Explosionsheftigkeit deutlich niedriger.
- c) Die Versuche mit einer Schwallwand, die über eine große, vertikal angeordnete, rechteckige Öffnung verfügte (s. Bild 9.1 d)) zeigten deutlich verringerte Werte aller Reaktionskennwerte - also auch des Explosionsdruckes -, wobei die Werte für Druckanstiegsgeschwindigkeit und Explosionsheftigkeit nochmals kleiner waren.

Die unter b) aufgeführten Ergebnisse legen des weiteren den Schluß nahe, daß primär der Turbulenzgrad der Reaktionsfront die Höhe der Explosionskennwerte bestimmt und weniger Effekte wie Vorverdichtungen und Mehrfachzündungen, zumindest unter den im Rahmen dieser Untersuchungen angelegten Versuchsbedingungen, da ansonsten auch der Explosionsdruck in der zweiten Kammer ansteigen müßte. Je größer der Einfluß von Einschnürungen und Umlenkungen ist, desto heftiger läuft also eine Explosion ab.

Die Größe der größten Öffnung einer Schwallwand hat augenscheinlich Einfluß auf den Explosionsdruck. Dieser ist bei Schwallwänden mit identischer zentraler Öffnung gleich groß, unabhängig davon, ob die Schwallwand zusätzlich mit weiteren, jedoch kleineren Öffnungen ausgestattet ist: Mit größer werdender (zentraler) Öffnung sinkt der sich ergebende Explosionsdruck.

Die Größe von Druckanstiegsgeschwindigkeit und Explosionsheftigkeit sind einerseits auch in gleicher Weise von der Größe der (größten) Öffnung abhängig, zusätzlich läßt sich hier jedoch erneut der Einfluß der Anzahl der Öffnungen in der Schwallwand ersehen: Mit Verringerung der Anzahl der Öffnungen nimmt - wie bereits erwähnt - die Größe von Druckanstiegsgeschwindigkeit und Explosionsheftigkeit ab. Mit anderen Worten: Wenn überhaupt, dann haben Mehrfachzündungen usw. Einfluß auf $(dp/dt)_{max}$ und K_G -Wert, weniger jedoch auf p_{ex} .

Die verstehenden Aussagen beziehen sich auf die Mittelwerte der Explosionskennwerte. Betrachtet man die Verhältnisse in der Zündkammer (K 1) und in der Zweitkammer (K 2) unabhängig voneinander, so läßt sich folgende Tendenz feststellen: Unabhängig von der Anzahl der Öffnungen der Schwallwand und deren Größe, war der Explosionsdruck in K 1 allgemein größer als in K 2, dagegen waren für Druckanstiegsgeschwindigkeit und Explosionsheftigkeit höhere Werte in K 2 festzustellen. Da die jeweiligen Unterschiede jedoch in der Größenordnung der Meßgenauigkeit der Versuchsanordnung lagen, kann diese Bewertung nicht als gesicherte Erkenntnis betrachtet werden.

9.3. Schlußfolgerungen - Bewertung von Tanks mit Einbauten

Aus den Versuchen mit dem Rezipienten ging hervor, daß die Höhe des Ausgangsdruckes der Explosion im Tankinneren und die Zündart - Reaktionsübertritt ins Tankinnere durch einen Flammenstrahl - überproportionalen Einfluß auf die Reaktionskennwerte (Explosionsdruck, Druckanstiegsgeschwindigkeit und damit Explosionsheftigkeit) haben. Dieser Einfluß wird relativiert, wenn man den Ergebnissen der in Abschnitt 7.1. beschriebenen Untersuchungen folgend stets von einem Ausgangsdruck nahe $p_a = 0 \text{ bar}$ und einer Zündung durch einen relativ langsam und weniger turbulent ablaufenden Flammeneintritt in den Tank ausgeht. Unabhängig davon haben jedoch Anzahl und Größe der Öffnungen in Schwallwänden (Überdeckungsgrad) zumindest Einfluß auf die Druckanstiegsgeschwindigkeit und Explosionsheftigkeit einer Explosion im Tankinneren, weniger auf den Explosionsdruck. Dieser ist augenscheinlich nicht von der Anzahl der Öffnungen, sondern vielmehr von der Größe der (größten) Öffnung in einer Schwallwand abhängig.

Der Turbulenzgrad und in geringem Maße Vorkompressionen in der zweiten Kammer scheinen bezüglich des Explosionsdruckes von ausschlaggebender Bedeutung zu sein. Der Turbulenzgrad (wegen flammenstrahlähnlicher Zündungen in der Zweitkammer) steigt in Abhängigkeit von geringer werdenden Querschnitten der größten Öffnung der Schwallwand (umgekehrte Proportionalität). Druckoszillationen führen überdies zu einem gewissen Ausgleich des Druckes in Zweit- und

Zündkammer. Insofern können die Erkenntnisse über Explosionen bei kleineren miteinander verbundenen Behältern und Behälterabschnitten (s. Abschnitt 2.3.3.) grundsätzlich auf die hier zugrundezulegenden Verhältnisse übertragen werden.

Insgesamt kann aus den Versuchen mit dem Rezipienten geschlossen werden, daß das Vorsehen einer großen Öffnung in einer Schwallwand bezüglich der zu erwartenden Reaktionskennwerte wesentlich günstiger ist als das Vorsehen von mehreren und kleineren Ausschnitten. Dies gilt für Schwallwände gleichen Überdeckungsgrades.

Wenn der Überdeckungsgrad in Verbindung mit mehreren und kleineren Öffnungen außerdem noch steigt (d.h. bei geringer werdenden freien Querschnitten), ergeben sich nochmals ungünstigere Steigerungen der Explosionskennwerte. Deshalb sollte also der freie Querschnitt von Schwallwandöffnungen möglichst groß bzw. der Überdeckungsgrad möglichst klein gewählt werden, um die Explosionskennwerte und damit die Auswirkungen einer Explosion im Tankinneren möglichst gering zu halten. Dies zumindest soweit, wie die sich auf diese Weise ergebende schwallhemmende Wirkung der Schwallwand noch als ausreichend anzusehen ist, was bei einem minimalen Überdeckungsgrad von 70 % - geltenden Rechtsvorschriften folgend - als gegeben angenommen werden kann.

Mit anderen Worten: Das vollständige Ausnutzen der nach Rechtsvorschriften gegebenen Möglichkeiten würde eine Schwallwandauslegung erlauben, die zu konstruktiv beherrschbaren Explosionskennwerten führt, wie in Abschnitt 10. beschrieben werden wird.

Die vorstehenden Schlußfolgerungen lassen sich um bestimmte Aspekte, die sich aus den Ergebnissen der Versuche mit Abschnitten realer Transporttanks ergeben haben, ergänzen.

Bei den Abschnitten realer Transporttanks handelt es sich um relativ dünnwandige Tanks (im Vergleich zur Wanddicke des Rezipienten). Die untersuchten Transporttanks waren für Prüfdrücke $p_p = 4 \text{ bar}$, der Rezipient für einen Prüfdruck von $p_p = 40 \text{ bar}$ ausgelegt.

Demzufolge ergaben sich bei allen untersuchten Tankabschnitten, die sämtlich Explosionsdrücken von ca. 10 bis 11 bar ausgesetzt waren, im Gegensatz zum Rezipienten mehr oder weniger große, dem Explosionsdruck entsprechende plastische Verformungen. Drei der mit Schwallwänden ausgestatteten Tankabschnitte versagten, fünf jedoch nicht. Bei den Tankabschnitten, die versagt haben, waren Druckanstiegsgeschwindigkeiten und Explosionsheftigkeiten festzustellen bzw. anzunehmen, die denen vergleichbar sind, die bei den Versuchen mit dem mit entsprechenden Schwallwänden ausgestatteten Rezipienten festgestellt wurden.

Bei den fünf Tankabschnitten, die nicht versagten, lagen die Werte für Druckanstiegsgeschwindigkeiten und Explosionsheftigkeiten jedoch deutlich unter den Werten, die nach den entsprechenden reproduzierbaren Versuchen mit dem Rezipienten zu erwarten gewesen wären. Konzentrations- und Explosionsdruckmessungen zufolge können abweichende Versuchsbedingungen (mangelhafte Reproduzierbarkeit) bei den verschiedenen Versuchen mit Abschnitten realer Transporttanks allein nicht die Ursache für diese Abweichungen sein. Ob eventuell ein bestimmtes Materialverhalten (Formänderungsarbeit bzw. -geschwindigkeit) der verwendeten Tankwerkstoffe hier begünstigend wirkt, wurde im Rahmen dieser Arbeit nicht weiter untersucht.

Unabhängig davon hat jedoch die werkstoff- und konstruktionsseitige Verformungsfähigkeit eines dünnwandigen Tanks mit Einbauten unzweifelhaft großen Einfluß auf sein Versagensverhalten.

Die Verwendung verformungsfähigerer Werkstoffe (z.B. austenitischer Edelstähle) begünstigt ein gutes Versagensverhalten gegenüber weniger verformungsfähigen Werkstoffen wie einfachen Baustählen oder Feinkornbaustählen. Des weiteren läßt sich die Verbindung zwischen Schwallwand bzw. Trennboden und Tankwand durch Vorsehen verformungsfähiger Elemente (Gegenkragen bestimmter Gestaltung, s. Abschnitt 10.) optimieren. Die Anordnung von Bauteilen, die die ungehinderte Verformung der Tankwand in der Nähe von Schwallwänden über die Verformungsfähigkeit der Verbindung Schwallwand/Tankmantel hinaus einschränken, wie z.B. Aufsattelungen bei Tanks von Tankfahrzeugen hat ebenfalls günstigen Einfluß, sofern diese spannungsgünstig (lastverteilend) gestaltet sind.

Ziel dieser Maßnahmen ist es zu erreichen, das explosionsbedingte Abreißen von Einbauten wie Schwallwänden und Trennböden möglichst zu verhindern, um sofortiges Aufreißen der Tankwand zu vermeiden oder durch Verdichtungseffekte der sich im Tank bewegenden Einbauten Explosionskennwerte hervorzurufen, die ebenfalls zur Tankzerstörung führen müssen.

Die Tanks, die den Explosionsdruckstoßversuchen nicht standhielten, waren im vorstehenden Sinne ungünstig gestaltet (starre, spannungsungünstige Verbindung zwischen Schwallwand und Tankwand) oder bestanden zusätzlich noch aus einem Werkstoff mit schlechteren Verformungseigenschaften.

Wie bereits erwähnt hängt die explosionsdruckstoßfeste Gestaltung von Transporttanks mit bestimmten Einbauten also nicht nur von der Höhe des zu erwartenden Explosionsdruckes, sondern auch von den weiteren Explosionskennwerten, insbesondere der Explosionsheftigkeit ab. Die Explosionsheftigkeit läßt sich durch die Gestaltung der Schwallwand eingrenzen. Das Verhalten des Tanks wiederum läßt sich durch das Ergreifen bestimmter konstruktiver Maßnahmen beeinflussen.

Aus diesem Grund erscheint es sinnvoll - da es sich bei der Bewertung von Tanks auf Explosionsdruckstoßfestigkeit mehr oder weniger immer auch um die Bewertung der Tankkonstruktion handelt - als signifikante Bewertungsgröße die bereits konstruktionsbezogene (= tankvolumenbezogene) Explosionsheftigkeit - zusätzlich zum Explosionsdruck - heranzuziehen, auch wenn sich die Reaktion selbst durch die Druckerstiegs geschwindigkeit hinreichend genau beschreiben läßt.

Damit ist die explosionsdruckstoßfeste Bauweise von Tanks mit Einbauten jedoch nicht primär druckabhängig, so daß eine gesonderte analytische Bewertung derartiger Tanks nicht möglich ist.

Kann der Explosionsdruck als gegeben angenommen werden und ist von Explosionsheftigkeiten auszugehen,

die die bei den Versuchen 53 bis 55 ermittelten Werte nicht wesentlich überschreiten, ist eine rechnerische Auslegung entsprechend Abschnitt 8.2. dennoch möglich. Die dort genannten Grenzen der Anwendbarkeit einer analytischen Vorgehensweise gelten jedoch weiterhin. Dies gilt zunächst nur für Tanks bzw. Tankkammern, die mit einer Schwallwand versehen sind.

Aus versuchstechnischen Gründen konnten keine Untersuchungen an Tanks vorgenommen werden, die mit mehreren Schwallwänden ausgestattet waren. Da die explosionsdruckstoßfeste Bauweise von Tanks mit Einbauten wie Schwallwänden wesentlich von der nicht vorherbestimmbaren Explosionsheftigkeit abhängig ist, läßt sich derzeit keine Aussage zu einer analytischen Bewertung derartiger Tanks treffen. In diesem Fall ist bis auf weiteres lediglich eine Bewertung auf experimenteller Basis möglich.

10. Auslegung und Bewertung explosionsdruckstoßfester Transporttanks

10.1. Zusammenstellung wesentlicher Ergebnisse

Unter den gegebenen Voraussetzungen ist bei der Einleitung von Explosionen durch betriebsmäßig freie Öffnungen in Transporttanks von einem Ausgangsdruck nahe $p_a = 0 \text{ bar}$ (genauer: zwischen 0,025 und 0,035 bar) und einer Zündung des sich im Tank befindlichen explosiblen Dampf/Luft-Gemisches durch einen relativ langsam ablaufenden Flammeneintritt verhältnismäßig geringen Turbulenzgrades auszugehen (siehe Abschnitt 7.1.).

Bei Tanks ohne Einbauten führt die derart verursachte Explosion des zündwilligsten Ethylen/Luft-Gemisches zu Explosionsdrücken, Druckerstiegs geschwindigkeiten und Explosionsheftigkeiten, die denjenigen entsprechen, die im Labormaßstab ermittelt wurden.

Unter diesen Bedingungen haben das Verhältnis Oberfläche zu Volumen ($O/V \geq 2,2$) und das Verhältnis Länge zu Durchmesser ($L/D \leq 6$) eines Tanks praktisch keinen Einfluß auf die Explosionskennwerte. Ein signifikanter Einfluß des Zündortes konnte ebenfalls nicht festgestellt werden. Der Vollständigkeit halber sei erwähnt, daß ein Anheben des Ausgangsdruckes und Änderungen der Zündart zu Steigerungen der Explosionskennzahlen führen. Entsprechend ist ein Absinken dieser Kennzahlen zu beobachten, wenn die Konzentration des Ethylens in Luft von stöchiometrischen Verhältnissen abweicht (s. Abschnitt 8.4.).

Bei Tanks ohne Einbauten hat eine wie eingangs erwähnt verursachte Explosion im Tankinneren also einen vorhersehbaren Explosionsdruck bzw. eine

prognostizierbare Druckerstiegs geschwindigkeit bzw. Explosionsheftigkeit zur Folge. Die sich durch maximale Explosionsdrücke von $p_{ex} \leq 8,9 \text{ bar}$ und Explosionsheftigkeiten von $K_G \leq 136 \text{ bar} \cdot \text{m/s}$ ergebenden Tankbeanspruchungen führen nach Auswertung der Versuche in Tabelle 8.2 bei geeigneter Konstruktionsweise zu Dehnungen und Dehnungsgeschwindigkeiten der Tankwände, die als quasistatisch anzusehen sind

$$(\dot{\epsilon} \leq 10^{-1} 1/s).$$

Bei Tanks mit Einbauten - beispielsweise Schwallwänden - ergeben sich (der Auswertung der Versuche in Tabelle 9.2 folgend) je nach konstruktiver Gestaltung der Schwallwand mehr oder weniger starke Steigerungen der Explosionskennwerte, die zu entsprechend höheren Tankbeanspruchungen führen können. Durch geeignete konstruktive Maßnahmen lassen sich diese Steigerungen vermeiden bzw. auf ein unbedenkliches Maß begrenzen. Es bleibt jedoch festzustellen, daß nicht in jedem Fall von quasistatischen Beanspruchungen ausgegangen werden kann

$$(\dot{\epsilon} > 10^0 1/s).$$

In jedem Fall hat also die konstruktive Gestaltung eines Tanks Einfluß darauf, ob er einer Explosion im Tankinneren standhält oder nicht.

Große, freie Öffnungen von Tanks wie (offene) Besichtigungsöffnungen bzw. Mannlöcher wirken wie Druckentlastungsöffnungen und führen zu einer Reduktion des Explosionsdruckes (s. Abschnitt 7.3.). Tanks, die einem Explosionsdruck von $p_{ex} = 8,9 \text{ bar}$ standzuhalten in der Lage sind, widerstehen auch der Einleitung

einer Explosion durch ein geöffnetes Mannloch (anstelle der Einleitung durch betriebsmäßig freie Öffnungen DN 80 oder kleiner wie bei Ausrüstungsteilen). Unter den vorstehenden Randbedingungen lassen sich Hinweise zur konstruktiven Gestaltung von Transporttanks, die einer Explosion in ihrem Inneren standhalten sollen, geben.

10.2. Konstruktive Auslegung von Transporttanks

10.2.1. Tanks ohne Einbauten

Tanks, für die die Verhältnisse $D/V \geq 2,2$ und $L/D \leq 6$ eingehalten sind, lassen sich entsprechend Abschnitt 8.2.3. explosionsdruckstoßfest auslegen. Hierbei ist Abschnitt 8.3. folgend grundsätzlich von einem Festigkeitskennwert

$$\sigma_{zul} \leq R_m / 1,3$$

nach TRT 006 [50] auszugehen. Für ungestörte Zylinderbereiche allein kann dagegen gegebenenfalls ein Berechnungskennwert

$$\sigma_{zul} \leq 2 / \sqrt{3} \cdot R_e \approx 1,155 \cdot R_e$$

Anwendung finden (s. Tabelle 8.4).

Noch kleinere erforderliche Wanddicken wären weiterhin dann möglich, wenn statt von Normmindestwerten für R_m und R_e die Kennwerte von erhöhten, an den verwendeten Blechen tatsächlich vorhandenen, d.h. ermittelten Kennwerten ausgegangen werden könnten. Weitere Optimierungen lassen sich durch die bessere Bewertung von Schweißverbindungen, d.h. mit Schweißnahtfaktoren $\nu > 0,85$ erzielen.

Eine gesonderte Betrachtung der Bodenbereiche von konzentrischen Endböden z.B. in Klöpper- oder Korb-bogenform kann entfallen, da der Bodenbereich bei Druckbeanspruchungen über die Streck- bzw. Fließgrenze hinaus in Richtung auf eine Halbkugelgestalt, d.h. eine spannungsgünstigere Form als im Zylinderbereich der Tanks vorhanden, zu fließen beginnt, ohne daß der Boden aufreißt. Ebenso werden durch plastische Verformung des Krepfenbereichs die dort herrschenden Spannungspitzen abgebaut.

Eine derartige Vorgehensweise ist den Abschnitten 8.3. und 8.5. folgend jedoch nur unter folgenden Voraussetzungen möglich:

- Die nach Rechtsvorschrift vorgegebenen Anforderungen an Mindestwanddicken - im allgemeinen größer als druckbedingt erforderlich - müssen eingehalten sein.
- Für den zylindrischen Teil und die Böden der Tanks muß ein einheitlicher Werkstoff mit vergleichbaren Festigkeitskennwerten verwendet werden.

c) Berechnungen des zylindrischen Teils und der Böden von Tanks, für die Explosionsdruckstoßfestigkeit nachgewiesen werden soll, müssen zunächst auf der Basis der AD-Merkblätter B 1 [83] und B 3 [87] für einen Berechnungs- bzw. Prüfdruck von wenigstens 4 bar erfolgen.

d) Die Wanddicke der Böden darf nicht kleiner sein als die Wanddicke des zylindrischen Teils, die sich aufgrund ihrer Auslegung auf Explosionsdruckstoßfestigkeit (s.o.) größer ergeben kann als nach AD-Merkblatt B 1 für 4 bar Prüfdruck ermittelt. Andere Zuschläge müssen ebenfalls Berücksichtigung finden (z.B. Korrosionszuschläge).

e) Ausschnitte (Besichtigungsöffnungen, Flansche usw.) sind - da sie möglichst formstabil bleiben sollen - nach AD-Merkblatt B 9 [84] für den Explosionsdruck $p_{ex} = 8,9 \text{ bar}$ zu bemessen.

f) Böden müssen als ein Teil gefertigt sein (Böden dürfen keine Schweißnähte aufweisen).

Auflagerbereiche können wie Endböden von einer gesonderten Betrachtung ausgenommen werden, wenn ihre konstruktive Gestaltung als spannungsgünstig angenommen werden kann. Dies gilt in allen Fällen als nachgewiesen, in denen Auflagerbereiche (Aufsattelungen, Tragarme) solchen entsprechen, die an Tanks vorhanden waren, die einer Prüfung auf Explosionsdruckstoßfestigkeit mit positivem Ergebnis unterzogen worden waren oder deren Eignung z.B. durch eine Finite-Elemente-Berechnung belegt wird. Letzteres gilt auch für Ausschnitte: Die überdimensionierte Bemessung nach AD-Merkblatt B 9 kann mit Hilfe einer Finite-Elemente-Berechnung optimiert werden.

Auf die Möglichkeit einer stoffbezogenen Optimierung der für die Explosionsdruckstoßfestigkeit erforderlichen Wanddicke durch die stoffbezogene Reduzierung des maximalen Explosionsdruckes ist in Abschnitt 8.3. bereits ausführlich hingewiesen worden.

10.2.2. Tanks mit Einbauten

Den Abschnitten 9.2.2. und 9.3. folgend sollten Schwallwände zur Begrenzung der Reaktionskennwerte Explosionsdruck $p_{ex} < 8,9 \text{ bar}$ und Explosionsheftigkeit $K_G < 400 \text{ bar} \cdot \text{m/s}$ in Übereinstimmung mit geltenden Anforderungen nach Rechtsvorschriften.

- möglichst große Öffnungsquerschnitte, d.h. einen möglichst kleinen Überdeckungsgrad aufweisen,
- möglichst nur über eine Öffnung des vorgenannten Überdeckungsgrades verfügen. Ein mögliches Beispiel für eine derartige Schwallwand ist aus Bild 9.1 d) zu ersehen.

Da Schwallwände und Trennböden nicht optimal in Tanks eingebaut werden können, kommt ihrer Kon-

struktionsweise (und der des Tanks insgesamt) zusätzlich große Bedeutung bei.

a) Verbindung Schwallwand/Trennboden - Tankwand

Drucktanks werden aus vorgeformten Blechen und Endböden zusammengefügt. Die Verbindungen sind als Stumpfstoß mit geeigneter Nahtart - u.U. mehrlagig - durchzuschweißen, was sowohl optimale Verbindungen der für zylindrische Teile verwendeten Bleche als auch entsprechend günstige Verbindungen des zylindrischen Teils eines Tanks mit Endböden ermöglicht. Schwallwände und Trennböden müssen dagegen in den zylindrischen Teil eines Tanks (Tankmantel) eingeschoben werden und sind daher als Überlappstoß mit einseitig geschweißten, geeigneten Kehlnähten zu fügen (s. Bild 10.1). Näheres zu Eignung und Anwendungsbereichen von Stößen und Nahtarten bei Schweißverbindungen kann der einschlägigen Literatur (z.B. [88]) entnommen werden. Stumpfstoße nehmen statische und dynamische Belastungen wesentlich besser auf als einseitig geschweißte Überlappstoße, gleiche Werkstoffe, Schweißnahtgüte, Wanddicken usw. vorausgesetzt. Insbesondere das Verhalten von einseitig geschweißten Überlappstoßen gegenüber Biege- und Scherbeanspruchungen ist schlechter als das von durchgeschweißten Stumpfstoßen.

Aus diesem Grund ist eine Verbindung nach Bild 10.1 a) bei dynamischen Beanspruchungen einer Schwallwand oder eines Trennbodens durch eine Explosion u.U. nicht in der Lage, diesen Beanspruchungen zu widerstehen, da auf die Einbauten Biegebeanspruchungen wirken, die zu Scherbeanspruchungen in der Schweißnaht führen. Dies dürfte ein das Tankversagen bei Versuch Nr. 19 begünstigender Umstand gewesen sein.

Verbessern läßt sich das Verhalten der Verbindung Schwallwand/Trennboden - Tankwand durch das Vorsehen von eingeschweißten Gegenkragen, die zu einer Lastverteilung, unter günstigen Verhältnissen in Richtung auf Zugbeanspruchungen, führen (Bild 10.1 b) ff.).

Hier kann nunmehr zwischen „steifen“ und „weichen“ Gegenkragen unterschieden werden. Steife Gegenkragen (s. Bild 10.1 b) und c)) führen zwar zu einer gewissen Lastverteilung, da nunmehr zwei Schweißnähte die durch eine Explosion hervorgerufenen Belastungen aufnehmen, aber die Belastungen verursachen nach wie vor unmittelbar auch Beanspruchungen der Schweißnähte. Dies dürfte sich bei den Versuchen Nr. 4, 14 und 27 ebenfalls ungünstig auf das Schwallwand- bzw. Trennbodenverhalten ausgewirkt haben.

Weiche Gegenkragen (s. Bild 10.1 d)) dagegen beginnen sich bei Überschreiten ihrer Fließgrenze auf diesem Spannungsniveau zu verformen (z.B. zu begradi- gen) bevor die Scherfestigkeit der Schweißverbindungen erreicht ist und bauen daher Verformungsenergie ab,

bzw. leisten Formänderungsarbeit, was also begünstigenden Einfluß auf das Schweißnahtverhalten hat.

Als Fazit dieser Betrachtung ist festzuhalten, daß bei Verbindungen zwischen Schwallwand bzw. Trennboden und Tankwand immer ein weicher Gegenkragen entsprechend Bild 10.1 d) vorgesehen werden sollte.

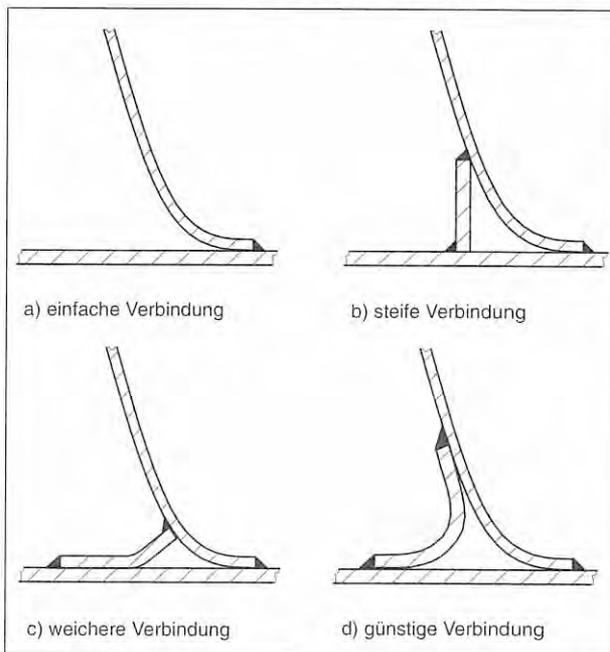


Bild 10.1: Verbindungen zwischen Einbauten und Tankwänden

b) Ergänzende Konstruktionshinweise

Die Wirkung von weichen Gegenkragen läßt sich konstruktiv unterstützen, wenn durch die Anordnung von Auflagerbereichen (Aufsattelungen, Tragarmen usw.) und Unterdruckverstärkungen (Vakuumringen) die Verformungsfähigkeit (Formänderungsfähigkeit) der Tankwand in der Nähe von Schwallwänden oder Trennböden eingeschränkt wird, so daß zusätzliche Beanspruchungen durch die explosionsbedingte Verformung der Tankwand selbst gering gehalten werden. Andererseits sollten Spannungsspitzen etwa an Störstellen wie eben Auflagerbereichen usw. vermieden werden. Gurt- und Futterbleche, die der Lastverteilung beim Anbringen von Aufsattelungen oder Vakuumringen dienen, helfen Spannungsspitzen abzubauen. Andererseits werden hierdurch Schweißnahtlängen (Störstelle) vergrößert, so daß abgewogen werden muß, welche Lösung die insgesamt günstigste ist. Gurt- und Futterbleche könnten u.U. auch die Verbindung Schwallwand/Trennboden - Tankwand nochmals spannungsgünstiger gestalten helfen.

Die Lage betriebsmäßig freier Öffnungen, durch die der Eintritt einer Reaktion ins Tankinnere zu befürchten steht, wird mehr oder weniger frei gewählt. Diese Öffnungen und die Anordnung einer Schwallwand im Tank sollten nach Möglichkeit so angeordnet werden, daß eine eventuelle Explosion in die konkave Seite der Schwallwand hineinläuft, da dies zu günstigeren mechanischen Belastungen der Verbindung Schwallwand/

Tankwand führt als umgekehrt (Biegung/Zug anstelle Scherung).

Die rechnerische Auslegung von Tanks mit Einbauten kann auf dieselbe Weise wie bei Tanks ohne Einbauten erfolgen, wenn die dort (s. Abschnitt 10.2.1.) aufgeführten Bedingungen eingehalten werden. In Ergänzung hierzu empfiehlt es sich, die Wanddicke von Trennböden zunächst ebenfalls nach AD-Merkblatt B 3 für einen Prüfdruck von 4 bar zu bemessen, jedoch in jedem Fall die Wanddicke von Trennböden und Schwallwänden entsprechend der der Tankwand vorzusehen. Trennböden müssen - genau wie Endböden - ohne Schweißnaht aus einem Stück gefertigt sein.

10.3. Qualifizierende Bewertung von Transporttanks

Vor dem Hintergrund der nunmehr vorliegenden Untersuchungsergebnisse läßt sich eine qualifizierende Bewertung von Transporttanks in Anlehnung an die TRT 001 [50] anhand folgender Anforderungen und Kriterien vornehmen:

- a) Transporttanks gelten als explosionsdruckstoßfest, wenn sie einer Explosion im Inneren standhalten, ohne aufzureißen, dabei sind bleibende Verformungen zulässig.
 - b) Über diese Anforderungen hinaus ist außerdem zu gewährleisten, daß keine Bauteile abgerissen sind und der Domdeckel nur soweit verformt ist, daß zwar die Domdeckeldichtung evtl. herausgedrückt, der Tank jedoch nicht erheblich offen ist.
 - c) Der für den Nachweis der Explosionsdruckstoßfestigkeit maßgebliche Explosionsdruck ist stoffabhängig und abhängig vom Ausgangsdruck, bei dem die Zündung im Tank erfolgt. Bei Transporttanks wird davon ausgegangen, daß eine störungsbedingte Zündung durch eine betriebsmäßig freie Öffnung bei geringen Ausgangsdrücken erfolgt. Für den Ausgangsdruck wird daher ein Umgebungsdruck in Höhe von 1 bar (abs.) angenommen. Ein Gemisch von 8,0 Vol.-% Ethylen in Luft weist unter allen bisher untersuchten Stoffen - außer solchen Stoffen, die zum Selbstzerfall neigen - den höchsten im Labormaßstab ermittelten Explosionsdruck auf. Für einen stoffunabhängigen Nachweis der Explosionsdruckstoßfestigkeit ist daher von diesem Explosionsdruck als Bemessungsgrundlage für Transporttanks auszugehen.
 - d) Der Nachweis explosionsdruckstoßfester Bauweise gilt als geführt, wenn ein Transporttank:
 - in einer experimentellen Prüfung an einem Baumuster einer Explosion mit dem obengenannten Gemisch standhält, also die eingangs erwähnten Anforderungen erfüllt,
- darüber hinaus, um vom Baumuster auf Tanks gleicher Bauart schließen zu können, einer Spannungsbewertung unter Anwendung erforderlicher Sicherheitsbeiwerte unterzogen wird (s. Abschnitt 8.2.1.),
 - bis auf Berechnungsverfahren den sonstigen in Abschnitt 10.2 enthaltenen Grundsätzen zur konstruktiven Auslegung folgend gestaltet ist.
- e) Die erwähnte experimentelle Prüfung kann mit einer Untersuchungskonzeption entsprechend Abschnitt 5.3 bzw. 5.4 (bezüglich der anzuwendenden Zündart, vgl. auch Abschnitt 7.1.) durchgeführt werden.
 - f) Einbauten wie Schwallwände und Trennböden können einem separaten Eignungsnachweis durch eine Prüfung im Rezipienten unterzogen werden, wenn ihre und die konstruktive Gestaltung des Tanks, in dem sie Verwendung finden sollen, den Anforderungen bzw. Empfehlungen nach Abschnitt 10.2.2. vollinhaltlich folgen.
 - g) Nach den im Rahmen dieser Arbeit gewonnenen Erkenntnissen sind Transporttanks, in denen mehr als eine Schwallwand vorgesehen ist, immer einer experimentellen Prüfung am Originaltank oder -tankabschnitt zu unterziehen (s. Abschnitt 9.3.).
 - h) Ein Tank ohne Einbauten wie Schwallwände und Trennböden gilt ebenfalls als explosionsdruckstoßfest, wenn nachgewiesen ist, daß er einem Wasserdruckversuch unter Berücksichtigung des Sicherheitsbeiwertes gegen Bruch (Erreichen der Zugfestigkeit; $R_m / 1,3$) und der Schweißnahtgüte v standhält, um vom geprüften Baumuster auf gleichartige Tanks sicher rückschließen zu können (s. Abschnitt 8.2.2).
 - i) Ein Transporttank gilt auch als explosionsdruckstoßfest, wenn die Berechnung aller drucktragenden Teile des Tanks auf der Grundlage eines Explosionsdruckes $p_{ex} \geq 8,9 \text{ bar}$ bzw. vereinfacht $p_{ex} = 9 \text{ bar}$ nach den Maßgaben der von der Arbeitsgemeinschaft Druckbehälter herausgegebenen AD-Merkblätter durchgeführt wird. Anstelle des Festigkeitskennwertes K/S nach den AD-Merkblättern kann - da bleibende Verformungen zulässig sind - von einer höchstzulässigen Werkstoffausnutzung

$$\sigma_{zul} \leq R_m / 1,3$$
 ausgegangen werden. Für Werkstoffe mit einem Streckgrenzenverhältnis von mehr als 0,66 kann dagegen auch der für (ungestörte) zylindrische Bereiche unter mehrachsiger Beanspruchung ermittelte Berechnungskennwert

$$\sigma_{zul} \leq 2 / \sqrt{3} \cdot R_e$$
 verwendet werden, bei dessen Anwendung bzw. Erreichen Fließen des Werkstoffes gerade einsetzt (s. Abschnitt 8.2.3.).

- j) Tanks mit Einbauten (Trennböden bzw. Schwallwand) können grundsätzlich auf die gleiche Weise wie vorstehend beschrieben dimensioniert werden, wenn nur eine Schwallwand vorgesehen wird, diese nach den in Abschnitt 10.2.2. aufgeführten Grundsätzen gestaltet ist und ferner die sonstigen im genannten Abschnitt enthaltenen Konstruktionshinweise eingehalten sind.

Belastungen von Transporttanks - etwa durch äußeren Überdruck und damit verbundene Stabilitätsprobleme (Unterdruckfestigkeit von Transporttanks) sowie unfallbedingte lokale und globale mechanische

Einwirkungen auf Transporttanks von außen (Penetration - puncture - durch formaggressive Teile, Aufprall - impact - von Strukturen großer Masse usw.) - sind im Zusammenhang mit der vorliegenden Arbeit von untergeordneter Bedeutung und wurden daher in die angestellten Betrachtungen nicht unmittelbar einbezogen (mittelbar ist natürlich ein Zusammenhang über die anzuwendenden Grundlagen der Mechanik gegeben). Ein Überblick über den diesbezüglichen Stand der Erkenntnisse einschließlich einer weitgehenden Auswertung entsprechender Literatur kann [89] entnommen werden.

11. Abschließende Bemerkungen

Anhand der Ergebnisse der vorliegenden Untersuchungen konnte in wesentlichen Teilen Aufschluß über den Ablauf von Explosionen entzündbarer flüssiger Stoffe - genauer: explosibler Dampf/Luft-Gemische - in Transporttanks gewonnen werden.

- a) Die Randbedingungen, unter denen sich Explosionen in Transporttanks ereignen können, wurden definiert (s. Abschnitt 7.1.).
- b) Die Parameter, die die Explosionskennwerte wie Explosionsdruck, Druckanstiegsgeschwindigkeit und Explosionsheftigkeit beeinflussen, wurden bestimmt bzw. bestätigt (s. Abschnitte 8.4. und 9.2.). Dabei wurde der Einfluß folgender Größen qualitativ und quantitativ untersucht:
- Konzentration des entzündbaren Dampfes in Luft,
 - Ausgangsdruck der Explosion im Tank,
 - Zündart,
 - Zündort,
 - geometrische Verhältnisse möglicher Transporttanks (Längen/Durchmesser-Verhältnis; Oberflächen/Volumen-Verhältnis),
 - (geometrische) Verhältnisse möglicher Einbauten (Trennböden, Schwallwände).

Vor diesem Hintergrund konnte genauere Aufschluß zur Explosionsdruckstoßfestigkeit von Transporttanks wie folgt gegeben werden:

- c) Der Begriff „Explosionsdruckstoßfestigkeit“ wurde in bezug auf die Anwendung auf Transporttanks definiert (s. Abschnitt 10.3.).
- d) Methoden des analytischen und experimentellen Eignungsnachweises explosionsdruckstoßfester Transporttanks und seiner Komponenten wurden entwickelt bzw. überprüft (s. Abschnitte 5., 8. und 9.).

- e) In diesem Rahmen konnten Berechnungsmöglichkeiten zu optimierter Auslegung von explosionsdruckstoßfesten Transporttanks aufgezeigt werden.
- f) Es konnten Hinweise zur konstruktiven Auslegung von Tanks gegeben werden, die
- die spannungsgünstige Gestaltung eines Transporttanks insgesamt
 - die Explosionskennwerte günstig beeinflussende Gestaltung von Einbauten
- betreffen (s. Abschnitte 8.5., 9.3. und 10.2.).
- g) Damit wurden Konkretisierungen und Vereinfachungen bisheriger Vorgehensweisen aufgezeigt.

Mit anderen Worten:

Ausgehend von der Kenntnis des Ablaufs von Explosionen in Transporttanks unter bestimmten Randbedingungen konnten Hinweise gegeben werden, wie Tanks explosionsdruckstoßfest gestaltet werden können und wie dies optimiert geschehen kann, damit Unfälle der zu Beginn dieser Darstellung geschilderten Art nach Möglichkeit vermieden werden.

Die empfohlene spannungsgünstige Gestaltung von explosionsdruckstoßfesten Transporttanks führt zugleich auch zu einer optimierten Gestaltung gegen unfallbedingte Einwirkungen von außen.

Verschiedene der Erkenntnisse aus den vorliegenden Arbeiten,

- den zugrunde zu legenden Ausgangsdruck (s. Abschnitt 7.1.),
- die für Eignungsnachweise anzuwendende Zündart (s. Abschnitt 7.1.),
- die ersatzgleiche Wasserdruckprüfung für Tanks ohne Einbauten (s. Abschnitte 8.1.2. und 8.2.2.)

betreffend, erschienen wirtschaftlich so bedeutsam, daß sie unmittelbar in das technische Regelwerk (TRT006-neu) eingeflossen sind.

Dessen ungeachtet ist anzustreben, das Technische Regelwerk im Sinne der mit dieser Arbeit darüber hinaus gegebenen Empfehlungen zu Auslegung und Bewertung explosionsdruckstoßfester Transporttanks zur Gänze zu überarbeiten.

Da dies in Zukunft wahrscheinlich nicht mehr auf nationaler Ebene erfolgen kann, wird es erforderlich werden, im Zusammenhang mit den EG/EU-weit geltenden Rechtsvorschriften den (mandatierten) Normungsweg zu beschreiten. Ein derartiges Normungsvorhaben auf der Grundlage des in den Rechtsvorschriften bereits eingeführten Schutzzieles müßte sich wesentlich also mit Definitionen und den Nachweismethoden der

Explosionsdruckstoßfestigkeit von Transporttanks - wie vorstehend bereits aufgeführt - beschäftigen.

In diesem Zusammenhang müßten auch Änderungen zur alternativen Schutzmöglichkeit gegen von außen in das Innere eines Tanks übertretende Reaktionen veranlaßt werden: In Zukunft sollten an Transporttanks nur noch dauerbrandsichere Flammendurchschlagsicherungen Verwendung finden dürfen (s. Abschnitt 7.2.).

Abschließend soll angemerkt werden, daß - obwohl ein gewisser Kenntnisstand erreicht ist - weitere ergänzende Untersuchungen sinnvoll wären. Die Analyse der Wirkung von Einbauten auf Explosionsabläufe in Tanks, insbesondere die von mehreren Schwallwänden hintereinander, könnte die vorliegende Arbeit sinnvoll ergänzen (s. Abschnitt 9.3.).

Literaturverzeichnis

- [1] S. Hartwig: Das Risiko des Chlortransportes mit der Bahn in Deutschland für die Allgemeinbevölkerung, Kolloquium in der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (Hand-out), Berlin, 11. Februar 1998
- [2] 15 Prozent der beförderten Güter sind Gefahrgüter Statistisches Bundesamt, Mitteilungen für die Presse - Nr. 109/93, Wiesbaden, 1993
- [3] Forschungsvorhaben THESEUS - Tankfahrzeuge mit höchst erreichbarer Sicherheit durch experimentelle Unfallsimulation -Zusammenfassender Schlußbericht TÜV Rheinland e.V., Institut für Verkehrssicherheit et al, Köln, März 1995
- [4] Gesetz über die Beförderung gefährlicher Güter, in der Bekanntmachung der Neufassung vom 29. September 1998 (BGBl. Teil I 1998 S. 3114)
- [5] S. Hartwig: Große technische Gefahrenpotentiale Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg-New York, 1983
- [6] S. Hartwig: Schwere Gase bei Störfallfreisetzung VDI-Verlag, Düsseldorf, 1989
- [7] Tödliche Verbrennung bei der Explosion eines mit Bitumen gefüllten Straßentankfahrzeuges Unf. Ber. BG Chemie 29/71 (28)
- [8] Tankexplosion Sicher Arbeiten (1980) H.5, S. 134 (Nachdr. Unf. Ber. BG Chemie)
- [9] Verbrennungen nach Verpuffung während Schweißarbeiten Unf. Ber. BG Chemie 48/93 (116) vom 23.4.1993
- [10] Unfall-Report, Feuer + Explosion, Tankzug Gefährliche Ladung 5/96, S. 28
- [11] Unfall-Report, Feuer + Explosion, Tankzug Gefährliche Ladung 2/97, S. 27
- [12] Unfall-Report, Feuer + Explosion, Tankzug Gefährliche Ladung 2/98, S. 28
- [13] Explosion eines Tankcontainers, Jahresbericht 1997 der staatlichen Gewerbeaufsicht des Landes Niedersachsen, S. 30/31, Hannover, Juli 1998
- [14] S. Hartwig: Die Risikoanalyse als Hilfe für Sicherheitsentscheidungen am Beispiel schwerer Gase und des Chlorstoffzyklus, Erich Schmidt Verlag, Berlin-Bielefeld-München, 1999
- [15] Richtlinien für die Vermeidung der Gefahren durch explosionsfähige Atmosphäre mit Beispielsammlung (Explosionsschutz-Richtlinien- EX-RL)BG Chemie (Hrsg.), Richtlinien Nr. 11, Ausgabe 09.1986
- [16] Schampel, K.: Flammendurchschlagsicherungen Expert Verlag, 1988 (Kontakt & Studium, Bd. 170)
- [17] Heinrich, H.-J.: Zum Ablauf von Gasexplosionen in mit Rohrleitungen verbundenen Behältern, BAM-Bericht Nr. 28, Berlin, August 1974
- [18] Förster, H. und Steen, H.: Einfluß der Turbulenz auf den Explosionsablauf in Dampf/Luft oder Gas/Luft-Gemischen in: PTB-Bericht W-33, Braunschweig, Dezember 1987
- [19] DIN EN 1127-1, Explosionsschutz - Teil 1: Grundlagen und Methodik, Deutsche Fassung Oktober 1997, Beuth Verlag GmbH, Berlin
- [20] Nabert, K. und Schön, G.: Sicherheitstechnische Kennzahlen brennbarer Gase und Dämpfe, Deutscher Eichverlag GmbH, 2. erweiterte Auflage 1963, Braunschweig, Nachdruck 1991
- [21] Bartknecht, W.: Explosionen, Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg-New York, 2. Auflage 1980
- [22] Förster, H. und Steen, H.: Untersuchungen zum Ablauf turbulenter Gasexplosionen, PTB-Bericht W-32, Braunschweig, Oktober 1986
- [23] Degener, M. and Förster, H.: Investigation of Flame Propagation: Influence of Turbulence on Fla-

- me Propagation EC Research Area: Major Technological Hazards Programme, Project No. EV4T 0011-D (B), Final Report, Braunschweig, December 1990
- [24] Krause, U.: Ein Beitrag zur mathematischen Modellierung des Ablaufs von Explosionen, BAM-Bericht Nr. 194, Berlin, 1993
- [25] Grundgesetz der Bundesrepublik Deutschland vom 23.05.1949 (BGBl I S. 1)
- [26] Gesetz über technische Arbeitsmittel (Gerätesicherheitsgesetz) vom 23.10.1992 (BGBl I S. 1793) in der Fassung der 12. Verordnung zum Gerätesicherheitsgesetz vom 17.06.1998 (BGBl. I S. 1393)
- [27] Gesetz zu dem Europäischen Übereinkommen vom 30.09.1957 über die internationale Beförderung gefährlicher Güter auf der Straße (ADR) vom 18.08.1969 (BGBl. II S. 1489) zuletzt geändert am 06.08.1975 (BGBl. I S. 2121)
- [28] Verordnung über die innerstaatliche und grenzüberschreitende Beförderung gefährlicher Güter auf der Straße (Gefahrgutverordnung Straße - GGVS) vom 12.12.1996 (BGBl. I S. 1886) in der Bekanntmachung der Neufassung vom 22.12.1998 (BGBl. I S. 3993)
- [29] Verordnung über die innerstaatliche und grenzüberschreitende Beförderung gefährlicher Güter mit Eisenbahnen (Gefahrgutverordnung Eisenbahn - GGVE) vom 12.12.1996 (BGBl. I S. 1876) in der Bekanntmachung der Neufassung vom 22.12.1998 (BGBl. I S. 3909)
- [30] Verordnung über die Beförderung gefährlicher Güter mit Seeschiffen (Gefahrgutverordnung See - GGVS) vom 04.03.1998 (BGBl. I S. 419)
- [31] Gesetz zum Vertrag vom 25.03.1957 zur Gründung der Europäischen Wirtschaftsgemeinschaft vom 27.07.1997 (BGBl. II S. 753 und 1678 sowie BGBl. II 1958 S. 64)
- [32] Gesetz zum Vertrag vom 07.02.1992 über die Europäische Union vom 28.12.1992 (BGBl. II S. 1251)
- [33] Europäisches Übereinkommen vom 30.09.1957 über die internationale Beförderung gefährlicher Güter auf der Straße (ADR) sowie Anlagen A und B.
- [34] Übereinkommen vom 09.05.1980 über den internationalen Eisenbahnverkehr (COTIF) mit Anhang B, Anlage I über die Ordnung für die internationale Eisenbahnbeförderung gefährlicher Güter (RID) von 1985, Anlageband zum BGBl. II Nr. 18
- [35] Richtlinie 94/55/EG des Rates vom 21.11.1994 zur Angleichung der Rechtsvorschriften der Mitgliedsstaaten für den Gefahrguttransport auf der Straße (Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaften Nr. L 319/7 vom 12.12.1994) in Verbindung mit der Richtlinie 96/86/EG der Kommission vom 13.12.1996 zur Anpassung der Richtlinie 94/55/EG des Rates zur Angliederung der Rechtsvorschriften der Mitgliedsstaaten betreffend die Beförderung gefährlicher Güter auf der Straße an den technischen Fortschritt (Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaften Nr. L 335 vom 24.12.1996, S. 43)
- [36] Richtlinie 96/49/EG des Rates vom 23.07.1996 zur Angleichung der Rechtsvorschriften der Mitgliedsstaaten für die Eisenbahnbeförderung gefährlicher Güter (Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaften Nr. L 235 S. 25 vom 17.09.1996)
- [37] IMDG-Code deutsch in der Fassung des Amendments 29-98 (Bundesanzeiger Nr. 45a vom 06.03.1999)
- [38] Recommendations on the Transport of Dangerous Goods, Model Regulations, Tenth Revised Edition, ST/SG/AC.10/1/Rev. 10 von 1997
- [39] Schulz-Forberg, B.: Model for a world-wide regulation for the transport of dangerous goods by all modes („Yellow Paper“) K.O. Storck-Verlag, Hamburg, 1997
- [40] AD-Merkblätter, Taschenbuch-Ausgabe 1997, herausgegeben vom Vd TÜV e.V. Essen, Carl Heymanns Verlag KG, Beuth Verlag GmbH
- [41] Richtlinien (R, TR, TRT, TRTF, TRKW, TRTC) zu den Gefahrgutvorschriften (Verkehrsblatt Nr. 18 S. 586)
- [42] Verordnung über die innerstaatliche und grenzüberschreitende Beförderung gefährlicher Güter auf Straßen (Gefahrgutverordnung Straße - GGVS) in der Neufassung vom 11.08.1995 (BGBl. I S. 1995)
- [43] Verordnung über die innerstaatliche und grenzüberschreitende Beförderung gefährlicher Güter mit Eisenbahnen (Gefahrgutverordnung Eisenbahn - GGVE) vom 22.07.1985 in der Fassung der 5. Eisenbahn-Gefahrgutänderungsverordnung vom 15.12.1995 (BGBl. I S. 1847)
- [44] Verordnung über Anlagen zur Lagerung, Abfüllung und Beförderung brennbarer Flüssigkeiten zu Lande (Verordnung über brennbare Flüssigkeiten - VbF) in der Bekanntmachung der Neufassung der Verordnung vom 13.12.1996 (BGBl. I 1996 S. 1937 und 1997 S. 447)
- [45] TRbF-Bestimmungen über brennbare Flüssigkeiten, Taschenbuch-Ausgabe 1997 Carl Heymanns-Verlag
- [46] TRbF 120 - Ortsfeste Tanks aus metallischen und nichtmetallischen Werkstoffen in der Fassung der 15. Änderung (BAarbBl. Nr. 6/1997)
- [47] TRT 030 - Lüftungseinrichtungen, Flammendurchschlagsicherungen (Verkehrsblatt 1986 S. 71)
- [48] TRT 006 - Explosionsdruckstoßfestigkeit (Verkehrsblatt 1986 S. 71)
- [49] TRbF 142 - Tankcontainer, in der Fassung der 5. Änderung (BAarbBl. 4/1994)
- [50] TRT 006 - Explosionsdruckstoßfestigkeit (Verkehrsblatt 1997 S. 603)
- [51] Redeker/Schön: 6. Nachtrag zu „Sicherheitstechnische Kennzahlen brennbarer Gase und Dämpfe“, Deutscher Eichverlag GmbH, Braunschweig 1990
- [52] Explosionsdruckstoßversuch an einem Transporttank, Bundesanstalt für Materialprüfung, Antrags-Nr. 1.5/1621 (Schwietert), Berlin, September 1985 (unveröffentlicht)

- [53] Mitteilung des Laboratoriums 4.22 der BAM (1984)
- [54] AD-Merkblätter, Taschenbuch-Ausgabe 1997, herausgegeben vom VdTÜV e.V. Essen, Carl Heymanns Verlag KG, Beuth Verlag GmbH
- [55] Explosionsdruckstoßversuch an einem Straßentankfahrzeug, Bundesanstalt für Materialprüfung, Antrags-Nr. 1.5/10412 (Hendricks), Berlin, 11/1987 (unveröffentlicht)
- [56] Ludwig, J., Mischke, W.-D. und Ulrich, A.: Explosionsdruckstoßfestigkeit von Transporttanks, Technische Überwachung. Bd. 28(1987), Nr. 9, S. 330-332
- [57] Ludwig, J.: Explosionsdruckstoßfestigkeit von Transporttanks; VDI-Preprints Werkstoff-Bauteil-Schaden 1987, 3. Jahrestagung der VDI-Gesellschaft Werkstofftechnik, 19.-20.3.1987, München, 1987, S. 199-208
- [58] Ludwig, J.: Explosionsdruckstoßfestigkeit von Transporttanks; PTB-Bericht W33, Braunschweig, Dezember 1987
- [59] Günther, B. und Ludwig, J.: Flameproof-Design of Portable Tanks; Preceedings of TDG11, Nippon Kaiji Kenter Kyokais, Tokyo, November 1992, pp. 181-194
- [60] Explosionsdruckstoßversuch an einem Straßentankfahrzeug; Bundesanstalt für Materialprüfung, Antrags-Nr. 1.5/10412 (Hendricks), Berlin, November 1987 (unveröffentlicht)
- [61] Forschungsvorhaben THEBETA - Thermische Belastbarkeit von Tanks - Schlußbericht; Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, Berlin, August 1996 (unveröffentlicht)
- [62] Ulrich, A.: Projektierung einer Justier- und Montagevorrichtung für einen variierbaren Versuchstank; Diplomarbeit, Fachhochschule Magdeburg, Fachbereich Maschinenbau, 1993 (unveröffentlicht)
- [63] Gase-Handbuch; Messer Griesheim GmbH, Frankfurt/Main, Broschüre 90.1001, 3. Auflage
- [64] Explosionsdruckstoßversuch an einem Eisenbahnkesselwagen; Bundesanstalt für Materialprüfung, Antrags-Nr. 1.5/1570 (VPI), Berlin, Juli 1984 (unveröffentlicht)
- [65] Explosionsdruckstoßversuch an einem Straßentankfahrzeug, Bundesanstalt für Materialprüfung, Antrags-Nr. 1.5/10458 (Gofa), Berlin, November 1987 (unveröffentlicht)
- [66] Explosionsdruckstoßversuch am Tank eines Straßentankfahrzeuges, Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, Antrags-Nr. 1.5/11238 (L.A.G.), Berlin, Dezember 1987 (unveröffentlicht)
- [67] Explosionsdruckstoßversuch an einem Tank, Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, Antrags-Nr. 1.5/11464 (Klaeser), Berlin, Oktober 1988 (unveröffentlicht)
- [68] Explosionsdruckstoßversuch an einem Tank, Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, Antrags-Nr. 1.5/11940 (Aurepa), Berlin, 01/1990 (unveröffentlicht)
- [69] Explosionsdruckstoßversuch an einem Tank, Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, Antrags-Nr. 1.5/11754 (Kässbohrer), Berlin, Januar 1990 (unveröffentlicht)
- [70] Explosionsdruckstoßversuch an einem Tank, Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, Antrags-Nr. 1.5/12554 (Magyar), Berlin, Februar 1990 (unveröffentlicht)
- [71] Explosionsdruckstoßversuch an einem Tank, Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, Antrags-Nr. 1.5/12586 (Van Hool), Berlin, Juni 1990 (unveröffentlicht)
- [72] Explosionsdruckstoßversuch an einem Tank, Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, Antrags-Nr. 1.5/13375 (CPV), Berlin, 06/1990 (unveröffentlicht)
- [73] Explosionsdruckstoßversuch an einem Tank, Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, Antrags-Nr. 1.7/40113 (Holvrieka), Berlin, Februar 1992 (unveröffentlicht)
- [74] Explosionsdruckstoßversuch an einem Tank, Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, Antrags-Nr. III.2/1306 (Feldbinder), Berlin, August 1997 (unveröffentlicht)
- [75] Ludwig, J.: Zahlenwertgleichung für die erforderliche Gesamtdurchflußmenge von Sicherheitseinrichtungen nach verkehrsrechtlichen Vorschriften, Amts- und Mitteilungsblatt der BAM, 14 (1984), Nr. 3 und 4
- [76] Kalide, W.: Einführung in die technische Strömungslehre, Carl Hanser Verlag, München 1968, 2. überarbeitete und erweiterte Auflage
- [77] Szabó, I.: Einführung in die Technische Mechanik Springer-Verlag, Berlin - Heidelberg - New York - Tokyo, Nachdruck der alten, neubearbeiteten Auflage 1984
- [78] Schwaigerer, S.: Festigkeitsberechnung im Dampfkessel-, Behälter- und Rohrleitungsbau, Springer-Verlag, Berlin - Heidelberg - New York - Tokyo, vierte, überarbeitete Auflage 1983
- [79] Szabó, I.: Höhere Technische Mechanik, Springer-Verlag, Berlin - Heidelberg - New York - Tokyo, zweiter Nachdruck der fünften, verbesserten und erweiterten Auflage 1985
- [80] Reckling, K.-A.: Plastizitätstheorie und ihre Anwendung auf Festigkeitsprobleme, Springer-Verlag, Berlin - Heidelberg - New York 1967
- [81] Krause, U.: Vergleich verschiedener Verfahren zum Bestimmen der Formänderungsfähigkeit bei Raumtemperatur, Stahl und Eisen 83 (1963), Nr. 25 vom 5. Dezember 1963, S. 1627 - S. 1640
- [82] Struck, W.: Das Sprödbbruchverhalten des Baustahles R St 37-2 N in geschweißten Konstruktionen, dargestellt mit Hilfe der Methode des Temperaturvergleichs, BAM-Bericht Nr. 18, Berlin, Januar 1973
- [83] AD-Merkblatt B 1: Zylinder- und Kugelschalen unter innerem Überdruck, Ausgabe Juni 1986, Carl Heymanns Verlag KG, Köln - Berlin

- [84] AD-Merkblatt B 9: Ausschnitte in Zylindern, Kegeln und Kugeln, Ausgabe Juli 1995, Carl Heymanns Verlag KG, Köln - Berlin
- [85] Wellinger, K. und Dietmann, H.: Festigkeitsberechnung - Grundlagen und technische Anwendung, Kröner-Verlag, Stuttgart, 3. erweiterte Auflage 1976
- [86] AD-Merkblatt B 7: Schrauben, Ausgabe Juni 1986 Carl Heymanns Verlag KG, Köln - Berlin
- [87] AD-Merkblatt B 3: Gewölbte Böden unter innerem und äußerem Überdruck, Ausgabe Oktober 1990, Carl Heymanns Verlag KG, Köln - Berlin
- [88] Ruge, J. (unter Mitarbeit von Nösle, H.): Handbuch der Schweißtechnik, Band III: Konstruktive Gestaltung der Bauteile, Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg-New York-Tokyo 1985
- [89] Forschungsvorhaben THESEUS - Tankfahrzeuge mit höchst erreichbarer Sicherheit durch experimentelle Unfallsimulation – Abschlußbericht Arbeitspaket 400, Tankkomponentenuntersuchung, Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, Berlin, Februar 1995

Abbildungsverzeichnis

- Bild 1.1: Gefahrgutaufkommen der verschiedenen Verkehrsträger [3]
- Bild 1.2: Ortsbeweglicher Tank (Tankcontainer) - Schematische Darstellung
- Bild 1.3: Ortsbeweglicher Tank (Wechseltank) - Schematische Darstellung
- Bild 1.4: Flammenrückschlag in einen Tank (schematisch)
- Bild 2.1: Zusammenhang zwischen Explosionen und Explosionspunkten, Bezeichnung der Konzentrationsbereiche und deren Verbrennungseigenschaften für Ethanol als Beispiel [6]
- Bild 2.2: Bestimmung des zeitlichen Druckanstieges dp/dt einer Brenngasexplosion
- Bild 2.3: Einfluß des Zündortes auf den zeitlichen Druckanstieg einer Dampf-Explosion (schematisch)
- Bild 2.4: Schematischer zeitlicher Ablauf einer Methan- und einer Wasserstoff-Explosion in einem geschlossenen Behälter (stöchiometrisches Gemisch)
- Bild 2.5: Volumeneinfluß auf Propan-Explosionen (stöchiometrisches Gemisch)
- Bild 2.6: Versuchsanordnung (schematisch)
- Bild 2.7: Explosionskennzahlen von Methan in kombinierten Behältern ($V = 1 \text{ m}^3 \rightarrow 5 \text{ m}^3$)
- Bild 2.8: Explosionskennzahlen von Methan in kombinierten Behältern ($V = 5 \text{ m}^3 \rightarrow 1 \text{ m}^3$)
- Bild 3.1: Beförderung gefährlicher Güter - Schematische Darstellung von Empfehlungen, Rechtsvorschriften und Richtlinien sowie der zuständigen Organisationen, Behörden und Gremien
- Bild 3.2: Beförderung gefährlicher Güter - EG/EU-Richtlinien und nationale Vorschriften (z.B. GSG) mit Einfluß auf Regelungen für die Beförderung gefährlicher Güter sowie zuständige Organisationen, Behörden und Gremien
- Bild 4.1: Versuchstank vor dem Explosionsdruckstoßversuch
- Bild 4.2: Versuchstank mit Einbauten - Versuchsaufbau (schematisch)
- Bild 4.3: Versuchstank nach dem Explosionsdruckstoßversuch
- Bild 5.1: Prinzipieller Aufbau des Versuchstanks
- Bild 5.2: Explosionsdruckfester Versuchstank (Segmente A und C)
- Bild 5.3: Vollständiger explosionsdruckfester Versuchstank (Segmente A, B und C)
- Bild 5.4: Prinzipieller Aufbau der Justier- und Montagevorrichtung
- Bild 5.5: Prinzipieller Aufbau der Justier- und Montagevorrichtung (Massen der Segmente und Verschiebekraft)
- Bild 5.6: Grundrahmen mit aufgesetzten Untergestellen
- Bild 5.7: Versuchsstand zur Durchführung von Explosionsdruckstoßversuchen
- Bild 5.8: Anziehen der Klammerschrauben
- Bild 5.9: Schematische Darstellung der Flanschverbindung
- Bild 5.10: Zündtopf
- Bild 5.11: Versuchsbehälter mit angeflanschem Zündtopf
- Bild 5.12: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus
- Bild 6.1: Versuchstanks (schematisch)
- Bild 6.2: Versuchsaufbauten und Meßstellenpläne zur Durchführung der Versuche Nr. 34 bis 89
- Bild 7.1: Ausfluß aus einem Druckbehälter
- Bild 7.2: Kugelhahn und seitlich angeordneter Propanbrenner
- Bild 7.3: Vordruck bzw. Ausgangsdruck bei Versuch Nr. 41
- Bild 7.4: Verlauf des Explosionsdruckes im Rezipienten bei Versuch Nr. 41
- Bild 7.5: Versuchsaufbau vor Versuch Nr. 51
- Bild 7.6: Zündbrennerposition am Versuchsaufbau vor Versuch Nr. 51 (Seitenansicht)
- Bild 7.7: Flammensiebkörper nach Versuch Nr. 51
- Bild 7.8: Versuchstank mit Hauptabmessungen
- Bild 7.9: Position der Brennmomentzündler bei Versuch Nr. 31
- Bild 7.10: Aluminiumkoffertank vor Versuch Nr. 31
- Bild 7.11: Mannlochöffnung nach Versuch Nr. 31
- Bild 7.12: Aluminiumkoffertank vor Versuch Nr. 32
- Bild 7.13: Position des Tanks nach Versuch Nr. 32
- Bild 7.14: Ausgerissener Doppel-S-Boden nach Versuch Nr. 32
- Bild 7.15: Drucksignal bei Versuch Nr. 31
- Bild 7.16: Drucksignal bei Versuch Nr. 32
- Bild 8.1: Versuchstank vor dem Wasserdruckversuch
- Bild 8.2: Abmessungen und Instrumentierung des Versuchstanks

- Bild 8.3: Tankversagen im Flanschbereich bei 15,5 bar
 Bild 8.4: Zeitliche Darstellung des Druck- und Dehnungsverlaufs
 Bild 8.5: Tank nach dem Innendruckversuch (15,5 bar/11 % Manteldehnung)
 Bild 8.6: Tanksegmente, Tankkammern, Zündorte, Meßstellenebenen und Einzelmeßstellen
 Bild 8.7: Druckverlauf bei Versuch Nr. 38 (kurzer Rezipient, Zündgefäß, Ausgangsdruck 0,2 bar, Z1)
 Bild 8.8: Druckverläufe bei Versuch Nr. 41 (kurzer Rezipient, Flammeneintritt DN 50, Ausgangsdruck 0,025 bar, Z1)
 Bild 8.9: Druckverläufe bei Versuch Nr. 50 (langer Rezipient, Flammeneintritt DN 50, Ausgangsdruck 0,024 bar, Z1)
 Bild 8.10: Druckverläufe bei Versuch Nr. 52 (langer Rezipient, Zündgefäß, Ausgangsdruck 0,2 bar, Z1)
 Bild 8.11: Druckverläufe bei Versuch Nr. 65 (langer Rezipient, Brennmomentzündler, Ausgangsdruck 0,2 bar, ZZ2)
 Bild 8.12/1: Flammeneintritt in den Versuchstank bei Versuch Nr. 35 (Teil 1)
 Bild 8.13: Variation der Zündart und Zündorte
 Bild 9.1: Versuche mit verschiedenen Schwallwänden
 Bild 9.2: Tanksegment mit eingebauter Schwallwand
 Bild 9.3: Schwallwand bei Versuch 39
 Bild 9.4: Zerstörte Schaugläser nach dem Versuch Nr. 39 mit Austrittsspuren des verbrannten Gemisches
 Bild 9.5/1: Durchtritt der Flammenfront durch die Schwallwand mit 3 Öffnungen
 Bild 9.6: Tanksegmente, Tankkammer, Zündorte, Meßstellenebenen und Einzelmeßstellen
 Bild 9.7: Druckverläufe bei Versuch Nr. 40
 Bild 9.8: Druckverläufe bei Versuch Nr. 44
 Bild 9.9: Druckverläufe bei Versuch Nr. 56
 Bild 9.10: Druckverläufe bei Versuch Nr. 53
 Bild 9.11/1: Durchtritt der Flammenfront durch die Schwallwand mit einer Öffnung
 Bild 10.1: Verbindungen zwischen Einbauten und Tankwänden

Tabellenverzeichnis

- Tabelle 1.1: Konservative Abschätzung des Gefahrgutunfallaufkommens auf der Straße für die BRD, 1991 [3]
 Tabelle 2.1: Verbrennungsvorgänge und kennzeichnende Größen [2]
 Tabelle 2.2: Explosionsgrenzen von Brenngasen und entzündbaren flüssigen Stoffen bei Normaldruck, Raumtemperatur, $E \approx 10 \text{ J}$ [7]
 Tabelle 2.3: K_G -Werte einiger Brenngase bei ruhend gezündetem Gemisch (Mittelwerte)
 (Zündenergie: $E \approx 10 \text{ J}$, $p_{\text{ex0}} = 7,4 \text{ bar}$)
 Tabelle 2.4: Explosionskennzahlen von Methan in kombinierten Behältern: $V = 1 \text{ m}^3 \rightarrow 5 \text{ m}^3$, Verbindungsleitung DN 400, Länge 10 m, $f = 0,13 \text{ m}^2/\text{m}^3$
 Tabelle 2.5: Explosionskennzahlen von Methan in kombinierten Behältern: $V = 5 \text{ m}^3$, Verbindungsleitung DN 400, Länge = 10 m, $f = 0,025 \text{ m}^2/\text{m}^3$
 Tabelle 2.6: Zündquellen und wesentliche Schutzmaßnahmen
 Tabelle 3.1: Übersicht über den Inhalt der Anlage A der GGVS/des ADR
 Tabelle 3.2: Übersicht über den Inhalt der Anlage B der GGVS/des ADR
 Tabelle 3.3: Vorschriften für Fahrzeugtanks und Tankcontainer (Rn. 211 100 ff. Anhang B.1a und Rn. 212 100 ff. Anhang B.1b der Anlage B zur GGVS/zum ADR)
 Tabelle 3.4: Ausgangsdruck als Funktion der betriebmäßig freien Öffnung eines Tanks
 Tabelle 4.1: Aufstellung der durchgeführten Explosionsversuche (Tankart: KW = Eisenbahnkesselwagen; TA = zylindrischer Tankabschnitt; KTC = kubischer Tankcontainer; ML = separates Mannloch; KTA = Koffertankabschnitt)
 Tabelle 5.1: Beziehung zwischen Sauerstoff-Rest- und Ethylenkonzentration
 Tabelle 5.2: Abhängigkeit des Vordrucks von der betriebmäßig freien Öffnung im Tank
 Tabelle 6.1: Zusammenstellung der Explosionsdruckstoßversuche mit Realtanks - Wesentliche Tankparameter (Tankart: KW = Eisenbahnkesselwagen; TA = zylindrischer Tankabschnitt; KTC = kubischer Tankcontainer; ML = separates Mannloch; KTA = Koffertankabschnitt)
 Tabelle 6.2: Zusammenstellung der Explosionsdruckstoßversuche mit Realtanks - Materialkennwerte
 Tabelle 6.3: Zusammenstellung der Explosionsdruckstoßversuche - Wanddicken (e) der Tanks und Einbauten - Indizes: m - Mantel, b - Boden, g - Gegenkragen, d - Deckel, v - Verstärkung, k - Kragen, s - Schwallwand
 Tabelle 6.4-1: Zusammenstellung der Explosionsdruckstoßversuche mit Realtanks - Versuchsparameter/Ergebnisse (Teil 1)
 Tabelle 6.5: Zusammenstellung der Versuche mit dem Rezipienten - Wesentliche Tankparameter
 Tabelle 6.6: Zusammenstellung der Versuche mit dem Rezipienten - Versuchsparameter und Ergebnisse
 Tabelle 7.1: Ergebnisse der Versuche Nr. 41 bis 43
 Tabelle 8.1: Versuchsergebnisse von Tanks ohne (wesentliche) Einbauten
 Tabelle 8.2: Versuche mit realen Transporttanks - Gemessene und aus gemessenen Dehnungen errechnete Drücke als Teil der Spannungsbewertung
 Tabelle 8.3: Bestimmung des günstigsten Durchmesser-Wanddickenverhältnisses im Hinblick auf Explosionsdruckstoßfestigkeit für St 37-2

- Tabelle 8.4: Optimierung des Durchmesser-Wanddickenverhältnisses im Hinblick auf Explosionsdruckstoßfestigkeit des zylindrischen Teils von Tanks aus verschiedenen Werkstoffen; Vergleich von D_a/e als Funktion von $(R_g/1,0$ unter Anlegen der Gestaltänderungsenergiehypothese) mit D_a/e als Funktion von $(R_m/1,3)$
- Tabelle 8.5: Versuchsergebnisse Versuch Nr. 38
- Tabelle 8.6: Versuchsergebnisse nach der Zündart (Ausgangsdruck 0 bar)
- Tabelle 8.7: Versuchsergebnisse nach Zündart (Ausgangsdruck 0,2 bar)
- Tabelle 8.8: Einfluß der Größe betriebsmäßig freier Öffnungen
- Tabelle 8.9: Zündung mit dem Zündgefäß, Variation des Zündortes bei 0 bar Ausgangsdruck
- Tabelle 8.10: Zündung mit dem Zündgefäß, Variation des Zündortes bei 0,2 bar Ausgangsdruck
- Tabelle 8.11: Brennmomentzündler, Variation des Zündortes in der Tankachse bei 0 bar Ausgangsdruck
- Tabelle 8.12: Brennmomentzündler, Variation des Zündortes in der Tankachse bei 0,2 bar Ausgangsdruck
- Tabelle 8.13: Brennmomentzündler, Variation des Zündortes längs der Tankwandung bei 0 bar Ausgangsdruck
- Tabelle 8.14: Zündung durch Flammeneintritt, Variation des Längen/Durchmesser-Verhältnisses, 0 bar Ausgangsdruck
- Tabelle 8.15: Zündung mit dem Zündgefäß, Variation des Längen/Durchmesser-Verhältnisses, 0,2 bar Ausgangsdruck
- Tabelle 9.1: Versuchsergebnisse an Tanks mit verschiedenen Trennböden
- Tabelle 9.2: Versuchsergebnisse an Tanks mit verschiedenen Schwallwänden und Trennböden
- Tabelle 9.3: Versuchsergebnisse am Rezipienten mit verschiedenen Schwallwänden

Anhang I

Technische Richtlinien Tanks (TRT)

TRT 006 „Explosionsdruckstoßfestigkeit“

- TRT 006 - alt (Verkehrsblatt 1986 S. 71)
- TRT 006 - neu (Verkehrsblatt 1997 S. 603)

Technische Richtlinien Tanks (TRT)		TRT 006								
Explosionsdruckstoßfestigkeit										
Zu Nr. 1.3.9 Anhang X und zu Nr. 1.3.12 Anhang XI der GGVE										
Zu Rn. 211 137 (2) Anhang B. 1 a sowie zu Rn. 212 137 (2) Anhang B. 1 b GGVS.										
<p>1. Tanks von festverbundenen Tanks, Aufsetztanks, Tankcontainern und Eisenbahnkesselwagen sind mit oder ohne angeschlossene Rohrleitungen explosionsdruckstoßfest gebaut, wenn nachgewiesen ist, daß sie einer Explosion im Innern standhalten ohne aufzureißen; dabei sind bleibende Verformungen zulässig.</p> <p>Der Explosionsdruck ist stoffabhängig und abhängig von dem Ausgangsdruck, bei dem die Zündung im Tank erfolgt. Für den Ausgangsdruck von 1 bar (Atmosphärendruck kann der maximale Explosionsdruck der Stoffe einschlägigen Tabellenwerken (z.B. K. Nabert/ G. Schön, Sicherheitstechnische Kennzahlen brennbarer Gase und Dämpfe) entnommen werden. Es ist auch zulässig, diesen maximalen Explosionsdruck mit 10 bar anzusetzen.</p> <p>Der Ausgangsdruck im Tank ist bei Tanks mit innerem Überdruck der höchste Druck, bei dem eine Flamme in den Tank zurückschlagen kann. Er ist abhängig von der Größe der betriebsmäßig freien Öffnung des Tanks (z. B. Querschnitt der Abblaseeinrichtung) und ergibt sich aus der nachstehenden Tabelle:</p> <table border="1" style="width: 100%;"> <thead> <tr> <th>Durchmesser der betriebsmäßig freien Öffnung des Tanks in mm</th> <th>Ausgangsdruck (absolut) in bar</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>≤ 25</td> <td>1,1</td> </tr> <tr> <td>≤ 50</td> <td>1,15</td> </tr> <tr> <td>≤ 80</td> <td>1,2</td> </tr> </tbody> </table> <p>Dabei wird ein im wesentlichen ungestörtes Abströmen der bei der Explosion entstehenden Gase durch die betriebsmäßig freie Öffnung im Freistrahle vorausgesetzt. Dieser Voraussetzung ist durch die konstruktive Gestaltung der Öffnung Rechnung zu tragen (Vermeidung von Verengungen u. a. Widerständen).</p> <p>Der höchste auftretende Explosionsdruck ergibt sich durch Multiplikation des maximalen Explosionsdrucks mit dem Ausgangsdruck als Faktor.</p> <p>Der der Beurteilung zu Grunde zu legende höchste auftretende Explosionsüberdruck p_m (in bar) ergibt sich nach folgender Beziehung:</p> $p_m = p_{exp} \cdot p_a - 1$ <p>p_{exp} = absoluter maximaler Explosionsdruck (in bar) bei dem absoluten Ausgangsdruck von 1 bar.</p> <p>p_a = absoluter Ausgangsdruck (in bar, laut Tabelle).</p> <p>Die Berechnung aller drucktragender Teile des Tanks ist nach den Maßgaben der von der „Arbeitsgemeinschaft Druckbehälter“ herausgegebenen Richtlinien (AD-Merkblätter) durchzuführen. Dabei wird unter Berücksichtigung der guten Verformungsfähigkeit (Duktilität) der eingesetzten Tankwerkstoffe (Bruchdehnung der verwendeten Metalle mindestens 16 %) eine Sicherheit gegen die Zugfestigkeit (Rm) von 1,3 für ausreichend gehalten. Dieser Wert (Rm/1,3) ersetzt den in den AD-Merkblättern genannten Ausgangsdruck K/S für die zulässige Werkstoffanstrengung.</p> <p>Dieser Nachweis gilt nur für Tanks ohne Einbauten, die zu einer weiteren Druckerhöhung führen würden, insbesondere Schwallwände.</p>			Durchmesser der betriebsmäßig freien Öffnung des Tanks in mm	Ausgangsdruck (absolut) in bar	≤ 25	1,1	≤ 50	1,15	≤ 80	1,2
Durchmesser der betriebsmäßig freien Öffnung des Tanks in mm	Ausgangsdruck (absolut) in bar									
≤ 25	1,1									
≤ 50	1,15									
≤ 80	1,2									
<p>2. Die Forderung, daß Tanks explosionsdruckstoßfest gebaut sind, gilt ebenfalls als erfüllt, wenn in einer experimentellen Prüfung z. B. durch eine Explosion mit explosionsfähigstem Äthylen/Luft-Gemisch nachgewiesen wird, daß er nach der Explosion nicht aufgerissen ist. Die Prüfung wird von der Bundesanstalt für Materialprüfung, Berlin, oder der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt, Braunschweig, durchgeführt.</p> <p>Diese Prüfung kann für Tanks, die aufgrund ihrer konstruktiven Gestaltung nicht nach den genannten Verfahren berechnet werden können, oder auch für berechenbare Tanks, die optimiert werden sollen, angewendet werden. Der Ausgangsdruck vor Entzündung des Äthylen/Luft-Gemisches muß gemäß der Tabelle gewählt werden.</p>										

(Verkehrsblatt 1986 S. 71)

Technische Richtlinien Tanks (TRT)		TRT 006
Explosionsdruckstoßfestigkeit		
Zu Nr. 1.3.9 Anhang X und zu Nr. 1.3.12 Anhang XI des RID		
Zu Rn 211 137 (2) Anhang B. 1a sowie zu Rn 212 137 (2) Anhang B. 1b der Anlage B des ADR		
<p>1. Festverbundene Tanks, Aufsetztanks, Tankcontainer und Tanks von Eisenbahnkesselwagen sind z. B. explosionsdruckstoßfest, wenn sie einer Explosion im Innern standhalten, ohne aufzureißen; dabei sind bleibende Verformungen zulässig.</p> <p>Der für den Nachweis der Explosionsdruckstoßfestigkeit maßgebliche Explosionsdruck ist stoffabhängig und abhängig von dem Ausgangsdruck, bei dem die Zündung im Tank erfolgt. Bei Transporttanks ist davon auszugehen, daß eine störungsbedingte Zündung durch eine betriebsmäßig freie Öffnung erfolgt: Für den Ausgangsdruck kann daher der Atmosphärendruck von 1 bar angesetzt werden. Für diesen Ausgangsdruck weist ein Gemisch von 8,0 Vol.-% Äthylen in Luft unter allen bislang untersuchten Stoffen*) den höchsten Explosionsdruck von 9,7 bar (absolut) auf.</p> <p>2. Ein Tank gilt z. B. ferner als explosionsdruckstoßfest, wenn in einer experimentellen Prüfung an einem Baumuster eine Explosion mit dem o. g. Gemisch unter atmosphärischen Ausgangsbedingungen vom Tank ertragen wird, ohne daß er aufreißt. Die Prüfung wird von der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, Berlin, oder der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt, Braunschweig, durchgeführt.</p> <p>3. Ein Tank gilt z. B. ferner als explosionsdruckstoßfest, wenn die Berechnung aller drucktragenden Teile des Tanks auf der Grundlage eines maximalen Explosionsdruckes von mindestens 9,7 bar (absolut) nach den Maßgaben der von der Arbeitsgemeinschaft Druckbehälter herausgegebenen Richtlinien (AD-Merkblätter) durchgeführt wird. Unter Berücksichtigung der guten Verformungsfähigkeit der eingesetzten Tankwerkstoffe (Bruchdehnung der verwendeten Metalle mindestens 16 %) ist eine Sicherheit gegen die Zugfestigkeit (Rm) von 1,3 ausreichend. Dieser Wert (Rm/1,3) ersetzt den in den AD-Merkblättern genannten Ausdruck K/S für die zulässige Werkstoffanstrengung.</p> <p>4. Ein Tank gilt z. B. ferner als explosionsdruckstoßfest, wenn nachgewiesen ist, daß er einem Wasserdrukversuch mit dem 1,3fachen des höchsten auftretenden Explosionsdruckes standhält, ohne aufzureißen.</p> <p>5. Die Nachweise nach 3. und 4. gelten nur für Tanks ohne Einbauten (insbesondere Schwallwände), die zu einer weiteren Druckerhöhung im Explosionsverlauf führen können.</p>		
*) Ausgenommen sind solche Stoffe, die zum Selbsterfall neigen.		

(Verkehrsblatt 1997 S. 603)

Anhang II

Versuch Nr. 34 bis 89

- **Versuchsaufbauten und Meßstellenpläne**
- **Tabellen der Einzel- und Mittelwerte der Druckmessungen**

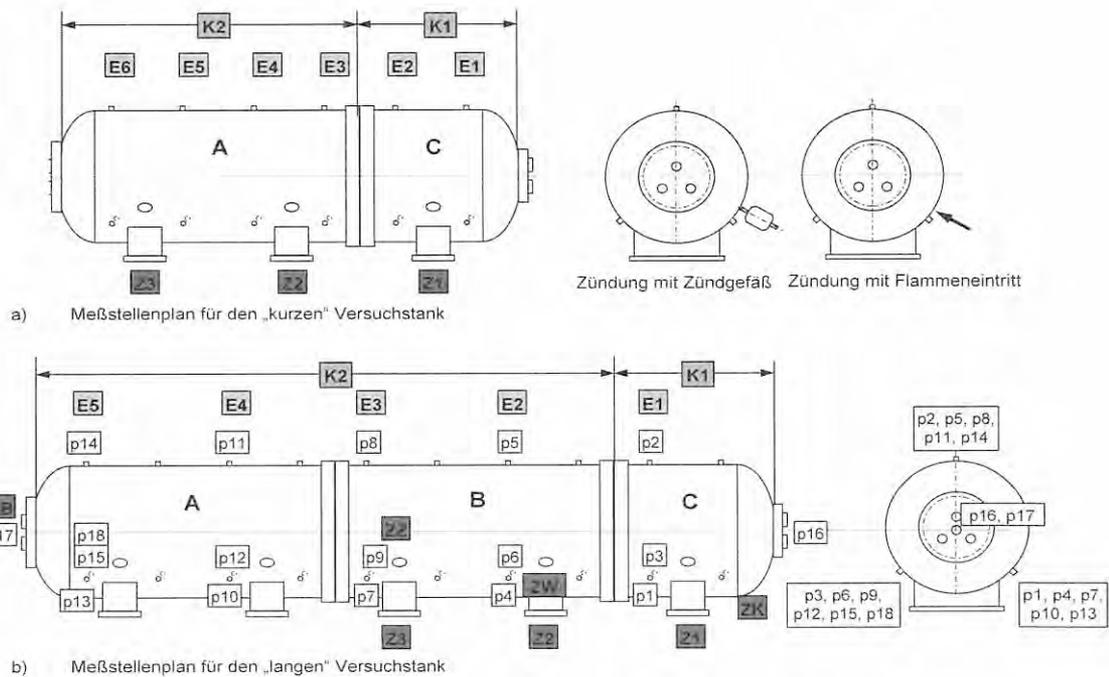


Bild II-1: Versuchsaufbauten und Meßstellenpläne zur Durchführung der Versuche Nr. 34 bis 89

Erläuterungen zu Bild II.1:

1. Kurzer Tank

1.1. Volumina

- Gesamtvolumen $V = 22,5 \text{ m}^3$
 - Kammer 1 (Tanksegment C) $V = 7,5 \text{ m}^3$
 - Kammer 2 (Tanksegment A) $V = 15,0 \text{ m}^3$
- (Kammereinteilung nur bei Versuchen mit eingebauten Schwallwänden)

1.2. Druckmessung

- Meßebenen E 1 bis E 6
(mit bis zu 3 um 120° versetzten Einzelmeßstellen je Meßebene)

1.3. Zündart und Zündort

- Zündgefäß (Brennmomentzündler); Z 1 bis Z 3
- Flammeneintritt; Z 1 bis Z 3

2. Langer Tank

2.1 Volumina

- Gesamtvolumen $V = 37,5 \text{ m}^3$
 - Kammer 1 (Tanksegment C) $V = 7,5 \text{ m}^3$
 - Kammer 2 (Tanksegment A + B) $V = 30,0 \text{ m}^3$
- (Kammereinteilung nur bei Versuchen mit eingebauten Schwallwänden)

2.2. Druckmessung

- Einzelmeßstellen p 1 bis p 18
- Meßebenen E 1 bis E 5
(mit bis zu 4 um 120° versetzten Einzelmeßstellen je Meßebene)

2.3. Zündart und Zündort

- Zündgefäß (Brennmomentzündler); Z 1 bis Z 3, ZB
- Flammeneintritt, Z 1 bis Z 3
- Innen (Brennmomentzündler); Wandung; ZW 1 bis ZW 3, ZK, ZB
- Innen (Brennmomentzündler); Zentralachse, ZZ 1 bis ZZ 3, ZB

Erläuterungen zu den nachfolgenden Tabellen:

Hierbei bedeuten:

p_{ex}	:	max. Explosionsdruck (Überdruck)
p_a	:	Anfangsdruck (Überdruck)
p_e	:	Enddruck (Überdruck)
t_a	:	Anfangszeit
t_e	:	Endzeit

p_a, p_e, t_a, t_e sind die den Meßkurven entnommenen Werte zur Ermittlung von (dp/dt)

Versuch Nr. 34 (III.2 / 9441)

Datum: 29.09.94 Durchmesser: 2000 mm Länge: 7748 mm
 Volumen: 22,5 m³ Ausgangsdruck: 0,25 bar Zündort: Zündgefäß Z1
 Temperatur: °C Konzentration: 8,0 Vol.-% Einbauten: keine

Meß- stelle	Kammer	Ebene	p_{ex} [bar]	p_a [bar]	p_e [bar]	t_a [s]	t_e [s]	$(dp/dt)_{max}$ [bar/s]	K_G -Wert [bar*m/s]
1	1	1	nicht verwertbar						
2	2	3	nicht verwertbar						
3	2	6	nicht verwertbar						
4	2	6	10,80	1,40	9,41	0,1048	0,3421	34	95
5	2	6	10,60	1,79	9,71	0,1294	0,3509	36	101

Mittelwerte	p_{ex} [bar]	$(dp/dt)_{max}$ [bar/s]	K_G -Wert [bar*m/s]
Ebene 1			
Ebene 2	-	-	-
Ebene 3	-	-	-
Ebene 4	-	-	-
Ebene 5	-	-	-
Ebene 6	10,70	35	98
Kammer 1			
Kammer 2	10,70	35	98
Gesamt	10,70	35	98

Meßstellen 1-3 bestückt mit piezoelektrischen Aufnehmer und nicht verwertbar

Versuch Nr. 35 (III.2 / 9460)

Datum: 15.12.94 Durchmesser: 2000 mm Länge: 7748 mm
 Volumen: 22,5 m³ Ausgangsdruck: 0,25 bar Zündort: Zündgefäß Z1
 Temperatur: °C Konzentration: 8,0 Vol.-% Einbauten: keine

Meß- stelle	Kammer	Ebene	p_{ex} [bar]	p_a [bar]	p_e [bar]	t_a [s]	t_e [s]	$(dp/dt)_{max}$ [bar/s]	K_G -Wert [bar*m/s]
1	1	1	nicht verwertbar						
2	2	3	nicht verwertbar						
3	2	6	nicht verwertbar						
4	2	6	9,90	0,96	9,14	0,1871	0,4831	28	78
5	2	6	nicht verwertbar	1,79	9,71	0,1294	0,3509		

Mittelwerte	p_{ex} [bar]	$(dp/dt)_{max}$ [bar/s]	K_G -Wert [bar*m/s]
Ebene 1			
Ebene 2	-	-	-
Ebene 3	-	-	-
Ebene 4	-	-	-
Ebene 5	-	-	-
Ebene 6	9,90	28	78
Kammer 1			
Kammer 2	9,90	28	78
Gesamt	9,90	28	78

Meßstellen 1-3 bestückt mit piezoelektrischen Aufnehmer und nicht verwertbar

Versuch Nr. 36 (III.2 / 9509)

Datum: 02.03.95 Durchmesser: 2000 mm Länge: 7748 mm
 Volumen: 22,5 m³ Ausgangsdruck: 0,20 bar Zündort: Zündgefäß Z1
 Temperatur: 12 °C Konzentration: 7,9 Vol.-% Einbauten: keine

Meß- stelle	Kammer	Ebene	p _{ex} [bar]	p _a [bar]	p _e [bar]	t _a [s]	t _e [s]	(dp/dt) _{max} [bar/s]	K _G -Wert [bar*m/s]
1	2	6	9,90	1,16	9,14	0,1174	0,3826	30	85
2	1	1	defekt						
3	2	6	nicht verwertbar						
4	2	5	nicht verwertbar						
5	2	4	nicht verwertbar						
6	2	6	9,90	1,10	9,09	0,1139	0,3706	31	88
7	2	4	nicht verwertbar						
8	2	4	nicht verwertbar						
9	2	3	nicht verwertbar						
10	1	2	nicht verwertbar						
11	1	1	nicht verwertbar						
12	1	1	nicht verwertbar						
13	2	2	nicht verwertbar						
14	2	3	nicht verwertbar						

Mittelwerte	p _{ex} [bar]	(dp/dt) _{max} [bar/s]	K _G -Wert [bar*m/s]
Ebene 1	9,90	31	88
Ebene 2			
Ebene 3			
Ebene 4			
Ebene 5			
Ebene 6	9,90	31	86
Kammer 1			
Kammer 2	9,90	31	86
Gesamt	9,90	31	86

Meßstellen 3-5 und 7-14 bestückt mit piezoelektrischen Aufnehmer und nicht verwertbar

Versuch Nr. 37 (III.2 / 9518)

Datum: 22.05.95 Durchmesser: 2000 mm Länge: 7748 mm
 Volumen: 22,5 m³ Ausgangsdruck: 0,20 bar Zündort: Zündgefäß Z1
 Temperatur: 18 °C Konzentration: 7,9 Vol.-% Einbauten: keine

Meß- stelle	Kammer	Ebene	p _{ex} [bar]	p _a [bar]	p _e [bar]	t _a [s]	t _e [s]	(dp/dt) _{max} [bar/s]	K _G -Wert [bar*m/s]
1	2	6	10,00	1,40	10,12	0,1582	0,3692	41	117
2	2	6	9,90	1,49	9,81	0,1596	0,3643	41	115
3	2	4	9,60	1,49	9,61	0,1617	0,3741	38	108
4	2	4	9,60	2,01	9,26	0,1772	0,3622	39	111
5	1	2	9,90	1,35	9,86	0,1533	0,3608	41	116
6	1	2	9,90	2,24	9,74	0,1835	0,3586	43	121
7	1	2	10,00	1,91	9,99	0,1716	0,3762	39	111
8	1	1	10,10	2,83	9,87	0,1983	0,3488	47	132
9	1	1	10,10	3,74	9,93	0,2278	0,3488	51	144
10	1	1	9,70	3,76	9,44	0,2349	0,3537	48	135

Mittelwerte	p _{ex} [bar]	(dp/dt) _{max} [bar/s]	K _G -Wert [bar*m/s]
Ebene 1	9,97	49	137
Ebene 2	9,93	41	116
Ebene 3	-	-	-
Ebene 4	9,60	39	109
Ebene 5	-	-	-
Ebene 6	9,95	41	116
Kammer 1			
Kammer 2			
Gesamt	9,88	43	121

Tiefpaß 100Hz

Versuch Nr. 38 (III.2 / 9519)

Datum: 23.05.95 Durchmesser: 2000 mm Länge: 7748 mm
 Volumen: 22,5 m³ Ausgangsdruck: 0,20 bar Zündort: Zündgefäß Z1
 Temperatur: 20 °C Konzentration: 8,0 Vol.-% Einbauten: keine

Meß- stelle	Kammer	Ebene	p _{ex} [bar]	p _a [bar]	p _e [bar]	t _a [s]	t _e [s]	(dp/dt) _{max} [bar/s]	K _G -Wert [bar*m/s]
1	2	6	10,10	2,40	10,05	0,2243	0,4543	33	94
2	2	6	10,00	2,46	9,89	0,2278	0,4543	33	93
3	2	4	9,50	3,09	9,41	0,2651	0,4459	35	99
4	2	4	9,80	1,71	9,80	0,1892	0,4641	29	83
5	1	2	9,90	3,40	9,86	0,2771	0,4543	36	103
6	1	2	9,60	3,15	9,44	0,2707	0,4494	35	99
7	1	2	9,70	3,01	9,56	0,2651	0,4508	35	100
8	1	1	9,90	3,78	9,72	0,2968	0,4434	40	114
9	1	1	9,90	3,90	9,74	0,3010	0,4466	40	113
10	1	1	9,40	4,00	9,44	0,3129	0,4536	39	109
11	2	6	9,90	3,60	9,89	0,2876	0,4441	40	113
12	2	4	9,80	4,75	9,74	0,3309	0,4501	42	118

Mittelwerte	p _{ex} [bar]	(dp/dt) _{max} [bar/s]	K _G -Wert [bar*m/s]
Ebene 1	9,73	40	112
Ebene 2	9,73	36	101
Ebene 3	-	-	-
Ebene 4	9,70	35	100
Ebene 5	-	-	-
Ebene 6	10,00	35	100
Kammer 1	9,73	37,70	106,44
Kammer 2	9,85	35,42	100,00
Gesamt	9,79	37	103

Versuch Nr. 39 (III.2 / 9521)

Datum: 21.06.95 Durchmesser: 2000 mm Länge: 7748 mm
 Volumen: 22,5 m³ Ausgangsdruck: 0,20 bar Zündort: Zündgefäß Z1
 Temperatur: 20 °C Konzentration: 7,7 Vol.-% Einbauten: Schwallwand mit 3 Öffnungen in klein

Meß- stelle	Kammer	Ebene	p _{ex} [bar]	p _a [bar]	p _e [bar]	t _a [s]	t _e [s]	(dp/dt) _{max} [bar/s]	K _G -Wert [bar*m/s]
1	2	6	defekt						
2	2	6	11,00	0,44	11,06	0,0657	0,0863	516	1456
3	2	4	10,00	2,25	9,84	0,0738	0,0858	633	1787
4	2	4	14,00	1,60	13,61	0,0705	0,0887	660	1862
5	1	2	12,60	1,71	11,99	0,0738	0,0952	480	1356
6	1	2	12,20	2,05	11,44	0,0762	0,0942	522	1473
7	1	2	12,10	1,79	11,99	0,0745	0,0959	477	1345
8	1	1	12,10	2,56	11,56	0,0779	0,0940	559	1579
9	1	1	12,40	2,25	11,75	0,0762	0,0947	513	1449
10	1	1	12,80	1,55	12,33	0,0735	0,0955	490	1384
11	2	6	11,40	1,11	11,19	0,0690	0,0872	554	1563
12	2	4	10,20	2,44	8,75	0,0741	0,0878	461	1302

Mittelwerte	p _{ex} [bar]	(dp/dt) _{max} [bar/s]	K _G -Wert [bar*m/s]
Ebene 1	12,43	521	1471
Ebene 2	12,30	493	1391
Ebene 3	-	-	-
Ebene 4	11,40	585	1650
Ebene 5	-	-	-
Ebene 6	11,20	535	1509
Kammer 1	12,37	507	1431
Kammer 2	11,32	565	1594
Gesamt	11,89	533	1505

Tiefpaß 100 Hz
 ungefiltert starke Oszillationen

Versuch Nr. 40 (III.2 / 9530)

Datum: 08.11.95 Durchmesser: 2000 mm Länge: 7748 mm
 Volumen: 22,5 m³ Ausgangsdruck: 0,20 bar Zündort: Zündgefäß Z1
 Temperatur: 10 °C Konzentration: 7,7 Vol.-% Einbauten: Schwallwand mit 3 Öffnungen in Verb

Meß- stelle	Kammer	Ebene	p _{ex} [bar]	p _a [bar]	p _e [bar]	t _a [s]	t _e [s]	(dp/dt) _{max} [bar/s]	K _G -Wert [bar*m/s]
1	2	6	11,80	1,10	11,40	0,0780	0,0901	851	2402
2	2	6	12,30	1,17	11,14	0,0777	0,0900	811	2289
3	2	6	11,40	1,20	9,91	0,0782	0,0892	792	2235
4	2	5	12,30	1,28	12,29	0,0774	0,0897	895	2526
5	2	5	11,90	1,96	11,26	0,0795	0,0893	949	2679
6	2	5	12,30	1,89	11,21	0,0791	0,0891	931	2629
7	2	4	11,90	1,40	10,40	0,0776	0,0881	857	2421
8	2	4	12,10	1,36	11,25	0,0776	0,0897	817	2305
9	2	4	12,00	1,79	11,10	0,0786	0,0893	870	2457
10	2	3	12,70	2,21	11,21	0,0795	0,0890	947	2673
11	2	3	12,90	1,93	11,95	0,0789	0,0906	856	2416
12	2	3	12,70	1,55	11,25	0,0784	0,0890	915	2582
13	1	2	10,70	1,69	10,40	0,0827	0,0951	702	1982
14	1	2	11,00	1,66	10,24	0,0825	0,0930	817	2308
15	1	2	10,80	1,69	10,00	0,0824	0,0930	784	2213
16	1	1	11,70	1,69	10,80	0,0822	0,0926	875	2472
17	1	1	10,90	1,49	9,50	0,0816	0,0929	709	2002
18	1	1	11,80	1,86	11,14	0,0826	0,0939	821	2317

Mittelwerte	p _{ex} [bar]	(dp/dt) _{max} [bar/s]	K _G -Wert [bar*m/s]
Ebene 1	11,47	802	2264
Ebene 2	10,83	768	2168
Ebene 3	12,77	906	2557
Ebene 4	12,00	848	2394
Ebene 5	12,17	925	2611
Ebene 6	11,83	818	2309
Kammer 1	11,80	832	2349
Kammer 2	11,93	859	2424
Gesamt		844	2384

Tiefpaß 100 Hz
ungefiltert starke Oszillationen

Versuch Nr. 41 (III.2 / 9615)

Datum: 14.05.96 Durchmesser: 2000 mm Länge: 7748 mm
 Volumen: 22,5 m³ Ausgangsdruck: 0,20 bar Zündort: Flammeneintritt DN50 / Z1
 Temperatur: 18 °C Konzentration: 7,9 Vol.-% Einbauten: keine

Meß- stelle	Kammer	Ebene	p _{ex} [bar]	p _a [bar]	p _e [bar]	t _a [s]	t _e [s]	(dp/dt) _{max} [bar/s]	K _G -Wert [bar*m/s]
1	1	1	8,20	0,83	7,72	-0,0014	0,3249	21	60
2	1	2	8,20	1,10	7,69	0,0222	0,3177	22	63
3	2	3	8,30	0,55	8,17	-0,0134	0,3453	21	60
4	2	4	8,40	1,34	8,23	0,0260	0,3269	23	65
5	2	5	8,40	0,91	7,75	0,0105	0,3390	21	59
6	2	6	8,00	0,91	7,53	0,0144	0,3331	21	59
7	2	6	begrenzt auf 2 bar						

Mittelwerte	p _{ex} [bar]	(dp/dt) _{max} [bar/s]	K _G -Wert [bar*m/s]
Ebene 1	8,20	21	60
Ebene 2	8,20	22	63
Ebene 3	8,30	21	60
Ebene 4	8,40	23	65
Ebene 5	8,40	21	59
Ebene 6	8,00	21	59
Kammer 1	8,20	22	61
Kammer 2	8,28	21	61
Gesamt	8,25	22	61

Flammeneintritt bei ca. 0,025 bar

Versuch Nr. 42 (III.2 / 9636)

Datum: 16.07.96 Durchmesser: 2000 mm Länge: 7748 mm
 Volumen: 22,5 m³ Ausgangsdruck: 0,20 bar Zündort: Flammeneintritt DN50 / Z1
 Temperatur: 18 °C Konzentration: 7,9 Vol.-% Einbauten: keine

Meß- stelle	Kammer	Ebene	p_{ex} [bar]	p_a [bar]	p_e [bar]	t_a [s]	t_e [s]	$(dp/dt)_{max}$ [bar/s]	K_G -Wert [bar*m/s]
1	1	1	8,00	0,68	7,59	0,0000	0,2489	28	78
2	1	2	8,00	1,21	7,33	0,0338	0,2357	30	86
3	2	3	8,10	1,02	7,86	0,0035	0,2468	28	79
4	2	4	8,50	1,21	7,89	0,0183	0,2333	31	88
5	2	5	8,60	1,02	8,22	0,0070	0,2398	31	87
6	2	6	8,10	0,94	7,26	0,0075	0,2186	30	85
7	2	6	begrenzt auf 2 bar						

Mittelwerte	p_{ex} [bar]	$(dp/dt)_{max}$ [bar/s]	K_G -Wert [bar*m/s]
Ebene 1	8,00	28	78
Ebene 2	8,00	30	86
Ebene 3	8,10	28	79
Ebene 4	8,50	31	88
Ebene 5	8,60	31	87
Ebene 6	8,10	30	85
Kammer 1	8,00	29	82
Kammer 2	8,33	30	85
Gesamt	8,22	30	84

Flammeneintritt bei ca. 0,028 bar

Versuch Nr. 43 (III.2 / 9637)

Datum: 17.07.96 Durchmesser: 2000 mm Länge: 7748 mm
 Volumen: 22,5 m³ Ausgangsdruck: 0,20 bar Zündort: Flammeneintritt DN50 / Z1
 Temperatur: 18 °C Konzentration: 7,9 Vol.-% Einbauten: keine

Meß- stelle	Kammer	Ebene	p_{ex} [bar]	p_a [bar]	p_e [bar]	t_a [s]	t_e [s]	$(dp/dt)_{max}$ [bar/s]	K_G -Wert [bar*m/s]
1	1	1	7,90	1,11	7,05	0,0288	0,2419	28	79
2	1	2	7,90	1,67	6,83	0,0577	0,2302	30	84
3	2	3	8,00	1,24	7,36	0,0225	0,2349	29	81
4	2	4	8,40	1,19	7,31	0,0167	0,2202	30	85
5	2	5	8,40	1,43	7,67	0,0309	0,2300	31	88
6	2	6	7,90	1,37	7,26	0,0353	0,2333	30	84
7	2	6	begrenzt auf 2 bar						

Mittelwerte	p_{ex} [bar]	$(dp/dt)_{max}$ [bar/s]	K_G -Wert [bar*m/s]
Ebene 1	7,90	28	79
Ebene 2	7,90	30	84
Ebene 3	8,00	29	81
Ebene 4	8,40	30	85
Ebene 5	8,40	31	88
Ebene 6	7,90	30	84
Kammer 1	7,90	29	82
Kammer 2	8,18	30	85
Gesamt	8,08	30	84

Flammeneintritt bei ca. 0,028 bar

Versuch Nr. 44 (III.2 / 9641)

Datum: 06.08.96 Durchmesser: 2000 mm Länge: 7748 mm
 Volumen: 22,5 m³ Ausgangsdruck: 0,20 bar Zündort: Flammeneintritt DN50 / Z1
 Temperatur: 20 °C Konzentration: 8,0 Vol.-% Einbauten: Schwallwand mit 3 Öffnungen in Verb

Meß- stelle	Kammer	Ebene	P _{ex} [bar]	p _a [bar]	p _e [bar]	t _a [s]	t _e [s]	(dp/dt) _{max} [bar/s]	K _G -Wert [bar*m/s]
1	2	6	defekt						
2	2	6	defekt						
3	2	6	8,60	0,34	8,50	-0,0013	0,0204	376	1061
4	2	5	8,60	0,19	8,36	-0,0051	0,0184	347	981
5	2	5	defekt						
6	2	5	8,60	0,19	8,03	-0,0054	0,0195	315	888
7	2	4	8,60	0,83	8,66	-0,0020	0,0177	397	1121
8	2	4	8,60	0,64	8,30	-0,0034	0,0177	363	1025
9	2	4	defekt						
10	2	3	8,70	1,14	7,55	-0,0013	0,0184	325	919
11	2	3	8,40	1,28	7,69	0,0022	0,0190	382	1077
12	2	3	8,60	0,28	8,26	-0,0059	0,0184	328	927
13	1	2	8,90	1,22	7,96	0,0065	0,0204	485	1370
14	1	2	9,20	0,80	8,96	0,0045	0,0232	436	1232
15	1	2	9,40	0,74	9,14	0,0041	0,0249	404	1140
16	1	1	defekt						
17	1	1	9,40	0,90	9,52	0,0033	0,0233	431	1217
18	1	1	9,40	0,74	9,15	0,0033	0,0233	420	1187
19	2	6	begrenzt auf 2 bar						

Mittelwerte	P _{ex} [bar]	(dp/dt) _{max} [bar/s]	K _G -Wert [bar*m/s]
Ebene 1	9,40	426	1202
Ebene 2	9,17	442	1247
Ebene 3	8,57	345	974
Ebene 4	8,60	380	1073
Ebene 5	8,60	331	934
Ebene 6	8,60	376	1061
Kammer 1	9,26	435	1229
Kammer 2	8,59	354	1000
Gesamt	8,85	385	1088

Flammeneintritt bei ca. 0,025 bar
 Tiefpaß 100 Hz
 ungefiltert starke Oszillationen

Versuch Nr. 45 (III.2 / 9719)

Datum: 19.09.97 Durchmesser: 2000 mm Länge: 12668 mm
 Volumen: 37,5 m³ Ausgangsdruck: 0,0 bar Zündort: Flammeneintritt DN50 / Z1
 Temperatur: °C Konzentration: 8,0 Vol.-% Einbauten: keine

Meß- stelle	Kammer	Ebene	P _{ex} [bar]	p _a [bar]	p _e [bar]	t _a [s]	t _e [s]	(dp/dt) _{max} [bar/s]	K _G -Wert [bar*m/s]
1	1	1	7,20	1,09	4,05	-0,0063	0,2241	13	43
2	1	1	7,30	0,67	4,02	-0,0671	0,2089	12	41
3	1	1	7,40	0,84	4,25	-0,0430	0,2266	13	42
4	2	2	7,30	0,94	3,87	-0,0430	0,2051	12	40
5	2	2	7,20	0,47	4,02	-0,0861	0,2152	12	39
6	2	2	7,30	0,92	3,92	-0,0329	0,2051	13	42
7	2	3	7,30	0,77	4,32	-0,0494	0,2456	12	40
8	2	3	7,20	0,64	4,35	-0,0608	0,2544	12	39
9	2	3	7,40	0,52	4,84	-0,0797	0,2785	12	40
10	2	4	7,40	0,80	4,59	-0,0519	0,2544	12	41
11	2	4	7,20	1,02	4,30	-0,0241	0,2392	12	42
12	2	4	7,40	0,47	4,44	-0,0797	0,2481	12	41
13	2	5	7,30	0,54	4,49	-0,0797	0,2696	11	38
14	2	5	7,30	0,97	4,49	-0,0215	0,2392	14	45
15	2	5	Meßbereich: 2 bar						
16	1	Boden	nicht vorhanden						
17	2	Boden	nicht vorhanden						
18	2	5	nicht vorhanden						

Mittelwerte	P _{ex} [bar]	(dp/dt) _{max} [bar/s]	K _G -Wert [bar*m/s]
Ebene 1	7,30	13	42
Ebene 2	7,27	12	40
Ebene 3	7,30	12	40
Ebene 4	7,33	12	41
Ebene 5	7,30	12	42
Kammer 1	7,30	13	42
Kammer 2	7,30	12	41
Gesamt	7,30	12	41

Versuch Nr. 46 (III.2 / 9720)

Datum: 01.10.97

Durchmesser: 2000 mm

Länge: 12668 mm

Volumen: 37,5 m³

Ausgangsdruck: 0,0 bar

Zündort: Flammeneintritt DN50 / Z1

Temperatur: °C

Konzentration: 8,0 Vol.-%

Einbauten: keine

Meß- stelle	Kammer	Ebene	p_{ex} [bar]	p_a [bar]	p_e [bar]	t_a [s]	t_e [s]	$(dp/dt)_{max}$ [bar/s]	K_G -Wert [bar*m/s]
1	1	1	7,90	1,12	5,57	-0,0025	0,1937	23	76
2	1	1							
3	1	1	8,10	0,60	5,32	-0,0367	0,1684	23	77
4	2	2							
5	2	2							
6	2	2	8,00	0,52	5,76	-0,0456	0,1937	22	73
7	2	3							
8	2	3							
9	2	3	8,10	0,64	5,79	-0,0367	0,1899	23	76
10	2	4							
11	2	4							
12	2	4	8,10	0,68	5,40	-0,0304	0,1772	23	76
13	2	5							
14	2	5							
15	2	5							
16	1	Boden							
17	2	Boden							
18	2	5							

Mittelwerte	p_{ex} [bar]	$(dp/dt)_{max}$ [bar/s]	K_G -Wert [bar*m/s]
Ebene 1	8,00	23	76
Ebene 2	8,00	22	73
Ebene 3	8,10	23	76
Ebene 4	8,10	23	76
Ebene 5			
Kammer 1	8,00	23	76
Kammer 2	8,07	22	75
Gesamt	8,04	23	76

Kugelhahn nicht vollständig geöffnet

Versuch Nr. 47 (III.2 / 9721)

Datum: 06.10.97

Durchmesser: 2000 mm

Länge: 12668 mm

Volumen: 37,5 m³

Ausgangsdruck: 0,0 bar

Zündort: Flammeneintritt DN80 / Z1

Temperatur: °C

Konzentration: 8,0 Vol.-%

Einbauten: keine

Meß- stelle	Kammer	Ebene	p_{ex} [bar]	p_a [bar]	p_e [bar]	t_a [s]	t_e [s]	$(dp/dt)_{max}$ [bar/s]	K_G -Wert [bar*m/s]
1	1	1	7,40	1,73	5,68	0,0405	0,2392	20	67
2	1	1	7,50	0,84	5,88	-0,0152	0,2456	19	65
3	1	1	7,50	0,75	6,55	-0,0177	0,2785	20	66
4	2	2	7,40	0,92	6,55	-0,0089	0,2823	19	65
5	2	2	7,40	0,94	6,28	-0,0063	0,2671	20	65
6	2	2	7,50	0,69	5,88	-0,0241	0,2392	20	66
7	2	3	7,50	0,89	5,91	-0,0127	0,2481	19	64
8	2	3	7,40	0,85	6,15	-0,0127	0,2734	19	62
9	2	3	7,60	0,71	6,40	-0,0215	0,2570	20	68
10	2	4	7,60	0,83	6,34	-0,0127	0,2519	21	70
11	2	4	7,40	0,77	6,16	-0,0177	0,2608	19	65
12	2	4	7,40	0,94	6,50	-0,0152	0,2671	20	66
13	2	5	7,50	0,86	6,46	-0,0089	0,2759	20	66
14	2	5	7,50	0,85	6,57	-0,0127	0,2759	20	66
15	2	5							
16	1	Boden	Meßbereich: 2 bar						
17	2	Boden	nicht vorhanden						
18	2	5	nicht vorhanden						

Mittelwerte	p_{ex} [bar]	$(dp/dt)_{max}$ [bar/s]	K_G -Wert [bar*m/s]
Ebene 1	7,47	20	66
Ebene 2	7,43	20	65
Ebene 3	7,50	19	65
Ebene 4	7,47	20	67
Ebene 5	7,50	20	66
Kammer 1	7,47	20	66
Kammer 2	7,47	20	66
Gesamt	7,47	20	66

Kugelhahn nicht vollständig geöffnet

Versuch Nr. 48 (III.2 / 9722)

Datum: 07.10.97 Durchmesser: 2000 mm Länge: 12668 mm
 Volumen: 37,5 m³ Ausgangsdruck: 0,0 bar Zündort: Flammeneintritt DN80 / Z1
 Temperatur: °C Konzentration: 8,0 Vol.-% Einbauten: keine

Meß- stelle	Kammer	Ebene	P _{ex} [bar]	P _a [bar]	P _e [bar]	t _a [s]	t _e [s]	(dp/dt) _{max} [bar/s]	K _G -Wert [bar*m/s]
1	1	1	7,50	0,84	5,11	-0,0119	0,1947	21	69
2	1	1	7,60	0,89	5,63	-0,0127	0,2177	21	69
3	1	1	7,60	1,04	5,76	-0,0025	0,2304	20	68
4	2	2	7,60	1,02	5,79	-0,0089	0,2304	20	67
5	2	2	7,60	0,69	5,98	-0,0304	0,2456	19	64
6	2	2	7,60	0,84	5,63	-0,0127	0,2241	20	68
7	2	3	7,60	0,74	5,68	-0,0177	0,2203	21	69
8	2	3	7,50	0,84	5,04	-0,0063	0,1937	21	70
9	2	3	7,70	0,72	6,16	-0,0215	0,2519	20	67
10	2	4	7,80	0,75	5,31	-0,0177	0,1962	21	71
11	2	4	7,60	0,86	4,76	-0,0127	0,1810	20	67
12	2	4	7,60	1,02	6,01	-0,0025	0,2456	20	67
13	2	5	7,60	0,64	4,89	-0,0278	0,1962	19	64
14	2	5	7,60	0,59	5,63	-0,0278	0,2266	20	66
15	2	5	Meßbereich: 2 bar						
16	1	Boden	nicht vorhanden						
17	2	Boden	nicht vorhanden						
18	2	5	nicht vorhanden						

Mittelwerte	P _{ex} [bar]	(dp/dt) _{max} [bar/s]	K _G -Wert [bar*m/s]
Ebene 1	7,57	21	69
Ebene 2	7,60	20	66
Ebene 3	7,60	21	69
Ebene 4	7,67	21	69
Ebene 5	7,60	19	65
Kammer 1	7,57	21	69
Kammer 2	7,62	20	67
Gesamt	7,61	20	68

Versuch Nr. 49 (III.2 / 9723)

Datum: 09.10.97 Durchmesser: 2000 mm Länge: 12668 mm
 Volumen: 37,5 m³ Ausgangsdruck: 0,0 bar Zündort: Flammeneintritt DN80 / Z1
 Temperatur: °C Konzentration: 8,0 Vol.-% Einbauten: keine

Meß- stelle	Kammer	Ebene	P _{ex} [bar]	P _a [bar]	P _e [bar]	t _a [s]	t _e [s]	(dp/dt) _{max} [bar/s]	K _G -Wert [bar*m/s]
1	1	1	7,50	0,67	5,01	-0,0177	0,1962	20	68
2	1	1	7,60	0,72	5,33	-0,0278	0,1987	20	68
3	1	1	7,60	0,57	5,41	-0,0392	0,2089	20	65
4	2	2	7,50	1,04	5,49	-0,0063	0,2152	20	67
5	2	2	7,50	0,64	5,39	-0,0241	0,2177	20	66
6	2	2	7,50	0,86	5,46	-0,0152	0,2114	20	68
7	2	3	7,50	0,97	5,09	-0,0089	0,1987	20	66
8	2	3	7,40	0,86	5,24	-0,0152	0,2051	20	67
9	2	3	7,60	0,64	5,51	-0,0304	0,2152	20	66
10	2	4	7,70	0,80	5,44	-0,0177	0,1962	22	73
11	2	4	7,50	0,84	5,09	-0,0089	0,1987	20	69
12	2	4	7,50	0,89	5,27	-0,0152	0,2051	20	67
13	2	5	7,50	0,72	5,36	-0,0241	0,2152	19	65
14	2	5	7,60	0,52	5,49	-0,0392	0,2392	18	60
15	2	5	Meßbereich: 2 bar						
16	1	Boden	nicht vorhanden						
17	2	Boden	nicht vorhanden						
18	2	5	nicht vorhanden						

Mittelwerte	P _{ex} [bar]	(dp/dt) _{max} [bar/s]	K _G -Wert [bar*m/s]
Ebene 1	7,57	20	67
Ebene 2	7,50	20	67
Ebene 3	7,50	20	66
Ebene 4	7,57	21	69
Ebene 5	7,55	19	62
Kammer 1	7,57	20	67
Kammer 2	7,53	20	67
Gesamt	7,54	20	67

Versuch Nr. 50 (III.2 / 9724)

Datum: 20.10.97

Durchmesser: 2000 mm

Länge: 12668 mm

Volumen: 37,5 m³

Ausgangsdruck: 0,0 bar

Zündort: Flammeneintritt DN50 / Z1

Temperatur: °C

Konzentration: 8,0 Vol.-%

Einbauten: keine

Meß- stelle	Kammer	Ebene	p_{ex} [bar]	p_a [bar]	p_e [bar]	t_a [s]	t_e [s]	$(dp/dt)_{max}$ [bar/s]	K_G -Wert [bar*m/s]
1	1	1	7,80	2,76	7,03	0,0823	0,2392	27	91
2	1	1	7,90	3,06	7,33	0,0924	0,2481	27	92
3	1	1	8,00	3,03	7,45	0,0886	0,2481	28	93
4	2	2	7,90	3,09	7,53	0,0924	0,2570	27	90
5	2	2	7,90	3,00	7,29	0,0949	0,2456	28	95
6	2	2	7,90	3,14	7,51	0,0949	0,2570	27	90
7	2	3	7,90	3,27	7,30	0,1038	0,2456	28	95
8	2	3	7,80	3,10	7,47	0,0949	0,2671	25	85
9	2	3	8,00	2,95	7,51	0,0861	0,2519	28	92
10	2	4	8,10	4,17	7,72	0,1316	0,2608	27	92
11	2	4	7,90	2,90	7,51	0,0861	0,2570	27	90
12	2	4	7,90	3,75	7,51	0,1203	0,2608	27	90
13	2	5	7,90	3,84	7,45	0,1253	0,2570	27	92
14	2	5	defekt						
15	2	5	Meßbereich: 2 bar						
16	1	Boden	nicht vorhanden						
17	2	Boden	nicht vorhanden						
18	2	5	nicht vorhanden						

Mittelwerte	p_{ex} [bar]	$(dp/dt)_{max}$ [bar/s]	K_G -Wert [bar*m/s]
Ebene 1	7,90	27	92
Ebene 2	7,90	27	92
Ebene 3	7,90	27	91
Ebene 4	7,97	27	91
Ebene 5	7,90	27	92
Kammer 1	7,90	27	92
Kammer 2	7,92	27	91
Gesamt	7,92	27	91

Flammeneintritt bei ca. 0,024 bar

Versuch Nr. 51 (III.2 / 9726)

Datum: 28.10.97

Durchmesser: 2000 mm

Länge: 12668 mm

Volumen: 37,5 m³

Ausgangsdruck: 0,0 bar

Zündort: Flammeneintritt DN80 / Z1 Flammens

Temperatur: °C

Konzentration: 8,0 Vol.-%

Einbauten: keine

Meß- stelle	Kammer	Ebene	p_{ex} [bar]	p_a [bar]	p_e [bar]	t_a [s]	t_e [s]	$(dp/dt)_{max}$ [bar/s]	K_G -Wert [bar*m/s]
1	1	1	8,80	1,24	6,34	0,0190	0,1987	28	95
2	1	1	defekt						
3	1	1	8,90	1,58	6,90	0,0304	0,2114	29	98
4	2	2	8,90	1,01	6,14	0,0000	0,1810	28	95
5	2	2	8,90	1,40	6,37	0,0152	0,1937	28	93
6	2	2	8,90	1,28	6,57	0,0127	0,2025	28	93
7	2	3	8,90	1,33	6,46	0,0152	0,1987	28	94
8	2	3	8,70	0,91	6,48	-0,0063	0,2051	26	88
9	2	3	8,90	1,40	6,77	0,0253	0,2203	28	92
10	2	4	9,10	0,55	7,02	-0,0241	0,2177	27	90
11	2	4	8,90	1,19	6,40	0,0063	0,1987	27	91
12	2	4	8,90	0,71	6,18	-0,0127	0,1873	27	92
13	2	5	8,90	1,02	6,29	0,0000	0,1899	28	93
14	2	5	8,90	1,18	6,28	0,0089	0,1962	27	91
15	2	5	Meßbereich: 2 bar						
16	1	Boden	nicht vorhanden						
17	2	Boden	nicht vorhanden						
18	2	5	nicht vorhanden						

Mittelwerte	p_{ex} [bar]	$(dp/dt)_{max}$ [bar/s]	K_G -Wert [bar*m/s]
Ebene 1	8,85	29	97
Ebene 2	8,90	28	94
Ebene 3	8,83	27	91
Ebene 4	8,97	27	91
Ebene 5	8,90	27	92
Kammer 1	8,85	29	97
Kammer 2	8,90	27	92
Gesamt	8,89	28	93

Versuch Nr. 52 (III.2 / 9727)

Datum: 05.11.97 Durchmesser: 2000 mm Länge: 12668 mm
 Volumen: 37,5 m³ Ausgangsdruck: 0,2 bar Zündort: Zündgefäß Z1
 Temperatur: °C Konzentration: 8,0 Vol.-% Einbauten: keine

Meß- stelle	Kammer	Ebene	p_{ex} [bar]	p_a [bar]	p_e [bar]	t_a [s]	t_e [s]	$(dp/dt)_{max}$ [bar/s]	K_G -Wert [bar*m/s]
1	1	1	9,70	1,34	5,59	-0,0089	0,1101	36	120
2	1	1	defekt						
3	1	1	9,70	1,38	5,74	-0,0127	0,0987	39	131
4	2	2	9,70	1,19	5,83	-0,0241	0,1013	37	124
5	2	2	9,80	0,95	6,40	-0,0367	0,1291	33	110
6	2	2	9,70	1,44	5,71	-0,0177	0,0987	37	123
7	2	3	9,80	1,02	6,13	-0,0278	0,1101	37	124
8	2	3	9,60	1,20	5,41	-0,0215	0,0924	37	124
9	2	3	9,80	1,33	5,44	-0,0177	0,0823	41	138
10	2	4	9,90	0,85	6,25	-0,0329	0,1076	38	129
11	2	4	9,70	1,16	5,35	-0,0241	0,0797	40	135
12	2	4	9,80	1,16	5,61	-0,0241	0,1038	35	116
13	2	5	9,90	1,01	6,54	-0,0241	0,1228	38	126
14	2	5	9,80	0,81	6,27	-0,0329	0,1228	35	117
15	2	5	9,90	0,68	7,44	-0,0494	0,1532	33	112
16	1	Boden	nicht vorhanden						
17	2	Boden	nicht vorhanden						
18	2	5	nicht vorhanden						

Mittelwerte	p_{ex} [bar]	$(dp/dt)_{max}$ [bar/s]	K_G -Wert [bar*m/s]
Ebene 1	9,70	37	125
Ebene 2	9,73	36	119
Ebene 3	9,73	38	128
Ebene 4	9,80	38	127
Ebene 5	9,87	35	118
Kammer 1	9,70	37	125
Kammer 2	9,78	37	123
Gesamt	9,77	37	123

Versuch Nr. 53 (III.2 / 9807)

Datum: 28.04.98 Durchmesser: 2000 mm Länge: 12668 mm
 Volumen: 37,5 m³ Ausgangsdruck: 0,0 bar Zündort: Flammeneintritt DN80 / Z1
 Temperatur: °C Konzentration: 8,0 Vol.-% Einbauten: Schwallwand mit Tür

Meß- stelle	Kammer	Ebene	p_{ex} [bar]	p_a [bar]	p_e [bar]	t_a [s]	t_e [s]	$(dp/dt)_{max}$ [bar/s]	K_G -Wert [bar*m/s]
1	1	1	8,60	0,11	8,33	-0,0459	0,0913	60	201
2	1	1	8,70	0,07	8,42	-0,0459	0,0895	62	206
3	1	1	8,70	0,31	9,02	-0,0381	0,0904	68	227
4	2	2	8,60	0,58	9,02	-0,0358	0,0972	63	212
5	2	2	8,60	0,22	8,75	-0,0436	0,0872	65	218
6	2	2	8,60	0,31	8,60	-0,0422	0,0872	64	214
7	2	3	8,60	0,07	8,84	-0,0381	0,0904	68	229
8	2	3	8,60	0,40	8,32	-0,0326	0,0826	69	230
9	2	3	8,60	0,55	8,81	-0,0312	0,0936	66	222
10	2	4	8,60	0,10	8,26	-0,0358	0,0739	74	249
11	2	4	8,60	0,28	8,45	-0,0312	0,0794	74	247
12	2	4	8,60	0,55	8,48	-0,0267	0,0748	78	262
13	2	5	8,40	0,25	8,36	-0,0267	0,0895	70	234
14	2	5	8,60	0,28	8,96	-0,0235	0,1027	69	230
15	2	5	Meßbereich 2 bar						
16	1	Boden	8,60	0,22	8,39	-0,0413	0,0849	65	217
17	2	Boden	8,90	0,29	8,38	-0,0280	0,0826	73	245
18	2	5	defekt						

Mittelwerte	p_{ex} [bar]	$(dp/dt)_{max}$ [bar/s]	K_G -Wert [bar*m/s]
Ebene 1	8,67	63	211
Ebene 2	8,60	64	215
Ebene 3	8,60	68	227
Ebene 4	8,60	75	253
Ebene 5	8,50	69	232
Kammer 1	8,65	64	213
Kammer 2	8,58	69	232
Gesamt	8,62	68	228

Flammeneintritt bei ca. 0,034 bar
 Starke Schwingungen, besonders in Kammer 2
 ab Meßstelle 13 ausgeprägtes Vormaximum
 Zur Ermittlung von p_{max} wurde lokale Maxima nicht betrachtet

Versuch Nr. 54 (III.2 / 9808)

Datum: 30.04.98

Durchmesser: 2000 mm

Länge: 12668 mm

Volumen: 37,5 m³

Ausgangsdruck: 0,0 bar

Zündort: Flammeneintritt DN80 Z1

Temperatur: °C

Konzentration: 8,0 Vol.-%

Einbauten: Schwallwand mit Tür

Meß- stelle	Kammer	Ebene	p _{ex} [bar]	p _a [bar]	p _e [bar]	t _a [s]	t _e [s]	(dp/dt) _{max} [bar/s]	K _G -Wert [bar*m/s]
1	1	1	7,90	0,16	8,03	-0,0459	0,1237	46	155
2	1	1	8,00	0,44	7,81	-0,0399	0,1237	45	151
3	1	1	8,10	0,25	8,00	-0,0459	0,1182	47	158
4	2	2	8,00	0,44	7,29	-0,0413	0,1292	40	134
5	2	2	8,10	0,16	7,92	-0,0513	0,1201	45	151
6	2	2	8,10	0,19	7,53	-0,0491	0,1146	45	150
7	2	3	8,10	0,31	7,62	-0,0399	0,1201	46	153
8	2	3	7,90	0,58	7,42	-0,0326	0,1214	44	149
9	2	3	8,00	0,16	7,48	-0,0399	0,1278	44	146
10	2	4	8,10	0,19	7,26	-0,0413	0,1068	48	160
11	2	4	8,10	0,25	7,95	-0,0312	0,1315	47	158
12	2	4	8,00	0,35	8,08	-0,0303	0,1214	51	171
13	2	5	7,90	0,19	7,69	-0,0312	0,1246	48	161
14	2	5	8,10	0,17	7,81	-0,0358	0,1224	48	162
15	2	5	Meßbereich 2 bar						
16	1	Boden	8,10	0,33	7,75	-0,0413	0,1224	45	152
17	2	Boden	8,20	0,25	7,86	-0,0303	0,1237	49	166
18	2	5	8,30	0,26	8,29	-0,0358	0,1237	50	169

Mittelwerte	p _{ex} [bar]	(dp/dt) _{max} [bar/s]	K _G -Wert [bar*m/s]
Ebene 1	8,00	46	155
Ebene 2	8,07	43	145
Ebene 3	8,00	45	149
Ebene 4	8,07	49	163
Ebene 5	8,10	49	164
Kammer 1	8,03	46	154
Kammer 2	8,06	46	155
Gesamt	8,06	46	156

Starke Schwingungen (40 Hz)

ab Ebene 3 ausgeprägtes Vormaximum

ab Meßstelle 13 starke Oszillationen

Versuch Nr. 55 (III.2 / 9809)

Datum: 06.05.98

Durchmesser: 2000 mm

Länge: 12668 mm

Volumen: 37,5 m³

Ausgangsdruck: 0,0 bar

Zündort: Flammeneintritt DN80 / Z1

Temperatur: °C

Konzentration: 8,0 Vol.-%

Einbauten: Schwallwand mit Tür

Meß- stelle	Kammer	Ebene	p _{ex} [bar]	p _a [bar]	p _e [bar]	t _a [s]	t _e [s]	(dp/dt) _{max} [bar/s]	K _G -Wert [bar*m/s]
1	1	1	8,10	0,44	7,42	-0,0390	0,1123	46	154
2	1	1	8,20	0,25	8,00	-0,0436	0,1192	48	159
3	1	1	8,10	0,16	7,92	-0,0436	0,1201	47	159
4	2	2	8,20	0,05	8,11	-0,0513	0,1224	46	155
5	2	2	8,20	0,28	7,95	-0,0422	0,1224	47	156
6	2	2	8,20	0,25	8,11	-0,0436	0,1192	48	162
7	2	3	8,20	0,22	8,20	-0,0422	0,1315	46	154
8	2	3	defekt						
9	2	3	8,10	0,38	7,95	-0,0358	0,1192	49	163
10	2	4	8,20	0,38	8,17	-0,0326	0,1237	50	167
11	2	4	8,20	0,22	7,72	-0,0358	0,1237	47	157
12	2	4	8,20	0,44	7,95	-0,0303	0,1169	51	171
13	2	5	8,10	0,28	7,29	-0,0289	0,1013	54	180
14	2	5	8,20	0,31	7,80	-0,0280	0,0949	61	204
15	2	5	Meßbereich 2 bar						
16	1	Boden	8,10	0,28	7,95	-0,0413	0,1169	49	162
17	2	Boden	8,40	0,16	8,20	-0,0335	0,1082	57	190
18	2	5	defekt						

Mittelwerte	p _{ex} [bar]	(dp/dt) _{max} [bar/s]	K _G -Wert [bar*m/s]
Ebene 1	8,13	47	157
Ebene 2	8,20	47	158
Ebene 3	8,15	47	159
Ebene 4	8,20	49	165
Ebene 5	8,15	57	192
Kammer 1	8,13	47	159
Kammer 2	8,18	50	167
Gesamt	8,18	50	166

ab Meßstelle 13 starke Oszillationen

Versuch Nr. 56 (III.2 / 9811)

Datum: 19.05.98 Durchmesser: 2000 mm Länge: 12668 mm
 Volumen: 37,5 m³ Ausgangsdruck: 0,0 bar Zündort: Flammeneintritt DN80 / Z1
 Temperatur: °C Konzentration: 8,0 Vol.-% Einbauten: Schwallwand mit Öffnung 500

Meß- stelle	Kammer	Ebene	P _{ex} [bar]	P _a [bar]	P _e [bar]	t _a [s]	t _e [s]	(dp/dt) _{max} [bar/s]	K _G -Wert [bar*m/s]
1	1	1	8,90	1,28	8,97	-0,0025	0,0320	223	746
2	1	1	9,10	1,05	9,28	-0,0025	0,0320	239	799
3	1	1	9,10	0,86	8,72	-0,0063	0,0282	228	763
4	2	2	9,20	0,52	10,21	-0,0123	0,0244	264	884
5	2	2	9,00	0,28	10,18	-0,0133	0,0228	274	918
6	2	2	9,10	0,34	9,53	-0,0171	0,0228	230	771
7	2	3	9,20	0,31	9,84	-0,0095	0,0228	295	988
8	2	3	9,00	0,26	9,14	-0,0079	0,0259	263	880
9	2	3	9,00	0,20	9,80	-0,0085	0,0250	287	959
10	2	4	9,10	0,28	9,93	-0,0057	0,0313	261	873
11	2	4	9,00	0,37	9,48	-0,0070	0,0288	254	851
12	2	4	defekt						
13	2	5	9,00	0,31	10,51	-0,0063	0,0297	283	948
14	2	5	9,00	0,31	9,66	-0,0063	0,0288	266	891
15	2	5	Meßbereich 2 bar						
16	1	Boden	9,00	0,72	8,89	-0,0063	0,0326	210	703
17	2	Boden	9,20	0,31	8,51	-0,0108	0,0114	370	1238
18	2	5	defekt						

Mittelwerte	P _{ex} [bar]	(dp/dt) _{max} [bar/s]	K _G -Wert [bar*m/s]
Ebene 1	9,03	230	769
Ebene 2	9,10	256	857
Ebene 3	9,07	282	942
Ebene 4	9,05	258	862
Ebene 5	9,00	275	920
Kammer 1	9,03	225	753
Kammer 2	9,06	268	896
Gesamt	9,06	263	881

Flammeneintritt bei ca. 0,032 bar
 Ermittlung der Anstiege aus Effektivwerten der gefilterten Druckverläufe (Tiefpaß 500 Hz)
 Starke Schwingungen
 ab Ebene 3 ausgeprägtes Vormaximum aufgrund von Überlagerungseffekten infolge von Oszillationen
 hoher Maximalwert bei Meßstelle 18 (an Enflüchtungsanschluß senkrecht zum Tankmantel) wahrscheinlich durch Beschleunigung

Versuch Nr. 57 (III.2 / 9812)

Datum: 25.05.98 Durchmesser: 2000 mm Länge: 12668 mm
 Volumen: 37,5 m³ Ausgangsdruck: 0,0 bar Zündort: Flammeneintritt DN80 / Z1
 Temperatur: °C Konzentration: 8,0 Vol.-% Einbauten: Schwallwand mit Öffnung 500

Meß- stelle	Kammer	Ebene	P _{ex} [bar]	P _a [bar]	P _e [bar]	t _a [s]	t _e [s]	(dp/dt) _{max} [bar/s]	K _G -Wert [bar*m/s]
1	1	1	8,50	0,71	7,92	-0,0079	0,0360	164	550
2	1	1	8,60	1,67	8,86	-0,0016	0,0380	182	609
3	1	1	8,80	1,58	9,03	-0,0025	0,0389	180	602
4	2	2	9,00	0,53	9,28	-0,0161	0,0405	154	517
5	2	2	9,10	1,09	9,01	-0,0117	0,0411	150	502
6	2	2	9,10	1,03	8,69	-0,0139	0,0411	139	466
7	2	3	9,00	1,44	8,87	-0,0108	0,0297	183	614
8	2	3	9,00	0,34	8,36	-0,0085	0,0427	157	524
9	2	3	8,90	0,31	8,47	-0,0101	0,0411	159	533
10	2	4	8,90	0,34	8,36	-0,0085	0,0427	157	524
11	2	4	8,90	0,31	8,17	-0,0108	0,0405	153	513
12	2	4	defekt						
13	2	5	8,60	1,50	10,37	-0,0009	0,0427	203	681
14	2	5	9,00	0,31	9,67	-0,0041	0,0497	174	583
15	2	5	Meßbereich 2 bar						
16	1	Boden	8,80	1,28	8,23	-0,0047	0,0380	163	545
17	2	Boden	9,10	0,24	8,50	-0,0123	0,0313	190	634
18	2	5	9,40	0,35	9,87	-0,0027	0,0297	294	983

Mittelwerte	P _{ex} [bar]	(dp/dt) _{max} [bar/s]	K _G -Wert [bar*m/s]
Ebene 1	8,63	175	587
Ebene 2	9,07	148	495
Ebene 3	8,97	166	557
Ebene 4	8,90	155	518
Ebene 5	9,00	224	749
Kammer 1	8,68	172	576
Kammer 2	8,99	175	585
Gesamt	8,92	175	586

Ermittlung der Anstiege aus Effektivwerten der gefilterten Druckverläufe (Tiefpaß 500 Hz)
 Starke Schwingungen
 ab Ebene 3 ausgeprägtes Vormaximum aufgrund von Überlagerungseffekten infolge von Oszillationen
 hoher Maximalwert bei Meßstelle 18 (an Enflüchtungsanschluß senkrecht zum Tankmantel) wahrscheinlich durch Beschleunigung

Versuch Nr. 58 (III.2 / 9813)

Datum: 05.06.98

Durchmesser: 2000 mm

Länge: 12668 mm

Volumen: 37,5 m³

Ausgangsdruck 0,2 bar

Zündort: innen ZZ3

Temperatur: °C

Konzentration: 8,1 Vol.-%

Einbauten: keine

Meß- stelle	Kammer	Ebene	p_{ex} [bar]	p_a [bar]	p_e [bar]	t_a [s]	t_e [s]	$(dp/dt)_{max}$ [bar/s]	K_G -Wert [bar*m/s]
1	1	1	9,50	1,01	8,78	-0,0475	0,2426	27	90
2	1	1	9,50	0,68	9,15	-0,0676	0,2581	26	87
3	1	1	9,70	0,68	9,48	-0,0699	0,2767	25	85
4	2	2	9,50	0,64	9,26	-0,0769	0,2596	26	86
5	2	2	9,70	0,52	9,23	-0,0714	0,2658	26	86
6	2	2	9,70	0,49	9,05	-0,0900	0,2596	24	82
7	2	3	defekt						
8	2	3	9,50	0,49	8,66	-0,0807	0,2395	26	85
9	2	3	defekt						
10	2	4	9,80	0,53	8,77	-0,0753	0,2279	27	91
11	2	4	9,50	0,80	8,48	-0,0544	0,2318	27	90
12	2	4	defekt						
13	2	5	9,50	0,74	8,75	-0,0660	0,2411	26	87
14	2	5	9,60	0,52	8,69	-0,0637	0,2279	28	94
15	2	5	Meßbereich 2 bar						
16	1	Boden	9,50	0,58	8,66	-0,0714	0,2465	25	85
17	2	Boden	9,70	0,69	8,96	-0,0637	0,2449	27	90
18	2	5	defekt						

Mittelwerte	p_{ex} [bar]	$(dp/dt)_{max}$ [bar/s]	K_G -Wert [bar*m/s]
Ebene 1	9,57	26	87
Ebene 2	9,63	25	85
Ebene 3	9,50	26	85
Ebene 4	9,65	27	90
Ebene 5	9,55	27	91
Kammer 1	9,55	26	87
Kammer 2	9,60	26	88
Gesamt	9,59	26	88

Versuch Nr. 59 (III.2 / 9814)

Datum: 12.06.98

Durchmesser: 2000 mm

Länge: 12668 mm

Volumen: 37,5 m³

Ausgangsdruck 0,2 bar

Zündort: innen ZZ3

Temperatur: °C

Konzentration: 8,1 Vol.-%

Einbauten: keine

Meß- stelle	Kammer	Ebene	p_{ex} [bar]	p_a [bar]	p_e [bar]	t_a [s]	t_e [s]	$(dp/dt)_{max}$ [bar/s]	K_G -Wert [bar*m/s]
1	1	1	10,10	1,52	9,45	-0,1109	0,1436	31	104
2	1	1	9,90	0,96	8,97	-0,1179	0,1397	31	104
3	1	1	9,90	0,57	9,31	-0,1349	0,1568	30	100
4	2	2	9,80	0,65	9,20	-0,1372	0,1513	30	99
5	2	2	10,00	1,05	9,07	-0,1086	0,1343	33	110
6	2	2	9,90	0,96	9,21	-0,1179	0,1475	31	104
7	2	3	10,00	0,90	8,91	-0,1217	0,1328	31	105
8	2	3	9,80	0,80	9,18	-0,1256	0,1591	29	98
9	2	3	10,10	0,90	9,21	-0,1349	0,1529	29	97
10	2	4	10,20	0,83	9,24	-0,1295	0,1459	31	102
11	2	4	9,90	0,73	9,27	-0,1256	0,1552	30	102
12	2	4	9,90	0,83	9,14	-0,1241	0,1436	31	104
13	2	5	9,90	0,86	9,24	-0,1256	0,1459	31	103
14	2	5	10,00	0,92	9,17	-0,1217	0,1529	30	101
15	2	5	Meßbereich 2 bar						
16	1	Boden	9,80	0,82	9,32	-0,1349	0,1660	28	95
17	2	Boden	10,00	0,96	9,34	-0,1163	0,1498	31	105
18	2	5	9,90	1,17	9,59	-0,1072	0,1664	31	103

Mittelwerte	p_{ex} [bar]	$(dp/dt)_{max}$ [bar/s]	K_G -Wert [bar*m/s]
Ebene 1	9,97	31	103
Ebene 2	9,90	31	105
Ebene 3	9,97	30	100
Ebene 4	10,00	31	103
Ebene 5	9,93	31	102
Kammer 1	9,93	30	101
Kammer 2	9,95	31	102
Gesamt	9,95	31	102

Versuch Nr. 60 (III.2 / 9815)

Datum: 16.06.98 Durchmesser: 2000 mm Länge: 12668 mm
 Volumen: 37,5 m³ Ausgangsdruck: 0,0 bar Zündort: innen ZZ3
 Temperatur: °C Konzentration: 8,1 Vol.-% Einbauten: keine

Meß- stelle	Kammer	Ebene	P _{ex} [bar]	p _a [bar]	p _e [bar]	t _a [s]	t _e [s]	(dp/dt) _{max} [bar/s]	K _G -Wert [bar*m/s]
1	1	1	7,80	0,38	7,56	-0,1202	0,2991	17	57
2	1	1	7,90	0,38	7,67	-0,1163	0,2991	18	59
3	1	1	8,10	0,40	7,85	-0,1349	0,2914	17	58
4	2	2	7,80	0,23	7,93	-0,1217	0,3138	18	59
5	2	2	8,10	0,72	7,93	-0,1179	0,3138	17	56
6	2	2	8,10	0,65	8,00	-0,1217	0,3006	17	58
7	2	3	8,30	0,83	8,20	-0,1256	0,3045	17	57
8	2	3	7,90	0,48	7,85	-0,1202	0,2914	18	60
9	2	3	8,40	0,88	8,17	-0,1124	0,2952	18	60
10	2	4	8,30	0,80	8,17	-0,0977	0,3030	18	62
11	2	4	8,20	0,80	7,90	-0,1124	0,2975	17	58
12	2	4	8,20	0,80	7,92	-0,1070	0,3030	17	58
13	2	5	8,00	0,72	7,53	-0,1086	0,2859	17	58
14	2	5	7,90	0,32	7,53	-0,1333	0,2914	17	57
15	2	5	Meßbereich 2 bar						
16	1	Boden	8,00	0,07	7,53	-0,1504	0,2914	17	57
17	2	Boden	8,30	0,64	7,59	-0,1202	0,2821	17	58
18	2	5	8,20	0,94	7,89	-0,1032	0,2883	18	59

Mittelwerte	P _{ex} [bar]	(dp/dt) _{max} [bar/s]	K _G -Wert [bar*m/s]
Ebene 1	7,93	17	58
Ebene 2	8,00	17	58
Ebene 3	8,20	18	59
Ebene 4	8,23	18	59
Ebene 5	8,03	17	58
Kammer 1	7,95	17	58
Kammer 2	8,12	17	59
Gesamt	8,09	17	58

Versuch Nr. 61 (III.2 / 9816)

Datum: 19.06.98 Durchmesser: 2000 mm Länge: 12668 mm
 Volumen: 37,5 m³ Ausgangsdruck: 0,0 bar Zündort: innen ZZ3
 Temperatur: 21 °C Konzentration: 8,1 Vol.-% Einbauten: keine

Meß- stelle	Kammer	Ebene	P _{ex} [bar]	p _a [bar]	p _e [bar]	t _a [s]	t _e [s]	(dp/dt) _{max} [bar/s]	K _G -Wert [bar*m/s]
1	1	1	8,10	0,41	7,69	-0,0939	0,2581	21	69
2	1	1	8,10	0,47	7,51	-0,0939	0,2542	20	68
3	1	1	8,10	0,74	7,56	-0,0714	0,2558	21	70
4	2	2	8,20	1,04	7,36	-0,0676	0,2318	21	71
5	2	2	8,30	1,04	7,42	-0,0714	0,2202	22	73
6	2	2	8,30	0,77	7,64	-0,0939	0,2465	20	68
7	2	3	8,30	0,58	7,92	-0,1016	0,2596	20	68
8	2	3	8,10	0,64	7,45	-0,0923	0,2279	21	71
9	2	3	8,30	0,97	7,45	-0,0900	0,2411	20	66
10	2	4	8,50	0,83	7,86	-0,0861	0,2279	22	75
11	2	4	8,20	0,80	8,08	-0,0861	0,2596	21	71
12	2	4	defekt						
13	2	5	8,20	0,77	7,42	-0,0885	0,2426	20	67
14	2	5	8,20	0,41	7,67	-0,1032	0,2357	21	72
15	2	5	Meßbereich 2 bar						
16	1	Boden	8,20	0,25	7,45	-0,1086	0,2241	22	72
17	2	Boden	8,20	0,71	7,59	-0,0861	0,2372	21	71
18	2	5	8,20	1,03	7,84	-0,0885	0,2635	19	65

Mittelwerte	P _{ex} [bar]	(dp/dt) _{max} [bar/s]	K _G -Wert [bar*m/s]
Ebene 1	8,10	21	69
Ebene 2	8,27	21	70
Ebene 3	8,23	20	68
Ebene 4	8,35	22	73
Ebene 5	8,20	20	68
Kammer 1	8,13	21	70
Kammer 2	8,25	21	70
Gesamt	8,22	21	70

Konzentration mit Binos ermittelt

Versuch Nr. 62 (III.2 / 9817)

Datum: 24.06.98 Durchmesser: 2000 mm Länge: 12668 mm
 Volumen: 37,5 m³ Ausgangsdruck: 0,0 bar Zündort: innen ZW3
 Temperatur: 19 °C Konzentration: 8,0 Vol.-% Einbauten: keine

Meß- stelle	Kammer	Ebene	P _{ex} [bar]	P _a [bar]	P _e [bar]	t _a [s]	t _e [s]	(dp/dt) _{max} [bar/s]	K _G -Wert [bar*m/s]
1	1	1	8,30	1,24	7,72	-0,0598	0,1923	26	86
2	1	1	8,40	1,16	8,20	-0,0544	0,2055	27	91
3	1	1	8,40	1,16	7,86	-0,0583	0,2016	26	86
4	2	2	8,50	1,31	8,81	-0,1705	0,1235	26	85
5	2	2	8,50	1,60	8,08	-0,1256	0,1119	27	91
6	2	2	8,30	1,35	7,75	-0,1241	0,1173	27	89
7	2	3	8,50	1,40	8,11	-0,1279	0,1250	27	89
8	2	3	8,30	1,52	8,00	-0,1241	0,1266	26	87
9	2	3	8,40	1,37	7,92	-0,1349	0,1289	25	83
10	2	4	8,60	1,90	8,08	-0,1109	0,1142	27	92
11	2	4	8,40	1,46	7,84	-0,1279	0,1212	26	86
12	2	4	8,40	1,30	7,95	-0,1442	0,1305	24	81
13	2	5	8,40	1,63	7,86	-0,1217	0,1212	26	86
14	2	5	8,50	1,20	7,99	-0,1411	0,1250	26	85
15	2	5	Meßbereich 2 bar						
16	1	Boden		1,30	8,20	-0,1411	0,1289	26	85
17	2	Boden		1,27	8,05	-0,1349	0,1158	27	91
18	2	5	8,60	0,94	8,05	-0,1504	0,1235	26	87

Mittelwerte	P _{ex} [bar]	(dp/dt) _{max} [bar/s]	K _G -Wert [bar*m/s]
Ebene 1	8,37	26	88
Ebene 2	8,43	26	89
Ebene 3	8,40	26	86
Ebene 4	8,47	26	86
Ebene 5	8,50	26	86
Kammer 1	8,40	26	87
Kammer 2	8,45	26	87
Gesamt	8,45	26	87

Versuch Nr. 63 (III.2 / 9818)

Datum: 01.07.98 Durchmesser: 2000 mm Länge: 12668 mm
 Volumen: 37,5 m³ Ausgangsdruck: 0,0 bar Zündort: innen ZW3
 Temperatur: °C Konzentration: 8,1 Vol.-% Einbauten: keine

Meß- stelle	Kammer	Ebene	P _{ex} [bar]	P _a [bar]	P _e [bar]	t _a [s]	t _e [s]	(dp/dt) _{max} [bar/s]	K _G -Wert [bar*m/s]
1	1	1	8,00	1,82	7,20	-0,0096	0,2055	25	84
2	1	1	8,00	0,80	7,59	-0,0676	0,2264	23	77
3	1	1	7,90	1,02	7,51	-0,0583	0,2148	24	80
4	2	2	8,00	0,61	7,56	-0,0885	0,2225	22	75
5	2	2	8,00	0,85	7,97	-0,0637	0,2302	24	81
6	2	2	8,20	0,77	7,72	-0,0753	0,2132	24	81
7	2	3	8,30	1,07	7,81	-0,0676	0,2039	25	83
8	2	3	8,20	0,74	8,03	-0,0807	0,2372	23	77
9	2	3	8,20	0,80	7,67	-0,0846	0,2132	23	77
10	2	4	8,50	0,97	7,75	-0,0622	0,1977	26	87
11	2	4	8,10	1,35	7,59	-0,0436	0,2039	25	84
12	2	4	defekt						
13	2	5		1,35	7,67	-0,0413	0,2148	25	83
14	2	5		1,64	7,90	-0,0305	0,2264	24	81
15	2	5	Meßbereich 2 bar						
16	1	Boden		1,10	7,89	-0,0637	0,2225	24	79
17	2	Boden		0,88	7,93	-0,0846	0,2132	24	79
18	2	5	8,10	0,68	7,64	-0,0923	0,2202	22	74

Mittelwerte	P _{ex} [bar]	(dp/dt) _{max} [bar/s]	K _G -Wert [bar*m/s]
Ebene 1	7,97	24	80
Ebene 2	8,07	24	79
Ebene 3	8,23	24	79
Ebene 4	8,30	26	86
Ebene 5	8,23	24	80
Kammer 1	8,03	24	80
Kammer 2	8,20	24	80
Gesamt	8,18	24	80

Versuch Nr. 64 (III.2 / 9823)

Datum: 07.07.98 Durchmesser: 2000 mm Länge: 12668 mm
 Volumen: 37,5 m³ Ausgangsdruck: 0,0 bar Zündort: innen ZZ2
 Temperatur: 20 °C Konzentration: 8,1 Vol.-% Einbauten: keine

Meß- stelle	Kammer	Ebene	p_{ex} [bar]	p_a [bar]	p_e [bar]	t_a [s]	t_e [s]	$(dp/dt)_{max}$ [bar/s]	K_G -Wert [bar*m/s]
1	1	1	7,70	0,77	7,10	-0,2904	0,0314	20	66
2	1	1	7,80	1,41	6,71	-0,2571	0,0144	20	65
3	1	1	7,80	1,24	7,09	-0,2733	0,0392	19	63
4	2	2	7,70	2,13	6,93	-0,2153	0,0206	20	68
5	2	2	7,80	2,40	7,33	-0,2006	0,0407	20	69
6	2	2	7,80	2,07	7,51	-0,2177	0,0500	20	68
7	2	3	7,80	1,94	7,23	-0,2269	0,0446	19	65
8	2	3	7,70	1,32	6,76	-0,2641	0,0129	20	66
9	2	3	7,90	1,02	7,33	-0,0598	0,2635	20	65
10	2	4	8,00	1,40	7,56	-0,2733	0,0407	20	66
11	2	4	7,80	1,49	7,39	-0,2548	0,0539	19	64
12	2	4	7,80	2,41	6,95	-0,1968	0,0129	22	73
13	2	5	7,80	2,11	6,90	-0,2099	0,0237	21	69
14	2	5	7,90	1,90	7,33	-0,2246	0,0353	21	70
15	2	5	Meßbereich 2 bar						
16	1	Boden	7,80	1,71	6,98	-0,2362	0,0276	20	67
17	2	Boden	7,80	2,13	5,41	-0,2022	-0,0676	24	82
18	2	5	7,80	1,32	7,47	-0,2664	0,0485	20	65

Mittelwerte	p_{ex} [bar]	$(dp/dt)_{max}$ [bar/s]	K_G -Wert [bar*m/s]
Ebene 1	7,77	19	65
Ebene 2	7,77	20	68
Ebene 3	7,80	20	65
Ebene 4	7,87	20	67
Ebene 5	7,83	20	68
Kammer 1	7,78	19	65
Kammer 2	7,82	20	67
Gesamt	7,81	20	68

Versuch Nr. 65 (III.2 / 9829)

Datum: 04.08.98 Durchmesser: 2000 mm Länge: 12668 mm
 Volumen: 37,5 m³ Ausgangsdruck: 0,2 bar Zündort: innen ZZ2
 Temperatur: 26 °C Konzentration: 8,0 Vol.-% Einbauten: keine

Meß- stelle	Kammer	Ebene	p_{ex} [bar]	p_a [bar]	p_e [bar]	t_a [s]	t_e [s]	$(dp/dt)_{max}$ [bar/s]	K_G -Wert [bar*m/s]
1	1	1	9,50	2,34	9,15	-0,0939	0,0802	39	131
2	1	1	9,40	2,89	8,60	-0,0846	0,0539	41	138
3	1	1	9,50	2,99	8,81	-0,0831	0,0632	40	133
4	2	2	9,60	3,40	9,08	-0,0676	0,0686	42	140
5	2	2	9,60	3,29	8,81	-0,0699	0,0632	42	139
6	2	2	9,50	3,10	9,18	-0,0769	0,0724	41	136
7	2	3	9,80	3,65	9,48	-0,0622	0,0686	45	149
8	2	3	9,50	3,53	8,96	-0,0676	0,0562	44	147
9	2	3	9,60	3,04	9,05	-0,0807	0,0748	39	129
10	2	4	9,90	3,11	9,10	-0,0807	0,0539	45	149
11	2	4	9,70	3,19	9,45	-0,0753	0,0748	42	139
12	2	4	defekt						
13	2	5	9,50	3,07	8,75	-0,0792	0,0593	41	137
14	2	5	9,70	3,28	9,04	-0,0730	0,0709	40	134
15	2	5	Meßbereich 2 bar						
16	1	Boden	9,60	2,77	9,02	-0,0885	0,0655	41	136
17	2	Boden	9,60	3,19	8,96	-0,0714	0,0632	43	143
18	2	5	9,40	2,77	8,84	-0,0846	0,0724	39	130

Mittelwerte	p_{ex} [bar]	$(dp/dt)_{max}$ [bar/s]	K_G -Wert [bar*m/s]
Ebene 1	9,47	40	134
Ebene 2	9,57	41	138
Ebene 3	9,63	42	142
Ebene 4	9,80	43	144
Ebene 5	9,53	40	134
Kammer 1	9,50	40	134
Kammer 2	9,62	42	139
Gesamt	9,59	41	138

Versuch Nr. 66 (III.2 / 9830)

Datum: 07.08.98

Durchmesser: 2000 mm

Länge: 12668 mm

Volumen: 37,5 m³

Ausgangsdruck: 0,2 bar

Zündort: innen ZZ2

Temperatur: 28 °C

Konzentration: 8,1 Vol.-%

Einbauten: keine

Meß- stelle	Kammer	Ebene	p_{ex} [bar]	p_a [bar]	p_e [bar]	t_a [s]	t_e [s]	$(dp/dt)_{max}$ [bar/s]	K_G -Wert [bar*m/s]
1	1	1	9,40	1,16	7,72	-0,1875	0,0353	29	98
2	1	1	9,40	1,16	7,80	-0,1821	0,0353	31	102
3	1	1	9,40	0,95	7,60	-0,2022	0,0260	29	98
4	2	2	9,40	0,98	7,63	-0,1952	0,0314	29	98
5	2	2	9,50	1,13	7,77	-0,1952	0,0314	29	98
6	2	2	9,60	0,83	8,02	-0,1968	0,0485	29	98
7	2	3	9,70	0,74	7,69	-0,2022	0,0276	30	101
8	2	3	9,80	0,61	7,56	-0,2084	0,0299	29	98
9	2	3	9,60	0,71	7,66	-0,2045	0,0206	31	103
10	2	4	9,80	0,61	7,72	-0,2115	0,0222	30	102
11	2	4	9,40	0,88	7,93	-0,2084	0,0461	28	93
12	2	4	defekt						
13	2	5	9,50	0,55	7,69	-0,2231	0,0299	28	94
14	2	5	9,50	0,61	7,60	-0,2115	0,0167	31	102
15	2	5	Meßbereich 2 bar						
16	1	Boden	9,50	1,08	8,05	-0,1952	0,0430	29	98
17	2	Boden	9,70	0,87	7,83	-0,1966	0,0371	30	100
18	2	5	9,30	0,57	7,36	-0,2215	0,0338	27	89

Mittelwerte	p_{ex} [bar]	$(dp/dt)_{max}$ [bar/s]	K_G -Wert [bar*m/s]
Ebene 1	9,40	30	99
Ebene 2	9,50	29	98
Ebene 3	9,70	30	101
Ebene 4	9,60	29	97
Ebene 5	9,43	28	95
Kammer 1	9,43	30	99
Kammer 2	9,55	29	98
Gesamt	9,53	29	98

Versuch Nr. 67 (III.2 / 9831)

Datum: 11.08.98

Durchmesser: 2000 mm

Länge: 12668 mm

Volumen: 37,5 m³

Ausgangsdruck: 0,0 bar

Zündort: innen ZZ2

Temperatur: 25 °C

Konzentration: 8,1 Vol.-%

Einbauten: keine

Meß- stelle	Kammer	Ebene	p_{ex} [bar]	p_a [bar]	p_e [bar]	t_a [s]	t_e [s]	$(dp/dt)_{max}$ [bar/s]	K_G -Wert [bar*m/s]
1	1	1	7,90	0,67	6,60	-0,2586	-0,0150	24	82
2	1	1	7,90	0,41	6,34	-0,2602	-0,0150	24	81
3	1	1	7,90	0,61	6,37	-0,2625	-0,0212	24	80
4	2	2	7,90	0,68	5,91	-0,2532	-0,0413	25	82
5	2	2	7,90	0,52	6,12	-0,2641	-0,0281	24	79
6	2	2	7,90	0,64	6,87	-0,2586	0,0051	24	79
7	2	3	8,10	0,47	6,29	-0,2532	-0,0250	26	85
8	2	3	7,90	0,16	6,07	-0,2641	-0,0250	25	83
9	2	3	8,10	0,49	5,88	-0,2718	-0,0397	23	78
10	2	4	8,20	0,35	6,34	-0,2772	-0,0281	24	80
11	2	4	7,90	0,44	6,43	-0,2733	-0,0057	22	75
12	2	4	defekt						
13	2	5	8,00	0,31	7,36	-0,2772	0,0314	23	77
14	2	5	8,00	0,60	7,39	-0,2509	0,0222	25	83
15	2	5	Meßbereich 2 bar						
16	1	Boden	7,90	0,68	6,53	-0,2440	-0,0096	25	84
17	2	Boden	8,20	0,48	6,97	-0,2571	0,0090	24	82
18	2	5	7,80	0,49	6,99	-0,2509	0,0183	24	81

Mittelwerte	p_{ex} [bar]	$(dp/dt)_{max}$ [bar/s]	K_G -Wert [bar*m/s]
Ebene 1	7,90	24	81
Ebene 2	7,90	24	80
Ebene 3	8,03	24	82
Ebene 4	8,05	23	78
Ebene 5	7,93	24	80
Kammer 1	7,90	24	82
Kammer 2	7,97	24	80
Gesamt	7,97	24	81

Versuch Nr. 68 (III.2 / 9832)

Datum: 13.08.98 Durchmesser: 2000 mm Länge: 12668 mm
 Volumen: 37,5 m³ Ausgangsdruck: 0,0 bar Zündort: innen ZW2
 Temperatur: 21 °C Konzentration: 8,1 Vol.-% Einbauten: keine

Meß- stelle	Kammer	Ebene	p _{ex} [bar]	p _a [bar]	p _e [bar]	t _a [s]	t _e [s]	(dp/dt) _{max} [bar/s]	K _G -Wert [bar*m/s]
1	1	1	7,80	0,91	7,00	-0,2772	0,0167	21	69
2	1	1	7,80	0,88	6,81	-0,2757	-0,0018	22	72
3	1	1	7,90	0,77	6,76	-0,2865	0,0036	21	69
4	2	2	7,80	0,64	6,71	-0,2888	0,0013	21	70
5	2	2	7,90	0,58	7,20	-0,2958	0,0206	21	70
6	2	2	7,90	1,19	6,63	-0,2718	-0,0080	21	69
7	2	3	8,00	0,64	6,07	-0,2942	-0,0359	21	70
8	2	3	7,80	1,04	6,90	-0,2625	0,0105	21	72
9	2	3	8,10	0,94	7,03	-0,2733	0,0105	21	72
10	2	4	8,00	1,30	7,06	-0,2470	0,0090	23	75
11	2	4	7,80	1,07	6,68	-0,2586	-0,0003	22	73
12	2	4	7,80	0,99	6,90	-0,2718	0,0167	20	69
13	2	5	7,80	1,11	6,63	-0,2586	-0,0057	22	73
14	2	5	7,90	1,04	7,20	-0,2602	0,0167	22	74
15	2	5	Meßbereich 2 bar						
16	1	Boden			7,80	1,07	6,73	-0,2641	-0,0057
17	2	Boden	8,00	0,68	7,80	-0,2811	0,0314	23	76
18	2	5	7,70	1,30	7,12	-0,2532	0,0299	21	69

Mittelwerte	p _{ex} [bar]	(dp/dt) _{max} [bar/s]	K _G -Wert [bar*m/s]
Ebene 1	7,83	21	70
Ebene 2	7,87	21	70
Ebene 3	7,97	21	71
Ebene 4	7,87	22	72
Ebene 5	7,80	22	72
Kammer 1	7,83	21	71
Kammer 2	7,88	21	71
Gesamt	7,87	21	72

Versuch Nr. 69 (III.2 / 9835)

Datum: 19.08.98 Durchmesser: 2000 mm Länge: 12668 mm
 Volumen: 37,5 m³ Ausgangsdruck: 0,0 bar Zündort: innen ZW2
 Temperatur: 26 °C Konzentration: 8,1 Vol.-% Einbauten: keine

Meß- stelle	Kammer	Ebene	p _{ex} [bar]	p _a [bar]	p _e [bar]	t _a [s]	t _e [s]	(dp/dt) _{max} [bar/s]	K _G -Wert [bar*m/s]
1	1	1	7,70	1,21	6,64	-0,2246	-0,0057	25	83
2	1	1	7,80	0,75	6,58	-0,2440	-0,0096	25	83
3	1	1	7,80	1,39	6,76	-0,2269	0,0013	24	79
4	2	2	7,90	0,52	7,00	-0,2695	0,0129	23	77
5	2	2	7,80	0,58	6,64	-0,2548	-0,0096	25	83
6	2	2	7,80	0,88	6,96	-0,2470	0,0167	23	77
7	2	3	7,90	0,77	7,00	-0,2440	0,0090	25	82
8	2	3	7,70	0,68	6,93	-0,2548	0,0013	24	82
9	2	3	8,10	1,07	6,98	-0,2269	-0,0003	26	87
10	2	4	8,00	0,94	7,00	-0,2285	0,0105	25	85
11	2	4	7,80	0,86	7,10	-0,2362	0,0237	24	80
12	2	4	7,80	0,97	7,23	-0,2362	0,0299	24	79
13	2	5	7,80	0,86	6,55	-0,2401	-0,0119	25	83
14	2	5	7,90	1,24	6,65	-0,2246	0,0075	23	78
15	2	5	Meßbereich 2 bar						
16	1	Boden			7,80	0,99	6,90	-0,2401	0,0090
17	2	Boden	8,10	0,77	7,06	-0,2491	0,0065	25	82
18	2	5	7,70	0,47	6,77	-0,2625	-0,0041	24	82

Mittelwerte	p _{ex} [bar]	(dp/dt) _{max} [bar/s]	K _G -Wert [bar*m/s]
Ebene 1	7,77	24	82
Ebene 2	7,83	24	79
Ebene 3	7,90	25	84
Ebene 4	7,87	24	81
Ebene 5	7,80	24	81
Kammer 1	7,78	24	81
Kammer 2	7,85	24	81
Gesamt	7,85	24	81

Versuch Nr. 70 (III.2 / 9836)

Datum: 21.08.98 Durchmesser: 2000 mm Länge: 12668 mm
 Volumen: 37,5 m³ Ausgangsdruck: 0,0 bar Zündort: innen ZB
 Temperatur: 20 °C Konzentration: 8,1 Vol.-% Einbauten: keine

Meß- stelle	Kammer	Ebene	p_{ex} [bar]	p_a [bar]	p_e [bar]	t_a [s]	t_e [s]	$(dp/dt)_{max}$ [bar/s]	K_G -Wert [bar*m/s]	
1	1	1	7,70	0,67	6,28	-0,2981	-0,0281	21	70	
2	1	1	7,80	0,64	6,81	-0,3020	0,0013	20	68	
3	1	1	7,80	0,69	6,53	-0,3051	-0,0096	20	66	
4	2	2	7,80	1,10	6,87	-0,2850	0,0144	19	65	
5	2	2	7,80	0,69	7,03	-0,2958	0,0144	20	68	
6	2	2	7,80	0,57	6,63	-0,3051	-0,0080	20	68	
7	2	3	8,00	0,55	7,42	-0,3089	0,0314	20	68	
8	2	3	7,70	0,91	6,90	-0,2919	0,0075	20	67	
9	2	3	8,00	1,63	7,17	-0,2664	0,0299	19	63	
10	2	4	7,90	0,64	7,06	-0,3051	0,0051	21	69	
11	2	4	7,80	0,67	7,06	-0,3089	0,0276	19	64	
12	2	4	7,80	0,50	7,30	-0,3151	0,0260	20	67	
13	2	5	7,80	0,67	6,85	-0,3051	-0,0096	21	70	
14	2	5	7,90	0,57	7,37	-0,3035	0,0485	19	65	
15	2	5	Meßbereich 2 bar							
16	1	Boden		7,70	0,59	6,85	-0,3182	0,0206	18	62
17	2	Boden		8,20	0,86	7,35	-0,2981	0,0237	20	68
18	2	5		7,70	0,68	7,17	-0,2996	0,0276	20	66

Mittelwerte	p_{ex} [bar]	$(dp/dt)_{max}$ [bar/s]	K_G -Wert [bar*m/s]
Ebene 1	7,77	20	68
Ebene 2	7,80	20	67
Ebene 3	7,90	20	66
Ebene 4	7,83	20	67
Ebene 5	7,80	20	67
Kammer 1	7,75	20	66
Kammer 2	7,83	20	67
Gesamt	7,84	20	67

Versuch Nr. 71 (III.2 / 9846)

Datum: 12.10.98 Durchmesser: 2000 mm Länge: 12668 mm
 Volumen: 37,5 m³ Ausgangsdruck: 0,2 bar Zündort: innen ZB
 Temperatur: 14 °C Konzentration: 7,9 Vol.-% Einbauten: keine

Meß- stelle	Kammer	Ebene	p_{ex} [bar]	p_a [bar]	p_e [bar]	t_a [s]	t_e [s]	$(dp/dt)_{max}$ [bar/s]	K_G -Wert [bar*m/s]	
1	1	1	9,60	1,80	9,06	-0,2209	0,1076	22	74	
2	1	1	9,60	2,67	8,50	-0,1534	0,0895	24	80	
3	1	1	9,70	2,86	9,12	-0,1534	0,1119	24	79	
4	2	2	9,60	2,99	8,99	-0,1480	0,0972	24	82	
5	2	2	9,70	2,07	8,81	-0,1929	0,0856	24	81	
6	2	2	9,70	2,51	8,74	-0,1666	0,0949	24	80	
7	2	3	9,90	1,99	9,17	-0,1952	0,1119	23	78	
8	2	3	9,60	2,56	9,35	-0,1728	0,1343	22	74	
9	2	3	10,00	2,12	9,34	-0,1875	0,1026	25	83	
10	2	4	9,70	2,04	8,78	-0,1836	0,0918	24	82	
11	2	4	9,60	2,86	8,69	-0,1411	0,0972	24	82	
12	2	4	defekt konstant 0.2 bar							
13	2	5		9,70	2,13	8,78	-0,1728	0,0840	26	87
14	2	5								
15	2	5		9,40	2,07	8,87	-0,1797	0,1119	23	78
16	1	Boden		9,90	2,07	8,48	-0,1952	0,0763	24	79
17	2	Boden		9,90	2,01	8,63	-0,2006	0,0949	22	75
18	2	5	fehlt							

Mittelwerte	p_{ex} [bar]	$(dp/dt)_{max}$ [bar/s]	K_G -Wert [bar*m/s]
Ebene 1	9,63	23	78
Ebene 2	9,67	24	81
Ebene 3	9,83	23	79
Ebene 4	9,65	24	82
Ebene 5	9,55	25	82
Kammer 1	9,70	23	78
Kammer 2	9,69	24	81
Gesamt	9,71	24	80

Versuch Nr. 72 (III.2 / 9847)

Datum: 16.10.98 Durchmesser: 2000 mm Länge: 12668 mm
 Volumen: 37,5 m³ Ausgangsdruck: 0,2 bar Zündort: innen ZB
 Temperatur: 15 °C Konzentration: 7,9 Vol.-% Einbauten: keine

Meß- stelle	Kammer	Ebene	p _{ex} [bar]	p _a [bar]	p _e [bar]	t _a [s]	t _e [s]	(dp/dt) _{max} [bar/s]	K _G -Wert [bar*m/s]	
1	1	1	10,30	2,91	9,17	-0,0861	0,0539	45	149	
2	1	1	10,30	3,64	8,86	-0,0714	0,0446	45	151	
3	1	1	10,40	3,07	9,32	-0,0846	0,0539	45	151	
4	2	2	10,30	3,50	9,17	-0,0730	0,0539	45	150	
5	2	2	10,40	3,07	9,40	-0,0885	0,0577	43	145	
6	2	2	10,30	3,50	9,25	-0,0753	0,0500	46	154	
7	2	3	10,60	3,64	9,63	-0,0714	0,0709	42	141	
8	2	3	10,30	3,76	9,06	-0,0753	0,0616	39	130	
9	2	3	10,80	3,18	9,10	-0,0846	0,0593	41	138	
10	2	4	11,10	3,30	9,79	-0,0861	0,0577	45	151	
11	2	4	10,30	3,38	8,74	-0,0769	0,0446	44	148	
12	2	4	Meßbereich 1 bar							
13	2	5		10,30	3,38	8,58	-0,0807	0,0392	43	145
14	2	5		10,50	3,42	8,94	-0,0699	0,0616	42	141
15	2	5		10,10	3,08	9,10	-0,0753	0,0670	42	142
16	1	Boden		10,80	3,34	9,32	-0,0769	0,0539	46	153
17	2	Boden		10,40	3,18	9,52	-0,0769	0,0632	45	152
18	2	5								

Mittelwerte	p _{ex} [bar]	(dp/dt) _{max} [bar/s]	K _G -Wert [bar*m/s]
Ebene 1	10,33	45	150
Ebene 2	10,33	45	149
Ebene 3	10,57	41	136
Ebene 4	10,70	45	149
Ebene 5	10,30	43	143
Kammer 1	10,45	45	151
Kammer 2	10,45	43	144
Gesamt	10,45	44	146

Versuch Nr. 73 (III.2 / 9848)

Datum: 20.10.98 Durchmesser: 2000 mm Länge: 12668 mm
 Volumen: 37,5 m³ Ausgangsdruck: 0,0 bar Zündort: innen ZB
 Temperatur: 8 °C Konzentration: 8,1 Vol.-% Einbauten: keine

Meß- stelle	Kammer	Ebene	p _{ex} [bar]	p _a [bar]	p _e [bar]	t _a [s]	t _e [s]	(dp/dt) _{max} [bar/s]	K _G -Wert [bar*m/s]	
1	1	1	8,10	2,09	6,81	-0,1991	0,0129	22	75	
2	1	1	8,20	2,09	6,81	-0,2060	0,0167	21	71	
3	1	1	8,30	2,57	7,29	-0,1782	0,0314	23	75	
4	2	2	8,20	2,42	7,20	-0,1821	0,0338	22	74	
5	2	2	8,30	2,70	7,42	-0,1759	0,0368	22	74	
6	2	2	8,20	2,40	7,06	-0,1914	0,0276	21	71	
7	2	3	8,40	2,37	7,39	-0,1991	0,0338	22	72	
8	2	3	8,20	1,88	7,17	-0,2099	0,0260	22	75	
9	2	3	8,50	2,42	7,15	-0,1991	0,0144	22	74	
10	2	4	8,80	2,77	7,66	-0,1821	0,0314	23	77	
11	2	4	8,20	2,21	6,93	-0,1875	0,0129	24	79	
12	2	4	Meßbereich 1 bar							
13	2	5		8,30	2,84	6,93	-0,1705	0,0105	23	76
14	2	5		8,20	2,40	6,77	-0,1821	0,0260	21	70
15	2	5		8,00	2,42	7,06	-0,1821	0,0368	21	71
16	1	Boden		8,50	3,00	6,76	-0,1635	0,0036	22	75
17	2	Boden		8,30	2,95	7,20	-0,1573	0,0407	21	72
18	2	5								

Mittelwerte	p _{ex} [bar]	(dp/dt) _{max} [bar/s]	K _G -Wert [bar*m/s]
Ebene 1	8,20	22	74
Ebene 2	8,23	22	73
Ebene 3	8,37	22	74
Ebene 4	8,50	23	78
Ebene 5	8,17	22	72
Kammer 1	8,28	22	74
Kammer 2	8,30	22	74
Gesamt	8,29	22	74

Versuch Nr. 74 (III.2 / 9849)

Datum: 22.10.98 Durchmesser: 2000 mm Länge: 12668 mm
 Volumen: 37,5 m³ Ausgangsdruck: 0,0 bar Zündort: innen ZK
 Temperatur: 18 °C Konzentration: 7,9 Vol.-% Einbauten: keine

Meß- stelle	Kammer	Ebene	p_{ex} [bar]	p_a [bar]	p_e [bar]	t_a [s]	t_e [s]	$(dp/dt)_{max}$ [bar/s]	K_G -Wert [bar*m/s]
1	1	1	7,30	0,67	6,53	-0,3954	0,0053	15	49
2	1	1	7,30	1,11	6,55	-0,3432	-0,0065	16	54
3	1	1	7,40	1,32	6,68	-0,3501	-0,0094	16	53
4	2	2	7,30	2,16	6,33	-0,3048	-0,0183	15	49
5	2	2	7,40	1,59	6,71	-0,3402	0,0053	15	50
6	2	2	7,30	1,16	6,53	-0,3520	-0,0045	15	52
7	2	3	7,50	0,92	6,29	-0,3668	-0,0094	15	50
8	2	3	7,30	0,99	6,60	-0,3501	0,0004	16	54
9	2	3	7,50	0,81	6,73	-0,3668	0,0103	16	53
10	2	4	7,70	0,86	7,17	-0,3688	0,0073	17	56
11	2	4	7,30	0,81	6,65	-0,3550	0,0122	16	53
12	2	4	defekt						
13	2	5	7,40	1,14	6,93	-0,3471	0,0290	15	52
14	2	5	7,30	1,37	6,73	-0,3383	0,0191	15	50
15	2	5	7,40	0,72	6,80	-0,3639	0,0191	16	53
16	1	Boden	7,40	0,69	7,00	-0,3875	0,0359	15	50
17	2	Boden	7,40	1,07	6,65	-0,3432	0,0172	15	52
18	2	5							

Mittelwerte	p_{ex} [bar]	$(dp/dt)_{max}$ [bar/s]	K_G -Wert [bar*m/s]
Ebene 1	7,33	16	52
Ebene 2	7,33	15	50
Ebene 3	7,43	16	52
Ebene 4	7,50	16	55
Ebene 5	7,37	15	52
Kammer 1	7,35	15	51
Kammer 2	7,40	15	52
Gesamt	7,39	15	52

Versuch Nr. 75 (III.2 / 9850)

Datum: 26.10.98 Durchmesser: 2000 mm Länge: 12668 mm
 Volumen: 37,5 m³ Ausgangsdruck: 0,0 bar Zündort: innen ZK
 Temperatur: 12 °C Konzentration: 7,9 Vol.-% Einbauten: keine

Meß- stelle	Kammer	Ebene	p_{ex} [bar]	p_a [bar]	p_e [bar]	t_a [s]	t_e [s]	$(dp/dt)_{max}$ [bar/s]	K_G -Wert [bar*m/s]
1	1	1	7,40	1,26	6,48	-0,2999	0,0172	16	55
2	1	1	7,50	1,24	6,28	-0,3018	-0,0065	17	57
3	1	1	7,50	1,69	6,73	-0,2812	0,0221	17	56
4	2	2	7,50	1,34	6,55	-0,2999	0,0122	17	56
5	2	2	7,60	2,29	6,76	-0,2546	0,0172	16	55
6	2	2	7,50	0,92	6,28	-0,3264	-0,0065	17	56
7	2	3	7,70	1,63	7,31	-0,2900	0,0388	17	58
8	2	3	7,80	1,86	6,58	-0,2733	0,0241	16	53
9	2	3	7,70	2,08	6,88	-0,2664	0,0290	16	54
10	2	4	7,90	2,45	6,76	-0,2398	0,0103	17	58
11	2	4	7,50	1,56	6,68	-0,2812	0,0221	17	56
12	2	4	7,50	2,51	6,98	-0,2428	0,0408	16	53
13	2	5	7,50	2,04	6,76	-0,2615	0,0221	17	56
14	2	5	7,50	2,09	6,81	-0,2526	0,0408	16	54
15	2	5	7,40	0,84	6,14	-0,3284	0,0024	16	54
16	1	Boden	7,60	1,09	7,57	-0,3186	0,0841	16	54
17	2	Boden	7,60	1,73	7,28	-0,2812	0,0693	16	53
18	2	5							

Mittelwerte	p_{ex} [bar]	$(dp/dt)_{max}$ [bar/s]	K_G -Wert [bar*m/s]
Ebene 1	7,47	17	56
Ebene 2	7,53	17	56
Ebene 3	7,73	16	55
Ebene 4	7,63	17	56
Ebene 5	7,47	16	54
Kammer 1	7,50	17	55
Kammer 2	7,59	16	55
Gesamt	7,57	16	55

Versuch Nr. 76 (III.2 / 9852)

Datum: 29.10.98 Durchmesser: 2000 mm Länge: 12668 mm
 Volumen: 37,5 m³ Ausgangsdruck: 0,0 bar Zündort: Zündgefäß Z3
 Temperatur: 12 °C Konzentration: 7,9 Vol.-% Einbauten: keine

Meß- stelle	Kammer	Ebene	p _{ex} [bar]	p _a [bar]	p _e [bar]	t _a [s]	t _e [s]	(dp/dt) _{max} [bar/s]	K _G -Wert [bar*m/s]
1	1	1	8,10	1,19	7,42	-0,1502	0,0339	34	113
2	1	1	8,00	1,60	7,03	-0,1473	0,0142	34	113
3	1	1	8,10	2,07	7,42	-0,1207	0,0457	32	108
4	2	2	8,00	2,48	7,42	-0,1138	0,0309	34	114
5	2	2	8,10	2,84	7,72	-0,0970	0,0428	35	117
6	2	2	8,00	2,48	7,45	-0,1049	0,0339	36	120
7	2	3	8,30	2,81	7,45	-0,0921	0,0457	34	113
8	2	3	8,00	2,07	7,51	-0,1167	0,0457	33	112
9	2	3	8,20	2,07	7,59	-0,1167	0,0506	33	111
10	2	4	8,40	3,26	7,33	-0,0852	0,0241	37	125
11	2	4	8,00	2,40	6,87	-0,1000	0,0241	36	121
12	2	4	8,10	2,51	7,48	-0,1020	0,0428	34	115
13	2	5	8,10	2,12	7,42	-0,1138	0,0339	36	120
14	2	5	8,10	2,40	7,20	-0,1049	0,0270	36	122
15	2	5	7,90	2,95	7,10	-0,0803	0,0290	38	127
16	1	Boden	8,40	1,67	7,36	-0,1286	0,0290	36	121
17	2	Boden	8,20	2,01	6,98	-0,1138	0,0241	36	121
18	2	5							

Mittelwerte		p _{ex} [bar]	(dp/dt) _{max} [bar/s]	K _G -Wert [bar*m/s]
Ebene 1		8,07	33	111
Ebene 2		8,03	35	117
Ebene 3		8,17	33	112
Ebene 4		8,17	36	120
Ebene 5		8,03	37	123
Kammer 1		8,15	34	114
Kammer 2		8,10	35	118
Gesamt		8,12	35	117

Versuch Nr. 77 (III.2 / 9856)

Datum: 02.11.98 Durchmesser: 2000 mm Länge: 12668 mm
 Volumen: 37,5 m³ Ausgangsdruck: 0,2 bar Zündort: Zündgefäß Z3
 Temperatur: 11 °C Konzentration: 7,9 Vol.-% Einbauten: keine

Meß- stelle	Kammer	Ebene	p _{ex} [bar]	p _a [bar]	p _e [bar]	t _a [s]	t _e [s]	(dp/dt) _{max} [bar/s]	K _G -Wert [bar*m/s]
1	1	1	10,60	2,11	9,21	-0,0923	0,0523	49	164
2	1	1	10,50	2,79	9,28	-0,0730	0,0523	52	173
3	1	1	10,60	2,49	9,44	-0,0792	0,0577	51	170
4	2	2	10,60	2,57	9,36	-0,0807	0,0539	50	169
5	2	2	10,60	2,07	9,67	-0,0939	0,0655	48	160
6	2	2	10,60	2,49	9,44	-0,0792	0,0562	51	172
7	2	3	10,80	3,22	9,44	-0,0637	0,0539	53	177
8	2	3	10,40	2,65	8,98	-0,0730	0,0562	49	164
9	2	3	10,70	2,65	9,52	-0,0730	0,0632	50	169
10	2	4	11,00	2,79	9,60	-0,0753	0,0577	51	171
11	2	4	10,50	2,91	9,21	-0,0699	0,0562	50	167
12	2	4	10,60	2,72	9,28	-0,0769	0,0593	48	161
13	2	5	10,60	2,72	9,60	-0,0753	0,0523	54	181
14	2	5	10,50	2,29	9,17	-0,0846	0,0539	50	166
15	2	5	10,30	2,25	8,98	-0,0831	0,0593	47	158
16	1	Boden	10,90	2,28	9,58	-0,0861	0,0577	51	170
17	2	Boden	10,60	2,45	9,17	-0,0792	0,0562	50	166
18	2	5							

Mittelwerte		p _{ex} [bar]	(dp/dt) _{max} [bar/s]	K _G -Wert [bar*m/s]
Ebene 1		10,57	51	169
Ebene 2		10,60	50	167
Ebene 3		10,63	51	170
Ebene 4		10,70	50	167
Ebene 5		10,47	50	168
Kammer 1		10,65	51	169
Kammer 2		10,60	50	168
Gesamt		10,61	50	168

Versuch Nr. 78 (III.2 / 9857)

Datum: 04.11.98

Durchmesser: 2000 mm

Länge: 12668 mm

Volumen: 37,5 m³

Ausgangsdruck: 0,2 bar

Zündort: Zündgefäß Z3

Temperatur: 13 °C

Konzentration: 7,9 Vol.-%

Einbauten: keine

Meß- stelle	Kammer	Ebene	p_{ex} [bar]	p_a [bar]	p_e [bar]	t_a [s]	t_e [s]	$(dp/dt)_{max}$ [bar/s]	K_G -Wert [bar*m/s]
1	1	1	10,40	2,53	9,17	-0,0622	0,0461	61	205
2	1	1	10,40	1,72	9,71	-0,0807	0,0632	56	186
3	1	1	10,40	2,53	9,40	-0,0637	0,0523	59	198
4	2	2	10,40	2,45	9,25	-0,0660	0,0430	62	209
5	2	2	10,30	2,87	9,60	-0,0583	0,0539	60	201
6	2	2	10,30	2,37	9,71	-0,0676	0,0655	55	185
7	2	3	10,60	3,03	9,52	-0,0544	0,0446	66	219
8	2	3	10,20	3,35	9,04	-0,0490	0,0446	61	203
9	2	3	10,50	2,37	9,40	-0,0730	0,0461	59	198
10	2	4	10,80	2,07	9,60	-0,0769	0,0446	62	208
11	2	4	10,30	2,65	9,14	-0,0622	0,0461	60	201
12	2	4	defekt						
13	2	5	10,30	2,89	9,05	-0,0544	0,0461	61	205
14	2	5	10,40	2,68	9,71	-0,0598	0,0562	61	203
15	2	5	10,30	2,49	9,14	-0,0660	0,0407	62	209
16	1	Boden	10,60	2,51	9,63	-0,0660	0,0539	59	199
17	2	Boden	10,30	3,07	9,14	-0,0529	0,0485	60	200
18	2	5							

Mittelwerte	p_{ex} [bar]	$(dp/dt)_{max}$ [bar/s]	K_G -Wert [bar*m/s]
Ebene 1	10,40	59	196
Ebene 2	10,33	59	198
Ebene 3	10,43	62	207
Ebene 4	10,55	61	204
Ebene 5	10,33	61	206
Kammer 1	10,45	59	197
Kammer 2	10,40	61	204
Gesamt	10,41	60	202

Versuch Nr. 79 (III.2 / 9858)

Datum: 09.11.98

Durchmesser: 2000 mm

Länge: 12668 mm

Volumen: 37,5 m³

Ausgangsdruck: 0,0 bar

Zündort: Zündgefäß Z3

Temperatur: 1 °C

Konzentration: 7,9 Vol.-%

Einbauten: keine

Meß- stelle	Kammer	Ebene	p_{ex} [bar]	p_a [bar]	p_e [bar]	t_a [s]	t_e [s]	$(dp/dt)_{max}$ [bar/s]	K_G -Wert [bar*m/s]
1	1	1	8,50	2,73	7,59	-0,1387	0,0446	27	89
2	1	1	8,60	3,29	7,78	-0,0939	0,0461	32	107
3	1	1	8,60	3,12	7,97	-0,1055	0,0523	31	103
4	2	2	8,40	3,45	7,75	-0,0939	0,0485	30	101
5	2	2	8,60	4,05	7,84	-0,0714	0,0461	32	108
6	2	2	8,70	3,56	7,72	-0,0885	0,0430	32	106
7	2	3	8,70	3,56	8,20	-0,0846	0,0670	31	102
8	2	3	8,50	3,81	7,51	-0,0792	0,0430	30	101
9	2	3	8,80	3,72	8,36	-0,0846	0,0632	31	105
10	2	4	8,90	3,92	8,17	-0,0730	0,0593	32	107
11	2	4	8,40	3,65	7,97	-0,0900	0,0539	30	101
12	2	4	8,50	3,68	8,26	-0,0831	0,0709	30	100
13	2	5	8,50	3,50	7,67	-0,0861	0,0562	29	98
14	2	5	8,50	3,26	7,72	-0,0954	0,0539	30	100
15	2	5	8,60	3,53	7,62	-0,0792	0,0407	34	114
16	1	Boden	8,90	3,50	8,45	-0,0861	0,0632	33	111
17	2	Boden	8,60	3,75	8,23	-0,0753	0,0686	31	104
18	2	5							

Mittelwerte	p_{ex} [bar]	$(dp/dt)_{max}$ [bar/s]	K_G -Wert [bar*m/s]
Ebene 1	8,57	30	100
Ebene 2	8,57	31	105
Ebene 3	8,67	31	103
Ebene 4	8,60	31	103
Ebene 5	8,53	31	104
Kammer 1	8,65	31	103
Kammer 2	8,59	31	104
Gesamt	8,61	31	103

Versuch Nr. 80 (III.2 / 9866)

Datum: 16.11.98 Durchmesser: 2000 mm Länge: 12668 mm
 Volumen: 37,5 m³ Ausgangsdruck: 0,2 bar Zündort: Zündgefäß Z2
 Temperatur: 7 °C Konzentration: 7,9 Vol.-% Einbauten: keine

Meß- stelle	Kammer	Ebene	p _{ex} [bar]	p _a [bar]	p _e [bar]	t _a [s]	t _e [s]	(dp/dt) _{max} [bar/s]	K _G -Wert [bar*m/s]
1	1	1	10,60	3,42	9,32	-0,0977	0,1235	27	89
2	1	1	10,60	2,45	8,60	-0,1310	0,0724	30	101
3	1	1	10,80	1,64	9,17	-0,1650	0,0918	29	98
4	2	2	10,60	1,83	9,32	-0,1612	0,1119	27	92
5	2	2	10,60	1,32	9,79	-0,1914	0,1212	27	91
6	2	2	10,60	1,48	9,02	-0,1728	0,0918	28	95
7	2	3	11,00	1,87	9,06	-0,1689	0,0817	29	96
8	2	3	10,60	1,53	9,67	-0,1728	0,1235	27	92
9	2	3	11,00	1,48	9,56	-0,1782	0,0987	29	98
10	2	4	11,80	1,41	10,37	-0,1821	0,1119	30	102
11	2	4	10,60	1,52	9,95	-0,1743	0,1343	27	91
12	2	4	defekt						
13	2	5	10,70	1,46	9,24	-0,1836	0,0933	28	94
14	2	5	10,80	1,68	9,21	-0,1650	0,0918	29	98
15	2	5	10,80	1,87	9,71	-0,1596	0,1158	28	95
16	1	Boden	11,30	1,56	10,29	-0,1821	0,1212	29	96
17	2	Boden	10,80	1,79	9,17	-0,1596	0,0972	29	96
18	2	5							

Mittelwerte	p _{ex} [bar]	(dp/dt) _{max} [bar/s]	K _G -Wert [bar*m/s]
Ebene 1	10,67	29	96
Ebene 2	10,60	28	93
Ebene 3	10,87	28	95
Ebene 4	11,20	29	97
Ebene 5	10,77	29	96
Kammer 1	10,83	29	96
Kammer 2	10,83	28	95
Gesamt	10,83	28	95

Versuch Nr. 81 (III.2 / 9879)

Datum: 30.11.98 Durchmesser: 2000 mm Länge: 12668 mm
 Volumen: 37,5 m³ Ausgangsdruck: 0,2 bar Zündort: Zündgefäß Z2
 Temperatur: 5 °C Konzentration: 7,9 Vol.-% Einbauten: keine

Meß- stelle	Kammer	Ebene	p _{ex} [bar]	p _a [bar]	p _e [bar]	t _a [s]	t _e [s]	(dp/dt) _{max} [bar/s]	K _G -Wert [bar*m/s]
1	1	1	10,50	3,38	8,98	-0,0939	0,0786	32	109
2	1	1	10,50	3,34	8,86	-0,0831	0,0840	33	111
3	1	1	10,60	3,14	9,06	-0,0977	0,0918	31	105
4	2	2	10,60	3,11	9,75	-0,0923	0,1250	31	102
5	2	2	10,70	3,03	9,75	-0,1086	0,1119	30	102
6	2	2	10,50	3,14	9,14	-0,0923	0,0879	33	111
7	2	3	10,70	3,50	9,67	-0,0900	0,1142	30	101
8	2	3	10,50	3,22	9,14	-0,0923	0,0933	32	107
9	2	3	10,70	3,30	8,70	-0,0993	0,0709	32	106
10	2	4	10,80	3,96	9,48	-0,0730	0,0895	34	114
11	2	4	10,50	3,68	8,90	-0,0831	0,0786	32	108
12	2	4	defekt						
13	2	5	10,50	3,50	9,36	-0,0714	0,1080	33	109
14	2	5	10,60	3,18	9,10	-0,0939	0,0856	33	110
15	2	5	10,50	4,18	8,65	-0,0568	0,0670	36	121
16	1	Boden	10,80	3,38	9,28	-0,0846	0,0879	34	115
17	2	Boden	10,60	3,60	8,78	-0,0699	0,0786	35	117
18	2	5							

Mittelwerte	p _{ex} [bar]	(dp/dt) _{max} [bar/s]	K _G -Wert [bar*m/s]
Ebene 1	10,53	32	108
Ebene 2	10,60	31	105
Ebene 3	10,63	31	105
Ebene 4	10,65	33	111
Ebene 5	10,53	34	114
Kammer 1	10,60	33	110
Kammer 2	10,60	32	108
Gesamt	10,60	33	109

Versuch Nr. 82 (III.2 / 9880)

Datum: 02.12.98 Durchmesser: 2000 mm Länge: 12668 mm
 Volumen: 37,5 m³ Ausgangsdruck: 0,0 bar Zündort: Zündgefäß Z2
 Temperatur: -3 °C Konzentration: 8,1 Vol.-% Einbauten: keine

Meß- stelle	Kammer	Ebene	P _{ex} [bar]	P _a [bar]	P _e [bar]	t _a [s]	t _e [s]	(dp/dt) _{max} [bar/s]	K _G -Wert [bar*m/s]
1	1	1	9,00	1,53	6,74	-0,1504	0,0222	30	101
2	1	1	9,00	1,83	7,44	-0,1372	0,0485	30	101
3	1	1	9,10	2,04	7,47	-0,1279	0,0392	33	109
4	2	2	8,90	2,26	6,96	-0,1148	0,0237	34	114
5	2	2	9,10	2,40	7,36	-0,1148	0,0407	32	107
6	2	2	9,00	1,98	6,93	-0,1310	0,0222	32	108
7	2	3	9,10	2,04	7,23	-0,1241	0,0314	33	112
8	2	3	8,90	1,92	6,47	-0,1256	0,0075	34	114
9	2	3	9,30	2,80	7,44	-0,1032	0,0299	35	117
10	2	4	9,30	2,16	7,23	-0,1202	0,0260	35	116
11	2	4	9,00	2,37	6,77	-0,1202	0,0129	33	111
12	2	4	9,00	1,83	7,29	-0,0660	0,1026	32	108
13	2	5	9,00	2,13	7,11	-0,0475	0,0879	37	123
14	2	5	9,00	1,95	7,56	-0,0583	0,1119	33	111
15	2	5	9,10	1,89	7,36	-0,0598	0,1011	34	114
16	1	Boden	9,20	1,89	7,80	-0,0637	0,1065	35	116
17	2	Boden	9,00	1,48	7,39	-0,1426	0,0523	30	101
18	2	5							

Mittelwerte	P _{ex} [bar]	(dp/dt) _{max} [bar/s]	K _G -Wert [bar*m/s]
Ebene 1	9,03	31	104
Ebene 2	9,00	33	110
Ebene 3	9,10	34	114
Ebene 4	9,10	33	112
Ebene 5	9,03	35	116
Kammer 1	9,08	32	107
Kammer 2	9,06	34	113
Gesamt	9,06	33	111

Versuch Nr. 83 (III.2 / 9881)

Datum: 15.12.98 Durchmesser: 2000 mm Länge: 12668 mm
 Volumen: 37,5 m³ Ausgangsdruck: 0,0 bar Zündort: Zündgefäß Z2
 Temperatur: 10 °C Konzentration: 7,9 Vol.-% Einbauten: keine

Meß- stelle	Kammer	Ebene	P _{ex} [bar]	P _a [bar]	P _e [bar]	t _a [s]	t _e [s]	(dp/dt) _{max} [bar/s]	K _G -Wert [bar*m/s]
1	1	1	7,80	1,79	6,57	-0,2447	0,0191	18	61
2	1	1	7,80	2,37	6,93	-0,2093	0,0408	18	61
3	1	1	8,10	2,32	7,20	-0,2241	0,0339	19	63
4	2	2	7,90	2,40	7,03	-0,2073	0,0309	19	65
5	2	2	8,00	2,78	7,03	-0,1876	0,0339	19	64
6	2	2	8,00	2,54	6,70	-0,1906	0,0221	20	66
7	2	3	8,20	2,45	6,93	-0,2073	0,0270	19	64
8	2	3	8,00	2,76	7,17	-0,1925	0,0408	19	63
9	2	3	8,30	2,81	7,29	-0,2024	0,0309	19	64
10	2	4	8,40	2,76	6,84	-0,1975	0,0004	21	69
11	2	4	8,00	2,24	7,06	-0,2113	0,0339	20	66
12	2	4	defekt						
13	2	5	8,10	2,34	6,98	-0,2162	0,0270	19	64
14	2	5	8,10	2,67	7,23	-0,1925	0,0526	19	62
15	2	5	8,10	2,73	6,56	-0,1788	0,0053	21	70
16	1	Boden	8,10	2,49	6,96	-0,2024	0,0309	19	64
17	2	Boden	8,10	2,26	6,81	-0,2191	0,0191	19	64
18	2	5							

Mittelwerte	P _{ex} [bar]	(dp/dt) _{max} [bar/s]	K _G -Wert [bar*m/s]
Ebene 1	7,90	18	62
Ebene 2	7,97	19	65
Ebene 3	8,17	19	64
Ebene 4	8,20	20	67
Ebene 5	8,10	19	65
Kammer 1	7,95	19	62
Kammer 2	8,10	19	65
Gesamt	8,06	19	64

Versuch Nr. 84 (III.2 / 9882)

Datum: 21.12.98 Durchmesser: 2000 mm Länge: 12668 mm
 Volumen: 37,5 m³ Ausgangsdruck: 0,0 bar Zündort: Zündgefäß ZB
 Temperatur: 1 °C Konzentration: 8,1 Vol.-% Einbauten: keine

Meß- stelle	Kammer	Ebene	p _{ex} [bar]	p _a [bar]	p _e [bar]	t _a [s]	t _e [s]	(dp/dt) _{max} [bar/s]	K _G -Wert [bar*m/s]
1	1	1	9,20	1,26	8,36	-0,0646	0,0421	67	223
2	1	1	8,90	0,69	8,15	-0,0715	0,0434	65	217
3	1	1	9,30	0,68	8,60	-0,0820	0,0535	58	196
4	2	2	9,20	1,56	8,09	-0,0674	0,0396	61	204
5	2	2	9,20	0,52	9,25	-0,0889	0,0497	63	211
6	2	2	9,10	1,60	8,48	-0,0646	0,0373	67	226
7	2	3	9,30	1,75	9,02	-0,0706	0,0503	60	201
8	2	3	9,10	0,68	8,36	-0,0668	0,0519	65	217
9	2	3	9,30	1,22	8,68	-0,0646	0,0503	65	217
10	2	4	9,50	0,82	8,74	-0,0813	0,0481	61	205
11	2	4	9,10	0,52	8,44	-0,0883	0,0551	55	185
12	2	4	defekt						
13	2	5	8,90	0,66	8,51	-0,0845	0,0535	57	191
14	2	5	8,90	0,62	9,10	-0,0829	0,0756	54	179
15	2	5	8,90	0,73	9,37	-0,0829	0,0734	55	185
16	1	Boden	9,20	0,68	9,32	-0,0813	0,0617	60	202
17	2	Boden	8,90	0,98	8,52	-0,0759	0,0541	58	194
18	2	5							

Mittelwerte	p _{ex} [bar]	(dp/dt) _{max} [bar/s]	K _G -Wert [bar*m/s]
Ebene 1	9,13	63	212
Ebene 2	9,17	64	214
Ebene 3	9,23	63	212
Ebene 4	9,30	58	195
Ebene 5	8,90	55	185
Kammer 1	9,15	63	210
Kammer 2	9,14	60	202
Gesamt	9,13	61	203

starke Oszillationen

Versuch Nr. 85 (III.2 / 9901)

Datum: 05.01.99 Durchmesser: 2000 mm Länge: 12668 mm
 Volumen: 37,5 m³ Ausgangsdruck: 0,2 bar Zündort: Zündgefäß ZB
 Temperatur: 16 °C Konzentration: 8,1 Vol.-% Einbauten: keine

Meß- stelle	Kammer	Ebene	p _{ex} [bar]	p _a [bar]	p _e [bar]	t _a [s]	t _e [s]	(dp/dt) _{max} [bar/s]	K _G -Wert [bar*m/s]
1	1	1							
2	1	1							
3	1	1	9,90	2,85	8,45	0,0461	0,2883	23	77
4	2	2							
5	2	2							
6	2	2	9,80	3,24	8,36	0,0539	0,2952	21	71
7	2	3	9,80	3,24	8,36	0,0616	0,2937	22	74
8	2	3							
9	2	3	9,70	3,15	8,36	0,0562	0,2991	21	72
10	2	4							
11	2	4							
12	2	4	defekt						
13	2	5							
14	2	5							
15	2	5	9,70	3,09	8,67	0,0577	0,3215	21	71
16	1	Boden							
17	2	Boden							
18	2	5							

Mittelwerte	p _{ex} [bar]	(dp/dt) _{max} [bar/s]	K _G -Wert [bar*m/s]
Ebene 1	9,90	23	77
Ebene 2	9,80	21	71
Ebene 3	9,75	22	73
Ebene 4			
Ebene 5	9,70	21	71
Kammer 1	9,90	23	77
Kammer 2	9,75	21	72
Gesamt	9,78	22	73

Versuch Nr. 86 (III.2 / 9902)

Datum: 07.01.99

Durchmesser: 2000 mm

Länge: 12668 mm

Volumen: 37,5 m³

Ausgangsdruck: 0,2 bar

Zündort: Zündgefäß ZB

Temperatur: 12,7 °C

Konzentration: 8,1 Vol.-%

Einbauten: keine

Meß- stelle	Kammer	Ebene	P _{ex} [bar]	P _a [bar]	P _e [bar]	t _a [s]	t _e [s]	(dp/dt) _{max} [bar/s]	K _G -Wert [bar*m/s]
1	1	1	9,90	2,09	9,27	-0,1070	0,1289	30	102
2	1	1	9,90	2,72	9,10	-0,0977	0,1328	28	93
3	1	1	10,00	2,57	8,70	-0,1032	0,1080	29	97
4	2	2	9,90	3,01	9,10	-0,0993	0,1266	27	90
5	2	2	9,90	3,71	9,24	-0,0993	0,1289	24	81
6	2	2	9,80	2,98	8,91	-0,0977	0,1158	28	93
7	2	3	10,00	3,58	9,04	-0,0885	0,1119	27	91
8	2	3	9,80	3,40	8,84	-0,0954	0,1065	27	90
9	2	3	10,00	3,31	9,14	-0,1016	0,1080	28	93
10	2	4	10,10	3,14	9,28	-0,0939	0,1142	30	99
11	2	4	9,80	3,38	8,97	-0,0954	0,1212	26	86
12	2	4	defekt						
13	2	5	9,80	3,61	8,95	-0,0885	0,1305	24	82
14	2	5	9,80	3,25	9,00	-0,0923	0,1196	27	91
15	2	5	9,80	3,51	8,88	-0,0885	0,1196	26	86
16	1	Boden	10,30	3,18	9,67	-0,0993	0,1622	25	83
17	2	Boden	9,70	2,78	9,27	-0,0977	0,1552	26	86
18	2	5							

Mittelwerte	P _{ex} [bar]	(dp/dt) _{max} [bar/s]	K _G -Wert [bar*m/s]
Ebene 1	9,93	29	97
Ebene 2	9,87	26	88
Ebene 3	9,93	27	91
Ebene 4	9,95	28	93
Ebene 5	9,80	26	86
Kammer 1	10,03	28	94
Kammer 2	9,88	27	89
Gesamt	9,91	27	90

starke Oszillationen

Versuch Nr. 87 (III.2 / 9903)

Datum: 11.01.99

Durchmesser: 2000 mm

Länge: 12668 mm

Volumen: 37,5 m³

Ausgangsdruck: 0,2 bar

Zündort: Zündgefäß ZB

Temperatur: 3 °C

Konzentration: 8,1 Vol.-%

Einbauten: keine

Meß- stelle	Kammer	Ebene	P _{ex} [bar]	P _a [bar]	P _e [bar]	t _a [s]	t _e [s]	(dp/dt) _{max} [bar/s]	K _G -Wert [bar*m/s]
1	1	1							
2	1	1							
3	1	1	9,90	2,44	8,67	0,0314	0,3060	23	76
4	2	2							
5	2	2							
6	2	2	9,80	3,29	8,57	0,0709	0,3115	22	73
7	2	3	9,80	2,55	8,24	0,0330	0,2836	23	76
8	2	3							
9	2	3	9,70	2,72	8,24	0,0446	0,2944	22	74
10	2	4							
11	2	4							
12	2	4	Fehler						
13	2	5							
14	2	5							
15	2	5	9,70	1,92	7,91	0,0051	0,2797	22	73
16	1	Boden							
17	2	Boden							
18	2	5							

Mittelwerte	P _{ex} [bar]	(dp/dt) _{max} [bar/s]	K _G -Wert [bar*m/s]
Ebene 1	9,90	23	76
Ebene 2	9,80	22	73
Ebene 3	9,75	22	75
Ebene 4			
Ebene 5	9,70	22	73
Kammer 1	9,90	23	76
Kammer 2	9,75	22	74
Gesamt	9,78	22	74

Versuch Nr. 88 (III.2 / 9904)

Datum: 19.01.99 Durchmesser: 2000 mm Länge: 12668 mm
 Volumen: 37,5 m³ Ausgangsdruck: 0,2 bar Zündort: Zündgefäß ZB
 Temperatur: 7 °C Konzentration: 8,1 Vol.-% Einbauten: keine

Meß- stelle	Kammer	Ebene	p _{ex} [bar]	p _a [bar]	p _e [bar]	t _a [s]	t _e [s]	(dp/dt) _{max} [bar/s]	K _G -Wert [bar*m/s]
1	1	1	10,60	6,46	10,30	0,0075	0,1057	39	131
2	1	1	Fehler						
3	1	1	10,70	4,53	10,85	-0,0003	0,1212	52	174
4	2	2	10,70	2,95	9,80	-0,0119	0,0910	67	223
5	2	2	10,80	3,07	9,96	-0,0119	0,1096	57	190
6	2	2	10,70	3,72	10,34	-0,0041	0,1026	62	208
7	2	3	10,80	3,38	9,76	-0,0080	0,1003	59	197
8	2	3	10,60	2,30	10,30	-0,0119	0,1188	61	205
9	2	3	10,80	2,53	9,42	-0,0134	0,0895	67	224
10	2	4	10,90	3,54	9,88	-0,0057	0,0910	66	220
11	2	4	10,60	3,31	10,04	-0,0134	0,1057	56	189
12	2	4	defekt						
13	2	5	10,50	2,73	9,72	-0,0119	0,0871	71	236
14	2	5	10,50	2,69	9,58	-0,0119	0,0949	64	216
15	2	5	10,60	2,19	9,80	-0,0173	0,0871	73	244
16	1	Boden	10,90	1,80	9,50	-0,0188	0,0802	78	260
17	2	Boden	10,60	1,70	9,88	-0,0212	0,0910	73	244
18	2	5							

Mittelwerte	p _{ex} [bar]	(dp/dt) _{max} [bar/s]	K _G -Wert [bar*m/s]
Ebene 1	10,65	46	152
Ebene 2	10,73	62	207
Ebene 3	10,73	62	209
Ebene 4	10,75	61	204
Ebene 5	10,53	69	232
Kammer 1	10,73	56	188
Kammer 2	10,68	64	214
Gesamt	10,69	63	211

Versuch Nr. 89 (III.2 / 9905)

Datum: 22.01.99 Durchmesser: 2000 mm Länge: 12668 mm
 Volumen: 37,5 m³ Ausgangsdruck: 0,0 bar Zündort: Zündgefäß ZB
 Temperatur: 6 °C Konzentration: 7,9 Vol.-% Einbauten: keine

Meß- stelle	Kammer	Ebene	p _{ex} [bar]	p _a [bar]	p _e [bar]	t _a [s]	t _e [s]	(dp/dt) _{max} [bar/s]	K _G -Wert [bar*m/s]
1	1	1	8,80	2,26	8,26	-0,0653	0,0724	44	146
2	1	1	8,50	2,41	8,16	-0,0637	0,0740	42	140
3	1	1	8,80	2,57	9,07	-0,0653	0,1041	38	128
4	2	2	8,80	2,34	8,42	-0,0653	0,0840	41	136
5	2	2	8,70	2,85	8,38	-0,0598	0,0817	39	131
6	2	2	8,60	2,00	8,38	-0,0637	0,0964	40	133
7	2	3	8,80	2,89	8,34	-0,0637	0,0987	34	112
8	2	3	8,50	2,72	8,23	-0,0676	0,0817	37	123
9	2	3	8,70	2,00	8,39	-0,0691	0,0949	39	130
10	2	4	8,80	1,92	8,38	-0,0676	0,0709	47	156
11	2	4	8,70	2,04	9,27	-0,0691	0,1096	40	135
12	2	4	8,50	1,60	7,76	-0,0769	0,0740	41	137
13	2	5	8,40	1,48	8,21	-0,0807	0,0670	46	153
14	2	5	8,50	1,54	7,46	-0,0784	0,0407	50	166
15	2	5	8,50	1,48	7,97	-0,0807	0,0724	42	142
16	1	Boden	8,90	1,88	8,23	-0,0691	0,0840	41	139
17	2	Boden	8,50	1,48	8,13	-0,0807	0,0670	45	151
18	2	5							

Mittelwerte	p _{ex} [bar]	(dp/dt) _{max} [bar/s]	K _G -Wert [bar*m/s]
Ebene 1	8,70	41	138
Ebene 2	8,70	40	134
Ebene 3	8,67	36	122
Ebene 4	8,67	43	143
Ebene 5	8,47	46	154
Kammer 1	8,75	41	138
Kammer 2	8,63	41	138
Gesamt	8,65	41	139

Versuch Nr. 86 (III.2 / 9902)

Datum: 07.01.99 Durchmesser: 2000 mm Länge: 12668 mm
 Volumen: 37,5 m³ Ausgangsdruck: 0,2 bar Zündort: Zündgefäß ZB
 Temperatur: 12,7 °C Konzentration: 8,1 Vol.-% Einbauten: keine

Meß- stelle	Kammer	Ebene	p _{ex} [bar]	p _a [bar]	p _e [bar]	t _a [s]	t _e [s]	(dp/dt) _{max} [bar/s]	K _G -Wert [bar*m/s]
1	1	1	9,90	2,09	9,27	-0,1070	0,1289	30	102
2	1	1	9,90	2,72	9,10	-0,0977	0,1328	28	93
3	1	1	10,00	2,57	8,70	-0,1032	0,1080	29	97
4	2	2	9,90	3,01	9,10	-0,0993	0,1266	27	90
5	2	2	9,90	3,71	9,24	-0,0993	0,1289	24	81
6	2	2	9,80	2,98	8,91	-0,0977	0,1158	28	93
7	2	3	10,00	3,58	9,04	-0,0885	0,1119	27	91
8	2	3	9,80	3,40	8,84	-0,0954	0,1065	27	90
9	2	3	10,00	3,31	9,14	-0,1016	0,1080	28	93
10	2	4	10,10	3,14	9,28	-0,0939	0,1142	30	99
11	2	4	9,80	3,38	8,97	-0,0954	0,1212	26	86
12	2	4	defekt						
13	2	5	9,80	3,61	8,95	-0,0885	0,1305	24	82
14	2	5	9,80	3,25	9,00	-0,0923	0,1196	27	91
15	2	5	9,80	3,51	8,88	-0,0885	0,1196	26	86
16	1	Boden	10,30	3,18	9,67	-0,0993	0,1622	25	83
17	2	Boden	9,70	2,78	9,27	-0,0977	0,1552	26	86
18	2	5							

Mittelwerte	p _{ex} [bar]	(dp/dt) _{max} [bar/s]	K _G -Wert [bar*m/s]
Ebene 1	9,93	29	97
Ebene 2	9,87	26	88
Ebene 3	9,93	27	91
Ebene 4	9,95	28	93
Ebene 5	9,80	26	86
Kammer 1	10,03	28	94
Kammer 2	9,88	27	89
Gesamt	9,91	27	90

starke Oszillationen

Versuch Nr. 87 (III.2 / 9903)

Datum: 11.01.99 Durchmesser: 2000 mm Länge: 12668 mm
 Volumen: 37,5 m³ Ausgangsdruck: 0,2 bar Zündort: Zündgefäß ZB
 Temperatur: 3 °C Konzentration: 8,1 Vol.-% Einbauten: keine

Meß- stelle	Kammer	Ebene	p _{ex} [bar]	p _a [bar]	p _e [bar]	t _a [s]	t _e [s]	(dp/dt) _{max} [bar/s]	K _G -Wert [bar*m/s]
1	1	1							
2	1	1							
3	1	1	9,90	2,44	8,67	0,0314	0,3060	23	76
4	2	2							
5	2	2							
6	2	2	9,80	3,29	8,57	0,0709	0,3115	22	73
7	2	3	9,80	2,55	8,24	0,0330	0,2836	23	76
8	2	3							
9	2	3	9,70	2,72	8,24	0,0446	0,2944	22	74
10	2	4							
11	2	4							
12	2	4	Fehler						
13	2	5							
14	2	5							
15	2	5	9,70	1,92	7,91	0,0051	0,2797	22	73
16	1	Boden							
17	2	Boden							
18	2	5							

Mittelwerte	p _{ex} [bar]	(dp/dt) _{max} [bar/s]	K _G -Wert [bar*m/s]
Ebene 1	9,90	23	76
Ebene 2	9,80	22	73
Ebene 3	9,75	22	75
Ebene 4			
Ebene 5	9,70	22	73
Kammer 1	9,90	23	76
Kammer 2	9,75	22	74
Gesamt	9,78	22	74

Versuch Nr. 88 (III.2 / 9904)

Datum: 19.01.99 Durchmesser: 2000 mm Länge: 12668 mm
 Volumen: 37,5 m³ Ausgangsdruck: 0,2 bar Zündort: Zündgefäß ZB
 Temperatur: 7 °C Konzentration: 8,1 Vol.-% Einbauten: keine

Meß- stelle	Kammer	Ebene	P _{ex} [bar]	P _a [bar]	P _e [bar]	t _a [s]	t _e [s]	(dp/dt) _{max} [bar/s]	K _G -Wert [bar*m/s]
1	1	1	10,60	6,46	10,30	0,0075	0,1057	39	131
2	1	1	Fehler						
3	1	1	10,70	4,53	10,85	-0,0003	0,1212	52	174
4	2	2	10,70	2,95	9,80	-0,0119	0,0910	67	223
5	2	2	10,80	3,07	9,96	-0,0119	0,1096	57	190
6	2	2	10,70	3,72	10,34	-0,0041	0,1026	62	208
7	2	3	10,80	3,38	9,76	-0,0080	0,1003	59	197
8	2	3	10,60	2,30	10,30	-0,0119	0,1188	61	205
9	2	3	10,80	2,53	9,42	-0,0134	0,0895	67	224
10	2	4	10,90	3,54	9,88	-0,0057	0,0910	66	220
11	2	4	10,60	3,31	10,04	-0,0134	0,1057	56	189
12	2	4	defekt						
13	2	5	10,50	2,73	9,72	-0,0119	0,0871	71	236
14	2	5	10,50	2,69	9,58	-0,0119	0,0949	64	216
15	2	5	10,60	2,19	9,80	-0,0173	0,0871	73	244
16	1	Boden	10,90	1,80	9,50	-0,0188	0,0802	78	260
17	2	Boden	10,60	1,70	9,88	-0,0212	0,0910	73	244
18	2	5							

Mittelwerte	P _{ex} [bar]	(dp/dt) _{max} [bar/s]	K _G -Wert [bar*m/s]
Ebene 1	10,65	46	152
Ebene 2	10,73	62	207
Ebene 3	10,73	62	209
Ebene 4	10,75	61	204
Ebene 5	10,53	69	232
Kammer 1	10,73	56	188
Kammer 2	10,68	64	214
Gesamt	10,69	63	211

Versuch Nr. 89 (III.2 / 9905)

Datum: 22.01.99 Durchmesser: 2000 mm Länge: 12668 mm
 Volumen: 37,5 m³ Ausgangsdruck: 0,0 bar Zündort: Zündgefäß ZB
 Temperatur: 6 °C Konzentration: 7,9 Vol.-% Einbauten: keine

Meß- stelle	Kammer	Ebene	P _{ex} [bar]	P _a [bar]	P _e [bar]	t _a [s]	t _e [s]	(dp/dt) _{max} [bar/s]	K _G -Wert [bar*m/s]
1	1	1	8,80	2,26	8,26	-0,0653	0,0724	44	146
2	1	1	8,50	2,41	8,16	-0,0637	0,0740	42	140
3	1	1	8,80	2,57	9,07	-0,0653	0,1041	38	128
4	2	2	8,80	2,34	8,42	-0,0653	0,0840	41	136
5	2	2	8,70	2,85	8,38	-0,0598	0,0817	39	131
6	2	2	8,60	2,00	8,38	-0,0637	0,0964	40	133
7	2	3	8,80	2,89	8,34	-0,0637	0,0987	34	112
8	2	3	8,50	2,72	8,23	-0,0676	0,0817	37	123
9	2	3	8,70	2,00	8,39	-0,0691	0,0949	39	130
10	2	4	8,80	1,92	8,38	-0,0676	0,0709	47	156
11	2	4	8,70	2,04	9,27	-0,0691	0,1096	40	135
12	2	4	8,50	1,60	7,76	-0,0769	0,0740	41	137
13	2	5	8,40	1,48	8,21	-0,0807	0,0670	46	153
14	2	5	8,50	1,54	7,46	-0,0784	0,0407	50	166
15	2	5	8,50	1,48	7,97	-0,0807	0,0724	42	142
16	1	Boden	8,90	1,88	8,23	-0,0691	0,0840	41	139
17	2	Boden	8,50	1,48	8,13	-0,0807	0,0670	45	151
18	2	5							

Mittelwerte	P _{ex} [bar]	(dp/dt) _{max} [bar/s]	K _G -Wert [bar*m/s]
Ebene 1	8,70	41	138
Ebene 2	8,70	40	134
Ebene 3	8,67	36	122
Ebene 4	8,67	43	143
Ebene 5	8,47	46	154
Kammer 1	8,75	41	138
Kammer 2	8,63	41	138
Gesamt	8,65	41	139

Die Entwicklung der BAM in Daten und Stichworten

- 1870** Das Preußische Ministerium für Handel, Gewerbe und öffentliche Arbeiten veranlasst die Errichtung einer Mechanisch-technischen Versuchsanstalt mit der Aufgabe, Versuche im allgemeinen wissenschaftlichen und öffentlichen Interesse sowie Festigkeitsprüfungen durchzuführen.
- 1904** Das Königliche Materialprüfungsamt wird durch Vereinigung der Königlichen mechanisch-technischen Versuchsanstalt mit der Königlichen Prüfungsstation für Baumaterialien (gegr. 1875) und der Königlichen chemisch-technischen Versuchsanstalt (gegr. 1877) in Berlin-Dahlem errichtet.
- 1919** Das neu benannte Staatliche Materialprüfungsamt (MPA) ressortiert beim Preußischen Ministerium für Wissenschaft, Kunst und Volksbildung; ab 1936 wird die Reichs-Röntgenstelle in das MPA einbezogen.
- 1920** Die Chemisch-Technische Reichsanstalt (CTR) wird beim Reichsministerium des Innern errichtet; sie ging hervor aus dem 1889 als Zentralversuchsstelle für Explosivstoffe geschaffenen Militärversuchsanstalt.
- 1945** MPA und CTR werden unter Betreuung durch den Magistrat von Berlin zusammengefasst.
- 1954** MPA/CTR werden als Bundesanstalt für mechanische und chemische Materialprüfung (BAM) – ab 1956 Bundesanstalt für Materialprüfung – von der Bundesrepublik Deutschland übernommen. Die BAM wird zusätzlich mit der Wahrnehmung amtlicher Materialprüfungsaufgaben für das Land Berlin beauftragt.
- 1969** Die BAM wird durch das Gesetz über explosionsgefährliche Stoffe (Sprengstoffgesetz) Bundesoberbehörde; bei der Gesetzesnovellierung 1986 wird der Begriff Forschung in den Namen der BAM aufgenommen.
- 1975** Durch das Gesetz über die Beförderung gefährlicher Güter werden der BAM weitere Aufgaben im Bereich der öffentlichen technischen Sicherheit übertragen.
- 1990** Mit der deutschen Vereinigung wird entsprechend einer Empfehlung des Wissenschaftsrates die Funktion der BAM als chemisch-technische Bundesanstalt verstärkt. Dazu wird Personal des aufgelösten Amtes für Standardisierung, Meßwesen und Warenprüfung (ASMW) und der aufgelösten Akademie der Wissenschaften der DDR eingestellt. Die amtlichen Materialprüfungsaufgaben für das Land Berlin werden schrittweise aufgegeben.
- 1995** Die BAM erhält nach umfassender Reorganisation durch Erlass des Bundesministeriums für Wirtschaft ein neues Statut, neue Managementinstrumente und ein zukunftsorientiertes Profil als Bestandteil der technisch-wissenschaftlichen Infrastruktur der Bundesrepublik Deutschland.
- 1998** Die Europäische Explosivstoffrichtlinie von 1993 wird durch Novellierung des Gesetzes über explosionsgefährliche Stoffe in deutsches Recht umgesetzt und die BAM als zuständige Institution benannt. Mit bestätigter Rechtsstellung als Bundesoberbehörde wird die BAM Notified Body im europäischen Konformitätsbewertungssystem.
- 1999** Die Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) und die BAM schließen eine Rahmenvereinbarung über die Zusammenarbeit im Bereich der Metrologie in der Analytischen Chemie. Die BAM wird einbezogen in die globale Kooperation der Meterkonvention und das „Arrangement for mutual recognition of national measurement standards and of calibration and measurement certificates issued by national metrology institutes“.

