



BAM

Bundesanstalt für
Materialforschung
und -prüfung

Dipl.-Ing. Dieter Lietze
Horst Pinkofsky

**Beanspruchung von
Rohrleitungen und Behältern
bei detonativ verlaufenden
Gasreaktionen**

254

Forschungsbericht



Dipl.-Ing. Dieter Lietze
Horst Pinkofsky

**Beanspruchung von
Rohrleitungen und Behältern
bei detonativ verlaufenden
Gasreaktionen**

Forschungsbericht 254
Berlin, Oktober 2002

Impressum

Forschungsbericht 254

Beanspruchung von Rohrleitungen und Behältern
bei detonativ verlaufenden Gasreaktionen

November 2002

Herausgegeben von der Bundesanstalt für
Materialforschung und -prüfung (BAM)

Unter den Eichen 87,
D-12205 Berlin

Tel. +49-30-81 04-0

Fax: +49-30-8 11 20 29

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

Bürgermeister-Smidt-Str. 74-76,

D-27511 Bremerhaven

Postfach 10 11 10, 27611 Bremerhaven

Tel.: (0471) 9 46 44-0

Fax. (0471) 9 45 44 77/88

Umschlag: Lutz Mittenzwei

Layout: BAM-Referat G.1

ISSN 0938-5533

ISBN 3-89701-734-2

Zusammenfassung

In der Arbeit wird über Untersuchungen zur Bestimmung des Explosionsdruckes bei detonativ verlaufenden Gasreaktionen berichtet. Mit welchem Explosionsdruck bzw. mit welcher daraus resultierenden Beanspruchung der Rohr- bzw. Behälterwand bei detonativ verlaufenden Gasreaktionen gerechnet werden muss, hängt außer von der reaktionsfähigen Gasphase und dem Anfangsdruck auch ganz wesentlich von der Lage des Umschlagspunktes zur Detonation in dem jeweils betrachteten System ab.

Bei Detonationen in Rohrleitungen müssen mit Bezug auf den Umschlagspunkt zur Detonation drei verschiedene Belastungsfälle beim Durchlaufen der Reaktionsfront und vier verschiedene Belastungsfälle bei der Reflexion der Reaktionsfront unterschieden werden, die zu unterschiedlich hohen Beanspruchungen an der Rohrwand führen.

Bei Detonationen in Behältern müssen mit Bezug auf den Umschlagspunkt zur Detonation analog zu den vier Belastungsfällen bei Reflexion der Reaktionsfront am Rohrende vier verschiedene Belastungsfälle unterschieden werden, die zu unterschiedlich hohen Beanspruchungen an der Behälterwand führen.

Zur Bestimmung des Explosionsdruckes bei Detonationen und den verschiedenen Belastungsfällen wurden drei verschiedene Messverfahren eingesetzt:

- Bestimmung über die Verformung von Aluminiumblechscheiben und den für eine gleichgroße Verformungsarbeit erforderlichen statischen Vergleichsdruck (p_{stat} nach der Berstscheibenverformungsmethode).
- Bestimmung über die Verformung der Rohr- bzw. Behälterwand und den für eine gleichgroße Verformungsarbeit erforderlichen statischen Vergleichsdruck (p'_{stat} nach der Rohrwandverformungsmethode und p''_{stat} nach der Behälterwandverformungsmethode).
- Bestimmung mit Hilfe einer Messkette aus Druckgeber, Verstärker und Speicheroszillograph.

Die nach der Rohr- bzw. Behälterwandverformungsmethode bestimmten statischen Vergleichsdrücke sind die Explosionsdrücke, die für die Bemessung detonationsgefährdeter Rohrleitungen bzw. Behälter herangezogen werden können.

Der Vergleich der Ergebnisse zeigt, dass bei Rohrleitungen DN 20 und dem Belastungsfall „Durchlaufen einer stabilen Detonation bei stationären Bedingungen“ der bei der Druckmessung ermittelte maximale Explosionsdruck p_{max} und der nach der Rohrwandverformungsmethode ermittelte statisch Vergleichsdruck p'_{stat} etwa gleichgroß sind.

Stationäre Bedingungen bedeutet hier, dass der Zustand des Frischgases beim Eintreffen der Reaktionsfront nicht mehr durch die beim Anlaufvorgang erzeugten und in das Frischgas vorgelaufenen Druckwellen verändert ist, d. h. stationäre Bedingungen in Bezug auf den Zustand der Gasphase.

Beim Belastungsfall „Reflexion einer stabilen Detonation bei stationären Bedingungen“ ist – zumindest bei Rohrleitungen DN 20 – der bei der Druckmessung ermittelte maximale Explosionsdruck p_{max} größer als der nach der Rohrwandverformungsmethode ermittelte statische Vergleichsdruck p'_{stat} und beim Belastungsfall „Reflexion einer instabilen Detonation bei extrem instationären Bedingungen“ ist er etwa dreimal so groß wie der nach der Rohrwandverformungsmethode ermittelte statische Vergleichsdruck p'_{stat} . Die weitere Diskussion der Versuchsergebnisse deutet aber an, dass bei Rohrleitungen mit größeren Durchmessern auch beim Belastungsfall „Reflexion einer stabilen Detonation bei stationären Bedingungen“ der bei der Druckmessung ermittelte maximale Explosionsdruck etwa genauso groß sein müsste, wie der nach der Rohrwandverformungsmethode ermittelte statische Vergleichsdruck p'_{stat} . Hier müssten zur Ergänzung auch Versuche mit einer Verformung von Rohren mit größerem Durchmesser ausgeführt werden.

Bei Behältern ist der bei der Druckmessung ermittelte maximale Explosionsdruck p_{max} bei allen Belastungsfällen größer als der nach der Behälterwandverformungsmethode ermittelte statische Vergleichsdruck p''_{stat} .

Der Einfluss des Durchmessers auf den Explosionsdruck und die Beanspruchung von Rohrleitungen bei detonativ verlaufenden Gasreaktionen wird näher untersucht.

Auf die Beanspruchung von Schlauchleitungen bei detonativ verlaufenden Reaktionen und die daraus resultierenden Kriterien für deren Dimensionierung wird am Beispiel von Schlauchleitungen für Hochdruck-Acetylen eingegangen.

Die Diskussion der Versuchsergebnisse führt schließlich auch noch auf eine neue Hypothese für die Ursache des Spins bei detonativ verlaufenden Gasreaktionen in Rohrleitungen.

Deflagration – Detonation – Detonationsanlaufstrecke – Detonationsanlaufdurchmesser

kritische Rohrlänge – kritischer Behälterdurchmesser

Druckwelle – Stoßwelle – Wirbelröhre - Spin

Summary

A report is given on research work to determine the explosion pressure with gaseous detonations. This explosion pressure and the resulting tube or vessel strain when subjected to gaseous detonations depends on the reactive gas phase, the initial pressure and very decisively on the position of the point of transition to detonation in the system considered.

With detonations in tubes we must distinguish three stressing cases with passing along of the reaction front and four stressing cases with reflection of the reaction front with respect to the point of transition to detonation resulting in different tube strain.

With detonations in vessels we must distinguish in accordance to the four stressing cases with reflection of the reaction front in tubes four similar stressing cases with respect to the point (area) of transition to detonation resulting in different vessel strain.

To determine the explosion pressure with gaseous detonations and the different stressing cases three different measuring methods had been applied:

- Determination by the deformation of sheet-aluminium disks and the static pressure needed for the same deformation work as with dynamic pressure, p_{stat} with "rupture disk deformation method".
- Determination by the deformation of the tube wall and vessel wall and the static pressure needed for the same deformation work as with dynamic pressure, p'_{stat} with "tube wall deformation method" and p_{stat} with "vessel wall deformation method".
- Determination by means of a surveyors chain from pressure gauge, amplifier and storage oscillograph.

The static pressure determined by the "tube wall deformation method" and the "vessel wall deformation method" are those explosion pressures needed for calculation of detonation endangered tubes and vessels.

With tube diameter DN 20 and stressing case "passing along of a stable detonation at stationary conditions" the maximum explosion pressure p_{max} determined by pressure gauge and the static pressure p'_{stat} determined by the tube wall deformation method are of the same value.

Stationary conditions means that the gas state is no longer effected by preceding pressure waves produced while running up to detonation, that is stationary conditions with respect to the gas state.

With tube diameter DN 20 and stressing case "reflection of a stable detonation at stationary conditions" the maximum explosion pressure p_{max} is higher than the pressure p'_{stat} determined by the tube wall deformation method and with stressing case "reflection of an unstable detonation at extremely unstable conditions" p_{max} is about three times the static pressure p'_{max} determined by the tube wall deformation method.

Further discussion of the test results indicate that with bigger diameter tubes the maximum explosion pressure p_{max} and the static pressure p'_{stat} determined by the tube wall deformation method may have the same value with stressing case "reflection of a stable detonation at stationary conditions" too. But this must be confirmed by tests with tube wall deformation of bigger diameter tubes.

With vessels the maximum explosion pressure p_{max} is higher than the static pressure p_{stat} determined by the vessel wall deformation method with all possible stressing cases.

The influence of diameter on the explosion pressure and tube strain with gaseous detonations is discussed.

Strain of rubber hose assemblies when subjected to gaseous detonations and criteria for dimensioning are discussed on the example of rubber hose assemblies for high pressure acetylene.

Furthermore a new hypothesis on the origin of the spin with gaseous detonations in tubes can be made.

**Deflagration – detonation – predetonation distance – predetonation diameter
critical tube length – critical vessel diameter –
pressure wave – shock wave - spin**

Inhaltsverzeichnis

	Seite
	3
	4
1	7
2	8
3	9
4	11
5	12
5.1	12
5.2	13
5.3	14
5.3.1	14
5.3.1.1	14
5.3.1.2	14
5.3.1.3	15
5.3.1.4	17
5.3.1.5	21
5.3.2	25
5.3.3	31
5.4	32
5.5	33
5.6	36
5.6.1	36
5.6.2	38
6	41
6.1	41
6.2	41
6.3	42
6.4	45
7	47
8	49
9	50

1 Einleitung

Im BAM-Forschungsbericht 196 „Untersuchungen über das Anlaufen von Detonationen im Inneren geschlossener Systeme“ ist über Untersuchungen berichtet worden, mit deren Hilfe die beim Anlaufen von Detonationen ablaufenden Vorgänge genauer analysiert werden sollten. Diese Untersuchungen mussten vor allem auch deshalb durchgeführt werden, um die bei umfangreichen Untersuchungen über die Grenze der Flammendurchschlagsicherheit von Detonationssicherungen erhaltenen Ergebnisse genauer analysieren zu können.

Zur Charakterisierung des Detonationsanlaufverhaltens verschiedener reaktionsfähiger Gasphasen ist die sogenannte Detonationsanlaufstrecke herangezogen worden. Sie ist für eine bestimmte Gasphase von den jeweils vorliegenden Randbedingungen (Zustand der Gasphase, Geometrie der Rohrleitung wie Durchmesser und Turbulenzpromotoren, Zündquelle usw.) abhängig. Da bei diesen Untersuchungen die Anlaufstrecken über die bei der Reflexi-

on der Reaktionsfront und Schwaden bewirkte Verformungsarbeit ermittelt worden sind, können auch quantitative Aussagen über die Beanspruchung von Rohrleitungen bei detonativ verlaufenden Reaktionen gemacht werden. Über diesen Teilaspekt der Untersuchungen und über ähnliche Untersuchungen, die vor längerer Zeit im Zusammenhang mit der Mitarbeit der BAM bei der Erstellung der Technischen Regeln für Acetylanlagen und Calciumcarbidlager durchgeführt worden sind, soll im Folgenden berichtet werden.

Bevor aber mit der Zusammenstellung der Ergebnisse der durchgeführten Untersuchungen begonnen werden kann, müssen zur besseren Lesbarkeit und Einführung in die Problematik noch einmal die allgemeinen Ausführungen zur Fortpflanzung einer Flammenfront in reaktionsfähigen Gasphasen und die phänomenologische Beschreibung des Detonationsanlaufvorganges aus dem BAM-Forschungsbericht 196 vorangestellt werden.

2 Allgemeines zur Fortpflanzung einer Flammenfront in reaktionsfähigen Gasphasen

Grundsätzlich muss man bei der Fortpflanzung einer Flammenfront in reaktionsfähigen Gasphasen zwei verschiedene Mechanismen unterscheiden. Sie kann entweder in Form einer Deflagration oder aber in Form einer Detonation erfolgen.

Bei einer Deflagration erfolgt die Zündung des Frischgases vor der Flammenfront durch Wärmeübertragung und durch Diffusion aktiver Teilchen aus der Reaktionszone in das angrenzende Frischgas. Die Geschwindigkeit der Flammenfront ist kleiner als die Schallgeschwindigkeit im Frischgas, und alle durch den Ablauf der Reaktion bewirkten Drucksteigerungen breiten sich im gesamten System nach allen Richtungen hin mit der jeweiligen Schallgeschwindigkeit (Frischgas, Reaktionsprodukte) aus.

Bei einer Detonation erfolgt die Zündung des Frischgases vor der Flammenfront durch die Temperatursteigerung bei der stoßartigen Verdichtung des Frischgases durch eine Stoßwelle. Die Geschwindigkeit der Flammenfront ist wesentlich größer als die Schallgeschwindigkeit im Frisch-

gas. Außerdem ist die Reaktionszone in der Flammenfront mit der Stoßwelle für die Zündung des Frischgases gekoppelt. An Stellen von sprunghaften Querschnittserweiterungen kann es zu einer Entkopplung zwischen Stoßwelle und Reaktionszone kommen. Die Reaktionsfront läuft dann als Deflagration weiter und muss erneut zur Detonation anlaufen. Ähnliche Verhältnisse können in Rohrsystemen auch an T-Abzweigen einer Rohrleitung auftreten.

Wird die Reaktion durch eine thermische Zündquelle (keine Stoßwelle) eingeleitet, dann kann sie zunächst nur als Deflagration laufen. Nach dem Durchlaufen der dazu erforderlichen Anlaufstrecke, der sogenannten Detonationsanlaufstrecke, wird sie dann als Detonation weiterlaufen. Ob eine Reaktion zu einer Detonation anlaufen kann, ist von vielen Einflussgrößen abhängig, im wesentlichen von der Gasart und der Zusammensetzung der Gasphase, dem Druck, der Temperatur, dem Strömungszustand, dem Rohrdurchmesser, der allgemeinen Geometrie des Einschusses (Turbulenzpromotoren), der Zündenergie usw.

3 Phänomenologische Beschreibung des Detonationsanlaufvorganges

Nach dem Einleiten der Reaktion kommt es durch die freigesetzte Energie zu einer Drucksteigerung, die sich mit Schallgeschwindigkeit in das Frischgas vor der Flammenfront ausbreitet. Die Expansion der Reaktionsprodukte führt zu Beschleunigungen der Flammenfront.

Eine weitere Folge dieser Expansion der Reaktionsprodukte ist eine in das Frischgas vor der Flammenfront induzierte Frischgasströmung. Bei starken Änderungen des Turbulenzgrades dieser Frischgasströmung kommt es zu zusätzlichen Beschleunigungen der Flammenfront.

Bei jeder dieser zusätzlichen Beschleunigungen der Flammenfront werden weitere Druckimpulse und bei sprunghaften Steigerungen der Energiefreisetzung dann auch Stoßwellen erzeugt, die vor der Flammenfront mit Schall- bzw. Stoßwellengeschwindigkeit in das Frischgas vorlaufen und aus Impulserhaltungsgründen mit der entsprechenden Schall- bzw. Stoßwellengeschwindigkeit hinter der Flammenfront durch die Reaktionsprodukte zurücklaufen.

Durch jeden vorlaufenden Druckimpuls und jede vorlaufende Stoßwelle wird für alle nachfolgenden Druckimpulse und Stoßwellen der Zustand des Frischgases vor der Flammenfront immer wieder verändert. An der Stelle, an der der Umschlag der Reaktion von der Deflagration zur Detonation erfolgt (Umschlagspunkt), ist eine an dieser Stelle durch eine sprunghafte Erhöhung der Energiefreisetzung erzeugte Stoßwelle in der Lage, das Frischgas in dem an dieser Stelle vorliegenden Zustand zu zünden. Die Reaktionsfront läuft von dieser Stelle ab dann als eine Detonation, d. h. als eine mit einer Stoßwelle gekoppelte Reaktionszone weiter.

Am Umschlagspunkt, an der Stelle also, an der sich der Mechanismus der Flammenfortpflanzung ändert, und an den Stellen, an denen es zur Reflexion bzw. zur Teilreflexion der Stoßwelle, der Reaktionszone und der bei der Reaktion gebildeten Schwaden kommt, treten höhere Drucksteigerungen durch die Reaktion auf als in den anderen Bereichen der Rohrleitung.

Mit den höchsten Drucksteigerungen muss dann gerechnet werden, wenn die Reflexionsstelle und der Umschlagspunkt zusammenfallen.

Sind alle durch den Anlaufvorgang verursachten, mit Schall- bzw. Stoßwellengeschwindigkeit vorgelaufenen Änderungen des Anfangszustandes der reaktionsfähigen Gasphase von der hinter dem Umschlagspunkt mit Detonationsgeschwindigkeit nachfolgenden Flammenfront eingeholt, dann läuft die Front der detonativ verlaufenden Reaktion nur noch durch Frischgas von immer gleichem Anfangszustand. Man hat dann den Fall einer stabilen Detonation bei stationären Bedingungen vorliegen, d. h. von stationären Bedingungen mit Bezug auf den Zustand der Gasphase. Für diesen Fall können die Detonationsgeschwindigkeit und der Detonationsdruck mit Hilfe der Sätze von der Erhaltung der Masse, des Impulses und der Energie aus den Zustandsgrößen des Frischgases für den Anfangszustand und aus den Zustandsgrößen der Reaktionsprodukte hinter der Reaktionszone berechnet werden.

Diesen Fall einer stabilen Detonation bei stationären Bedingungen, d. h. bei tatsächlich nicht veränderten Anfangs-

bedingungen, hat man allerdings erst nach einem längeren Laufweg für die Detonationsfront vorliegen. Man hat aber bereits „nahezu“ stationäre Bedingungen vorliegen, wenn alle beim Anlaufvorgang verursachten und mit Schallgeschwindigkeit vorgelaufenen Druckwellen von der Detonationsfront eingeholt worden sind. Dies ist bereits nur wenige Rohrdurchmesser bis einige zehn Rohrdurchmesser hinter dem Umschlagspunkt zur Detonation der Fall (abhängig von der Länge der Detonationsanlaufstrecke).

Sieht man von Untersuchungen über den Detonationsanlaufvorgang ab, wird bei Untersuchungen über Detonationen im Grunde immer dieser Fall einer stabilen Detonation bei nahezu stationären Bedingungen, d. h. bei nur noch durch die vorgelaufenen Stoßwellen veränderten Anfangsbedingungen, betrachtet. Für diesen Fall stimmen die nach dem oben genannten Verfahren berechneten Detonationsgeschwindigkeiten und -drücke relativ gut mit den bei den Untersuchungen gemessenen Werten für die Detonationsgeschwindigkeit und den Druck in der Detonationsfront überein. Beim Detonationsdruck müsste man allerdings wesentlich höhere Drücke messen, wenn der Ort der Druckmessung zufällig an einer Stelle liegt, an der die Rohrwand durch den Spin in der Detonationsfront belastet wird.

So ist zum Beispiel bei den in [1] beschriebenen und im Abschnitt 5.3.1 noch einmal zusammengefassten Untersuchungen mit einem detonativen Zerfall von Hochdruck-Acetylen mit 21 bar und 26 bar Anfangsdruck in nahtlosen Präzisionsstahlrohren mit 20 mm Innendurchmesser aus dem Werkstoff St 35 GBK [2] beobachtet worden, dass die Rohrwand zusätzlich zur allgemeinen Aufweitung durch den Druck in der Detonationsfront auf einer spiralförmig verlaufenden Linie mit einer Steigung von $w = 65$ bis 70 mm, d. h. von etwa 3,2 bis 3,5 Rohrinne Durchmesser bleibend verformt wurde.

Auf dem **Bild 1** ist mit einem Blick in eines dieser Rohre diese zusätzliche, spiralförmig verlaufende Verformung in der Rohrwand zu erkennen.

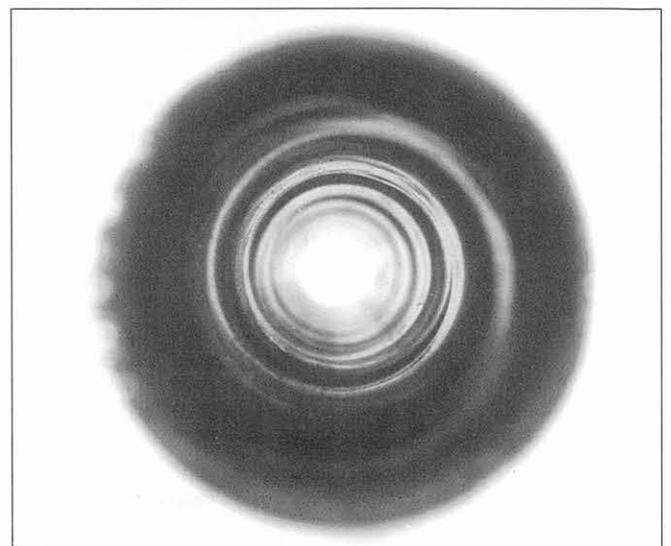


Bild 1: Foto von der spiralförmigen Aufbeulung in der Rohrwand nach dem Durchlaufen eines detonativen Acetylenzerfalls bei 21 bar Anfangsdruck durch ein Rohr \varnothing 22 x 1 mm

Auch bei den dann im Abschnitt 5.3.2 beschriebenen Untersuchungen mit detonativ verlaufenden Reaktionen von Propan/ bzw. Acetylen/Sauerstoff-Gemisch und etwa 9 bar Anfangsdruck in Rohren $\varnothing 22 \text{ mm} \times 0,5 \text{ mm}$ aus St 35 NBK [2] ist eine derartige spiralförmig verlaufende, zusätzliche Verformung der Rohrwand beobachtet worden. Hier betrug die Steigung dieser spiralförmig verlaufenden Verformung der Rohrwand nur etwa $w = 38$ bis 40 mm , d. h. nur etwa 1,8 bis 1,9 Rohrlängendurchmesser (Gasphase mit größerer Detonationsgeschwindigkeit und wesentlich kürzerer Detonationsanlaufstrecke).

Verursacht wird diese spiralförmig verlaufende Verformung in der Rohrwand durch einen in der Detonationsfront vorhandenen Spin. Im Abschnitt 5.6 wird dann auch noch näher auf den Spin bei detonativ verlaufenden Gasreaktionen eingegangen.

Das oben beschriebene Phänomen der Bildung extrem hoher Explosionsdrücke bei Reflexion der Reaktionsfront am Umschlagpunkt zur Detonation kann auch dazu genutzt werden, die Länge von Detonationsanlaufstrecken zu bestimmen. Es wird entweder bei vorgegebener Gemischzusammensetzung und Anfangsbedingungen (Druck, Temperatur usw.) die Rohrlänge oder bei vorgegebener Rohrlänge und Anfangsbedingungen die Gemischzusammensetzung ermittelt, bei der am Rohrende die höchsten Explosionsdrücke gemessen werden, wenn die Reaktion am anderen Rohrende eingeleitet wird. Nach dieser Me-

thode wird die Länge der Detonationsanlaufstrecke unter einer Zusatzbedingung bestimmt, und zwar unter der Bedingung, dass die Länge der Rohrleitung L genauso groß ist wie die Länge der Detonationsanlaufstrecke L_A . Die nach dieser Methode bestimmte Detonationsanlaufstrecke wird im folgenden als „kritische Rohrlänge L_{krit} “ bezeichnet ($L_{krit} = L_A$ für $L/L_A = 1$), da bei $L = L_{krit}$ die höchsten Drucksteigerungen durch die Reaktion und damit auch Beanspruchungen der Rohrleitung auftreten, die bei Gasreaktionen überhaupt möglich sind.

Analog kann nach dieser Methode auch der Detonationsanlaufdurchmesser D_A von räumlichen Detonationen in kugelförmigen Gefäßen bei Zündung in Gefäßmitte bestimmt werden.

Im BAM-Forschungsbericht 196 [3] ist über die nach dieser Methode bestimmten Detonationsanlaufstrecken und -durchmesser bereits berichtet worden, soweit dadurch Aussagen zu dem dort behandelten Thema „Anlaufen von Detonationen im Inneren geschlossener Systeme“ gemacht werden konnten. Mit Hilfe der Ergebnisse dieser Untersuchungen und ergänzender Untersuchungen können außerdem aber auch noch Aussagen über die Beanspruchung von Rohrleitungen und Behältern bei detonativ verlaufenden Gasreaktionen gemacht werden. Über diesen anderen Teilaspekt der Untersuchungen soll im folgenden berichtet werden.

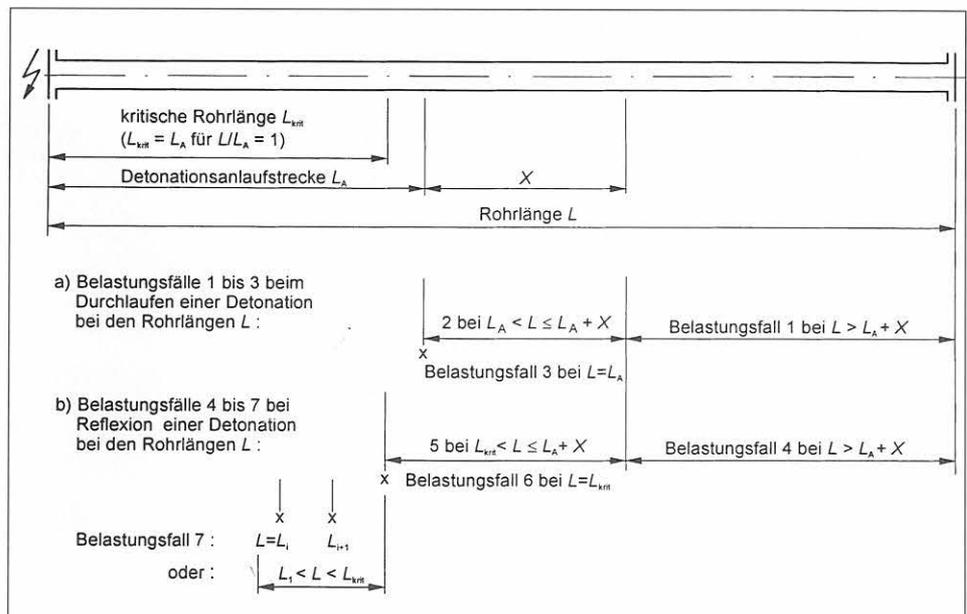


Bild 2: Bereiche einer Rohrleitung mit unterschiedlich hoher Beanspruchung beim Durchlaufen und bei der Reflexion von Detonationen

4 Die verschiedenen Belastungsfälle bei detonativ verlaufenden Gasreaktionen

Wie bereits aus der phänomenologischen Beschreibung des Detonationsanlaufvorganges folgt, müssen in Rohrleitungen bei detonativ verlaufenden Gasreaktionen grundsätzlich die folgenden Belastungsfälle unterschieden werden, die zu unterschiedlich hohen Beanspruchungen an der Rohrleitung führen:

- 1) Belastung der Rohrwand beim Durchlaufen einer stabilen Detonation unter nahezu stationären Bedingungen, d. h. bei nur noch durch die während des Detonationsanlaufvorganges in das Frischgas vorgelaufenen schnellen Stoßwellen geänderten Anfangsbedingungen (Spin).
- 2) Belastung der Rohrwand beim Durchlaufen einer stabilen/instabilen Detonation unter instationären Bedingungen, d. h. bei stärker veränderten Anfangsbedingungen durch die während des Anlaufvorganges vorgelaufenen Druckwellen.
- 3) Belastung der Rohrwand beim Durchlaufen einer instabilen Detonation unter extrem instationären Bedingungen, d. h. am Umschlagpunkt zur Detonation. An dieser Stelle kommt es zu den stärksten Veränderungen des Anfangszustandes in der Gasphase. Die Höhe der Veränderungen ist jedoch abhängig von der Länge der Detonationsanlaufstrecke. Nach den bisher gemachten Erfahrungen muss mit den größten Veränderungen des Anfangszustandes dann gerechnet werden, wenn die Länge der Detonationsanlaufstrecke etwa 80 bis 100 Rohrinne Durchmesser beträgt.
- 4) Belastung der Rohrwand bei Reflexion einer stabilen Detonation unter nahezu stationären Bedingungen am Rohrende. Hier muss mit einer etwa gleichgroßen Belastung der Rohrwand gerechnet werden wie am Umschlagpunkt zur Detonation, wenn die Länge der Detonationsanlaufstrecke etwa 80 bis 100 Rohrinne Durchmesser beträgt.
- 5) Belastung der Rohrwand bei Reflexion einer stabilen/instabilen Detonation unter instationären Bedingungen.
- 6) Belastung der Rohrwand bei Reflexion einer instabilen Detonation unter extrem instationären Bedingungen, d. h. unter der Bedingung, dass die Länge der Rohrleitung L genauso groß ist wie die Länge der Detonationsanlaufstrecke $L_A = L_{krit}$.
- 7) Belastung der Rohrwand bei Reflexion einer instabilen Detonation unter instationären Bedingungen bei Rohrlängen $L_1 < L_{krit}$ ($= L_A$ für $L/L_A = 1$), d. h. wenn es bei im Grunde deflagrativem Verlauf der Reaktion kurz vor dem Rohrende aufgrund des dort vorliegenden Frischgaszustandes beim Loslaufen einer Stoßwelle zur Koppelung dieser Stoßwelle mit der Flammenfront kommt. Dieser Fall kann bei einigen Gasphasen reproduzierbar auch nur bei einigen ganz bestimmten Rohrlängen $L_1 < L_{krit}$ auftreten (siehe dazu Abschnitt 6.1.1 in [3], insbesondere die Bilder 10, 11 und 13).

Auf dem **Bild 2** (siehe Seite 10) sind für eine Rohrleitung die Bereiche von Rohrlängen skizziert, bei denen es

- a) beim Durchlaufen einer Detonation zu den Belastungsfällen 1 bis 3 kommt

und bei denen es

- b) bei der Reflexion einer Detonation am Rohrende zu den Belastungsfällen 4 bis 7 kommt.

Bei Behältern müssen bei detonativ verlaufenden Reaktionen analog zu den oben genannten Belastungsfällen 4, 5, 6 und 7 die folgenden Belastungsfälle unterschieden werden:

- 4') Belastung der Behälterwand bei Reflexion einer stabilen Detonation bei nahezu stationären Bedingungen.
- 5') Belastung der Behälterwand bei Reflexion einer stabilen/instabilen Detonation bei instationären Bedingungen.
- 6') Belastung der Behälterwand bei Reflexion einer instabilen Detonation bei extrem instationären Bedingungen ($D = D_{krit}$).
- 7') Belastung der Behälterwand bei Reflexion einer instabilen Detonation bei instationären Bedingungen ($D < D_{krit}$).

Im Folgenden soll über die Ergebnisse von Untersuchungen berichtet werden, bei denen Teile von Rohrleitungen und Behältern bei diesen verschiedenen Belastungsfällen bleibend verformt worden sind. Für die gleichen Bauteile wurden unter statischer Belastung die Drücke bestimmt, die zu gleichgroßen Verformungen an diesen Bauteilen führen wie bei der dynamischen Belastung durch die detonativ verlaufende Reaktion. Damit kann aufgrund einer gleichgroßen Verformungsarbeit dem Impuls der detonativ verlaufenden Reaktion ein statischer Vergleichsdruck zugeordnet werden, der für die Bemessung detonationsgefährdeter Bauteile herangezogen werden kann, wenn ein Werkstoff mit einem ähnlichen Verformungsverhalten gewählt wird.

Verformt wurde entweder die Rohrwand oder Behälterwand selbst oder eine bzw. mehrere am Rohrende bzw. an einer Stelle in der Behälterwand montierte Scheibe(n) aus Aluminiumblech.

Der nach der „Rohrwandverformungsmethode“ bzw. „Behälterwandverformungsmethode“ ermittelte statische Vergleichsdruck p'_{stat} bzw. p''_{stat} wird mit dem nach der „Berstscheibenverformungsmethode“ ermittelten statischen Vergleichsdruck p_{stat} verglichen.

Im Abschnitt 5.4 werden diese statischen Vergleichsdrücke dann auch noch mit den mit Hilfe eines Quarzkristalldruckaufnehmers und eines Speicheroszillographen bei den verschiedenen Belastungsfällen ermittelten maximalen Explosionsdrücken verglichen.

5 Beanspruchung von Rohrleitungen bei detonativ verlaufenden Gasreaktionen

5.1 Allgemeine Angaben zum Versuchsaufbau und zur Versuchsdurchführung

Auf dem **Bild 3** ist der prinzipielle Aufbau der Versuchrohrleitungen mit den Stellen, an denen das jeweils eingesetzte Bauteil (Rohrteil, Al-Scheibe) verformt werden sollte, skizziert. Um auch an der Stelle des Rohres, an der es zur Reflexion der Reaktionsfront und der nachfolgenden Schwaden kommt, eine unbehinderte Verformung der Rohrwand zu ermöglichen und damit auch für diese Stelle einen statischen Vergleichsdruck ermitteln zu können, wurde die auf den **Bildern 4 und 5** skizzierte Form für den Rohrabschluss gewählt.

Die Verspannung der Aluminiumscheiben mit dem Rohrende ist auf dem **Bild 6** skizziert. Sie waren so mit dem Rohrende verspannt, dass sie auf einer freien Fläche von 10 mm Durchmesser von dem in Richtung der Reaktionsfortpflanzung auftretenden Stoß beansprucht worden sind.

Die überwiegende Anzahl der Versuche wurde in Rohren mit 20 mm Innendurchmesser ausgeführt.

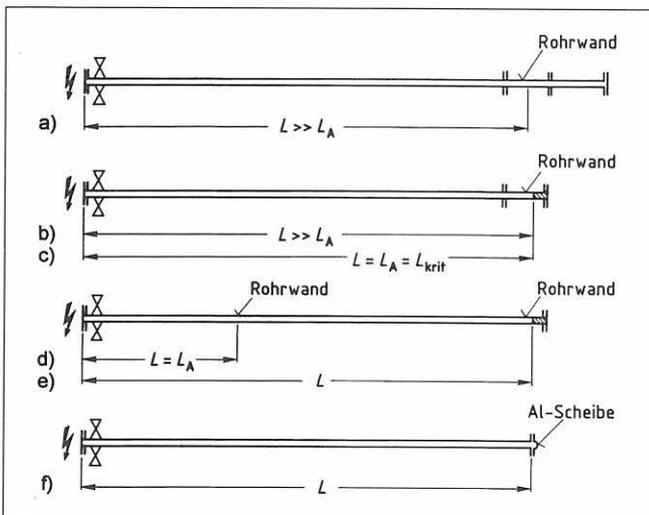


Bild 3: Aufbau der Versuchrohrleitungen mit den Stellen, an denen die Bauteile eingebaut waren, die bei den Versuchen verformt werden sollten

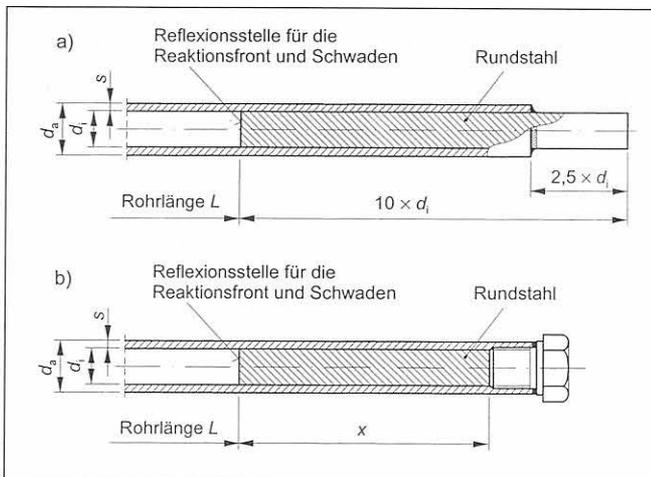


Bild 4: Form des Rohrabschlusses bei den Versuchen mit einem Zerfall von Hochdruck-Acetylen

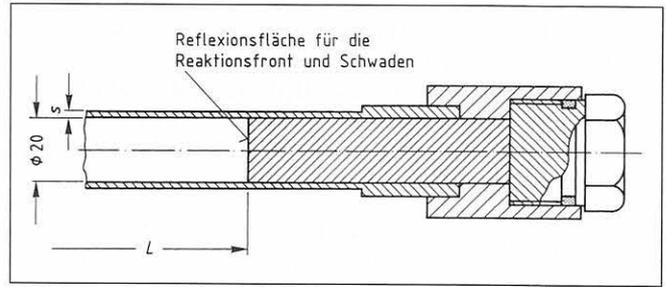


Bild 5: Form des Rohrabschlusses bei den Versuchen mit einer Reaktion von Brenngas/Luft- bzw. Brenngas/Sauerstoff-Gemisch

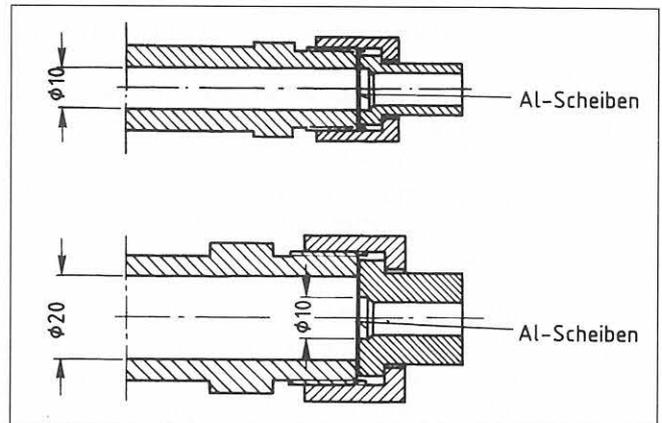


Bild 6: Einspannung der Scheiben aus Aluminiumblech am Rohrende

Die Rohrleitung wurde evakuiert und mit der jeweils vorgesehenen Gasphase (vorgemischtes Brenngas/Sauerstoff (Luft)-Gemisch aus einem Mischgefäß bzw. reines Acetylen aus Acetylenflaschen ohne Lösungsmittel) bis zum gewünschten Druck gefüllt. Eingeleitet wurde die Reaktion am einen Ende der Rohrleitung durch Durchschmelzen eines Metalldrahtes.

5.2 Verformung der Bauteile bei statischer Belastung – Statischer Vergleichsdruck

Auf dem **Bild 7** ist beispielhaft für die bei den Versuchen eingesetzten Rohre $\varnothing 21 \text{ mm} \times 0,5 \text{ mm}$ und $\varnothing 22 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$ die bei statischer Belastung ermittelte Aufweitung des Rohrdurchmessers in Abhängigkeit vom Druck angegeben. Eingesetzt wurden hier u. a. auch 180 mm lange Rohrformteile aus Rohr $\varnothing 24 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$ aus den Werkstoffen St 35 GBK und Aluminium, bei denen über eine Länge von 120 mm der Außendurchmesser von ursprünglich $d_a = 24 \text{ mm}$ auf $d_a = 21 \text{ mm}$ abgedreht worden ist. Diese Rohrformteile sind mit Hilfe eines Zweikomponentenklebers in die Rohranschlussarmaturen eingeklebt worden und konnten gemäß **Bild 3** an der jeweils gewünschten Stelle in die Rohrleitung DN 20 eingebaut werden.

Das Rohr $\varnothing 21 \text{ mm} \times 0,5 \text{ mm}$ aus Aluminium ist bei einem Druck von 155 bar geborsten, ohne sich vorher nennenswert zu verformen. Bei der dynamischen Belastung durch die Detonation sind auch beim Al-Rohr bleibende Verformungen der Rohrwand aufgetreten. Erst bei einer Auf-

weitung des Rohrdurchmessers von etwa 1,5 mm an ist es hier zu einem Bruch der Rohrwand gekommen.

Für die bei den Versuchen eingesetzten Al-Scheiben haben sich bei statischer Belastung die auf dem **Bild 8** angegebenen Kurven für die Verformung der Scheiben in Abhängigkeit vom Druck ergeben. Eingesetzt wurden Scheiben aus Aluminiumblech von 0,3 mm Dicke aus dem Werkstoff AlMg 3 hart. Wie man sieht, kommt es bei statischer Belastung mit stufenweiser Steigerung des Druckes zu einem Brechen der Al-Scheiben, wenn der Druck überschritten wird, bei dem die Ausbeulung der Scheiben einen Wert von etwa 1,1 mm erreicht.

Bei der dynamischen Belastung durch die Reflexion der Reaktionsfront und der nachfolgenden Schwaden sind noch Ausbeulungen der Al-Scheiben von wesentlich mehr als einem Millimeter möglich.

Die Zuordnung der in den Kurven a', b' und c' auf dem Bild 8 angegebenen Verformungen der Scheiben zu einem statischen Vergleichsdruck erfolgte aufgrund des Vergleichs der Ergebnisse von Versuchen mit dynamischer Beanspruchung, bei denen die jeweilige Rohrleitung mit unterschiedlich vielen Al-Scheiben verschlossen war. Wurde zum Beispiel bei einem Versuch mit dynamischer Belastung eine Al-Scheibe um $f = 2,0$ mm ausgebeult, dann wurden bei einem zweiten Versuch unter völlig gleichen Anfangsbedingungen, d. h. bei gleicher dynamischer Belastung, zwei Al-Scheiben nur um $f = 0,7$ mm ausgebeult.

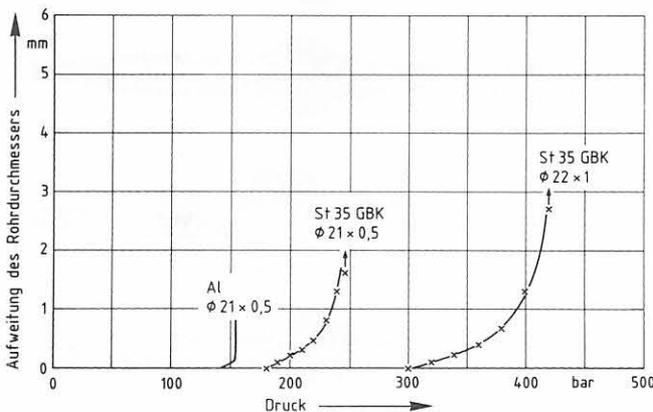


Bild 7: Verformung der Rohre aus St 35 GBK und Aluminium mit 20 mm Innendurchmesser und den angegebenen Wanddicken bei statischer Belastung

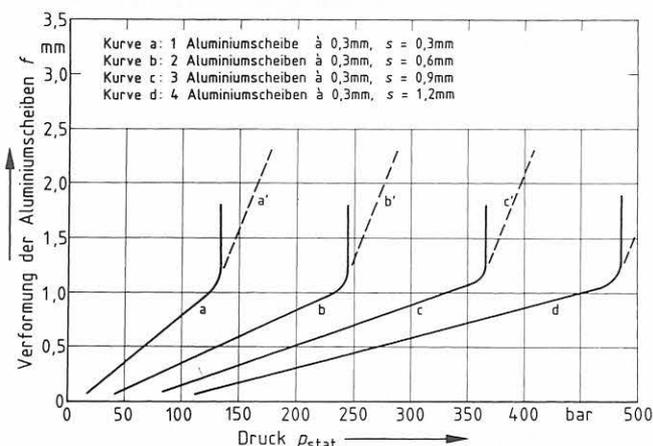


Bild 8: Verformung am Rohrende beim Zerfall von Acetylen von 26 bar Anfangsdruck in Rohren 30 x 5 mm aus St 35 GBK bei Variation der Rohrlänge

Damit kann z. B. die Ausbeulung $f = 2,0$ mm bei nur einer Scheibe dem statischen Vergleichsdruck $p_{stat} = 170$ bar für die Ausbeulung $f = 0,7$ mm bei zwei Scheiben gleichgesetzt werden.

Zunächst wurden Scheiben aus dem Werkstoff AlMg 3 hart eingesetzt. Da Bleche aus diesem Material nicht mehr nachgeliefert werden konnten, musste später auf Scheiben aus dem Werkstoff AlMg 3 1/2 hart (mittel) übergegangen werden, und es wurde auch für Scheiben aus diesem Material die entsprechende Verformungskurve $f = f(p_{stat})$ ermittelt.

5.3 Ermittlung des statischen Vergleichsdruckes für den Explosionsdruck

5.3.1 Versuche mit einem Zerfall von reinem Acetylen in Rohr- und Schlauchleitungen

5.3.1.1 Allgemeine Vorbemerkungen

Acetylen mit der Summenformel C_2H_2 ist ein Brenngas, das wegen der Dreifachbindung zwischen den Kohlenstoffatomen im Molekül chemisch instabil ist. Ein Brenngas also, in dem auch bei Abwesenheit von Luft bzw. Sauerstoff eine fortschreitende Reaktion eingeleitet werden kann, wenn die dazu erforderliche Energie in das System eingebracht wird.

Im Hochdruckteil von Acetylenanlagen muss das Gas bei Drücken gehandhabt werden, bei denen es im Falle einer Zündung auch in Rohr- oder Schlauchleitungen mit relativ kleinen Durchmessern bereits zu einem detonativen Verlauf der Zerfallsreaktion kommen kann. Nach der Verordnung über Acetylenanlagen und Calciumcarbidlager (Acetylenverordnung, AcetV) [4] und den zugehörigen Technischen Regeln für Acetylenanlagen und Calciumcarbidlager (TRAC) [5] müssen Acetylenanlagen so gebaut werden, dass sie den bei einem solchen Acetylenzerfall auftretenden Beanspruchungen widerstehen.

5.3.1.2 Detonationsanlaufstrecken

Über die mit einem Zerfall von sogenanntem Hochdruck-Acetylen in Rohrleitungen mit 10, 15 und 20 mm Innendurchmesser ausgeführten Versuche ist in [1] und [6] berichtet worden. In den TRAC wird unterschieden zwischen Niederdruck-Acetylen mit einem Druck bis zu 1,2 bar (0,2 bar Überdruck), Mitteldruck-Acetylen mit Drücken zwischen 1,2 bar und 2,5 bar und Hochdruck-Acetylen mit Drücken über 2,5 bar bis zum maximal zulässigen Druck von 26 bar (28,5 bar).

In der **Tabelle 1** (Seite 14) sind die bei diesen Untersuchungen ermittelten Detonationsanlaufstrecken zusammengestellt. Die Randbedingungen waren: bei der Zündung ruhende Gasphase, durchschmelzender Metalldraht als Zündquelle, glatte Oberfläche der Rohrleitung ohne jede Störstelle zur Erzeugung von zusätzlicher Turbulenz im Frischgas vor der Reaktionszone.

L_A ist die Detonationsanlaufstrecke, die bei diesen Randbedingungen in Rohrleitungen mit einer Rohrlänge L bestimmt worden ist, die größer war als die Länge der

Tabelle 1: Detonationsanlaufstrecken beim Zerfall von Hochdruck-Acetylen in Röhren mit glatter Oberfläche und durchschmelzendem Metalldraht als Zündquelle

Innendurchmesser	Anfangsdruck	Detonationsanlaufstrecke		Verhältnis	
		L_A	L_{krit}	L_A/d_i	L_{krit}/d_i
d_i	p_a	mm	mm	-	-
mm	bar	mm	mm	-	-
20	26	1900	-	95	-
20	26	-	1670	-	84
20	21	-	2100	-	105
15	26	-	1500	-	100
10	31	-	1180	-	118
10	10	-	1920	-	192

Detonationsanlaufstrecke. Sie wurde ermittelt durch Versuche mit Versuchsaufbau c auf Bild 3 aufgrund der Verformung der Rohrwand beim Durchlaufen der Reaktionsfront am Umschlagspunkt (L_A ermittelt unter Bedingungen $L/L_A > 1$).

L_{krit} ist die Detonationsanlaufstrecke, die bei diesen Randbedingungen in Rohrleitungen mit einer Rohrlänge L bestimmt worden ist, die etwa genauso groß war wie die Länge der Detonationsanlaufstrecke. Sie wurde ermittelt durch Versuche mit Versuchsaufbau d auf Bild 3 aufgrund der Verformung der Rohrwand bei Reflexion der Reaktionsfront am Rohrende ($L_{krit} = L_A$ ermittelt unter der Zusatzbedingung $L/L_A = 1$). Wie bereits weiter oben erwähnt, wird die nach dieser Methode ermittelte Detonationsanlaufstrecke hier als kritische Rohrlänge bezeichnet, weil bei diesen Randbedingungen an einer Reflexionsstelle für die Reaktionsfront die höchsten Explosionsdrücke auftreten, die bei der Reaktion einer Gasphase – hier reines Acetylen – möglich sind.

Auf den Bildern 9 und 10 sind beispielhaft die Ergebnisse der Versuche zur Bestimmung der kritischen Rohrlänge beim Zerfall von Acetylen mit 26 bar Anfangsdruck in Rohrleitungen von 20 mm Innendurchmesser mit glatter Rohroberfläche zusammengestellt. Bei diesen Versuchen wurde nur die Länge der Rohrleitung zwischen dem Zündort und dem Rohrende variiert. Der Berstdruck für das Rohr mit 30 mm Außendurchmesser und 5 mm Wanddicke aus dem Werkstoff St 35 GBK [2] lag bei etwa 2000 bar.

Bei den Versuchen für Bild 10 war ein Rohr $\text{Æ} 26 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$ vor dem Rohrende über eine Länge von $l = 40 \text{ mm}$ ($2 \times d_i$) bzw. 60 mm ($3 \times d_i$) durch eine übergeschobene Hülse aus Rohr $\text{Æ} 32 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$ verstärkt worden, beide Rohre wieder aus dem Werkstoff St 35 GBK. Bei der statischen Druckprobe sind an dem Rohr $\text{Æ} 26 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$ erste bleibende Verformungen bei einem Druck von etwa 1050 bar ermittelt worden.

Bei gleichen Versuchen mit Rohrlängen $L \approx L_{krit}$ und Röhren $\text{Ø} 28 \text{ mm} \times 4 \text{ mm}$ mit einem durch eine übergeschobene Hülse aus Rohr $\text{Ø} 35 \text{ mm} \times 3,5 \text{ mm}$ über eine Länge von $l = 2 \times d_i$ verstärkten Rohrende ist die übergeschobene Rohrhülse nicht mehr bleibend verformt worden.

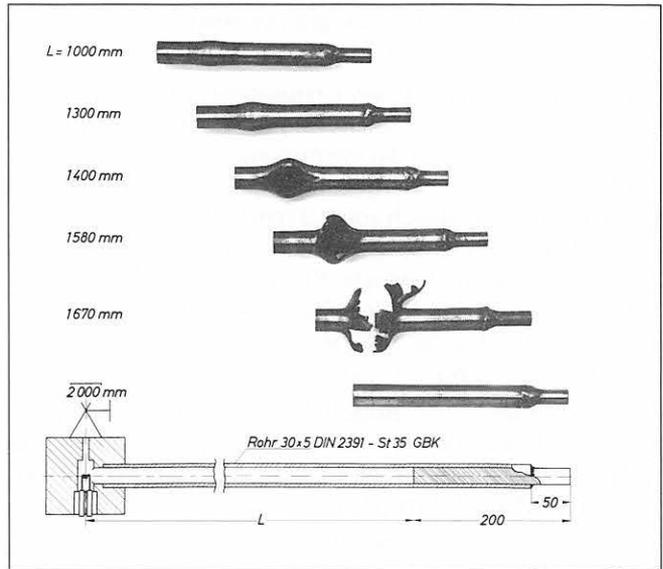


Bild 9: Verformung am Rohrende beim Zerfall von Acetylen von 26 bar Anfangsdruck in Röhren $\text{Ø} 30 \times 5 \text{ mm}$ aus St 35 GBK bei Variation der Rohrlänge

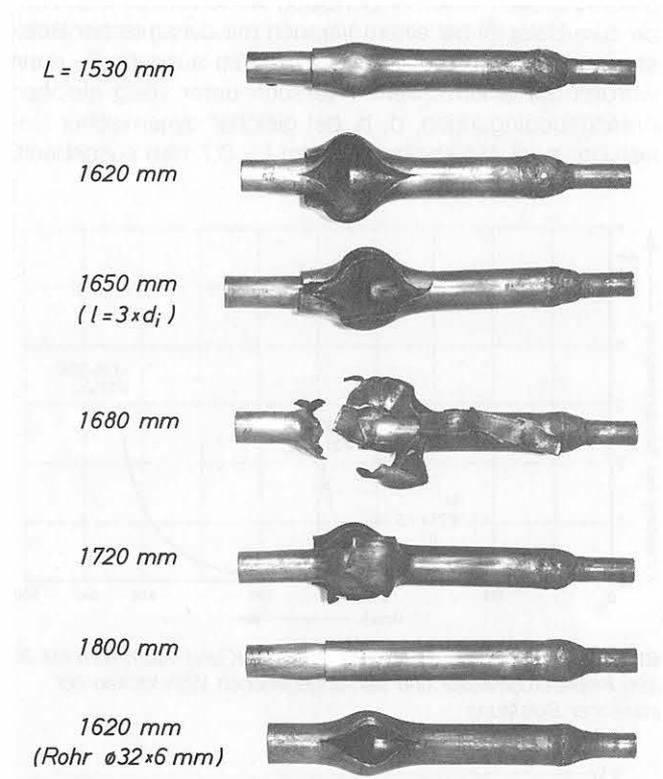


Bild 10: Verformung am Rohrende beim Zerfall von Acetylen von 26 bar Anfangsdruck in Röhren $\text{Ø} 26 \times 3 \text{ mm}$ aus St 35 GBK mit verstärktem Rohrende bei Variation der Rohrlänge

Durch diese Gegenüberstellung der Ergebnisse von Versuchen unter gleichen Randbedingungen in Bezug auf Druck, Temperatur, Rohrlinnendurchmesser, glatte Rohrwand, ruhende Gasphase, Zündquelle usw. soll an dieser Stelle noch einmal unterstrichen werden, dass nach dieser Methode eine Detonationsanlaufstrecke $L_{krit} = L_A \pm \Delta L_A$ ermittelt wird, für die $\Delta L_A \gg 0$ geht.

Für die nach anderen Methoden in Rohrleitungen mit $L/L_A > 1$ für bestimmte Randbedingungen ermittelten Detonationsanlaufstrecken dagegen gilt $L_A = L_A \pm \Delta L_A$ mit $\Delta L_A \gg 0$.

5.3.1.3 Gerade unverzweigte Rohrleitungen

Aus der Verformung der Rohrwand bei Versuchen mit einem Zerfall von Hochdruck-Acetylen in Rohren mit 20 mm Innendurchmesser von unterschiedlicher Wanddicke und dem statischen Vergleichsdruck für die gleiche Verformungsarbeit kann man für den beim detonativen Zerfall von Acetylen in Rohren mit 20 mm Innendurchmesser auftretenden Explosionsdruck schließen [1]:

- 1) Beim Belastungsfall 1, d. h. beim Durchlaufen einer stabilen Detonation bei nahezu stationären Bedingungen leistet der Explosionsdruck die gleiche Verformungsarbeit wie ein statischer Druck, der das 16fache des Anfangsdruckes beträgt, d. h. $p_{\text{expl}} = 16 \times p_a$ für $L \gg L_A$.
- 2) Beim Belastungsfall 3, d. h. beim Durchlaufen einer instabilen Detonation bei den extrem instationären Bedingungen am Umschlagspunkt kann der Explosionsdruck die gleiche Verformungsarbeit leisten wie ein statischer Druck, der bis zum 32fachen des Anfangsdruckes betragen kann, d. h. $p_{\text{expl}} = 32 \times p_a$ für $L = L_A$ (der Faktor vor p_a ist abhängig vom Verhältnis L_A/d).
- 3) Beim Belastungsfall 4, d. h. bei der Reflexion einer stabilen Detonation bei nahezu stationären Bedingungen am geschlossenen Rohrende leistet der Explosionsdruck die gleiche Verformungsarbeit wie ein statischer Druck, der das 32fache des Anfangsdruckes beträgt, d. h. $p_{\text{expl}} = 32 \times p_a$ für $L \gg L_A$.
- 4) Beim Belastungsfall 6, d. h. bei der Reflexion einer instabilen Detonation bei extrem instationären Bedingungen am geschlossenen Rohrende leistet der Explosionsdruck die gleiche Verformungsarbeit wie ein statischer Druck, der bis zum 120fachen des Anfangsdruckes betragen kann, d. h. $p_{\text{expl}} = 120 \times p_a$ für $L = L_{\text{krit}}$ (Faktor vor p_a wieder abhängig vom Verhältnis L_{krit}/d).

Mit Abnahme der kritischen Rohrlänge nimmt auch der Explosionsdruck bei diesem kritischen Belastungsfall ab. Bei einer Rohrleitung mit 20 mm Innendurchmesser, 26 bar Anfangsdruck und einer in die Rohrleitung über die gesamte Rohrlänge zur Beschleunigung des Ablaufes der Reaktion eingelegten Drahtspirale nimmt die kritische Rohrlänge von $L_{\text{krit}} = 1670$ mm (siehe Bild 9 bzw. Bild 10) auf $L_{\text{krit}} = 320$ mm ab. Im Diagramm auf **Bild 11** ist der bei diesen Versuchen an der Reflexionsstelle von Rohren $\varnothing 24$ mm x 2 mm aus St 35 GBK aus der Aufweitung des Rohrdurchmessers ermittelte statische Vergleichsdruck für den Explosionsdruck in Abhängigkeit von der Rohrlänge aufgetragen. Bei einem Anfangsdruck von 26 bar und einer kritischen Rohrlänge von nur noch $L_{\text{krit}} = 320$ mm (Spirale) tritt an der Reflexionsstelle nur noch ein Explosionsdruck von etwa $p_{\text{expl}} = 760$ bar, d. h. $p_{\text{expl}} = 29 \times p_a$ auf.

Mit einer zur Beschleunigung des Ablaufs der Zerfallsreaktion in die Rohrleitung eingelegten Spirale kann bei hohen Anfangsdrücken und dem kritischen Fall $L = L_{\text{krit}}$ der Explosionsdruck um den Faktor 0,25 (1/4) von $p_{\text{expl}} = 120 \times p_a$ auf nur noch $p_{\text{expl}} = 30 \times p_a$ reduziert werden. Darauf wird weiter unten im Abschnitt 5.3.1.5 „Schlauchleitungen“ noch weiter eingegangen.

Mit Abnahme des Anfangsdruckes nimmt die kritische Rohrlänge dann aber wieder zu. Bei einem Anfangsdruck von nur noch 3,3 bar und einer in die Rohrleitung eingelegten Spirale beträgt die kritische Rohrlänge $L_{\text{krit}} = 1800$ mm. Bei diesen Bedingungen wurde an der Reflexionsstelle über die Verformung von Al-Scheiben ein Explosions-

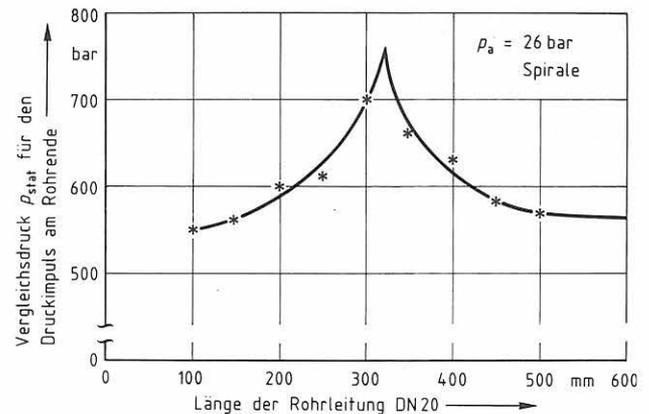


Bild 11: Vergleichsdruck p'_{stat} für den Druckimpuls am Rohrende beim Zerfall von Acetylen bei 26 bar Anfangsdruck in Rohren $\varnothing 24$ x 2 mm aus St 35 GBK, die über die ganze Länge mit einer Drahtspirale ausgelegt waren

druck von $p_{\text{expl}} = 325$ bar, d. h. von $p_{\text{expl}} = 98 \times p_a$ ermittelt ($p_{\text{expl}} = p'_{\text{stat}} = 0,5 \times p_{\text{stat}}$, siehe Abschnitt 5.3.2).

In der **Tabelle 2** (Seite 16) sind die mit Hilfe des statischen Vergleichsdruckes für eine gleichgroße Rohrverformung ermittelten Explosionsdrücke zusammengestellt, die beim detonativen Verlauf der Zerfallsreaktion bei den verschiedenen Belastungsfällen auftreten.

Ist es beim Durchlaufen der Detonationsfront zu einer Aufweitung des Rohrdurchmessers gekommen, dann ist auch immer eine zusätzliche, spiralförmig verlaufende Verformung (siehe Bild 1) in der Rohrwand beobachtet worden [1], die durch den Spin in der Detonationsfront verursacht wird.

Der Vergleich der Explosionsdrücke in den Zeilen 1 und 5 der Tabelle deutet an, dass der Explosionsdruck bei detonativ verlaufenden Gasreaktionen auch noch vom Durchmesser der Rohrleitung abhängig ist. Im Abschnitt 5. 5 wird darauf dann näher eingegangen.

Die hier über den Vergleich von Verformungsarbeiten bei statischer und dynamischer Belastung mit Hilfe eines statischen Vergleichsdruckes ermittelten Explosionsdrücke für den Detonationsdruck können für die Dimensionierung detonationsgefährdeter Acetylenrohrleitungen herangezogen werden, vorausgesetzt die Rohrleitungen werden aus Rohren hergestellt, bei denen der Rohrwerkstoff eine dem hier eingesetzten Werkstoff St 35 GBK vergleichbare Verformungsfähigkeit besitzt.

Entscheidend für die Höhe des an einem Rohrende auftretenden Explosionsdruckes ist neben der Höhe des Anfangsdruckes vor allem auch der Abstand zwischen dem Zündort und dem Rohrende. Um dies noch einmal besonders eindrucksvoll zu unterstreichen, sollen hier die Ergebnisse von zwei Versuchen mit einem Acetylenzerfall bei 26 bar Anfangsdruck mitgeteilt werden, bei denen die Zerfallsreaktion nicht an dem einen Rohrende eingeleitet worden ist. Bei Zündung des Acetylen an der Verbindungsstelle zwischen einem 1,62 m langen Teilstück aus Rohr $\varnothing 28$ mm x 4 mm und einem 1,60 m langen Teilstück aus Rohr $\varnothing 30$ mm x 5 mm, beide aus St 35 GBK, wurden beide Rohre am Rohrende durch den Explosionsdruck aufgerissen und stark verformt. Bei der Zündung an der Verbindungsstelle zwischen einem 1,60 m langen Teilstück aus Rohr $\varnothing 30$ mm x 5 mm und einem 7,5 m langen Teilstück aus Rohr $\varnothing 25$ mm x 2,5 mm, beide wieder aus St 35 GBK, wurde das kurze, 5 mm dicke Rohr am

Tabelle 2: Explosionsdruck, bestimmt durch den statischen Vergleichsdruck für eine gleichgroße Rohrverformung wie beim Durchlaufen und bei der Reflexion einer Acetyldetonation bei $L \gg L_A$ (stabile Detonation bei stationären Bedingungen, Belastungsfälle 1 und 4) und bei $L = L_A$ bzw. $L = L_A = L_{krit}$ (instabile Detonation bei extrem instationären Bedingungen, Belastungsfälle 3 und 6)

Innen-durch-messer	Anfangs-druck	Detonationsanlaufstrecke		Verhältnis	Explosionsdruck aus statischem Vergleichsdruck			
					beim Durchlaufen der Detonation		bei Reflexion der Detonation	
d_i	p_a	L_A	L_{krit}	L_{krit}/d_i	$L \gg L_A$	$L = L_A$	$L \gg L_A$	$L = L_A = L_{krit}$
mm	bar	mm	mm	-	p_{expl}	p_{expl}	p_{expl}	p_{expl}
20	26	1900		95	$16 \times p_a^{a)}$	$32 \times p_a$	$32 \times p_a$	
			1670	84				$120 \times p_a$
10	31		1180	118				$100 \times p_a$
10	10		1920	192				$125 \times p_a$
437	2,5	36000		83		$60 \times p_a$		
20 ^{b)}	26		320	16				$29 \times p_a$
20 ^{b)}	3,3		1800	90				$98 \times p_a$

a) Zusätzliche Verformung der Rohrwand in Form einer Spirale mit einer Steigung von $w \approx 3 \times d_i$ durch den Spin der Detonation (siehe Bild 1)

b) Mit Drahtspirale im Innern der Rohrleitung

Ende aufgerissen und stark verformt, während das lange, nur 2,5 mm dicke Rohr am Ende nur um 1,2 mm aufgebeult worden ist.

Besonders wichtig bei der Auslegung detonationsgefährdeter Rohrleitungen ist die Wahl eines Werkstoffs mit einer ausreichenden Verformungsfähigkeit. **Bild 12** zeigt das zerstörte, ca. 1,5 m lange Teilstück aus Rohr $\varnothing 28 \text{ mm} \times 4 \text{ mm}$ aus dem Werkstoff St 35 zugblank (Bruchdehnung A_5 mindestens 6 % nach [2]) einer insgesamt $L = 2,05 \text{ m}$ langen Rohrleitung DN 20 von einem Versuch mit einem Acetylenzerfall bei 26 bar Anfangsdruck. An dem an das vordere Ende dieses Rohrteiles angeschweißten ca. 0,5 m l angen Teilstück aus Rohr $\varnothing 25 \text{ mm} \times 2,5 \text{ mm}$ aus dem Werkstoff St 35 GBK (Bruchdehnung A_5 mindestens 25 % nach [2]) sind keine bleibenden Verformungen festgestellt worden.

Wäre bei diesem Versuch ein $L = 2,05 \text{ m}$ langes Rohr $\varnothing 28 \text{ mm} \times 4 \text{ mm}$ aus dem Werkstoff St 35 GBK eingesetzt worden (war hier auch beabsichtigt, doch vom Lieferanten wurde falsches Rohrmaterial geliefert), dann hätte es nach Bild 9 allenfalls zu einer Aufweitung des Rohres am Rohrende, möglicherweise mit einem Riss in dieser Aufweitung, kommen können. Bei einer Rohrlänge von $L = 2,05 \text{ m}$ und einem Anfangsdruck von 26 bar ($L = 1,2 \times L_{krit}$) wird ein Rohr $\varnothing 30 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ aus dem Werkstoff St 35 GBK am Rohrende nicht mehr bleibend verformt. Auch bei dem Ver-

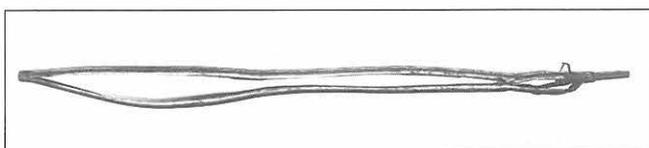


Bild 12: Zerstörtes Teilstück aus Rohr $\varnothing 28 \times 4 \text{ mm}$ aus St 35 zugblank nach einem Zerfall von Acetylen bei 26 bar Anfangsdruck

such mit dem Rohr aus dem Werkstoff St 35 zugblank muss das Rohr zuerst am Rohrende bei Reflexion der Reaktionsfront aufgerissen worden sein. In dem spröden Material muss es dann aber sofort und mit sehr großer Rissgeschwindigkeit zu zwei Sprödbrüchen bis kurz vor der Schweißnaht am Anfang dieses Rohrteiles gekommen sein. Die durch die beiden Sprödbrüche gebildeten Rohrhälften müssen dann noch vor einer Druckentlastung über die beiden Risse durch die Stoßwelle der reflektierten Detonationsfront auseinander gedrückt worden sein.

Bei der Verwendung von Rohren aus sprödem Werkstoff für eine detonationsgefährdete Acetylen-Rohrleitung besteht bei einem Acetylenzerfall die Gefahr, dass die Rohrleitung in ihrer ganzen Länge zerstört wird.

Mit den auf dem **Bild 13** dokumentierten Versuchsergebnissen soll noch gezeigt werden, wie das Rohrende einer durch eine Berstscheibe verschlossenen Rohrleitung beim Auftreffen einer detonativ verlaufenden Reaktion beansprucht wird [7]. Unten auf dem Bild ist der Versuchsaufbau skizziert. Die Rohrleitungen wurden aus Rohr $\varnothing 25 \text{ mm} \times 2,5 \text{ mm}$ aus dem Werkstoff St 35 GBK hergestellt. Dieses Rohr wurde bei Versuchen mit 26 bar Anfangsdruck und Reflexion einer stabilen Detonation unter nahezu stationären Bedingungen ($L \gg L_A$) am Rohrende im Durchmesser um etwa 1,1 mm aufgeweitet.

Auch bei diesen Versuchen wurde der Anfangsdruck wieder zu $p_a = 26 \text{ bar}$ gewählt.

Links auf dem Bild ist die bei dem jeweiligen Versuch gewählte Länge der Rohrleitung und der Berstdruck der eingesetzten Berstscheibe bzw. bei dem mit einem Blindflansch verschlossenen Rohr der Berstdruck für das Rohr angegeben. Rechts auf dem Bild ist die nach den Versuchen am Rohrende gemessene Aufweitung des Rohr-

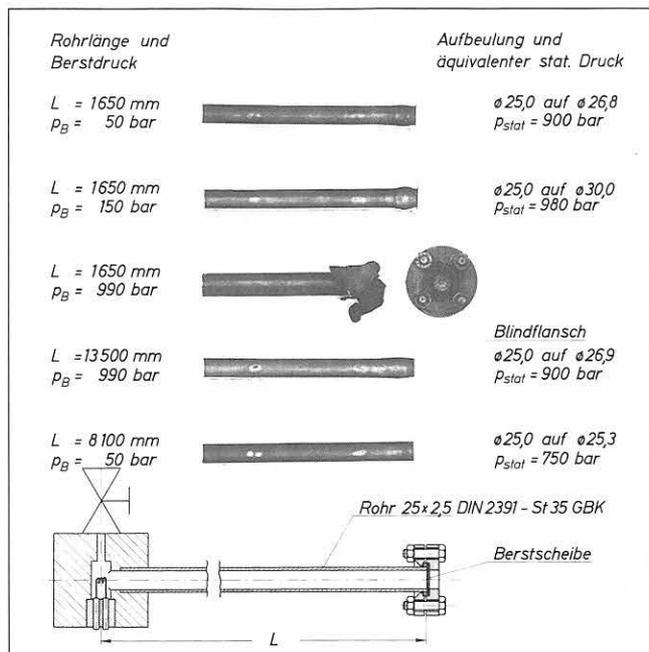


Bild 13: Verformung am Rohrende bei Abschluss der Rohrleitung durch eine Berstscheibe und durch einen Blindflansch beim Zerfall von Acetylen bei 26 bar Anfangsdruck

durchmessers und der statische Druck als Vergleichsdruck für den Explosionsdruck angegeben, durch den eine etwa gleichgroße Aufweitung des Rohrdurchmessers bewirkt wird.

Beim Belastungsfall 4, d. h. wenn die Länge der Rohrleitung L sehr viel größer ist als die Länge der Detonationsanlaufstrecke L_A ($L \gg L_A$), kann durch den Einsatz der Berstscheibe die Beanspruchung der Rohrleitung am Rohrende um knapp 20 % reduziert werden (Vergleiche die Ergebnisse der Versuche Nr. 4 und Nr. 5 unten auf dem Bild).

Beim Belastungsfall 6, d. h. wenn die Länge der Rohrleitung L etwa genauso groß ist wie die Länge der Detonationsanlaufstrecke L_A ($L = L_A = L_{krit}$), kann durch den Einsatz der Berstscheibe die Beanspruchung der Rohrleitung am Rohrende etwa auf die Beanspruchung reduziert werden, die bei der Reflexion einer stabilen Detonation bei nahezu stationären Bedingungen am geschlossenen Rohrende auftritt, wenn der Ansprechdruck der Berstscheibe nicht zu hoch gewählt wird (Vergleiche die Ergebnisse der Versuche Nr. 1 und Nr. 4 auf dem Bild). Mit Zunahme des Ansprechdruckes der Berstscheibe nimmt auch die Belastung der Rohrleitung am Rohrende zu.

5.3.1.4 Verzweigte Rohrsysteme mit Querschnittserweiterungen und T-Abzweigen

In der **Tabelle 3** (Seite 18) sind die Ergebnisse von Versuchen zusammengestellt, die in Rohrleitungen mit einer Querschnittserweiterung bzw. einer T-Verzweigung ausgeführt worden sind [6]. Aufgrund der Verformungen an der hinter der Querschnittserweiterung bzw. an dem T-Abzweig weiterführenden Rohrleitung (Rohrleitung b in der Tabelle) und der bei den Versuchen mit einem Acetylenzerfall in unverzweigten, geraden Rohrleitungen gemachten Erfahrungen können auch Aussagen über den Ablauf eines Acetylenzerfalls in verzweigten Rohrsystemen gemacht werden.

Bei einem als stabile Detonation laufenden Acetylenzerfall (Länge der Rohrleitung a sehr viel größer als die Länge der Detonationsanlaufstrecke, d. h. $L_a \gg L_A$) muss es an Querschnittserweiterungen von $d_2/d_1 = 1,33$ (20 mm/15 mm) zu einer Trennung von Stoßwelle und Reaktionsfront kommen, da in der Rohrleitung mit dem größeren Durchmesser erst wieder eine Detonation anläuft. Die Rohrleitung b ist so dimensioniert, dass sie beim gewählten Anfangsdruck und dem Durchlaufen einer stabilen Detonation bei nahezu stationären Bedingungen (Belastungsfall 1) nicht bleibend verformt wird, beim Durchlaufen einer instabilen Detonation bei den extrem instationären Bedingungen am Umschlagspunkt (Belastungsfall 3) aber bleibend verformt wird. Ähnliche Beobachtungen sind auch bei Versuchen mit einem Acetylenzerfall in Schlauchleitungen gemacht worden. Siehe dazu Tabelle 7 im Abschnitt 5.1.3.5. Hier muss es bei einem aus der vorgeschalteten Rohrleitung als stabile Detonation einlaufenden Acetylenzerfall an der Querschnittserweiterung vom Innendurchmesser der Schlauchtülle $d_1 = 15$ mm auf den Innendurchmesser des Schlauches von $d_2 = 19$ mm ($d_2/d_1 = 1,27$) zu einer Trennung von Stoßwelle und Reaktionsfront kommen, da in der Schlauchleitung erst wieder erneut eine Detonation anlaufen muss.

Einen ähnlichen Reaktionsablauf stellt man auch am T-Abzweig zu einer Rohrleitung mit einem im Verhältnis von $d_2/d_1 = 0,5$ kleineren Durchmesser fest. Hier muss in der Rohrleitung mit dem kleineren Durchmesser erst wieder erneut eine Detonation anlaufen, wenn in der Rohrleitung mit dem größeren Durchmesser eine stabile Detonation bei nahezu stationären Bedingungen ($L_a \gg L_A$) an dem T-Abzweig vorbeiläuft.

Auffällig ist, dass es bei sehr kurzen an dem T-Abzweig angeschlossenen Rohrleitungen zu einer erheblich höheren Beanspruchung der Rohrleitung am Rohrende kommt, als zum Beispiel aufgrund des Verhältnisses L/L_{krit} für die vom T-Abzweig aus erneut zur Detonation anlaufende Reaktion zu erwarten wäre. In der **Tabelle 4** (Seite 19) sind die Ergebnisse der Versuche zur Bestimmung der Detonationsanlaufstrecke beim Zerfall von Hochdruck-Acetylen in geraden, unverzweigten Rohrleitungen mit 10 mm Innendurchmesser zusammengestellt [6]. Danach muss in geraden unverzweigten Rohrleitungen beim Zerfall von Hochdruck-Acetylen offensichtlich erst bei Rohrlängen $L > 0,6 \times L_{krit}$ mit der Belastung des Rohrendes durch eine anlaufende Detonation (Belastungsfall 7) gerechnet werden (siehe auch Bild 9), in verzweigten Rohrleitungen dagegen bereits unmittelbar hinter dem Abzweig.

Weiterhin fällt aber noch auf, dass es hinter Querschnittserweiterungen und T-Abzweigen nicht nur am Umschlagspunkt zur Detonation und am Rohrende zu höheren Drucksteigerungen beim Ablauf der Reaktion und damit zu höheren Beanspruchungen der Rohrleitung kommt. Hier ist es hinter dem Umschlagspunkt noch an einigen anderen Stellen zu Aufbeulungen der Rohrleitung gekommen. Solche zusätzlichen Aufbeulungen der Rohrleitung als Folge von erhöhten Drucksteigerungen beim Ablauf der Reaktion konnten bei den in längeren, geraden Rohrleitungen ohne Querschnittserweiterungen und T-Verzweigungen ausgeführten Versuchen nicht festgestellt werden.

Diese zusätzlichen erhöhten Drucksteigerungen werden wahrscheinlich durch die Stoßwelle der ursprünglich detonativ verlaufenden Reaktion (Primärdetonation) und durch

Tabelle 3: Versuche mit einem Zerfall von Hochdruck-Acetylen in Rohrleitungen mit sprunghaften Querschnittsänderungen und T-Abzweigen

Versuch	Anfangsdruck	Rohrleitung a		Rohrleitung b			Anschluss von Rohrleitung b an Rohrleitung a	Ergebnis Rohrleitung b wurde verformt	
		p_a	d_i	L	d_i	s		L	bei L_x /auf \emptyset
Nr.	(bar)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)		(mm)/(mm)	(mm)
1	14	10	5000	30	2,5	5700	Rohrerweiterung	3540 / \emptyset 38,0	\emptyset 38,5
2	26	10	5000	20	2	5000	Rohrerweiterung	1010 / geborsten ^{b)}	geborsten
3	26	15	5000	20	2	5000	Rohrerweiterung	1310 / geborsten ^{c)}	geborsten
4	26	15	5000	20	2	5000	Rohrerweiterung	1850 / \emptyset 26,0	geborsten
5	26	20	5500	10	1	5000	T-Abzweig ^{a)}	1360 / \emptyset 12,7 ^{d)}	geborsten
6	26	20	5500	10	3	1500	T-Abzweig		keine Verformung
7	26	20	5500	10	3	1300	T-Abzweig		aufgerissen ^{e)}
8	26	20	5500	10	3	1100	T-Abzweig		keine Verformung
9	26	20	5500	10	3	900	T-Abzweig		keine Verformung
10	26	20	5500	10	2	1100	T-Abzweig		\emptyset 17,0
11	26	20	5500	10	2	900	T-Abzweig		geborsten
12	26	20	5500	10	2	700	T-Abzweig		geborsten
13	26	20	5500	10	2	500	T-Abzweig		\emptyset 15,0
14	26	20	5500	10	2	300	T-Abzweig		\emptyset 15,5
15	26	20	5500	10	2	100	T-Abzweig		\emptyset 14,7 ^{f)}

- a) 500 mm vor dem fest verschlossenen Rohrende
b) außerdem noch Aufbeulungen auf $d_a = 25$ mm bei $L = 3,25$ m und $4,20$ m hinter Querschnittsänderung
c) außerdem noch abgerissen bei $L = 2,16$ m und zusätzlich aufgebault auf $d_a = 25,5$ mm bei $L = 3,50$ m hinter der Querschnittsänderung
d) außerdem noch Aufbeulungen auf $d_a = 12,7$ mm bei $L = 2,52$ m, $3,10$ m, $3,50$ m und $3,92$ m hinter der T-Abzweigstelle
e) aufgerissen wie bei $L = 1580$ mm auf dem Bild 9 geborsten hier immer abgerissen wie bei $L = 1670$ mm auf dem Bild 9
f) der statische Vergleichsdruck für eine gleichgroße Verformungsarbeit beträgt etwa $p'_{stat} = 1130$ bar ($p'_{stat}/p_a = 43$)

weitere Stoßwellen, die während des erneuten Anlaufvorganges gebildet werden und in das Frischgas vorlaufen, verursacht. Auf dem **Bild 14** (Seite 20) ist versucht worden, verschiedene Phasen einer hinter Querschnittserweiterungen und T-Verzweigungen weiterlaufenden Zerfallsreaktion darzustellen.

Dabei wurde angenommen, dass es bei der Reflexion der aus der Front der Primärdetonation in das Frischgas vorgelaufenen Stoßwelle nicht zur Zündung einer detonativ verlaufenden Reaktion kommt. Bei allen Versuchen ist das

Rohrende aber so beansprucht worden wie bei der Reflexion einer stabilen Detonation bei nahezu stationären Bedingungen. Deshalb muss weiterhin angenommen werden, dass die hinter der Querschnittserweiterung bzw. dem T-Abzweig erneut zur Detonation angelaufene Reaktion bereits am Rohrende eingetroffen ist, bevor ihr vom Rohrende aus die Front einer Reaktion entgegenlaufen kann, die bei der Reflexion der aus der Front der Primärdetonation vorgelaufenen Stoßwelle gezündet wird. Die Zündverzugszeit bei Zündung durch Stoßwellen muss danach größer sein als die Zeitdifferenz zwischen dem Auftreffen der vorgelaufenen Stoßwelle und dem Eintreffen der Front der erneut zur Detonation angelaufenen Reaktion.

Für die Darstellung auf der Abbildung wurden die folgenden Bezeichnungen gewählt:

- F für die Flammenfront (Reaktionsfront)
A für die Stoßwelle, die aus der Front der Primärdetonation in das Frischgas vorläuft
B für die Stoßwellen, die während des erneuten Anlaufvorganges aus der Reaktionsfront in das Frischgas vorlaufen

Tabelle 4: Versuche mit einem Zerfall von Hochdruck-Acetylen in Rohrleitungen aus Rohr $\text{AE } 18 \times 4$, $\text{AE } 14 \times 2$, $\text{AE } 13 \times 1,5$ und $\text{AE } 12 \times 1$ DIN 2391 aus St 35 GBK zur Ermittlung der kritischen Rohrlänge für Rohrleitungen DN 10 bei den Anfangsdrücken $p_a = 31$ bar und $p_a = 10$ bar

Ver- such Nr.	Rohrleitung			Anfangs- druck p_a (bar)	Aufbeulung		Explosions- druck a) P (bar)	Druck- steigerung p/p_a (bar/bar)	Verhältnis $L/L_{\text{krit}}^b)$ (mm/mm)
	Durch- messer d (mm)	Wand- dicke s (mm)	Länge L (mm)		Durch- messer	ln %			
1	18	4	1440	31	18,0	-	≤ 1900	$\leq 61,3$	1,22
2	18	4	1390	31	18,6	3,3	2300	74,2	1,18
3	18	4	1360	31	20,0	11,1	2530	81,6	1,15
4	18	4	1300	31	21,0	16,7	2600	83,9	1,10
5	18	4	1100	31	22,3	23,9	2650	85,5	0,93
6	18	4	890	31	20,0	11,1	2530	81,6	0,75
7	18	4	750	31	18,0	-	≤ 1900	$\leq 61,3$	0,64
8	14	2	2100	10	14,0	-	≤ 950	≤ 95	1,09
9	14	2	2050	10	14,8	5,7	1150	115	1,07
10	14	2	2000	10	15,0	7,1	1190	119	1,04
11	14	2	1950	10	15,5	10,7	1230	123	1,02
12	14	2	1900	10	15,8	12,8	1250	125	0,99
13	14	2	1850	10	14,1	0,7	950	95	0,96
14	14	2	1800	10	14,3	2,1	970	97	0,94
15	13	1,5	2100	10	13,0	-			1,09
16	13	1,5	2050	10	16,3	25,4			1,07
17	13	1,5	2000	10	geborsten				1,04
18	13	1,5	1800	10	geborsten				0,94
19	13	1,5	1750	10	17,5	34,6			0,91
20	13	1,5	1650	10	16,0	23,1			0,86
21	13	1,5	1600	10	13,0	-			0,83
22	12	1	2100	10	12,0	-	≤ 550	≤ 55	1,09
23	12	1	2000	10	geborsten		> 750	> 75	1,04
24	12	1	1600	10	geborsten		> 750	> 75	0,83
25	12	1	1340	10	geborsten		> 750	> 75	0,70
26	12	1	1210	10	13,2	9,2	700	70	0,63

^{a)} Statischer Vergleichsdruck p'_{atm} für den Explosionsdruck, durch den eine gleichgroße Verformungsarbeit geleistet wird

^{b)} Bei den gewählten Versuchsbedingungen (Rohrinnendurchmesser, glatte Rohrleitung, ruhende Gasphase, Zündquelle, Geometrie am Zündort usw.) ergibt sich aus dem Diagramm Aufweitung des Rohrdurchmessers als Funktion der Rohrlänge bei $p_a = 31$ bar eine kritische Rohrlänge von $L_{\text{krit}} = 1180$ mm bei $p_a = 10$ bar eine kritische Rohrlänge von $L_{\text{krit}} = 1920$ mm

- L_A für die Länge der Detonationsanlaufstrecke der erneut zur Detonation anlaufenden Reaktion
- D für die Detonationsfront der erneut zur Detonation angelaufenen Reaktion
- $p_n(t)$ für die Änderung des Anfangszustandes am Ort des Zusammentreffens der am Rohrende reflektierten Stoßwelle A mit den beim erneuten Anlaufvorgang erzeugten und in das Frischgas vorlaufenden Stoßwellen B.

Auf dem Bild wird verdeutlicht, durch welche Vorgänge es zusätzlich zu den Aufbeulungen am Umschlagspunkt bei $L = L_A$ und am Rohrende auch an einigen anderen Stellen noch zu Aufbeulungen der Rohrleitung kommen kann, wenn die Reaktion hinter Querschnittserweiterungen und T-Abzweigen erneut zur Detonation anlaufen muss.

Wegen einer besseren Übersichtlichkeit der Darstellung sind die Stoßwellen B1', B2' und D' (D' = Retonationswelle) weggelassen worden, die aus Impulserhaltungsgründen in die entgegengesetzte Richtung durch die Reaktionsprodukte laufen müssen. Außerdem sind auch die wäh-

rend des Anlaufens der Primärdetonation in das Frischgas vorgelaufenen Stoßwellen B01, B02 ... weggelassen worden.

Beim Versuch Nr. 5 in Tabelle 3, bei dem es neben der Verformung am Umschlagspunkt und am Rohrende zu vier zusätzlichen Aufbeulungen an der Rohrleitung gekommen ist, müssen nach dieser Darstellung während des erneuten Anlaufvorganges demnach mindestens drei Stoßwellen aus der Reaktionsfront in das Frischgas vorgelaufen sein, die von der Reaktionsfront bis zum Umschlagspunkt nicht eingeholt werden können.

Beim Versuch Nr. 4 in der Tabelle, bei dem die Anlaufstrecke zur Detonation merklich länger war als bei den drei anderen hier betrachteten Versuchen, trifft die am Rohrende reflektierte Stoßwelle der Primärdetonation wahrscheinlich bereits während des erneuten Anlaufvorganges auf die Reaktionsfront. Hier ist es nur zu einer Aufbeulung zwischen dem T-Abzweig und dem Rohrende gekommen.

Mit extrem hohen Drucksteigerungen muss in verzweigten Rohrsystemen möglicherweise dann gerechnet wer-

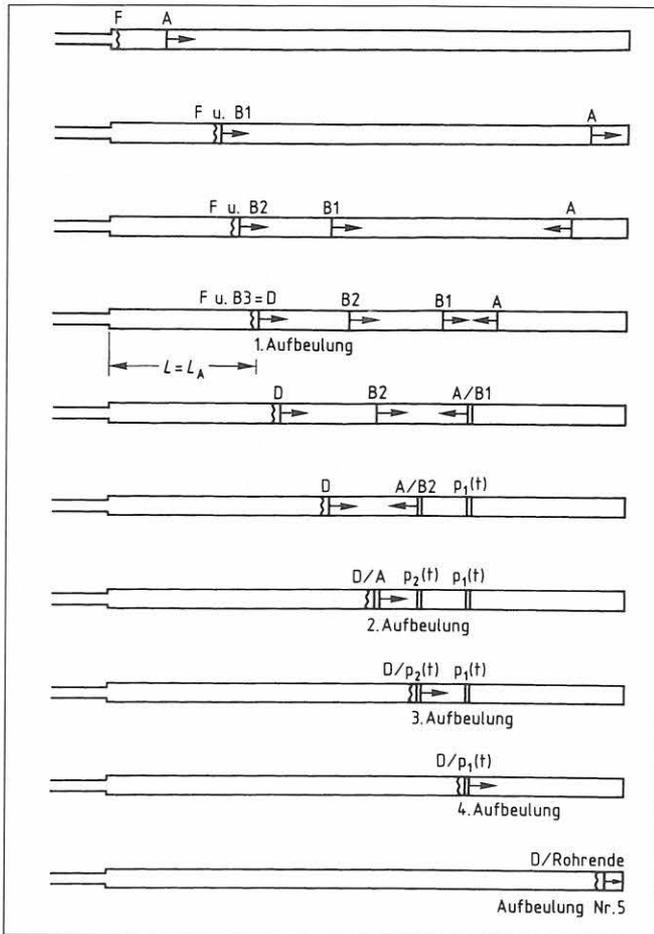


Bild 14: Orte mit höheren Druckbeanspruchungen bei einer hinter Querschnittserweiterungen oder T-Abzweigen erneut angelaufenen Detonation

den, wenn die Geometrie gerade so gewählt wird (bei Versuchen) bzw. so vorliegt (bei Unfällen in der Praxis), dass die am Rohrende reflektierte Stoßwelle der Primärdetonation genau am Umschlagpunkt auf die Front der erneut angelaufenen Detonation trifft.

In diesem speziellen Fall muss am Umschlagpunkt zur Detonation wahrscheinlich mit ähnlich hohen Drucksteigerungen und damit auch mit Beanspruchungen der Rohrleitung gerechnet werden wie beim Belastungsfall 6, d. h. wie bei Reflexion einer instabilen Detonation bei den extrem instationären Bedingungen am Umschlagpunkt (siehe Bilder 9 und 10).

Mit einer derart extrem hohen Beanspruchung der Rohrleitung muss u. U. auch an solchen Stellen von Rohrleitungssystemen gerechnet werden, an denen zwei Reaktionsfronten aufeinander treffen können, zum Beispiel in einer als Ringleitung ausgeführten Sammelleitung eines Acetylenflaschenbündels, in die über den T-Stutzen der Anschlussleitung ein Acetylenzerfall einläuft. Rohrleitungen in denen detonationsfähige Gasphasen gehandhabt werden, sollten deshalb nicht in Form einer Ringleitung ausgeführt werden.

Bei dem Versuch mit einem Acetylenzerfall bei 26 bar Anfangsdruck in einer zum T-Anschlussstutzen symmetrisch aufgebauten, insgesamt ca. 1800 mm langen Ringleitung aus Rohr \varnothing 14 mm x 2 mm aus rostfreiem Stahl 1.4541 mit insgesamt zwölf blindverschlossenen Anschlussleitungen DN 6 für die einzelnen Gasflaschen im Bündel ist es genau gegenüber dem T-Anschlussstutzen nach einem

Laufweg von jeweils 900 mm beim Aufeinandertreffen der beiden Reaktionsfronten zu einem Bruch der Rohrleitung gekommen. Nach [8] hat der Stahl 1.4541 eine Zugfestigkeit von $R_m = 500$ bis 750 N/mm². Nach der Kesselformel $2 \cdot R_m \cdot s = p \cdot d_i$ muss bei statischer Belastung mit einem Bruch der Rohrleitung erst bei einem Druck von mehr als 2000 bar gerechnet werden. Durch die dynamische Belastung beim Aufeinandertreffen der beiden Reaktionsfronten wurde an dieser Stelle demnach eine gleichgroße Verformungsarbeit geleistet wie bei einer statischen Belastung durch einen Druck von mindestens dem 77fachen Anfangsdruck. Der Vergleich mit den Ergebnissen der Versuche in geraden, glatten Rohrleitungen DN 10 in Tabelle 4 zeigt, dass hier die Fronten zweier gerade erst anlaufenden Detonationen (Belastungsfall 7 mit $L < L_{krit}$) aufeinander getroffen sein müssen.

Abschließend sollen hier noch die Ergebnisse von vier Versuchen mitgeteilt werden, mit deren Hilfe eine Aussage darüber gemacht werden kann, mit welchen Beanspruchungen der Rohrleitung gerechnet werden muss, wenn die Reaktionsfront vom seitlichen T-Abzweig aus auf die Rohrwand der T-Verzweigung trifft [6].

Bei den beiden ersten Versuchen traf die Front der Zerfallsreaktion aus einer $L = 5,5$ m langen Rohrleitung DN 20 als stabile Detonation bei nahezu stationären Bedingungen ($L \gg L_A$) vom seitlichen T-Abzweig aus auf die Rohrwand der T-Verzweigung DN 20, beim dritten und vierten Versuch traf sie aus einer nur $L = 1,65$ m langen Rohrleitung DN 20 als instabile Detonation bei extrem instationären Bedingungen ($L = L_{krit}$) auf die Rohrwand der T-Verzweigung DN 20. Die beim ersten Versuch eingesetzte T-Verzweigung wurde aus Rohr \varnothing 25 mm x 2,5 mm mit dem Werkstoff St 35 GBK gefertigt, aus einem Rohr also, das nach [1] so dimensioniert ist, dass es bei dem gewählten Anfangsdruck $p_a = 26$ bar und den Belastungsfällen 3 und 4, d. h. am Umschlagpunkt und an der Stelle der Reflexion einer stabilen Detonation bei nahezu stationären Bedingungen gerade noch geringfügig bleibend verformt wird. Die beim zweiten und dritten Versuch eingesetzte T-Verzweigung war aus Rohr \varnothing 26 mm x 3 mm St 35 GBK gefertigt, aus einem Rohr, das bei den genannten Belastungsfällen und dem gewählten Anfangsdruck von 26 bar gerade nicht mehr bleibend verformt wird.

Die beim vierten Versuch eingesetzte T-Verzweigung schließlich war aus Rohr \varnothing 30 mm x 5 mm St 35 GBK gefertigt, aus einem Rohr, das für die oben genannten Belastungsfälle bei dem gewählten Anfangsdruck von 26 bar bereits mit einem Faktor von etwa zwei überdimensioniert wäre, das allerdings bei diesem Anfangsdruck und Reflexion einer instabilen Detonation bei extrem instationären Bedingungen ($L = L_{krit}$) an der Reflexionsstelle noch zerstört wird (siehe dazu Bild 9).

Bei den ersten beiden Versuchen mit dem Einlaufen einer stabilen Detonation bei stationären Bedingungen ist es in dem Bereich der T-Verzweigung des Rohrsystems nur zu einer geringfügigen bleibenden Verformung der Rohrwand in Verlängerung der Rohrachse des T-Abzweiges gekommen.

Beim dritten Versuch mit dem Einlaufen einer instabilen Detonation bei extrem instationären Bedingungen ist die T-Verzweigung aus Rohr \varnothing 26 mm x 3 mm in Verlängerung der Rohrachse des T-Abzweiges zerstört worden und unmittelbar vor der T-Verzweigung ist das Rohr \varnothing 26 mm x 3 mm

um 2 mm auf einen Durchmesser von 28 mm aufgebeult worden. **Bild 15** zeigt die zerstörte T-Verzweigung. Beim vierten Versuch, wieder mit dem Einlaufen einer instabilen Detonation bei extrem instationären Bedingungen ist es an der T-Verzweigung aus Rohr $\varnothing 30 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ wieder nur zu einer geringfügigen bleibenden Verformung der Rohrwand in Verlängerung der Rohrachse des T-Abzweiges gekommen.

Wird eine Rohrleitung aus Rohr gefertigt, das beim maximal möglichen Anfangsdruck weder bei der am Umschlagspunkt zur Detonation noch bei der bei Reflexion einer stabilen Detonation bei stationären Bedingungen auftretenden Beanspruchung bleibend verformt wird, dann ist auch eine aus diesem Rohr gefertigte T-Verzweigung der Rohrleitung als ausreichend detonationsfest anzusehen, solange keine instabile Detonation bei extrem instationären Bedingungen ($L = L_{\text{krit}}$) vom seitlichen T-Abzweig aus in die Rohrverzweigung einläuft. Eine auch für diesen Belastungsfall detonationsfeste T-Verzweigung muss nach den Ergebnissen der Versuche Nr. 3 und 4 aus einem Rohr gefertigt werden, das auf eine etwa doppelt so hohe Druckfestigkeit ausgelegt ist.

5.3.1.5 Schlauchleitungen

Da in Acetylen-Füllanlagen bzw. in Batterieanlagen und Flaschenbündeln die Acetylenflaschen oder auch ganze Flaschenbündel mit Hilfe von Schlauchleitungen an die Hochdruck-Sammelleitung angeschlossen werden, ergibt sich auch die Frage, wie derartige Schlauchleitungen dimensioniert werden müssen, damit sie den bei einem Zerfall von Hochdruck-Acetylen auftretenden Beanspruchungen widerstehen. Zu diesem Fragenkomplex wurden die im folgenden beschriebenen Untersuchungen ausgeführt.

Bild 16 zeigt die Schnittzeichnung einer Hochdruck-Hydraulikschlauchleitung mit 8 mm Innendurchmesser. Ursprünglich sollten derartige Schlauchleitungen als Schlauchleitungen für Hochdruck-Acetylen in Füllanlagen und Batterieanlagen eingesetzt werden. Wie man sieht, trifft die Front der Zerfallsreaktion am einen Ende der Schlauchleitung auf eine Querschnittserweiterung vom Innendurchmesser der Schlauchtülle auf den Innendurchmesser des Schlauches. Am anderen Ende der Schlauchleitung dagegen trifft sie auf eine Querschnittsverengung, auf eine Stelle, an der es zur Teilreflexion der Reaktionsfront kommt. Dies ist auch die kritische Stelle der Schlauchleitung, wenn sie durch einen Acetylenzerfall beansprucht wird.

Bild 17 zeigt den Versuchsaufbau für die Versuche mit einem Zerfall von Hochdruck-Acetylen in Schlauchleitungen.

Es wurden Versuche ausgeführt, bei denen die Zerfallsreaktion aus einer 5 m langen Rohrleitung in die Schlauchleitung eingelaufen ist und Versuche, bei denen die Zerfallsreaktion kurz vor dem Beginn der Schlauchleitung eingeleitet worden ist.

Die Ergebnisse der Versuche sind in den **Tabellen 5, 6 und 7** (Seite 22-23) zusammengestellt.

Es gibt keinen signifikanten Unterschied bei den Versuchsergebnissen, wenn die Zerfallsreaktion am Anfang der Schlauchleitung oder am Anfang einer dieser Schlauchleitung vorgeschalteten, 5 m langen Rohrleitung eingeleitet wird. Nach dem Anlaufen einer Detonation in der Rohrleitung kommt es an der plötzlichen Querschnittserweiterung vom Tülleninnendurchmesser auf den Schlauchinnendurch-

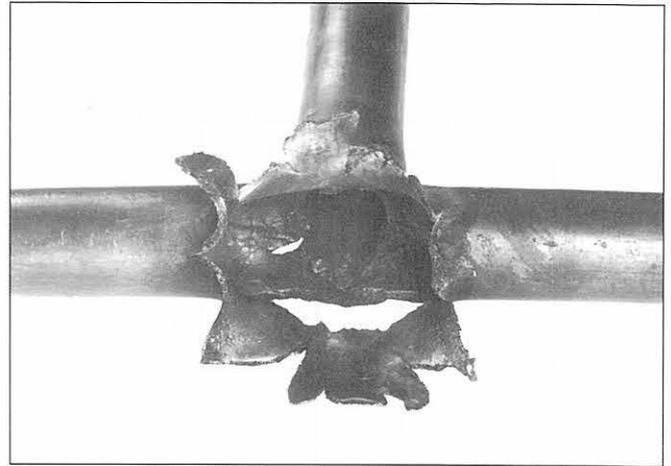


Bild 15: T-Verzweigung aus Rohr $\varnothing 26 \times 3 \text{ mm}$ aus St 35 GBK nach einem Acetylenzerfall bei 26 bar Anfangsdruck bei Zündung im Ab-stand der kritischen Rohrlänge

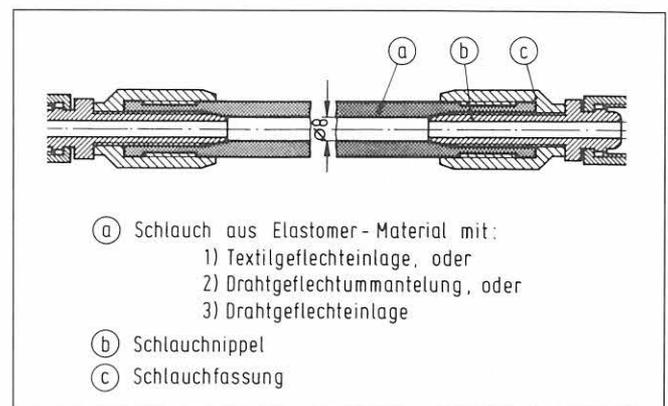


Bild 16: Schnitt durch eine Schlauchleitung DN 8

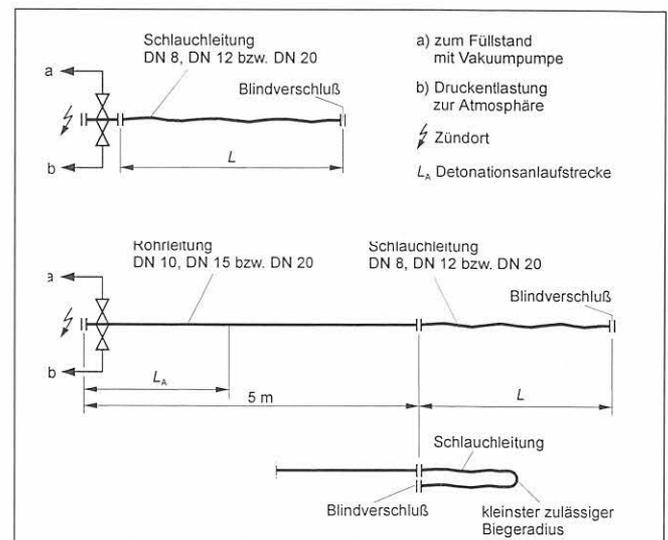


Bild 17: Versuchsaufbau für die Versuche mit einem Zerfall von Hochdruck-Acetylen in Schlauchleitungen

messer zu einer Entkopplung zwischen Reaktionsfront und Stoßwelle und es muss erst wieder erneut eine Detonation in der Schlauchleitung anlaufen. Vergleiche dazu die Versuchsergebnisse Nr. 2 und 3 in der Tabelle 7.

Zu den Anforderungen an die Festigkeit von Schlauchleitungen für Hochdruck-Acetylen können die folgenden Schlussfolgerungen aus den Versuchsergebnissen gezogen werden:

Tabelle 5: Versuche mit einem Zerfall von Hochdruck-Acetylen in Schlauchleitungen DN 8 von unterschiedlicher Festigkeit mit Schlauchlängen $L \gg L_A$ (Detonationsanlaufstrecke)

Versuch	Schlauchleitung DN 8			Anfangsdruck	Ergebnis
	Typ	Berstdruck	Länge		
Nr.	a)	p_{berst} bar	L mm	p_a bar	Schlauchleitung zerstört
1	2ST	1750	5020	26	zweite Schlaucheinbindung
2			5000	21	zweite Schlaucheinbindung
3			4900	19	keine Verformung
4			4900	20	zweite Schlaucheinbindung
5			4700	19	keine Verformung
6	3TE	500	10040	11	zweite Schlaucheinbindung
7			10000	9	keine Verformung
8			10000	10	zweite Schlaucheinbindung
9			9960	9	keine Verformung
10			9960	10	zweite Schlaucheinbindung
11	2TE	300	5000	20	bei $L = L_A = 740$ mm und an 8 weiteren Stellen
12			5000	12	zweite Schlaucheinbindung
13			4850	15	zweite Schlaucheinbindung
14			4700	18	zweite Schlaucheinbindung

a) Schlauchtyp nach EN 853 (DIN 20022) und EN 854 (DIN 20021)

(Legende zur Tabelle 6)

- a) Schlauchtyp nach EN 853 (DIN 20 022) und EN 854 (DIN 20 021)
- b) Schlauchleitung mit Mindestbiegeradius $R = 55$ mm umgebogen
- c) Schlauchleitung mit Mindestbiegeradius $R = 55$ mm umgebogen, Zerfallsreaktion aus einer vorgeschalteten 5 m langen Rohrleitung DN 10 eingelaufen
- d) 100 mm lange Spirale vor beiden Schlaucheinbindungen
- e) 100 mm lange Spirale vor der zweiten Schlaucheinbindung

Tabelle 6: Versuche mit einem Zerfall von Hochdruck-Acetylen in Schlauchleitungen DN 8 von unterschiedlicher Festigkeit mit und ohne einglegter Drahtspirale. Spirale mit 8 mm Außendurchmesser, 0,5 mm Drahtdurchmesser und 5 mm Steigung

Ver-such	Schlauchleitung DN 8				Anfangsdruck	Ergebnis
	Typ	Berstdruck	Länge	Länge der Spirale		
Nr.	a)	p_{berst} bar	L mm	mm	p_a bar	Schlauchleitung zerstört
1	2ST	1750	500	500	26	keine Verformung
2				keine Spirale	26	zweite Schlaucheinbindung
3	3TE	500	500	500	21	keine Verformung
4				500	26	keine Verformung
5				keine Spirale	21	zweite Schlaucheinbindung
6				500	28,5	keine Verformung
7				500	31	keine Verformung
8			500 ^{b)}	500	26	keine Verformung
9			500 ^{c)}	500	26	keine Verformung
10			500 ^{c)}	keine Spirale	26	zweite Schlaucheinbindung
11	2TE	300	500	500	26	zweite Schlaucheinbindung und 10 mm hinter der ersten Schlaucheinbindung
12				500	22	zweite Schlaucheinbindung und 45 mm hinter der ersten Schlaucheinbindung
13				500	21	keine Verformung
14	3TE	500	45	45	22	keine Verformung
15	2TE	300	45	45	22	zweite Schlaucheinbindung
16	3TE	500	45	45	26	keine Verformung
17	1ST	790	700	2 x 100 ^{d)}	26	zweite Schlaucheinbindung und 90 mm vor der zweiten Schlaucheinbindung
18	2ST	1750	700	2 x 100 ^{d)}	26	keine Verformung
19				1 x 100 ^{e)}	26	zweite Schlaucheinbindung und 90 mm vor der zweiten Schlaucheinbindung

Tabelle 7: Versuche mit einem Zerfall von Hochdruck-Acetylen in Schlauchleitungen DN 12 und DN 20 von unterschiedlicher Festigkeit mit und ohne eingeleger Drahtspirale

Ver- such	Schlauchleitung					Anfangs- druck	Versuchs- aufbau	Ergebnis
	Nenn- weite	Typ	Berst- druck	Länge	Spirale ein- gebaut			
Nr.	DN mm	a)	p_{berst} ^{b)} bar	L mm	ja/nein	p_a bar	c, d, e	Schlauchleitung wurde zerstört
1	20	2ST	850	2000	ja	28,5	c	an 5 Stellen, nicht an den Schlauchverbindungen. Erste Bruchstelle 70 mm hinter der ersten Schlauchverbindung
2					nein	28,5	c	bei $L = L_A = 710$ mm. Rest der Schlauchleitung zerstört bis auf ein 500 mm langes Teilstück mit spiralförmigem Riss mit Steigung von 65 mm (siehe Bild 18)
3					nein	28,5	d	bei $L = L_A = 800$ mm. Rest der Schlauchleitung zerstört
4	20	2020ST	1050	2000	ja	28,5	c	30 Sekunden nach der Zündung bei $L = 750$ und 830 mm. f)
5					ja	28,5	e	80 Sekunden nach der Zündung bei $L = 1175$ mm. f)
6					ja	28,5	d	60 Sekunden nach der Zündung bei $L = 300$ mm. f)
7	20	4SP	1400	2000	ja	28,5	c	keine Verformung
8					ja	28,5	e	keine Verformung
9					ja	28,5	d	keine Verformung
10	12	2ST	1100	1500	ja	28,5	c	keine Verformung
11					ja	28,5	e	keine Verformung
12					ja	28,5	d	keine Verformung
13	12	4SP	1660	1500	nein	28,5	c	zweite Schlauchverbindung
14					nein	28,5	d	zweite Schlauchverbindung

a) Schlauchtyp nach EN 853 (DIN 20022) und EN 856 (DIN 20023)

b) Mindestberstdruck nach Angaben in der Norm

c) Versuchsaufbau c: Teil mit Ventilen und Zündquelle/5m Vorleitung DN 15 oder DN 20/Schlauchleitung/Blindverschluss

d) Versuchsaufbau d: Teil mit Ventilen und Zündquelle/Schlauchleitung/Blindverschluss

e) Versuchsaufbau e: wie Aufbau c, Schlauchleitung mit Mindestbiegeradius umgebogen

f) Die Schlauchbrüche 30 oder mehr Sekunden nach der Zündung resultieren aus einer zu großen thermischen Belastung des Schlauchmaterials.

Die Spirale mit 1,3 mm Drahtdurchmesser und nur 5 mm Steigung hat zu viel Masse zum Speichern der bei der Zerfallsreaktion freigesetzten Wärme an den Stellen, an denen die Spirale nach dem Durchlaufen der Zerfallsreaktion zusammengepresst wird.

1) Schlauchleitungen DN 8 mit einem Berstdruck von 300 bar können beim Belastungsfall 3, d.h. beim Durchlaufen einer instabilen Detonation bei den extrem instationären Bedingungen am Umschlagspunkt ($L = L_A$) den Beanspruchungen durch die Zerfallsreaktion bis zu einem Anfangsdruck von 18 bar widerstehen (siehe Versuche Nr. 11 und 14 in Tabelle 5). Bei dieser Art der Beanspruchung muss der Berstdruck für die Schlauchleitung demnach mindestens das 17fache des Anfangsdruckes betragen.

2) Schlauchleitungen DN 8 mit einem Berstdruck von 500 bar können beim Belastungsfall 4, d.h. bei der Reflexion

einer stabilen Detonation bei nahezu stationären Bedingungen ($L \gg L_A$) den Beanspruchungen durch die Zerfallsreaktion bis zu einem Anfangsdruck von 9 bar widerstehen (siehe Versuche Nr. 6 bis 10 in Tabelle 5). Bei dieser Art der Beanspruchung muss der Berstdruck für die Schlauchleitung demnach mindestens das 56fache des Anfangsdruckes betragen.

Bei den Versuchen mit einem Zerfall von Hochdruck-Acetylen in Stahlrohrleitungen wurde bei diesen beiden Belastungsfällen eine etwa gleichgroße Rohrverformung gemessen, d.h., es wurde etwa die gleiche Verformungsarbeit geleistet.

Bei den Versuchen mit einem Zerfall von Hochdruck-Acetylen in Schlauchleitungen aus Elastomermaterial mit Textilgeflechteinlagen, Typ 2TE bzw. Typ 3TE [9] stellen wir bei diesen beiden Belastungsfällen dagegen eine sehr unterschiedlich große Verformung der Schlauchleitung fest, d. h., hier wird beim Belastungsfall 4 (Reflexion bei $L \gg L_A$) eine wesentlich größere Verformungsarbeit geleistet als beim Belastungsfall 3 (Durchlaufen bei $L = L_A$).

Beim Belastungsfall 3 wird das Bauteil im wesentlichen durch Zugspannungen beansprucht, die durch den am Umschlagspunkt auftretenden Druckimpuls erzeugt werden. Beim Belastungsfall 4 dagegen wird das Bauteil durch Zug- und Schubspannungen beansprucht, die durch den bei Reflexion der Reaktionsfront auftretenden Druckimpuls erzeugt werden.

Im Abschnitt 5.4 wird gezeigt (siehe Bild 32), dass der Druckimpuls am Umschlagspunkt ($L = L_A$) etwa dreimal so groß ist wie bei Reflexion einer stabilen Detonation bei nahezu stationären Bedingungen am Rohrende ($L \gg L_A$). Die am Umschlagspunkt erzeugten Zugspannungen und die an der Reflexionsstelle mit den zusätzlichen Schubspannungen erzeugten zusammengesetzten Spannungen führen bei dem sehr verformungsfähigen Rohrwerkstoff St 35 GBK zu einer etwa gleichgroßen Verformungsarbeit, bei dem gegen Scherbeanspruchung empfindlichen Schlauchwerkstoff dagegen führen die zusätzlichen Schubspannungen an der Reflexionsstelle zu einer größeren Verformungsarbeit als am Umschlagspunkt.

- 3) Schlauchleitungen DN 8 Typ 2 ST [10] mit einem Berstdruck von 1750 bar können beim Belastungsfall 4, d. h. bei der Reflexion einer stabilen Detonation bei nahezu stationären Bedingungen ($L \gg L_A$), den Beanspruchungen durch die Zerfallsreaktion bis zu einem Anfangsdruck von 19 bar widerstehen (siehe Versuche Nr. 3 bis 5 in Tabelle 5). Bei dieser Art der Beanspruchung muss der Berstdruck für die Schlauchleitung aus diesem Schlauchtyp mindestens das 92fache des Anfangsdruckes betragen.

Schläuche vom Typ 3TE haben zur Verstärkung drei Textilgeflechteinlagen, Schläuche vom Typ 2ST haben zwei Drahtgeflechteinlagen aus rostfreiem Stahl. Es scheint, dass Schläuche mit Textilgeflechteinlagen dieser Art der Beanspruchung besser widerstehen können als Schläuche mit Drahtgeflechteinlagen.

- 4) Schlauchleitungen DN 20 Typ 2020ST [10] mit einem Berstdruck von mindestens 1050 bar können beim Belastungsfall 3, d. h. beim Durchlaufen einer instabilen Detonation bei den extrem instationären Bedingungen am Umschlagspunkt ($L = L_A$), den Beanspruchungen durch die Zerfallsreaktion bis zu einem Anfangsdruck von 28,5 bar widerstehen (vergleiche Versuche Nr. 1 bis 3 mit den Versuchen Nr. 4 bis 6 in Tabelle 7). Sie können dieser Art der Beanspruchung widerstehen, wenn der Mindestberstdruck das 37fache des Anfangsdruckes beträgt, sie können dies nicht, wenn er nur das 30fache des Anfangsdruckes beträgt (850 bar/28,5 bar).

Bild 18 zeigt das Teilstück der Schlauchleitung DN 20, Typ 2ST vom Versuch Nr. 2 der Tabelle 7 mit einem Riss in Form einer Spirale, der wahrscheinlich durch den Spin in der Detonationsfront erzeugt worden ist.

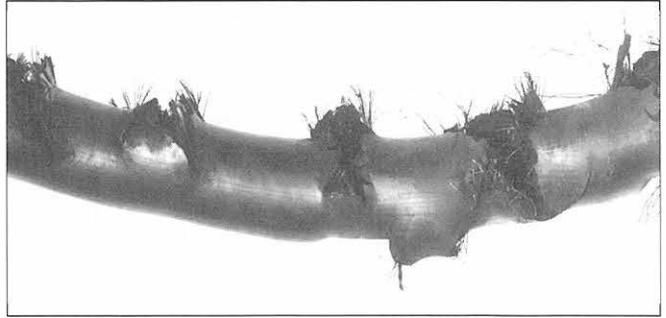


Bild 18: Spiralförmiger Riss in der Schlauchleitung DN 20 Typ 2 ST nach einem Zerfall von Hochdruck-Acetylen bei 28,5 bar Anfangsdruck

Auch bei dieser Art der Beanspruchung scheint bei Schläuchen mit Textilgeflechteinlagen ein niedrigerer Berstdruck als bei Schläuchen mit Drahtgeflechteinlagen auszureichen (vergleiche die Schlussfolgerungen 1 und 4).

Die Drahtgeflechteinlagen werden aus Drähten aus rostfreiem Stahl mit einer sehr hohen Zugfestigkeit aber sehr geringen Bruchdehnung hergestellt. Möglicherweise würde man auch bei Schläuchen mit Drahtgeflechteinlagen mit einem erheblich geringeren auf den Anfangsdruck bezogenen Berstdruck auskommen, wenn man sie aus Drähten mit einer wesentlich größeren Verformungsfähigkeit herstellen würde.

- 5) Schlauchleitungen aus Elastomermaterial mit den derzeit höchsten Berstdrücken können beim maximal zulässigen Anfangsdruck von 26 bar bzw. 28,5 bar den beim Belastungsfall 4, d. h. bei Reflexion einer stabilen Detonation bei nahezu stationären Bedingungen ($L \gg L_A$) auftretenden Beanspruchungen nicht widerstehen. Die Belastung nimmt zu, wenn sich die Länge der Schlauchleitung L der Länge der Detonationsanlaufstrecke L_A nähert ($L \rightarrow L_A$).
- 6) Schlauchleitungen aus Elastomermaterial mit einem Innendurchmesser von maximal 20 mm und einem Mindestberstdruck von 1000 bar können allen bei einem Zerfall von Acetylen bis zum maximal zulässigen Druck von 28,5 bar auftretenden Beanspruchungen widerstehen, wenn sie über die gesamte Schlauchlänge mit einer Drahtspirale ausgelegt werden.

Der Mindestberstdruck kann reduziert werden für Schlauchleitungen aus Schläuchen mit Textilgeflechteinlagen und möglicherweise auch für Schlauchleitungen aus Schläuchen mit Drahtgeflechteinlagen, wenn sie aus Drähten mit einer wesentlich größeren Verformungsfähigkeit hergestellt werden.

Damit kommt man zu folgendem Resultat: Nach den in den Tabellen 5, 6 und 7 zusammengestellten Versuchsergebnissen und den daraus gezogenen Schlussfolgerungen müssen Schlauchleitungen für Hochdruck-Acetylen aus Elastomerschläuchen mit Drahtgeflechteinlagen und Innendurchmessern bis maximal 20 mm einen Berstdruck von mindestens 1000 bar haben. Schlauchleitungen aus Elastomermaterial mit Textilgeflechteinlagen und Innendurchmessern bis maximal 8 mm müssen einen Berstdruck von mindestens 500 bar haben.

Aber normale Hochdruck-Hydraulikschlauchleitungen dieser Festigkeit können nicht den Beanspruchungen widerstehen, die beim Zerfall von Hochdruck-Acetylen bei der Teilreflexion der Reaktionsfront an der Schlauchtülle auftreten.

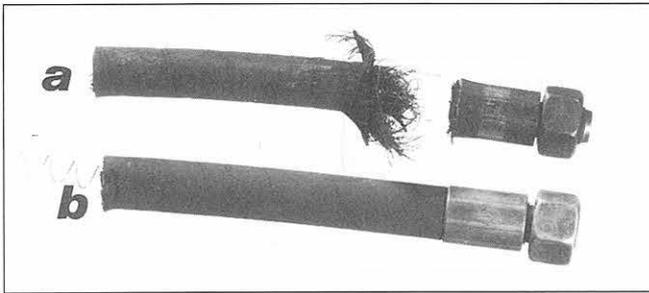


Bild 19: Verformung am Schlauchende einer Schlauchleitung DN 12 Typ 4 SP von 1500 mm Länge ($p_{berst, min} = 1600$ bar) nach einem Zerfall von Hochdruck-Acetylen bei 26 bar Anfangsdruck a) normale Hochdruck-Hydraulikschlauchleitung; b) gleiche Hochdruck-Hydraulikschlauchleitung mit eingelegeter Drahtspirale

Nur wenn die Schlauchleitung über die ganze Länge zwischen den beiden Einbindungen mit einer Drahtspirale zur Beschleunigung des Detonationsanlaufvorganges (Abschnitt 5.3.1.3) ausgelegt ist, kann sie auch den an dieser Stelle auftretenden Beanspruchungen widerstehen. Dies wird noch einmal sehr eindrucksvoll durch die beiden auf dem **Bild 19** dokumentierten Versuchsergebnisse bestätigt. Bei der Schlauchleitung mit Spirale hätte auch ein Schlauch Typ 2ST mit einem Mindestberstdruck von 1100 bar gewählt werden können (siehe Versuche Nr. 10 bis 12 in Tabelle 7).

Ein Schlauchtyp, bei dem bereits bauartbedingt viele Störstellen zur Erzeugung von zusätzlicher Turbulenz im Frischgas von der Reaktionsfront und damit zur Beschleunigung des Detonationsanlaufvorganges vorhanden sind, ist der sogenannte Ganzmetall-Wellrohrschlauch. In der **Tabelle 8** (Seite 26) sind die bisher mit einem Zerfall von Hochdruck-Acetylen in Schlauchleitungen aus Ganzmetall-Wellrohrschlauch ausgeführten Versuche zusammengestellt.

Danach muss eine Schlauchleitung DN 16 aus Ganzmetall-Wellrohrschlauch einen Berstdruck von mindestens 750 bar haben, damit sie den beim Zerfall von Hochdruck-Acetylen bis 26 bar Anfangsdruck auftretenden Beanspruchungen widerstehen kann. Bei einer Schlauchleitung DN 6 aus Ganzmetall-Wellrohrschlauch könnte, ähnlich wie bei einer Schlauchleitung der gleichen Nennweite aus Elastomerschlauch mit Textilgeflechteinlage und eingelegeter Drahtspirale, bereits ein Berstdruck von etwa 500 bar ausreichend sein.

5.3.2 Versuche mit einer Reaktion von Brenngas/Sauerstoff(Luft)-Gemisch in geraden, unverzweigten Rohrleitungen

Der für die Versuche gewählte Versuchsaufbau ist auf dem **Bild 3** skizziert. Zunächst wurden Versuche mit den im Abschnitt 5.2 beschriebenen Rohrformteilen mit 20 mm Innendurchmesser und 0,5 mm Wanddicke aus den Werkstoffen St 35 GBK und Aluminium ausgeführt. Die Länge der Vorleitung DN 20 betrug $L = 2000$ mm und als reaktionsfähige Gasphase wurden Acetylen/Sauerstoff-Gemische gewählt. Acetylen/Sauerstoff-Gemische deshalb, weil sie über einen großen Bereich von Gemischzusammensetzungen sehr kurze Detonationsanlaufstrecken haben.

Auf dem **Bild 20** sind die Ergebnisse zusammengestellt, die bei den Versuchen mit den Rohrformteilen aus dem Werkstoff St 35 GBK erhalten worden sind:

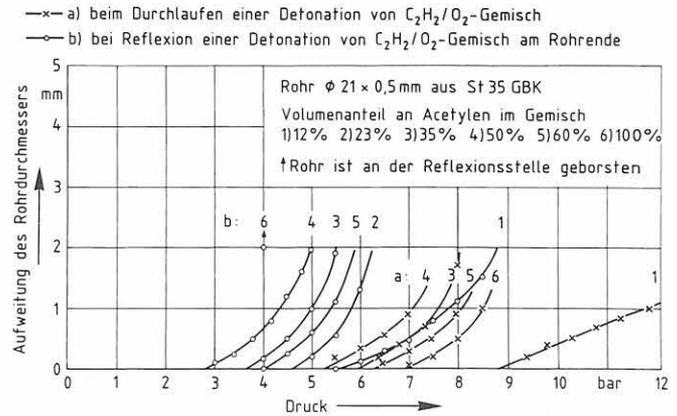


Bild 20: Aufweitung des Durchmessers von Rohren $\varnothing 21 \times 0,5$ mm aus St 35 GBK bei Detonationen im Acetylen/Sauerstoff-Gemisch in Abhängigkeit vom Anfangsdruck; a) beim Durchlaufen der Detonation durch das Rohr und b) bei der Reflexion der Detonation am Rohrende

- Kurven a) beim Durchlaufen einer Detonation von Acetylen/Sauerstoff-Gemisch durch Rohre $\varnothing 21$ mm x 0,5 mm und
- Kurven b) bei der Reflexion einer Detonation von Acetylen/Sauerstoff-Gemisch am Rohrende von Rohren $\varnothing 21$ mm x 0,5 mm.

Aufgetragen ist die Aufweitung des Rohrdurchmessers in Abhängigkeit vom Anfangsdruck. Gewählt wurden Gemische mit einem Volumenanteil an Acetylen von 12 %, 23 %, 35 %, 50 % und 60 % sowie reines Acetylen (100 %).

Auf dem **Bild 21** sind die Ergebnisse entsprechender Versuche mit den Rohrformteilen aus Aluminium zusammengestellt.

Mit Hilfe der Angaben auf **Bild 7** kann den gemessenen Verformungen ein statischer Vergleichsdruck zugeordnet werden. Beim Aluminiumrohr musste bei der dynamischen Belastung erst bei einer Aufweitung des Rohrdurchmessers von mehr als einem Millimeter mit einem Bruch des Rohres gerechnet werden. Bei der statischen Belastung ist es bei einem Druck von 155 bar zu einem Bruch des Rohres gekommen. Beim Rohr aus St 35 GBK ist der Anstieg der Kurven für die Aufweitung des Rohrdurchmessers bis

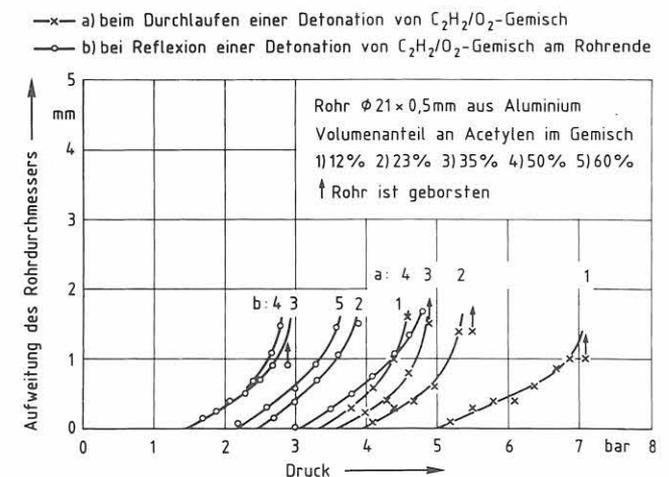


Bild 21: Aufweitung des Durchmessers von Rohren $\varnothing 21 \times 0,5$ mm aus Aluminium bei Detonationen im Acetylen/Sauerstoff-Gemisch in Abhängigkeit vom Anfangsdruck a) beim Durchlaufen der Detonation durch das Rohr und b) bei der Reflexion der Detonation am Rohrende

Tabelle 8: Versuche mit einem Zerfall von Hochdruck-Acetylen in Schlauchleitungen aus Ganzmetall-Wellrohrschlauch

Ver-such Nr.	Schlauchleitung			Berst-druck $p_{berst}^{b)}$ bar	Anfangs-druck p_a bar	Ergebnis
	Muster Nr.	Länge L mm	Durch-messer d_i mm			
1 bis 3	1 bis 3	500	16 ^{a)}	760	26	Spiralförmige Aufbeulung mit Steigung von etwa 60 mm/dicht
4	4	1600	16 ^{a)}		26	keine Aufweitung/dicht
5	5	1000	6	750	26	keine Aufweitung/dicht
6					28,5	keine Aufweitung/dicht
7	6	2000	6		26	keine Aufweitung/dicht
8					28,5	keine Aufweitung/dicht
9	7	1000	6	1150	26	keine Aufweitung/c)
10	8	3000	6	1025	26	keine Aufweitung/d)

- ^{a)} Nach § 10 der Acetylenverordnung der Bauart nach zugelassene Schlauchleitung für Hochdruck-Acetylen
- ^{b)} Nach der Belastung durch einen Versuch (Muster Nr. 1, 7 und 8) bzw. durch zwei Versuche (Muster Nr. 5) mit einem Zerfall von Hochdruck-Acetylen ermittelter Berstdruck
- ^{c)} Dichtung zwischen Schlaucharmatur und Adapter zum Verschließen der Schlauchleitung beschädigt (Bei der statischen Druckprobe bei 980 bar gerissen, danach durch andere Dichtung ersetzt)
- ^{d)} Dichtung zwischen Schlaucharmatur und Adapter zum Verschließen der Schlauchleitung sowie Adapter zum Anschluss an die 5 m lange Versuchsröhreleitung DN 10 beschädigt (bei der statischen Druckprobe von Muster Nr. 7 bei 1130 bar gerissen, Dichtungen waren ungekammert eingebaut, konstruktiver Fehler)

zu einer Aufweitung von 0,5 mm sowohl bei der statischen Belastung als auch bei der dynamischen Belastung durch die Reaktion zunächst konstant und nimmt dann überproportional zu. Hier ist bei einer Aufweitung des Rohrdurchmessers von 0,5 mm der dynamischen Belastung durch die Reaktion ein statischer Druck von etwa 220 bar gleichzusetzen.

Mit diesen statischen Vergleichsdrücken und den Anfangsdrücken, bei denen bei den Versuchen mit dem Al-Rohr gerade noch kein Bersten erfolgt ist, bzw. bei denen bei den Versuchen mit dem Rohr aus St 35 GBK eine Aufweitung des Rohrdurchmessers von etwa 0,5 mm ermittelt worden ist, ergeben sich die im Diagramm auf **Bild 22** angegebenen, der geleisteten Verformungsarbeit äquivalenten, auf den Anfangsdruck p_a bezogenen Explosionsdrücke p_{det} (Vergleichsdrücke p'_{stat}) bei detonativ verlaufenden Reaktionen von Acetylen/Sauerstoff-Gemischen und den Belastungsfällen:

- a) Durchlaufen einer stabilen Detonation unter nahezu stationären Bedingungen durch Rohre DN 20 (Belastungsfall 1) und
- b) Reflexion einer stabilen Detonation unter nahezu stationären Bedingungen am Rohrende von Rohren DN 20 (Belastungsfall 4).

In dem Diagramm auf **Bild 23** sind für Rohrleitungen DN 20 und mehrere Brenngase die in [3] ermittelten kritischen

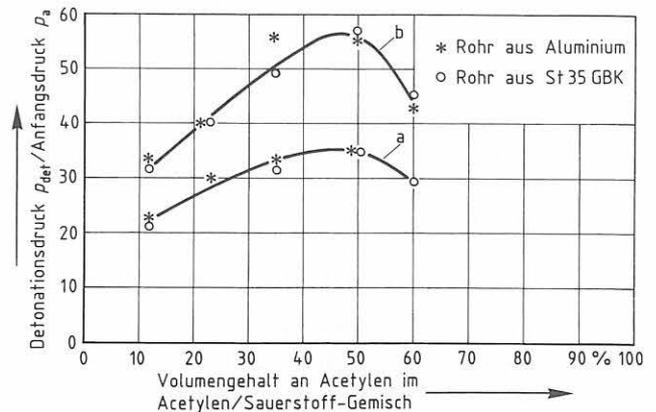


Bild 22: Detonationsdruck p_{det} (Vergleichsdruck p'_{stat}) zu Anfangsdruck p_a in Abhängigkeit von der Zusammensetzung der Acetylen/Sauerstoff-Gemische bei den Bedingungen
a) Durchlaufen einer stabilen Detonation bei nahezu stationären Bedingungen und
b) Reflexion einer stabilen Detonation bei nahezu stationären Bedingungen am Rohrende, ermittelt nach der Rohrwandverformungsmethode durch Versuche in Rohren DN 20

Rohrlängen $L_{krit} = \text{Detonationsanlaufstrecken } L_A$ für $L/L_A = 1$ in Abhängigkeit von der Brenngas/Sauerstoff-Gemischzusammensetzung zusammengestellt.

Die Anfangsbedingungen waren Atmosphärendruck und Raumtemperatur. Mit zunehmendem Druck nimmt die

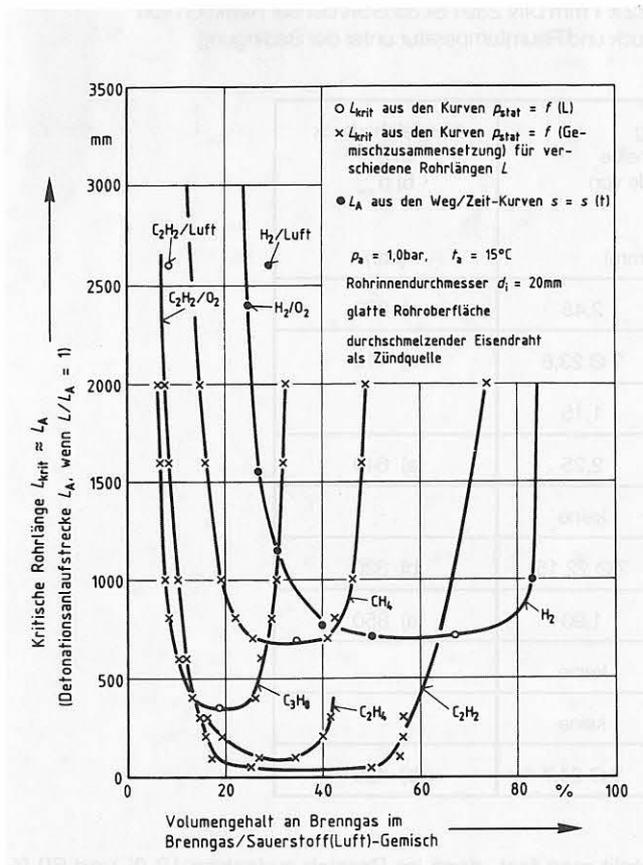


Bild 23: Kritische Rohrlänge L_{krit} für verschiedene Brenngas/Sauerstoff-Gemische von Atmosphärendruck und Raumtemperatur in Abhängigkeit von der Gemischzusammensetzung, ermittelt durch Versuche in glatten Rohrleitungen mit 20 mm Innendurchmesser

Länge der Detonationsanlaufstrecke ab [11], und die Detonationsgrenze verschiebt sich vor allem bei überstöchiometrischen Gemischen zu erheblich höheren Brenngasgehalten.

Bei den für die Versuche gewählten Gemischzusammensetzungen und Anfangsdrücken hat man demnach so kurze Detonationsanlaufstrecken vorliegen, dass bei der gewählten Länge der Vorleitung von $L = 2000$ mm alle während des Anlaufvorganges vorgelaufenen Druckwellen von der vom Umschlagspunkt ab mit Detonationsgeschwindigkeit folgenden Reaktionsfront weit vor dem Messort eingeholt worden sind.

Der Zustand des Frischgases am Messort kann also nur sehr kurzzeitig durch vorgelaufene, schnelle Stoßwellen verändert worden sein (nahezu stationäre Bedingungen).

Bei den mit einem Acetylenzerfall ausgeführten Versuchen (100 % Acetylen) betrug die Länge der Vorleitung $L = 5000$ mm. Außerdem war zur Beschleunigung des Anlaufvorganges hinter dem Zündort eine ca. 500 mm lange Drahtspirale in die Rohrleitung eingesetzt. In beiden Fällen, sowohl beim Durchlaufen der Detonation durch das Rohr als auch bei Reflexion der Detonation am Rohrende, ist es zu erheblich höheren Drucksteigerungen gekommen, als nach den im Abschnitt 5.3.1.3 mitgeteilten Ergebnissen von Versuchen bei erheblich höheren Anfangsdrücken zu erwarten gewesen wäre. Im Fall a ergibt sich ein $p_{det}/p_a = 27$ gegenüber 16 und im Fall b ein $p_{det}/p_a > 60$ gegenüber 32. Hier muss demnach die Anlaufstrecke so lang gewesen sein, dass beim Eintreffen der Detonationsfront am

Messort der Druck im Frischgas erheblich höher als der Anfangsdruck gewesen sein muss (instationäre Bedingungen).

Nach [12] muss in einer glatten Rohrleitung mit 20 mm Innendurchmesser ohne Störstellen zur Turbulenzerzeugung beim Zerfall von reinem Acetylen erst bei Anfangsdrücken von etwa 4,0 bar an mit dem Anlaufen einer Detonation gerechnet werden. Nach den Ergebnissen eigener Untersuchungen wird bei einer 5 m langen, glatten Rohrleitung mit 20 mm Innendurchmesser das Rohrende bei Anfangsdrücken von mehr als 3,4 bar durch eine mit einer Stoßwelle gekoppelten Reaktionsfront, d.h. durch eine Detonation belastet. Bei einer über die gesamte Rohrlänge mit einer Spirale ausgelegten, längeren Rohrleitung mit 20 mm Innendurchmesser liegt der Detonationsgrenzdruck bei einem Wert von 2,9 bar. Bei einem Druck von 3,3 bar beträgt bei diesen Bedingungen die Länge der Detonationsanlaufstrecke etwa 1800 mm.

Der Fall der Belastung des Rohrendes durch eine instabile Detonation unter extrem instationären Bedingungen bei $L = L_{krit}$ wurde in [3] sehr eingehend untersucht. Die dabei für verschiedene Brenngas/Sauerstoff(Luft)-Gemische mit Hilfe der Berstscheibenverformungsmethode ermittelten statischen Vergleichsdrücke p_{stat} sind in dem Diagramm auf **Bild 24** (Seite 28) in Abhängigkeit von der auf den Rohrrinnendurchmesser d_i bezogenen kritischen Rohrlänge L_{krit} aufgetragen. Die Anfangsbedingungen waren Atmosphärendruck und Raumtemperatur.

In der **Tabelle 9** (Seite 28) sind für überstöchiometrisches Propan/Sauerstoff-Gemisch die bei den Rohrlängen $L = L_{krit} = 800$ mm ($40 \times d_i$) und 1800 mm ($90 \times d_i$) nach der Berstscheibenverformungsmethode und mit Hilfe der Rohrwandverformungsmethode ermittelten statischen Vergleichsdrücke einander gegenübergestellt. Danach ergibt sich nach der Rohrwandverformungsmethode ein statischer Vergleichsdruck p'_{stat} , der nur etwa halb so groß ist wie der nach der Berstscheibenverformungsmethode ermittelte Vergleichsdruck p_{stat} , d. h. es gilt

$$p'_{stat} = 0,5 \times p_{stat}$$

Der Faktor 0,5 zwischen den nach den beiden Methoden ermittelten statischen Vergleichsdrücken ergibt sich aus

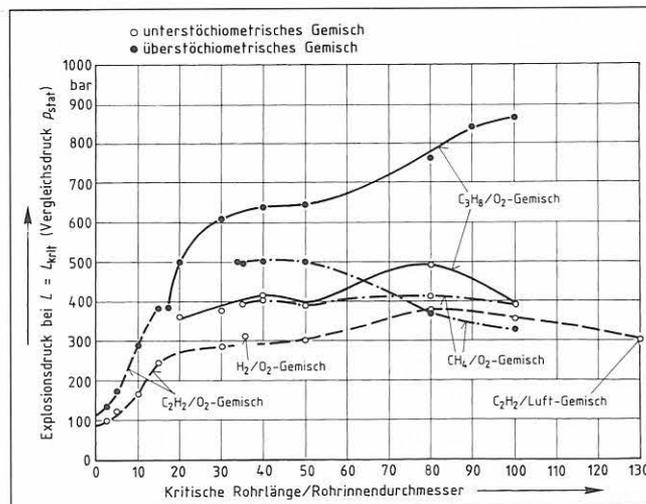


Bild 24: Vergleichsdruck p_{stat} für den Explosionsdruck bei Reflexion einer instabilen Detonation bei den extrem instationären Bedingungen bei $L=L_{krit}$ in Abhängigkeit vom Verhältnis L_{krit}/d_i für verschiedene Brenngas/Sauerstoff-Gemische, ermittelt nach der Berstscheibenverformungsmethode bei Versuchen in glatten Rohrleitungen mit 20 mm Innendurchmesser

Tabelle 9: Verformung des Rohrendes von Rohrleitungen aus Rohr $\text{AE } 22 \times 1 \text{ mm DIN 2391 St 35 GBK}$ bei der Reaktion von überstöchiometrischem Propan/Sauerstoff-Gemisch bei Atmosphärendruck und Raumtemperatur unter der Bedingung Rohrlänge L gleich kritische Rohrlänge L_{krit}

Versuch Nr.	Volumengehalt an Propan im Propan/Sauerstoff-Gemisch	Rohrlänge L (mm)	Anzahl der Berstscheiben	Verformung a) Berstscheibe b) Rohrende von $\varnothing 22$? (mm)	Vergleichsdruck a) p'_{stat} b) p'_{stat} (bar)
1	33 % Propan	2000	7	a) 2,45	a) 870
2		2000	-	b) ? $\varnothing 23,8$	b) 410
3	29,5 % Propan	800	5	a) 1,15	
4		770	5	a) 2,25	a) 640
5		770	-	b) keine	
6		800	-	b) ? $\varnothing 22,15$	b) 320
7	32,5 % Propan	1800	7	a) 1,90	a) 850
8		1800	-	b) keine	
9	33 % Propan	1800	-	b) keine	
10	32,7 % Propan	1800	-	b) ? $\varnothing 24,7$	b) 420

der unterschiedlichen Beanspruchung der Messglieder (Rohrwand bzw. Berstscheibe) am Messort.

Bei der Berstscheibe werden alle Elemente des Bauteils zum gleichen Zeitpunkt gleichstark belastet. Bei der Rohrwand dagegen wurden benachbarte Elemente des Bauteils zum gleichen Zeitpunkt unterschiedlich stark belastet. In der Summation ergibt dies für den statischen Vergleichsdruck bei der Belastung der Elemente der Rohrwand und bei der Belastung der Elemente der Berstscheibe den Faktor 0,5.

Im Extremfall, d. h. bei brenngasreichen Kohlenwasserstoff/Sauerstoff-Gemischen und einer relativ großen kritischen Rohrlänge von $L_{\text{krit}} = 100 \times d_i$, kann am Rohrende ein Explosionsdruck auftreten, der am Rohr die gleiche Verformungsarbeit leistet wie ein statischer Druck vom 420fachen des absoluten Anfangsdruckes. Man erhält hier also eine noch um den Faktor 3,5 (420/120) höhere Drucksteigerung als beim Zerfall von Hochdruck-Acetylen von 20 bar Anfangsdruck in Rohren mit 20 mm Innendurchmesser.

Der Fall der Belastung des Rohrendes durch eine stabile Detonation unter nahezu stationären Bedingungen ($L \gg L_A$) lässt sich leicht dadurch realisieren, dass die Reaktion gezwungen wird, sehr schnell über eine kurze Anlaufstrecke zur Detonation anzulaufen. Dies kann sehr einfach dadurch erreicht werden, dass in die Rohrleitung eine Spirale eingesetzt wird.

In den Diagrammen auf den **Bildern 25 und 26** sind für Acetylen/Sauerstoff- bzw. Propan/Sauerstoff-Gemische die unter diesen Bedingungen mit Hilfe der Berstscheibenverformungsmethode ermittelten statischen Vergleichsdrücke p_{stat} zusammengestellt. Anfangsbedingungen waren wieder Atmosphärendruck und Raumtemperatur.

Halbiert man im Diagramm auf Bild 25 gemäß $p'_{\text{stat}} = 0,5 \times p_{\text{stat}}$ die Werte für den statischen Vergleichsdruck p_{stat} , dann

stellt man fest, dass im Bereich zwischen 12 % und 60 % Volumenanteilen Acetylen im Gemisch bei diesen Versuchen nahezu die gleichen Drucksteigerungen (p'_{stat}/p_a mit $p_a = 1,0 \text{ bar}$) ermittelt worden sind wie bei den Versuchen für die Kurve b im Diagramm auf Bild 22.

Dem Diagramm auf Bild 26 kann entnommen werden, dass bei einem Volumenanteil von 33 % Propan im Gemisch bei Reflexion einer stabilen Detonation unter nahezu stationären Bedingungen eine Drucksteigerung von $p_{\text{stat}}/p_a = 125$ erreicht wird ($p'_{\text{stat}}/p_a = 62$). Beim gleichen Gemisch wurde bei Reflexion einer instabilen Detonation unter extrem instationären Bedingungen bei $L = L_{\text{krit}}$ eine Drucksteigerung von $p_{\text{stat}}/p_a = 870$ (siehe Tabelle 1), d. h. eine um den Faktor 7 (870/125) höhere Drucksteigerung als bei Reflexion einer stabilen Detonation unter nahezu stationären Bedingungen, ermittelt.

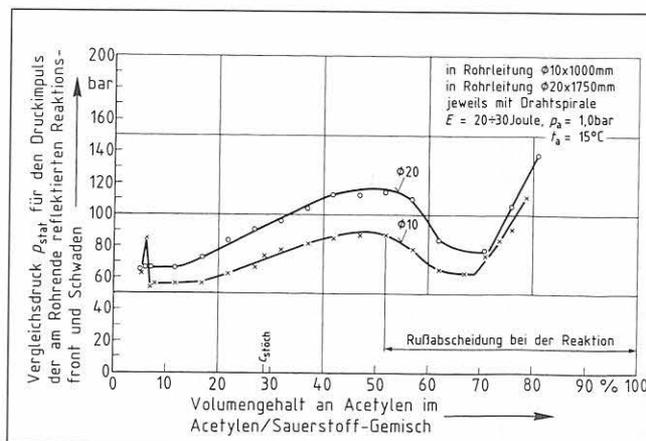


Bild 25: Vergleichsdruck p_{stat} für den Druckimpuls der am Rohrende reflektierten Reaktionsfront und Schwaden in Abhängigkeit von der Zusammensetzung des Acetylen/Sauerstoff-Gemisches bei den mit einer Spirale ausgelegten Rohrleitungen DN 10 von 1000 mm Länge und DN 20 von 1750 mm Länge und den Anfangsbedingungen Atmosphärendruck und Raumtemperatur

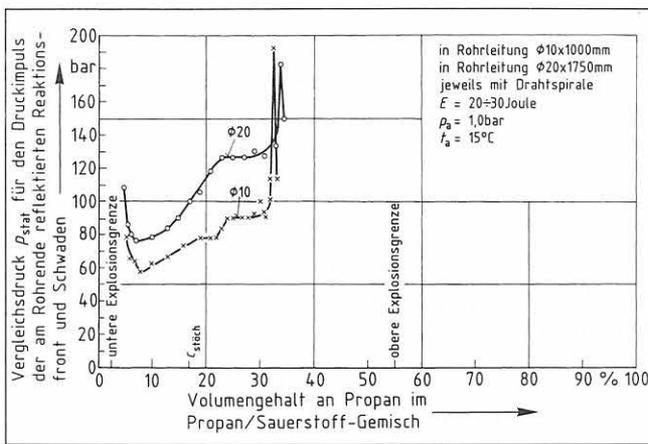


Bild 26: Vergleichsdruck p_{stat} für den Druckimpuls der am Rohrende reflektierten Reaktionsfront und Schwaden in Abhängigkeit von der Zusammensetzung des Propan/Sauerstoff-Gemisches bei den mit einer Spirale ausgelegten Rohrleitungen DN 10 von 1000 mm Länge und DN 20 von 1750 mm Länge und den Anfangsbedingungen Atmosphärendruck und Raumtemperatur

Bei detonativ verlaufenden Reaktionen von Brenngas/Luft-Gemischen können diese extrem hohen Explosionsdrücke wegen der niedrigeren Detonationsgeschwindigkeit allerdings nicht erreicht werden.

Im Diagramm auf Bild 24 wird für Acetylen/Luft-Gemisch mit 9,5 % Volumenanteilen Acetylen und Atmosphärendruck ($p_a = 1,0$ bar) bei einer kritischen Rohrlänge L_{krit} von 130 Rohrinneindurchmessern ein statischer Vergleichsdruck von $p_{stat} = 300$ bar ($p'_{stat} = 150$ bar) angegeben ($p_{stat}/p_a = 300$).

Bei weiteren Versuchen im Rahmen der Untersuchungen zu [3] wurden bei Acetylen/Luft-Gemischen und den Bedingungen $p_a = 1,0$ bar, Rohrinneindurchmesser $d_i = 20$ mm und Reflexion einer instabilen Detonation unter extrem instationären Bedingungen nach der Berstscheibenverformungsmethode statische Vergleichsdrücke von maximal $p_{stat} = 480$ bar (entsprechend $p'_{stat} = 240$ bar nach der Rohrwandverformungsmethode) ermittelt ($p_{stat}/p_a = 480$). Bei Reflexion einer stabilen Detonation bei nahezu stationären

Bedingungen wurde gemäß Bild 20 in [3] bei den gleichen Bedingungen (Gasphase, Druck und Rohrdurchmesser) ein statischer Vergleichsdruck von $p_{stat} = 60$ bar ermittelt ($p_{stat}/p_a = 60$).

Inzwischen sind mit Acetylen/Luft- und Wasserstoff/Luft-Gemischen auch in Rohrleitungen mit 100 mm Innendurchmesser Versuche zur Bestimmung von Detonationsanlaufstrecken mit Hilfe des Berstscheibenverformungsverfahrens ausgeführt worden.

Bei einer Rohrlänge von $L = 6300$ mm und Acetylen/Luft-Gemisch von Atmosphärendruck und Raumtemperatur wurde am Endflansch aufgrund der Verformung der Al-Blechscheiben für den statischen Vergleichsdruck ein Wert von $p_{stat} = 500$ bar ermittelt ($p'_{stat} = 250$ bar). Bei diesem Versuch ist der Endflansch DN 100 PN 16 um mehrere Millimeter verwölbt worden, und das Rohr $\varnothing 108$ mm x 3,6 mm aus St 35.4 ist kurz vor der Schweißnaht am Vorschweißflansch um ca. 3 mm im Durchmesser aufgeweitet worden. Bei einer statischen Druckprobe mit dem gleichen Rohr wurde eine Aufweitung des Durchmessers um 3 mm bei einem Druck von $p'_{stat} = 210$ bar erreicht. Direkt an der Reflexionsstelle, an der die höchsten Drucksteigerungen bei Reflexion der Reaktionsfront und Schwaden auftreten, wird die Versteifung durch den Flansch wirksam. Die Dichtung der Flanschverbindung erfolgte mit Hilfe eines O-Ringes (keine Flachdichtung!), der in einer Nut im Blindflansch eingesetzt war.

In der **Tabelle 10** sind noch die Ergebnisse von Versuchen mit einer Reaktion von Brenngas/Sauerstoff-Gemisch der angegebenen Zusammensetzung bei dem angegebenen Anfangsdruck in 2000 mm bzw. 1700 mm langen, dünnwandigen Rohren aus St 35 NBK zusammengestellt. Wie bei den mit einem Zerfall von Hochdruck-Acetylen in dünnwandigen Rohren mit 20 mm Innendurchmesser ausgeführten Versuchen, so ist es auch hier wieder zusätzlich zu der allgemeinen Aufweitung des Rohres zu einer spiralförmig über die gesamte Rohrlänge verlaufenden Aufbeulung in der Rohrwand gekommen. Diese in Form einer Schraubenlinie verlaufende Aufbeulung in der Rohrwand

Tabelle 10: Verformung dünnwandiger Rohre aus St 35 NBK bei Versuchen mit einer Reaktion von Brenngas/Sauerstoff-Gemisch der angegebenen Zusammensetzung beim angegebenen Anfangsdruck

Ver-such Nr.	Außen-durch-messer d_a mm	Wand-dicke s mm	Rohr-länge L mm	Brenngas/Sauerstoff-Gemisch Anteil an Brenngas % Volumengehalt	Anfangs-druck p_a bar	Ergebnis
1	22	1	2000	25 % Propan	10,0	Rohrende abgerissen, sonst keine bleibenden Verformungen
2	22	0,5	2000	25 % Propan	9,0	Rohr am Rohrende über Länge von ca. 100 mm zerstört; Aufweitung $\varnothing 22 ? \varnothing 23,7$ und Spin ^{a)} mit 38 mm Steigung
3	22	0,5	1700	28 % Propan	9,8	Rohr am Rohrende über Länge von ca. 90 mm zerstört; Aufweitung $\varnothing 22 ? \varnothing 24,5$ und Spin ^{a)} mit 40 mm Steigung
4	22	0,5	2000	35 % Acetylen	9,0	Bis $L = 300$ mm Aufweitung $\varnothing 22 ? \varnothing 22,6$, dann zerstörtes Rohrteil, dann 1330 mm langes Rohrteil mit Aufweitung $\varnothing 22 ? \varnothing 23,5$ und Spin ^{a)} mit ca. 38 mm Steigung, Rohrende abgerissen, insgesamt waren etwa 370 mm Rohr zerstört

^{a)} Der allgemeinen Aufweitung des Rohres war eine über die gesamte Rohrlänge spiralförmig verlaufende zusätzliche Aufbeulung mit der angegebenen Steigung überlagert

muss auch hier wieder durch den Spin [13] bei einer detonativ verlaufenden Reaktion verursacht worden sein.

Beim Zerfall von Hochdruck-Acetylen mit Anlaufstrecken von 1,7 bis 2,0 m und einer Detonationsgeschwindigkeit von etwa 1900 m/s betrug die Steigung der spiralförmigen Aufbeulung 65 bis 70 mm, d. h. etwas mehr als drei Rohrinne Durchmesser. Bei der Reaktion von Propan/ bzw. Acetylen/Sauerstoff-Gemisch mit Anlaufstrecken von nur wenigen Zentimetern und einer Detonationsgeschwindigkeit von etwa 2600 m/s [14] betrug die Steigung der spiralförmigen Aufbeulung, d. h. die Steigung des Spins der Detonation, nur etwa 38 bis 40 mm, d. h. nur etwa zwei Rohrinne Durchmesser.

Bei den Rohrformteilen aus St 35 GBK ist es an dem allerdings nur 120 mm langen Teilstück Ø 21 mm x 0,5 mm nicht zu einer spiralförmig verlaufenden, zusätzlichen bleibenden Verformung in der Rohrwand durch den Spin gekommen.

Bei der statischen Druckprobe mit dem Rohrformteil Æ 21 mm x 0,5 mm aus St 35 GBK und mit dem Rohr Æ 22 mm x 0,5 mm aus St 35 NBK wurde ein unterschiedliches Verformungsverhalten der beiden Werkstoffe beobachtet. Beim Rohr Æ 21 mm x 0,5 mm aus St 35 GBK betrug das Verhältnis aus dem Berstdruck und dem Druck, bei dem die ersten bleibenden Verformungen aufgetreten sind, d. h. bei dem die Streckgrenze des Materials erreicht wird $p_{berst}/p_{streck} = 245/190 = 1,3$, beim Rohr Æ 22 mm x 0,5 mm aus St 35 NBK betrug dieses Verhältnis $p_{berst}/p_{streck} = 210/140 = 1,5$. Noch deutlicher erkennbar wird das unterschiedliche Verformungsverhalten der beiden Werkstoffe aber, wenn man die gesamte Aufweitung des Rohres bis zum Bersten vergleicht. Beim Rohr Æ 21 mm x 0,5 mm aus St 35 GBK wurde hier mit $D=1,6$ mm ein Wert von $Dd/d_a \times 100 = 7,6$ % ermittelt, beim Rohr Æ 22 mm x 0,5 mm aus St 35 NBK mit $Dd=6,5$ mm dagegen ein Wert von $Dd/d_a \times 100=29$ %. Diese erheblich größere Verformbarkeit des Materials führt offenbar dazu, dass beim Rohr Æ 22 mm x 0,5 mm aus St 35 NBK die Rohrwand auch noch durch den im Spin der Detonation auftretenden Druck bleibend verformt wird.

In der **Tabelle 11** ist noch für die Versuche mit den Rohren Ø 22 mm x 0,5 mm aus St 35 NBK – analog zu den Versuchen mit den Rohrformteilen auf Bild 22 – der auf-

grund einer gleichen Verformungsarbeit ermittelte Vergleichsdruck p'_{stat} für den Detonationsdruck sowie das Verhältnis von p'_{stat}/p_a (Anfangsdruck) angegeben. Bei statischer Belastung kommt es bei diesem Rohr bei einer Drucksteigerung von $p_a = 200$ bar auf $p_a = 210$ bar zu einer Aufweitung des Außendurchmessers von $d_a = 23,4$ mm auf $d_a = 28,5$ mm und dann zum Bruch des Rohres.

Kommt man bei der dynamischen Belastung durch die Reaktionsfront in diesen Bereich mit dem steilen Anstieg der Verformungskurve, dann kann der über die gleiche Verformungsarbeit nach der Rohrwandverformungsmethode bestimmte Detonationsdruck p'_{stat} nicht mehr für die Bemessung von detonationsgefährdeten Rohrleitungen genommen werden. Es wird dann ein zu kleiner Wert für den Detonationsdruck ermittelt, da unter diesen Bedingungen der Werkstoff bei der sehr kurzzeitigen dynamischen Belastung einen Teil der Belastung durch zusätzliche Verformung während der Belastungsdauer aufnehmen kann.

5.3.3 Versuche mit einer Reaktion von Acetylen/Luft-Gemisch in Rohrleitungen mit Querschnittserweiterungen

Analog zum Acetylenzerfall kommt es auch bei der Reaktion von Brenngas/Luft-Gemischen an Querschnittserweiterungen von Rohrleitungen mit 10 mm Innendurchmesser auf 20 mm Innendurchmesser zu einer Entkopplung von Stoßwelle und Reaktionsfront. Bei der Reaktion von Acetylen/Luft-Gemisch zum Beispiel (Brenngas/Luft-Gemisch mit dem kleinsten Detonationsgrenzdurchmesser und der kürzesten Detonationsanlaufstrecke) muss eine aus einer längeren Rohrleitung DN 10 einlaufende Detonation in der daran angeschlossenen Rohrleitung DN 20 erst wieder erneut zur Detonation anlaufen, wie die Diskussion der in dem Diagramm auf **Bild 27** zusammengestellten Versuchsergebnisse zeigt.

In diesem Diagramm ist der statische Vergleichsdruck für den Druckimpuls der am Ende einer Rohrleitung DN 20 reflektierten Reaktionsfront in Abhängigkeit von der Rohr-

Tabelle 11: Vergleichsdruck p'_{stat} für den Detonationsdruck und Verhältnis Vergleichsdruck p'_{stat} zu Anfangsdruck p_a ermittelt nach der Rohrwandverformungsmethode durch Versuche in Rohren Æ 22 x 0,5 mm aus St 35 NBK

Brenngas/ Sauerstoff- Gemisch	Anfangs- druck	Aufwei- tung von Ø 22 auf	Ver- gleichs- druck	Verhältnis
% Volumen- gehalt	p_a bar	d_a mm	p'_{stat} ^{a)} bar	p'_{stat}/p_a -
25 % Propan	9,0	23,7	200	22,2
28 % Propan	9,8	24,5	206	21,0
35 % Acetylen	9,0	23,5	200	22,2

a) Der hier mit Hilfe der Rohrwandverformungsmethode ermittelte Vergleichsdruck p'_{stat} ist zu klein, da man mit der dynamischen Belastung in den Bereich mit dem steilen Anstieg der Verformungskurve $Dd = f(p)$ kommt (siehe dazu im Text).

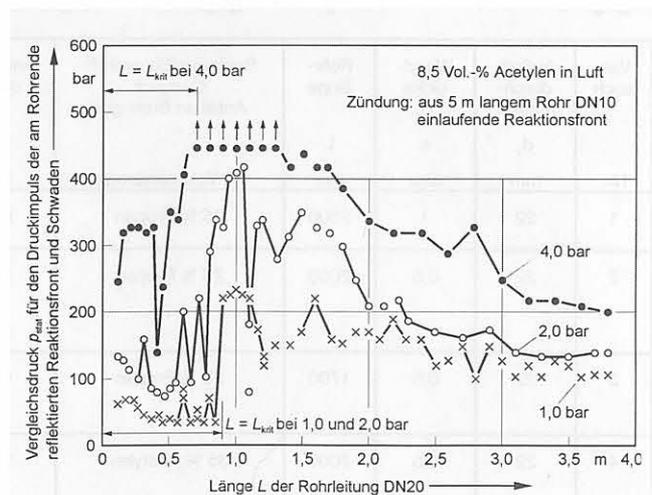


Bild 27: Vergleichsdruck p_{stat} für den Druckimpuls der am Rohrende reflektierten Reaktionsfront und Schwaden in Abhängigkeit von der Länge der Rohrleitung DN 20 beim Einlaufen einer Reaktionsfront aus einer vorgeschalteten 5 m langen Rohrleitung DN 10 bei den angegebenen Bedingungen

länge aufgetragen, wobei die Zündung des Gemisches am Anfang des Rohrteiles DN 20 durch eine aus einer 5 m langen Rohrleitung DN 10 als stabile Detonation bei nahezu stationären Bedingungen einlaufende Reaktionsfront erfolgt ist. Als reaktionsfähige Gasphase wurde Acetylen/Luft-Gemisch mit einem Volumengehalt an Acetylen von 8,5 % gewählt. Der Anfangsdruck betrug 1,0 bar, 2,0 bar und 4,0 bar. In der Rohrleitung DN 10 beträgt die kritische Rohrlänge (Detonationsanlaufstrecke $L_A = L_{krit}$ für $L/L_A = 1$) bei der gewählten Rohrgeometrie am Zündort gemäß Bild 11 in [3] bereits bei Atmosphärendruck nur $L_{krit} = 0,9$ m, d. h. nur etwa ein fünftel der Länge des Rohrteiles DN 10.

Würde die Reaktionsfront hinter der Querschnittserweiterung als eine Detonation weiterlaufen, dann würde sie nur noch durch Frischgas von unverändertem Anfangszustand laufen. Dann müsste bei allen Rohrlängen ein etwa gleichgroßer statischer Vergleichsdruck für den Druckimpuls der am Rohrende reflektierten Reaktionsfront und Schwaden gemessen werden.

Gemessen wurde aber ein verhältnismäßig niedriger statischer Vergleichsdruck bei kurzen Rohrlängen und ein Anstieg auf extrem hohe Werte für den statischen Vergleichsdruck nach einem Laufweg für die Reaktionsfront von etwa 0,9 m bei den Anfangsdrücken 1,0 bar und 2,0 bar und nach einem Laufweg von etwa 0,7 m bei dem Anfangsdruck von 4,0 bar.

Damit erhält man bei diesem Gemisch und dieser Art der Zündung des Gemisches am Anfang der Rohrleitung DN 20 eine kritische Rohrlänge L_{krit} , d. h. eine Detonationsanlaufstrecke $L_A = L_{krit}$ für $L/L_A = 1$ von etwa $L_{krit} = 0,9$ m bei den Anfangsdrücken 1,0 bar und 2,0 bar und von etwa $L_{krit} = 0,7$ m beim Anfangsdruck 4,0 bar.

Bei thermischer Zündung durch Durchschmelzen eines Metalldrahtes am Anfang einer Rohrleitung DN 20 mit einer Blende $\varnothing 10$ mm etwa 50 mm hinter dem Zündort als Turbulenzpromotor wurde beim gleichen Gemisch und den Anfangsdrücken 1,0 bar und 2,0 bar nach Bild 19 in [3] eine kritische Rohrlänge von $L_{krit} = 1,1$ m bzw. 1,0 m, d. h. eine nahezu gleichgroße Detonationsanlaufstrecke ermittelt. Durch die Blende $\varnothing 10$ mm etwa 50 mm hinter dem Zündort und die dadurch bewirkte zusätzliche Turbulenz im Frischgas vor der Reaktionsfront wird bei einer Rohrleitung DN 20 der Detonationsanlaufvorgang offenbar etwa in der gleichen Weise beschleunigt wie durch die vorlaufende Stoßwelle bei Einlaufen einer Detonation aus einer vorgeschalteten Rohrleitung DN 10. In einer glatten Rohrleitung ohne Turbulenzpromotoren ist die Detonationsanlaufstrecke etwa doppelt so lang (Vergleiche die Bilder 18 und 19 in [3]).

Weiterhin fällt noch auf, dass bei den Versuchen zu Bild 27 der statische Vergleichsdruck für den Druckimpuls bei Rohrlängen $L_1 < L_{krit}$, d. h. bei der Reflexion der Front und Schwaden einer erst wieder anlaufenden Detonation mit Zunahme des Anfangsdruckes sogar größer wird als bei großen Rohrlängen $L_1 \gg L_{krit}$, d. h. bei der Reflexion der Front und der Schwaden einer stabilen Detonation bei dann bereits nahezu stationären Bedingungen. Beim Zerfall von Hochdruck-Acetylen mit noch wesentlich höheren Anfangsdrücken ist bei Reflexion der Front und Schwaden einer erst anlaufenden Detonation bei den gewählten Rohrlängen L_1 mit $L_1 < L_{krit}$ aber $> L_{krit}/2$ eine wesentlich höhere Beanspruchung des Rohrendes aufgetreten als bei der Reflexion der Front und Schwaden einer bereits angelau-

fenen Detonation bei Rohrlängen $L_1 > L_A$, wie z. B. auch die auf dem Bild 9 dokumentierten Versuchsergebnisse zeigen (weitere Ergebnisse siehe [1]).

5.4 Ermittlung des Explosionsdruckes durch eine Druckmessung

Bei den gleichen Bedingungen, bei denen mit Hilfe der verformten Bauteile die statischen Vergleichsdrücke ermittelt worden sind, ist mit Hilfe eines Quarzkristalldruckaufnehmers und eines Speicheroszillographen auch der zeitliche Verlauf des Explosionsdruckes gemessen worden. Eingesetzt wurden ein Piezo-Druckaufnehmer Typ 6201B, ein Verstärker Typ 5007 und ein 68 KHz Filter von der Firma Kistler sowie ein Oszilloskop Typ VC 6041 von der Firma Hitachi.

Auf dem Bild 28 ist beispielhaft die Druckaufzeichnung wiedergegeben, die bei einem Versuch ermittelt worden ist, bei dem eine stabile Detonation unter nahezu stationären Bedingungen in Acetylen/Sauerstoff-Gemisch von 7,1 bar Anfangsdruck mit 50 % Volumenanteilen Acetylen durch eine Rohrleitung mit 20 mm Innendurchmesser gelaufen ist. Mit dem gemessenen maximalen Explosionsdruck ergibt sich eine Drucksteigerung von $p_{max}/p_a = 250$ bar/7,1 bar = 36. Es ergibt sich ein etwa gleichgroßer Wert für die Drucksteigerung wie unter den gleichen Bedingungen nach der Rohrwandverformungsmethode ermittelt worden ist (siehe Bild 22 bei 50 % Acetylen: $p_{det}/p_a = 35$).

Auf dem Bild 29 (Seite 32) sind beispielhaft zwei Druckaufzeichnungen wiedergegeben, die bei einem Versuch ermittelt worden sind, bei dem eine stabile Detonation unter nahezu stationären Bedingungen in Acetylen/Sauerstoff-Gemisch von 4,3 bar Anfangsdruck mit 50 % Volumenanteilen Acetylen a) durch eine Rohrleitung mit 20 mm Innendurchmesser gelaufen ist und b) am Rohrende der gleichen Rohrleitung reflektiert worden ist. Im Fall a) ergibt sich mit einem maximalen Explosionsdruck von $p_{max} = 160$ bar wieder eine etwa gleich große Drucksteigerung wie oben für den gleichen Belastungsfall von $p_{max}/p_a = 37$. Im Fall b) ergibt sich eine Drucksteigerung von $p_{max}/p_a = 84$. Hier ergibt sich ein bereits deutlich höherer Wert als bei den gleichen Bedingungen nach der Rohrwandverformungsmethode ermittelt worden ist (siehe wieder Bild 22 bei 50 % Acetylen: $p_{det}/p_a = 56$).

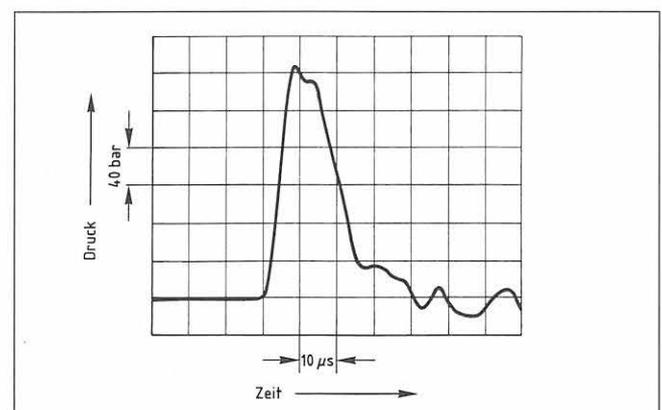


Bild 28: Explosionsdruck in Abhängigkeit von der Zeit beim Durchlaufen einer stabilen Detonation in Acetylen/Sauerstoff-Gemisch von 7,1 bar Anfangsdruck mit 50 % Volumenanteilen Acetylen in einer Rohrleitung mit 20 mm Innendurchmesser

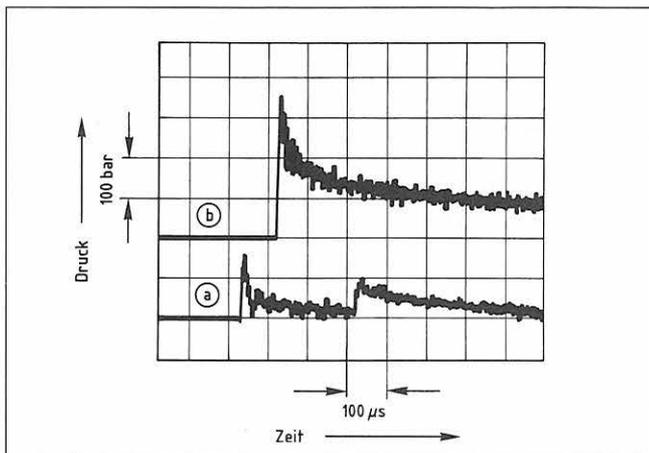


Bild 29: Explosionsdruck in Abhängigkeit von der Zeit a) beim Durchlaufen und b) bei der Reflexion einer stabilen Detonation in Acetylen/Sauerstoff-Gemisch von 4,3 bar Anfangsdruck mit 50% Volumanteilen Acetylen in einer Rohrleitung mit 20 mm Innendurchmesser

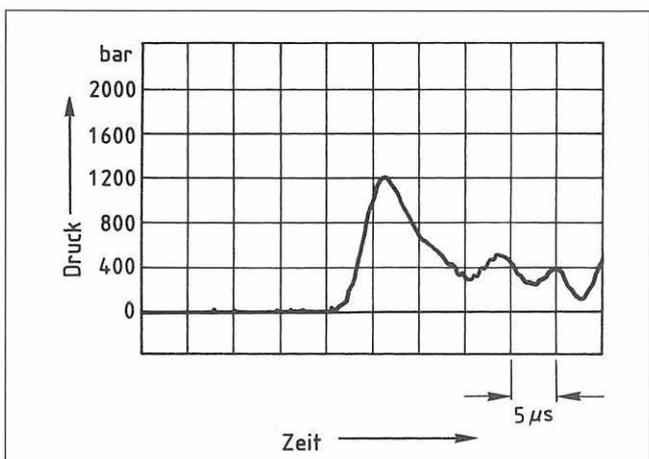


Bild 30: Explosionsdruck in Abhängigkeit von der Zeit bei Reflexion einer instabilen Detonation bei den extrem instationären Bedingungen bei $L = L_{krit}$ Propan/Sauerstoff-Gemisch von 1 bar Anfangsdruck mit 33% Volumenanteilen Propan am Ende einer 2 m langen Rohrleitung mit 20 mm Innendurchmesser

Auf dem **Bild 30** schließlich ist noch die Druckaufzeichnung wiedergegeben, die bei einem Versuch ermittelt worden ist, bei dem eine instabile Detonation unter den extrem instationären Bedingungen bei $L = L_{krit}$ in Propan/Sauerstoff-Gemisch von einem bar Anfangsdruck mit 33 % Volumenanteilen Propan am Ende einer 2 m langen Rohrleitung mit 20 mm Innendurchmesser reflektiert worden ist. Mit dem gemessenen maximalen Explosionsdruck ergibt sich eine Drucksteigerung von $p_{max}/p_a = 1200$. Nach der Rohrwandverformungsmethode wurde bei den gleichen Anfangsbedingungen nur eine Drucksteigerung von $p'_{stat}/p_a = 420$, nach der Berstscheibenverformungsmethode eine Drucksteigerung von $p_{stat}/p_a = 870$ ermittelt (siehe dazu Angaben in Tabelle 9).

Der Vergleich der Ergebnisse zeigt, dass zumindest bei Rohrleitungen mit 20 mm Innendurchmesser gilt:

a) Beim Durchlaufen einer Detonation unter nahezu stationären Bedingungen (Belastungsfall 1) ist der nach der Rohrwandverformungsmethode bestimmte statische Vergleichsdruck p'_{stat} etwa genauso groß wie der bei der Druckmessung bestimmte maximale Explosionsdruck p_{max} .

b) Bei Reflexion einer Detonation unter nahezu stationären Bedingungen (Belastungsfall 4) ist der nach der Rohrwandverformungsmethode bestimmte statische Vergleichsdruck p'_{stat} bereits merklich kleiner als der bei der Druckmessung bestimmte maximale Explosionsdruck p_{max} .

c) Bei Reflexion einer Detonation unter extrem instationären Bedingungen (Belastungsfall 6) ist der nach der Rohrwandverformungsmethode bestimmte statische Vergleichsdruck p'_{stat} nur noch etwa ein Drittel so groß wie der bei der Druckmessung bestimmte maximale Explosionsdruck p_{max} .

Durch die Ergebnisse der ausgeführten Versuche [3] kann für Rohrleitungen mit 20 mm Innendurchmesser der für die Bemessung relevante statische Vergleichsdruck $p'_{stat} = 0,5 \times p_{stat}$ für verschiedene Gasphasen und die einzelnen Belastungsfälle bei detonativ verlaufenden Gasreaktionen angegeben werden. Damit wird es möglich, Rohrleitungen DN 20 auf ausreichende Festigkeit bei der Beanspruchung durch detonativ verlaufende Gasreaktionen zu bemessen. Bei größeren Rohrdurchmessern muss dann aber noch berücksichtigt werden, dass die Beanspruchung einer Rohrleitung durch detonativ verlaufende Gasreaktionen mit Zunahme des Durchmessers zunimmt. Bei Versuchen mit einem detonativen Acetylenzerfall wurde zum Beispiel ermittelt, dass bei einer Rohrleitung DN 450 mit 437 mm Innendurchmesser die Beanspruchung der Rohrwand am Umschlagpunkt nahezu doppelt so hoch ist wie bei einer Rohrleitung DN 20 mit nur 20 mm Innendurchmesser (siehe Tabelle 2).

In [15] werden für die bei Detonationen in Wasserstoff/Sauerstoff-Gemischen gemessenen maximalen Explosionsdrücke bei Rohrleitungen mit 100 mm Innendurchmesser etwa 30 % höhere Werte angegeben als bei Rohrleitungen mit nur 15 mm Innendurchmesser.

Durch die im folgenden Abschnitt beschriebenen Untersuchungen ist versucht worden, diese Abhängigkeit der Beanspruchung einer Rohrleitung vom Rohrdurchmesser genauer zu ermitteln.

5.5 Einfluss des Durchmessers auf die Beanspruchung der Rohrleitung

Aus Kostengründen konnten bei den größeren Nennweiten bisher leider noch keine Versuchsserien ausgeführt werden, bei denen die Beanspruchung der Rohrleitung mit Hilfe der Rohrwandverformungsmethode ermittelt worden ist.

Es sind daher nur Versuche ausgeführt worden, bei denen mit Hilfe einer Druckmessung der maximale Explosionsdruck p_{max} bestimmt worden ist. Wie aber bei dem Vergleich zwischen den bei der Druckmessung ermittelten maximalen Explosionsdrücken und den nach der Rohrwandverformungsmethode ermittelten statischen Vergleichsdrücken gezeigt werden konnte, kann beim Belastungsfall 1, d. h. beim Durchlaufen einer Detonation unter nahezu stationären Bedingungen, der mit Hilfe der Druckmessung bestimmte maximale Explosionsdruck trotz seiner relativ kurzen Dauer bereits nahezu vollständig in Verformungsarbeit umgesetzt werden. Für diesen Belastungsfall kann daher auch der durch die Druckmessung ermittelte maximale Explosionsdruck für die Bemessung der Rohrleitung herangezogen werden. Bei den anderen

Belastungsfällen dagegen braucht – zumindest bei Rohrleitungen mit Innendurchmessern bis 20 mm – nur ein Teil des durch die Druckmessung ermittelten maximalen Explosionsdruckes für die Bemessung der Rohrleitung herangezogen zu werden.

Hier kann der mit Hilfe der Druckmessung bestimmte maximale Explosionsdruck nur zu einem Teil in Verformungsarbeit umgesetzt werden.

Der für die Versuche gewählte Versuchsaufbau ist auf dem **Bild 31** skizziert. Es wurden etwa 6 m lange Rohrleitungen mit 50, 100 und 200 mm Innendurchmesser eingesetzt. Die jeweilige Rohrleitung wurde evakuiert und anschließend mit dem vorbereiteten Gemisch aus einem Mischgefäß bis zum Anfangsdruck von 1,0 bar gefüllt.

Die Zündung des Gemisches erfolgte an einem Ende der Rohrleitung durch Durchschmelzen eines Metalldrahtes. Etwa ein Meter vor dem anderen Rohrende ist der beim Durchlaufen der Reaktionsfront am Druckaufnehmer auftretende Druck gemessen und mit Hilfe des Speicheroszillographen registriert worden. Mit der Rohrleitung DN 100 ist dann auch noch eine Versuchsserie ausgeführt worden, bei der am Rohrende der bei Reflexion der Reaktionsfront auftretende Druck registriert worden ist.

Als reaktionsfähige Gasphase wurde wieder Acetylen/Sauerstoff-Gemisch gewählt. Acetylen/Sauerstoff-Gemische haben über einen relativ großen Bereich von Gemischzusammensetzungen eine sehr kurze Detonationsanlaufstrecke. Dies bedeutet praktisch, dass auch bei den gewählten, noch relativ kurzen Rohrlängen am Messort doch die Belastungsfälle „Beanspruchung der Rohrleitung und des Rohrendes durch eine stabile Detonation unter nahezu stationären Bedingungen“, d. h. die Belastungsfälle 1 und 4 über einen relativ großen Bereich von Gemischzusammensetzungen realisiert werden konnten.

In den beiden Diagrammen auf den **Bildern 32 und 33** sind die Ergebnisse der Versuche zusammengestellt. Aufgetragen ist der am jeweiligen Messort vom Druckaufnehmer gemessene maximale Explosionsdruck in Abhängigkeit von der Zusammensetzung des Acetylen/Sauerstoff-Gemisches.

Auf dem Bild 32 ist der beim Durchlaufen einer Detonation am Messort registrierte maximale Explosionsdruck angegeben. Für die Rohrleitung mit 20 mm Innendurchmesser ist der nach der Rohrwandverformungsmethode ermittelte, auf den Anfangsdruck p_a bezogene statische Vergleichsdruck p'_{stat} und beim Gemisch mit 50 % Volumen-

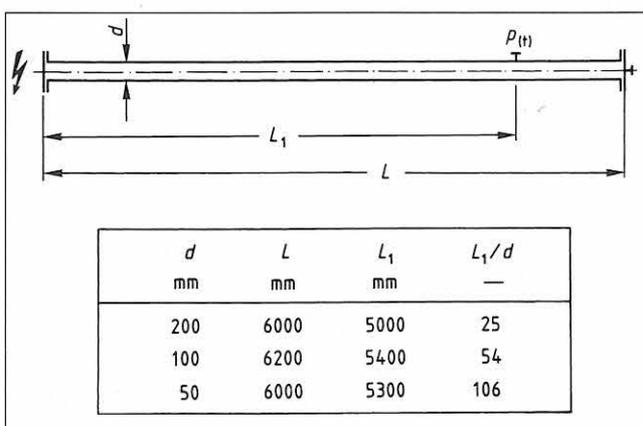


Bild 31: Versuchsaufbau

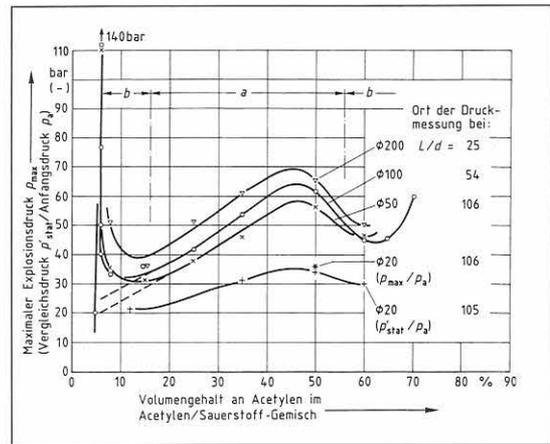


Bild 32: Maximaler Explosionsdruck in Abhängigkeit von der Gemischzusammensetzung beim Durchlaufen der Reaktionsfront am Messort; a) als stabile Detonation bei nahezu stationären Bedingungen, b) als stabile bzw. instabile Detonation bei instationären Bedingungen

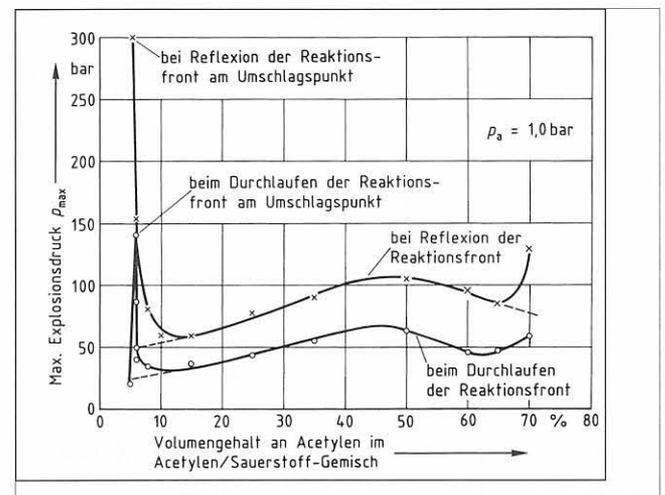


Bild 33: Maximaler Explosionsdruck in Abhängigkeit von der Gemischzusammensetzung beim Durchlaufen und bei der Reflexion der Reaktionsfront

anteilen Acetylen ist auch der bei der Druckmessung ermittelte, auf den Anfangsdruck p_a bezogene maximale Explosionsdruck p_{max} mit eingetragen.

Bei den Rohrleitungen DN 50 und DN 100 ist bei unterstöchiometrischem Gemisch auch der am Umschlagspunkt zur Detonation beim Durchlaufen der Reaktionsfront auftretende maximale Explosionsdruck ermittelt worden. Bei der Rohrleitung DN 100 mussten vier Versuche mit dem entsprechenden Gemisch ausgeführt werden, bevor der Druckgeber zufällig genau am Ort des Umschlagspunktes plaziert war und dadurch der am Umschlagspunkt zur Detonation auftretende Druck registriert werden konnte.

Bei der Rohrleitung DN 50 dagegen konnte der am Umschlagspunkt auftretende maximale Explosionsdruck zufällig bereits beim ersten Versuch mit dem entsprechenden Gemisch ermittelt werden.

Wie bei der Reflexion am Rohrende – und hier insbesondere bei der Reflexion einer instabilen Detonation unter extrem instationären Bedingungen –, so kann auch am Umschlagspunkt zur Detonation der an dieser Stelle gemessene maximale Explosionsdruck nicht vollständig, sondern nur zu einem Teil, in Verformungsarbeit umgesetzt

werden. Nach allen bisher gemachten Erfahrungen ist die Beanspruchung der Rohrleitung bei der Belastung durch eine instabile Detonation bei den extrem instationären Bedingungen am Umschlagspunkt maximal doppelt so hoch wie bei der Belastung durch eine stabile Detonation bei stationären Bedingungen.

Für ein Gemisch mit ca. 6 % Volumenanteilen Acetylen ergibt die Extrapolation der Kurve für die Beanspruchung der Rohrleitung durch eine stabile Detonation (Bereich a im Diagramm) bei der Rohrleitung DN 50 einen maximalen Explosionsdruck von 20 bar (der dem statischen Vergleichsdruck p'_{stat} für die Bemessung bei diesem Belastungsfall etwa gleichgesetzt werden kann) und bei der Rohrleitung DN 100 von 25 bar, so dass am Umschlagspunkt bei der Rohrleitung DN 50 dem gemessenen maximalen Explosionsdruck von 110 bar ein statischer Vergleichsdruck (Bemessungsdruck) p'_{stat} von maximal $2 \times 20 \text{ bar} = 40 \text{ bar}$ und bei der Rohrleitung DN 100 dem gemessenen maximalen Explosionsdruck von 140 bar ein statischer Vergleichsdruck p'_{stat} von maximal $2 \times 25 \text{ bar} = 50 \text{ bar}$ gleichzusetzen ist.

Auf dem Bild 33 sind die bei den Versuchen mit der Rohrleitung DN 100 ermittelten maximalen Explosionsdrücke zusammengestellt, die beim Durchlaufen der Reaktionsfront an der Rohrwand bzw. bei Reflexion der Reaktionsfront am Rohrende gemessen worden sind.

Würde man beim Volumengehalt von 5,5 % Acetylen den kritischen Fall „Rohrlänge $L =$ kritische Rohrlänge $L_{krit} =$ Detonationsanlaufstrecke L_A mit $L/L_A = 1$ “, d. h. den Belastungsfall 6 noch genauer treffen, d. h. würde man noch mehr Versuche bei diesen Randbedingungen aufführen, dann könnte man wahrscheinlich auch noch um 100 bis 150 bar höhere, maximale Explosionsdrücke messen.

Extrapoliert man die Kurve für den maximalen Explosionsdruck bei Reflexion einer stabilen Detonation unter stationären Bedingungen bis zu einem Volumengehalt von 5,5 % Acetylen, dann kommt man für diesen Belastungsfall auf einen maximalen Explosionsdruck von etwa 50 bar. Diesem maximalen Explosionsdruck könnte nach den Ergebnissen der Versuche mit einer Verformung von Rohrteilen an Rohrleitungen DN 20 ein statischer Vergleichsdruck als Bemessungsdruck von etwa $p'_{stat} = 1,6 \times 25 \text{ bar} = 40 \text{ bar}$ entsprechen (berechnet mit $p'_{stat} = 25 \text{ bar}$ für den Belastungsfall 1 bei den Bedingungen Rohrleitung DN 100 und 5,5 % Volumenanteile Acetylen im Gemisch und ein Faktor von 1,6 für das Verhältnis der Rohrwandbeanspruchung bei den Belastungsfällen 4 und 1 (nach Bild 22 für Rohrleitungen DN 20). Da nach den bei den Untersuchungen über das Anlaufen von Detonationen in [3] gemachten Erfahrungen bei Rohrlängen von 60 Rohrdurchmesser (6 m Rohr DN 100) und dem kritischen Fall der Reflexion einer instabilen Detonation unter extrem instationären Bedingungen ($L = L_{krit}$) mit einer mindestens 5fach höheren Belastung der Rohrleitung am Rohrende gerechnet werden muss als bei der Reflexion einer stabilen Detonation unter nahezu stationären Bedingungen ($L \gg L_{krit}$), würde sich beim Belastungsfall 6 ein statischer Vergleichsdruck für die Bemessung des Rohrendes von $p'_{stat} = 5 \times 40 \text{ bar} = 200 \text{ bar}$ oder mehr ergeben. Bei dieser Belastung würde es an der eingesetzten Versuchsrohrleitung DN 100 aus Rohr $\varnothing 108 \text{ mm} \times 3,6 \text{ mm}$ mit dem Werkstoff St 35.4 am Rohrende wahrscheinlich bereits zu bleibenden Verformungen der Rohrwand kommen. Deshalb ist

auch bei unterstöchiometrischen Gemischen darauf verzichtet worden, den beim kritischen Fall $L = L_{krit}$ (Belastungsfall 6) maximal möglichen Explosionsdruck noch genauer zu ermitteln. Siehe dazu auch die Ergebnisse von Versuchen mit Acetylen/Luft-Gemisch in Rohren DN 100 (Abschnitt 5.3.2).

Hier wurde beim Belastungsfall 6 mit $L = L_{krit}$ das Rohr $\varnothing 108 \text{ mm} \times 3,6 \text{ mm}$ aus St 35.4 am Rohrende von $d_a = 108 \text{ mm}$ auf $d_a = 111 \text{ mm}$ aufgeweitet.

Bei überstöchiometrischem Acetylen/Sauerstoff-Gemisch und dem kritischen Fall $L = L_{krit}$ würde sich aufgrund der oberen Kurve $p_{max} = f(\text{Gemischzusammensetzung})$ auf Bild 33 ein um den Faktor $80 \text{ bar}/50 \text{ bar} = 1,6$ höherer statischer Vergleichsdruck, d. h. ein für die Belastung des Rohrendes äquivalenter statischer Vergleichsdruck p'_{stat} von mehr als $1,6 \times 200 \text{ bar} = 320 \text{ bar}$ ergeben. Bei einer derartigen Belastung würde bei einer Rohrleitung DN 100 aus Rohr $\varnothing 108 \text{ mm} \times 3,6 \text{ mm}$ aus St 35.4 am Rohrende die Flanschverbindung aus dem Blindflansch und dem Vorschweißflansch bereits vom Rohrende abgerissen werden. Deshalb musste bei überstöchiometrischen Gemischen auf derartige Versuche zunächst ganz verzichtet werden (im wesentlichen aus Kostengründen).

Bei den Belastungsfällen 1 und 4 (stabile Detonation bei stationären Bedingungen) wurden die höchsten maximalen Explosionsdrücke etwa beim Gemisch mit der größten Detonationsgeschwindigkeit gemessen. Auf dem Bild 34 ist für Acetylen/Sauerstoff-Gemische die Abhängigkeit der Detonationsgeschwindigkeit von der Gemischzusammensetzung dargestellt (Bild 292 in [14]). Der Anstieg der Detonationsgeschwindigkeit bei hohen Volumenanteilen an Acetylen ist wahrscheinlich darauf zurückzuführen, dass bei diesen Bedingungen die Messstrecke zur Ermittlung der Detonationsgeschwindigkeit in einem Bereich lag, in dem noch keine stationären Bedingungen vorlagen. Bekanntlich werden kurz hinter dem Umschlagspunkt zur Detonation höhere Detonationsgeschwindigkeiten gemessen als bei einer stabilen Detonation bei stationären Bedingungen. Die Detonationsgeschwindigkeit beim Zerfall von reinem Acetylen liegt nach eigenen Messungen bei etwa 1900 m/s.

In dem Diagramm auf Bild 35 schließlich ist die aus den Ergebnissen der Versuche resultierende Abhängigkeit des auf den Anfangsdruck bezogenen maximalen Explosionsdruckes vom Rohrdurchmesser angegeben, und zwar für den Fall der Belastung des Druckaufnehmers beim Durchlaufen einer stabilen Detonation unter nahezu stationären Bedingungen. Parameter ist die bei den Versuchen gewählte Gemischzusammensetzung.

In das Diagramm sind strichliert die bei Versuchen mit einem detonativen Acetylenzerfall nach der Rohrwandverformungsmethode ermittelten, auf den Anfangsdruck bezogenen statischen Vergleichsdrücke p'_{stat}/p_a mit eingetragen.

Kurve 1) gilt, wie die Kurven für die Acetylen/Sauerstoff-Gemische, für den Fall der Belastung der Rohrwand beim Durchlaufen einer stabilen Detonation unter nahezu stationären Bedingungen. Kurve 2) für den Fall der Belastung der Rohrwand beim Durchlaufen einer instabilen Detonation unter den extrem instationären Bedingungen am Umschlagspunkt zur Detonation (wahrscheinlich ergibt sich hier beim Acetylenzerfall und dem Belastungsfall 3 eine ähnliche Abhängigkeit vom Durchmesser wie bei der Kurve für Acetylen/Sauerstoff-Gemisch mit 35 % Volumen-

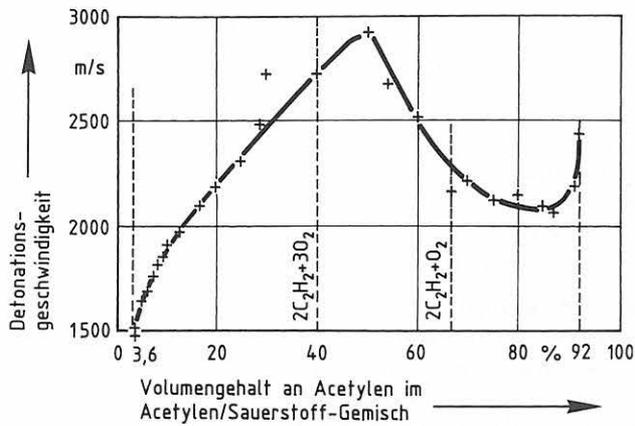


Bild 34: Detonationsgeschwindigkeit von Acetylen/Sauerstoff-Gemischen (Bild 292 in [14])

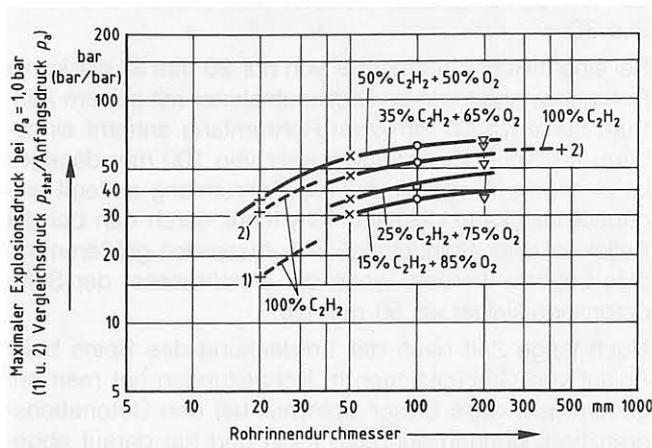


Bild 35: Maximaler Explosionsdruck in Abhängigkeit vom Rohrdurchmesser für die angegebenen Acetylen/Sauerstoff-Gemische beim Durchlaufen einer stabilen Detonation unter nahezu stationären Bedingungen

anteilen Acetylen bei dem Belastungsfall 1, d. h. beim Durchlaufen einer stabilen Detonation unter nahezu stationären Bedingungen).

Für die Dimensionierung detonationsgefährdeter Acetylenrohrleitungen müssen mindestens die in der Kurve 2) angegebenen, auf den Anfangsdruck bezogenen, statischen Vergleichsdrücke für die am Umschlagspunkt zur Detonation auftretende Belastung der Rohrleitung herangezogen werden. Bei einer derart dimensionierten Rohrleitung ist auch ein verschlossenes Rohrende bei der Belastung durch eine stabile Detonation unter stationären Bedingungen ($L \gg L_{krit}$) noch ausreichend fest dimensioniert, bei der Belastung durch eine bereits stabile bzw. noch instabile Detonation unter instationären Bedingungen ($L \approx L_{krit}$) ist es nicht mehr ausreichend fest dimensioniert.

Wie bereits am Ende von Abschnitt 5.4 festgestellt worden ist, kann bei Rohrleitungen bis zu 20 mm Innendurchmesser nur beim Belastungsfall 1 „Durchlaufen einer stabilen Detonation unter nahezu stationären Bedingungen“ der bei der Druckmessung ermittelte maximale Explosionsdruck auch für die Bemessung herangezogen werden. Für diesen Belastungsfall ist durch die Versuche in den Rohrleitungen mit 20, 50, 100 und 200 mm Innendurchmesser die Abhängigkeit des maximalen Explosionsdruckes vom Rohrdurchmesser ermittelt worden. Damit kann dann auch für Rohrleitungen mit größeren Durchmessern die bei den verschiedenen Belastungsfällen auftretende Be-

anspruchung der Rohrleitung mit Hilfe der bekannten Daten aus [3] für Rohrleitungen mit 20 mm Durchmesser zumindest abgeschätzt werden.

Bei größeren Rohrdurchmessern scheint aber auch beim Belastungsfall 4 „Reflexion einer stabilen Detonation unter nahezu stationären Bedingungen“ der durch die Druckmessung ermittelte maximale Explosionsdruck doch etwa dem mit Hilfe der Rohrwandverformungsmethode ermittelten statischen Vergleichsdruck für die Bemessung gleichgesetzt werden zu können. Hier ist analog zu den für die Rohrleitung DN 20 mit Hilfe der Rohrwandverformungsmethode ermittelten Explosionsdrücken auch der mit Hilfe der Druckmessung ermittelte maximale Explosionsdruck beim Belastungsfall 4 nur etwa 1,6 mal so groß wie beim Belastungsfall 1. Eine solche Möglichkeit der Gleichsetzung des bei der Druckmessung ermittelten maximalen Explosionsdruckes mit dem nach der Rohrwandverformungsmethode ermittelten Explosionsdruck müsste aber durch weitere Versuche mit einer Verformung der Rohrenden an Rohrleitungen mit größerem Durchmesser – wenn dazu die erforderlichen Sachmittel zur Verfügung gestellt werden können – noch bestätigt werden.

Bei kleinen Rohrdurchmessern wird bei der Druckmessung möglicherweise deshalb ein wesentlich höherer Wert für den maximalen Explosionsdruck p_{max} gemessen, weil hier der Druckaufnehmer am Rohrende nicht nur durch den bei der Reflexion der Reaktionsfront und Schwaden auftretenden Impuls sondern auch noch durch den bei der Reflexion des Spins der Detonation und seiner Schwaden auftretenden Impuls belastet wird.

Bei einem Rohrdurchmesser von nur 20 mm ist ein in der Rohrachse angeordneter Druckaufnehmer mit seinem Zentrum nur 10 mm vom Rohrfumfang entfernt, bei einem Rohrdurchmesser von 100 mm dagegen ist er schon 50 mm vom Rohrfumfang entfernt und kann deshalb evtl. auch nicht mehr durch den bei der Reflexion eines Spins und seiner Schwaden auftretenden Impuls belastet werden.

Auch beim Belastungsfall 1, d. h. beim Durchlaufen einer stabilen Detonation bei stationären Bedingungen, muss bei der Druckmessung ein wesentlich höherer Wert für den maximalen Explosionsdruck p_{max} gemessen werden, wenn der Druckaufnehmer zufällig an einem Ort eingebaut ist, an dem er zusätzlich noch durch den Spin belastet wird, d. h. wenn der Ort der Druckmessung zufällig auf der Spur für den Spin am Rohrfumfang liegt.

Mit Abnahme des Rohrdurchmessers nimmt die Wahrscheinlichkeit zu, dass der Druckaufnehmer zufällig an einem solchen Ort in die Rohrleitung eingebaut ist.

5.6 Zum Spin bei detonativ verlaufenden Gasreaktionen in Rohrleitungen

5.6.1 Zusammenstellung von Beobachtungen über den Spin

Etwa 50 Jahre nachdem man entdeckt hatte, dass es beim Ablauf von Gasreaktionen in Rohrleitungen bei bestimmten Randbedingungen zu einem detonativen Verlauf der Reaktion kommen kann, wurde auch entdeckt, dass die Detonation bei den Detonationsgrenzbedingungen für die Gasphase nur noch als eine sogenannte Spindetonation laufen kann [16].

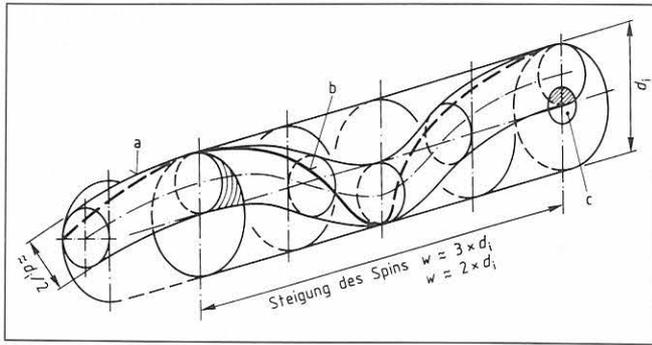


Bild 36: Skizze mit einem Ausschnitt von der Aufnahme einer Spindetonation bei der Reaktion von Acetylen/Sauerstoff/Argon/Stickstoff-Gemisch an der Detonationsgrenze in einer Rohrleitung mit 25 mm Innendurchmesser nach Bild 9-2 in [17]

- a) Spindetonation mit Steigung $w = 3 \times d_i$
 b) spiralförmig verlaufende Aufbeulung der Rohrwand durch die Spindetonation, zusätzlich zur Aufweitung der Rohrwand durch die eigentliche Detonation
 1) beim Zerfall von Hochdruck-Acetylen mit $w = 3 \times d_i$ ($d_i = 20$ mm)
 2) bei der Reaktion von Acetylen/Sauerstoff- bzw. Propan/ Sauerstoff-Gemisch mit $w = 2 \times d_i$ ($d_i = 21$ mm)
 c) Messung des Explosionsdruckes mit einem axial am Rohrende angeordneten Druckgeber

Auf den mit Hilfe einer Drehtrommelkamera aufgezeichneten Weg/Zeit-Kurven von der Fortpflanzung der Flammenfront in Glas- bzw. Quarzglasrohren wird bei einer stabilen Detonation unter nahezu stationären Bedingungen die Flammenfront als eine gerade Linie mit konstanter Steigung abgebildet. Bei einer Spindetonation an den Detonationsgrenzen dagegen wird die Flammenfront als eine gewellte Linie mit einer im Mittel konstanten Steigung abgebildet [14].

Auf den in der Literatur gezeigten Einzelbildaufnahmen vom Ablauf der Reaktion in den Glas- bzw. Quarzglasrohren erkennt man, dass die Reaktion bei einer solchen Spindetonation nur in einer spiralförmig verlaufenden Röhre detonativ verläuft. Bei den früher üblicherweise eingesetzten Rohren mit 15 bis 25 mm Durchmesser hat diese an der Rohrwand anliegende, spiralförmig verlaufende Röhre einen Durchmesser von etwa dem halben Rohrdurchmesser.

Auf dem **Bild 36** ist ein Ausschnitt von der Aufnahme einer solchen Spindetonation bei der Reaktion von Acetylen/Sauerstoff/Argon-Gemisch an der Detonationsgrenze in einem Rohr mit 25 mm Innendurchmesser skizziert (Skizze von Bild 9-2 in [17]). Die Steigung des Spins beträgt hier etwa $w = 3 \times$ Rohrrinnendurchmesser.

Auf der Linie b, an der die hier dargestellte, bei den Detonationsgrenzbedingungen fotografierte Spindetonation die Rohrwand berührt, ist bei den oben beschriebenen Untersuchungen mit einem Zerfall von Hochdruck-Acetylen und einer Reaktion von Propan/ und Acetylen/Sauerstoff-Gemisch in Stahlrohren mit 20 bzw. 21 mm Innendurchmesser wahrscheinlich die an der Rohrwand beobachtete, spiralförmig verlaufende zusätzliche Verformung aufgetreten.

An der Stelle c ist noch ein axial am Ende einer Rohrleitung angeordneter Druckgeber skizziert.

Wie oben im Abschnitt 5.4 berichtet, wurde bei Versuchen mit Acetylen/Sauerstoff-Gemisch mit 50 % Volumenanteilen Acetylen und 4,3 bar Anfangsdruck in einer Rohrleitung DN 20 an der Rohrwand beim Vorbeilaufen der Detonationsfront ein max. Explosionsdruck von $p_{\max} = 155$

bar ($36 \times p_a$) und am Rohrende bei Reflexion der Detonationsfront ein max. Explosionsdruck von $p_{\max,r} = 360$ bar = $2,3 \times p_{\max}$ gemessen.

Bei Versuchen mit dem gleichen Gemisch und 1,0 bar Anfangsdruck in einer Rohrleitung DN 100 (siehe Abschnitt 5.5) wurde an der Rohrwand beim Vorbeilaufen der Detonationsfront ein max. Explosionsdruck von $p_{\max} = 65$ bar ($65 \times p_a$), bei der Reflexion am Rohrende aber nur ein $p_{\max,r}$ von 105 bar = $1,6 \times p_{\max}$ gemessen.

Bei dem kleinen Rohrdurchmesser wird bei der Druckmessung der um etwa 40 % höhere max. Explosionsdruck von $p_{\max,r} = 2,3 \times p_{\max}$ gegenüber $p_{\max,r} = 1,6 \times p_{\max}$ bei dem größeren Rohrdurchmesser wahrscheinlich dadurch bewirkt, dass hier der am Rohrende in der Rohrachse angeordnete Druckaufnehmer auch noch durch den höheren Druckimpuls aus der Front und den Schwaden der Spindetonation belastet wird (siehe Punkt c auf Bild 36).

Bei einem Rohrdurchmesser von nur 20 mm ist der in der Rohrachse angeordnete Druckaufnehmer mit seinem Zentrum nur etwa 10 mm vom Rohrumfang entfernt eingebaut, bei einem Rohrdurchmesser von 100 mm dagegen ist er schon etwa 50 mm vom Rohrumfang entfernt eingebaut und kann deshalb nicht mehr durch den bei der Reflexion einer Spindetonation auftretenden größeren Impuls belastet werden, wenn der Durchmesser der Spindetonation kleiner als 50 mm ist.

Noch lange Zeit nach der Entdeckung des Spins beim Ablauf von Gasreaktionen in Rohrleitungen hat man angenommen, dass dieser Spin nur bei den Detonationsgrenzbedingungen auftreten kann und hat darauf abgestellte Theorien über die Ursache des Spins entwickelt. In [18] wird für das Verhältnis der Steigung des Spins (pitch p of the spin) zum Rohrdurchmesser d die Formel $p/d = \pi (\gamma_0 + 1) / \gamma_0 k_n$ angegeben. Darin ist γ_0 das Verhältnis der spezifischen Wärmekapazitäten c_p/c_v für die Reaktionsprodukte mit Werten zwischen $\gamma_0 = 1,2$ bis 1,4.

Die Konstante k_n ist eine Ableitung der Besselfunktion mit dem Wert 1,841 für den einköpfigen Spin. Die mit dieser Formel errechneten Werte p/d stimmen relativ gut mit den experimentell ermittelten Werten überein.

Als man Anfang der 60iger Jahre begann, Detonationsvorgänge u. a. auch mit Hilfe der sogenannten „smoked foil“ Technik (Rußschriebtechnik) zu untersuchen, hat man festgestellt, dass dieser Spin nicht nur beim Ablauf von Reaktionen bei den Detonationsgrenzbedingungen auftritt [13]. Aus den auf den Rußschrieben abgebildeten Strukturen hat man geschlossen, dass auch bei allen anderen detonativ verlaufenden Reaktionen in Rohren die Detonationsfront eine dreidimensionale Struktur hat und mit einem Spin behaftet ist. Allerdings wird auch auf diesen Rußschrieben eine Spur des Spins selbst wieder nur in der Nähe der Detonationsgrenzbedingungen abgebildet (siehe z. B. Bild 9-5 in [17] oder Bild 21 in [19]). Auf den Rußschrieben von Reaktionen im Detonationsbereich wird eine wabenförmige Struktur abgebildet. Hierbei scheint es sich um eine durch das Zusammenwirken der Fronten in der Spindetonation und der Rohrdetonation entstandene Sekundärstruktur zu handeln. Über die auf der Grundlage dieser Untersuchungsergebnisse entwickelten neueren Theorien über den Spin bei detonativ verlaufenden Gasreaktionen wird z. B. in [16] und [19] berichtet. Es werden Modelle vorgestellt, mit deren Hilfe erklärt werden kann,

wie diese Sekundärstrukturen (Abbildung von Tripelpunktspuren) durch das Zusammenwirken des einfallenden Stoßes, des Machstammes und des Transversalstoßes gebildet werden.

Die hier noch einmal zusammengestellten Beobachtungen über den Spin bei detonativ verlaufenden Gasreaktionen in Rohrleitungen in Verbindung mit den bei Untersuchungen über das Anlaufen von Detonationen in Rohrleitungen [3] gemachten Erfahrungen haben dazu geführt, eine neue, im Grunde ganz einfache und damit auch leicht nachvollziehbare Theorie über die Ursache für den Spin zu entwickeln.

5.6.2 Neue Hypothese über die Ursache für den Spin

Gemäß Bild 36 scheint es sich bei dem Spin um eine in der Rohrleitung durch eine spiralförmig verlaufende, an der Rohrwand anliegende Röhre laufende Detonation (Spindetonation) zu handeln. Das in dieser Röhre eingeschlossene Gas bildet wahrscheinlich eine Wirbelröhre.

Diese Wirbelröhre kann im Grunde nur durch die während des Anlaufvorganges erzeugten, in das Frischgas vorgelaufenen und von der Detonationsfront noch nicht eingeholten Stoßwellen [3] gebildet worden sein. Die Steigung dieser spiralförmig verlaufenden Wirbelröhre hängt ab von der Geschwindigkeit dieser Stoßwellen oder aber von der zeitlichen Folge (Frequenz), in der die Stoßwellen in das Frischgas vorlaufen. Eine solche Wirbelröhre ist ein sehr stabiles hydrodynamisches System, das hier allerdings durch sehr schnelle Vorgänge gebildet wird und dann auch nur über die extrem kurze Zeitdauer bis zum Eintreffen der Detonationsfront stabil bleiben muss.

In der Nähe der Detonationsgrenze gibt es offensichtlich Bedingungen, bei denen die Reaktion nur in der Wirbelröhre detonativ verlaufen kann. Bei den Bedingungen im Detonationsbereich muss die Reaktion dann sowohl in der Wirbelröhre als auch im restlichen Rohrquerschnitt detonativ verlaufen, allerdings in beiden Querschnittsbereichen unter unterschiedlichen Randbedingungen.

Aufgrund des anderen Zustandes der Gasphase in der Wirbelröhre (zusätzliche, durch die vorgelaufenen Stoßwellen erzeugte Rotationsenergie) ist die Geschwindigkeit der Spindetonation und der Druck in der Spindetonation größer als in der Rohrdetonation. Die Geschwindigkeit der Reaktionsfront in der Spindetonation muss im Verhältnis der Längen der beiden Laufwege größer sein als die Geschwindigkeit der Reaktionsfront in der Rohrdetonation im restlichen Rohrquerschnitt.

Eine größere Detonationsgeschwindigkeit und ein höherer Detonationsdruck werden auch hinter dem Umschlagspunkt zur Detonation gemessen [20], d. h. in dem Bereich der Rohrleitung, in dem der Zustand der Gasphase noch durch die beim Anlaufvorgang gebildeten, in das Frischgas vorgelaufenen und von der Detonationsfront noch nicht eingeholten Druckwellen verändert ist (instationäre Bedingungen durch zusätzliche Druckenergie sowie durch zusätzliche kinetische Energie in der Frischgasströmung vor der Flammenfront).

Mit Hilfe dieser neuen Hypothese über die Ursache für den Spin bei detonativ verlaufenden Gasreaktionen können alle hier beschriebenen Beobachtungen über den Spin plausibel erklärt werden.

Es können aber auch noch spekulative Voraussagen gemacht werden. So müsste es z. B. bei größeren Rohrdurchmessern, wenn der Durchmesser der Spindetonation (Wirbelröhre) kleiner als der halbe Rohrdurchmesser wird, bei Reflexion der Reaktionsfront und Schwaden am Rohrende eine signifikante Ungleichverteilung des Detonationsdruckes über den Rohrquerschnitt geben.

Tatsächlich konnte bei Versuchen mit Detonationen von stöchiometrischem Acetylen/Sauerstoff-Gemisch in einer 6 m langen Rohrleitung DN 100 mit 49 und einer 6 m langen Rohrleitung DN 200 mit 101 gleichmäßig über den Querschnitt am Rohrende verteilten Messstellen zum Messen des Explosionsdruckes eine solche Ungleichverteilung des Detonationsdruckes über den Rohrquerschnitt auch festgestellt werden. Bei gleichen Versuchen mit einer 6 m langen Rohrleitung DN 50 mit 14 und einer 2 m langen Rohrleitung DN 20 mit 4 gleichmäßig über den Querschnitt am Rohrende verteilten Messstellen konnte eine solche Ungleichverteilung des Detonationsdruckes über den Rohrquerschnitt nicht festgestellt werden.

Auf dem **Bild 37** (Seite 38) ist für die Rohrleitungen DN 100 und DN 20 das Rohrende mit den 49 bzw. 4 Messstellen zum Messen des Explosionsdruckes skizziert. Als Messglied wurde eine 0,3 mm dicke Scheibe aus Aluminiumblech aus dem Werkstoff AlMg3 mittel eingesetzt. Als Maß für den Detonationsdruck am jeweiligen Messort auf dem Querschnitt diente wieder die Verformung der Al-Scheibe bzw. der dieser Verformung äquivalente statische Vergleichsdruck p_{stat} .

Auf dem **Bild 38** (Seite 38) ist beispielhaft für einen Versuch mit stöchiometrischem Acetylen/Sauerstoff-Gemisch von 1,2 bar Anfangsdruck in der Rohrleitung DN 100 die bei zwei senkrecht aufeinander stehenden Durchmessern an den Messstellen gemessene Verformung der Al-Scheibe bzw. der dieser Verformung äquivalente statische Vergleichsdruck in Abhängigkeit vom Radius aufgetragen. Wie man unmittelbar sieht, ist die Verformung der Al-Scheibe an den Messpunkten auf einem der vier halben Durchmesser, d. h. in einem der vier Quadranten des Rohrquerschnittes größer als in den anderen drei Quadranten.

Diese größeren Verformungen der Al-Scheibe in dem einen der vier Quadranten des Querschnittes müssen durch den größeren Impuls bei der Reflexion der Front der Spindetonation und der Schwaden aus der Spindetonation verursacht worden sein.

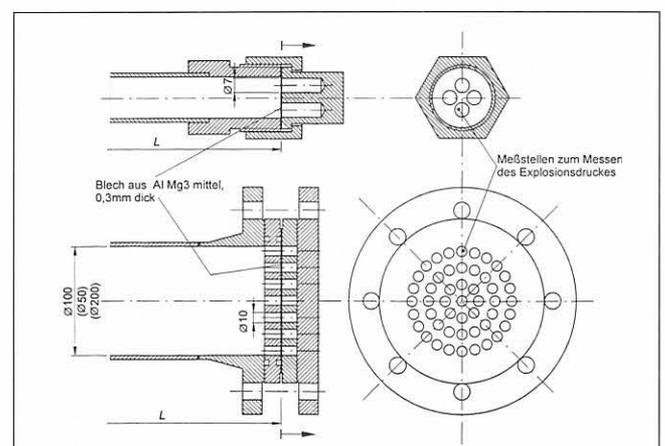


Bild 37: Rohrende DN 20 und DN 100 mit vier bzw. 49 gleichmäßig über den Querschnitt verteilten Messstellen zum Messen des Explosionsdruckes

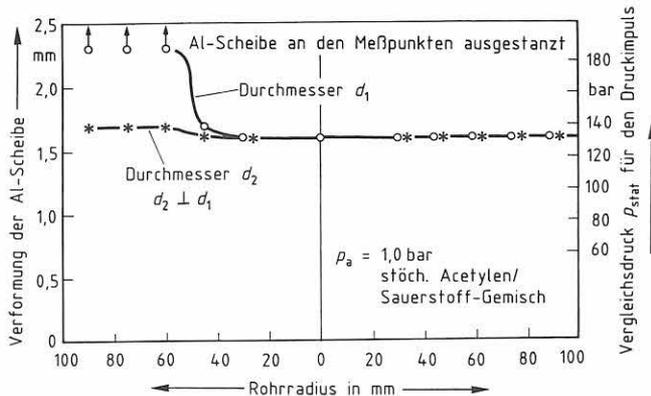
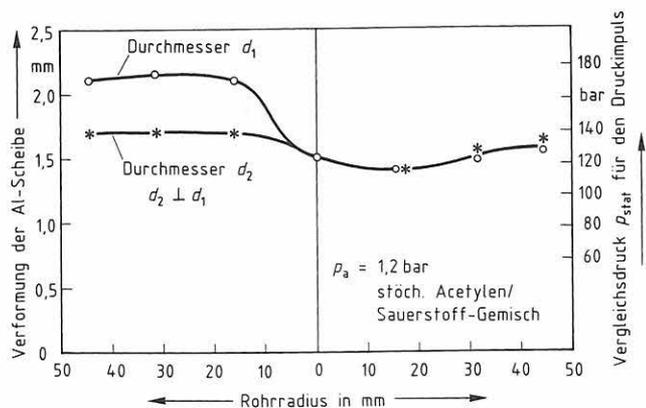


Bild 38: Verformung der Al-Scheibe bzw. statischer Vergleichsdruck p_{stat} in Abhängigkeit vom Radius bei zwei senkrecht zueinander stehenden Rohrdurchmessern der Rohrleitung DN 100

Bild 39: Verformung der Al-Scheibe bzw. statischer Vergleichsdruck p_{stat} in Abhängigkeit vom Radius bei zwei senkrecht zueinander stehenden Rohrdurchmessern der Rohrleitung DN 200

Nach diesen Versuchsergebnissen scheint bei einer Rohrleitung DN 100 der Durchmesser der Spindeltonation (der Wirbelröhre) etwa $d_{spin} = 35$ bis 40 mm, d. h. - wie bereits weiter oben bei der Diskussion der Ergebnisse der Druckmessung im Abschnitt 5.5 vermutet - weniger als die Hälfte des Rohrdurchmessers zu betragen. Bei einer Rohrleitung DN 50 dagegen scheint der Durchmesser der Spindeltonation wie bei einer Rohrleitung DN 25 (siehe Bild 36) noch immer etwa die Hälfte des Rohrdurchmessers zu betragen. Hier konnte bei Versuchen mit stöchiometrischem Acetylen/Sauerstoff-Gemisch nur ganz marginal eine Ungleichverteilung des Detonationsdruckes über den Querschnitt an der Reflexionsstelle mit Hilfe der hier angewandten Methode zur Messung des Detonationsdruckes festgestellt werden.

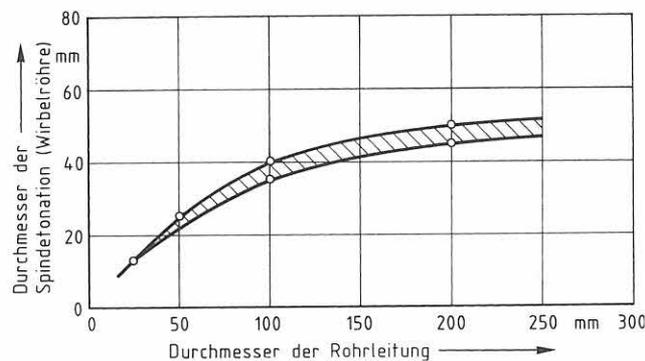


Bild 40: Durchmesser der Spindeltonation (Wirbelröhre) in Abhängigkeit vom Rohrdurchmesser

Auf dem **Bild 39** ist dann auch beispielhaft für einen Versuch mit stöchiometrischem Acetylen/Sauerstoff-Gemisch von $1,0$ bar Anfangsdruck in der Rohrleitung DN 200 die bei zwei senkrecht aufeinander stehenden Durchmessern an den Messstellen gemessene Verformung der Al-Scheibe bzw. der dieser Verformung äquivalente statische Vergleichsdruck in Abhängigkeit vom Rohrradius aufgetragen. Auch hier ist wieder die Verformung der Al-Scheibe an den äußeren Messpunkten auf einem der vier halben Durchmesser, d.h. in dem äußeren Teilbereich des einen der vier Quadranten des Rohrquerschnittes größer als in dem restlichen Teilbereich dieses Quadranten und den anderen drei Quadranten.

Versuchen wieder gleichstark verformt worden, bei einigen Versuchen dagegen ist sie unterschiedlich stark und bei zwei Versuchen dann auch nicht mehr bleibend verformt worden.

Nach diesen Versuchsergebnissen scheint bei einer Rohrleitung DN 200 der Durchmesser der Spindeltonation, d.h. der Wirbelröhre etwa $d_{spin} = 45$ bis 50 mm zu betragen. Damit erhält man für den Durchmesser der Spindeltonation die in **Bild 40** angegebene Abhängigkeit vom Rohrdurchmesser.

Bei der Belastung durch eine mit einem Spin behafteten Rohrdetonation wird bei einer Rohrleitung DN 20 die Al-Scheibe an allen vier Messpunkten offensichtlich immer gleichstark verformt.

Bei der Belastung durch eine vermutlich reine Spindeltonation dagegen wird sie an den vier Messpunkten unterschiedlich stark verformt, wobei die Verformung bei den ausgeführten Versuchen immer in Drehrichtung des Uhrzeigers gesehen zugenommen hat. Dies spricht für einen nach rechts gedrehten Spin, d.h. für eine nach rechts gedrehte Wirbelröhre, wie bei der auf Bild 36 gezeigten Skizze von der Aufnahme einer Spindeltonation.

In der **Tabelle 12** sind noch die Ergebnisse von Versuchen mit einer $4,6$ m langen Rohrleitung DN 20 zusammengestellt, bei denen die Zusammensetzung des Acetylen/Sauerstoff-Gemisches vom stöchiometrischen Gemisch bis zur Detonationsgrenze bei brenngasarmen Gemischen variiert worden ist.

Bei der Belastung durch eine Deflagration kann die Al-Scheibe bei den hier gewählten Anfangsdrücken nicht mehr bleibend verformt werden. Während bei den Versuchen mit Belastung des Rohrendes durch eine Detonation bzw. durch eine Spindeltonation immer ein kurzer, harter Schlag, ähnlich wie bei dem Schlag mit einem Hammer auf eine Metallfläche, zu hören war, war bei den Versuchen mit Belastung des Rohrendes durch eine Deflagration eine kurze Folge leichter Schläge, ein sogenanntes Klingeln zu hören.

Bei den Gemischen innerhalb der Detonationsgrenzen ist die Al-Scheibe bei Reflexion der Reaktionsfront und Schwaden an allen vier, gleichmäßig über den Querschnitt verteilten Messpunkten immer gleichstark verformt worden (Versuche Nr.1 bis 6). Bei den Gemischen an der Detonationsgrenze ist sie an den vier Messpunkten bei einigen

Verursacht wird dieses Klingeln wahrscheinlich durch beim Reaktionsablauf erzeugte, und durch die Rohrleitung laufende Stoßwellen, durch die dann auch die Wirbelröhre für die Spindeltonation gebildet wird.

Tabelle 12: Verformung der Scheibe aus Aluminiumblech an den vier Messstellen am Ende einer 4,6 m langen Rohrleitung DN 20 bei Versuchen mit Variation der Zusammensetzung des Acetylen/Sauerstoff-Gemisches bis zur Detonationsgrenze

Versuch Nr.	Volumengehalt an Acetylen %	Anfangs- druck p_a bar	Ausbeulung der Al-Scheibe an den vier Messpunkten				Das Rohrende wurde belastet durch eine
			1 mm	2 mm	3 mm	4 mm	
1	28,6 (stöch.)	2,0	0,70	0,70	0,70	0,70	Detonation
2		3,0	1,15	1,15	1,15	1,15	Detonation
3	20	2,0	0,70	0,70	0,70	0,70	Detonation
4		3,0	0,95	1,00	1,00	0,95	Detonation
5	10	2,0	0,50	0,50	0,50	0,50	Detonation
6		3,0	0,75	0,75	0,75	0,75	Detonation
7	5	3,0	0,75	0,75	0,75	0,75	Detonation
8		3,0	1,05	1,50	1,40	0,95	Spindetonation
9		2,0	1,15	1,20	1,30	1,30	Spindetonation
10		1,0	0,80	0,80	0,80	0,80	Detonation
11	4,7	2,0	0,00	0,00	0,00	0,00	Deflagration
12		3,0	0,00	0,00	0,00	0,00	Deflagration
13		3,9	aus ^{a)}	aus ^{a)}	1,30	1,50	Spindetonation
14		2,6	0,80	0,85	0,95	1,15	Spindetonation
15		1,8	0,70	0,70	0,70	0,70	Detonation

^{a)} Aluminiumblech ausgestanzt

6 Beanspruchung von Behältern bei detonativ verlaufenden Gasreaktionen

6.1 Allgemeine Vorbemerkung

Wie bereits eingangs bei der phänomenologischen Beschreibung des Detonationsanlaufvorganges im Abschnitt 4 festgestellt wurde, muss in Analogie zu den Verhältnissen bei Rohrleitungen auch bei kugelförmigen Gefäßen und Zündung in Gefäßmitte mit den höchsten Explosionsdrücken und damit Beanspruchungen der Gefäßwand dann gerechnet werden, wenn der Gefäßdurchmesser D genauso groß ist wie der Detonationsanlaufdurchmesser D_A . In Analogie zur Rohrleitung soll deshalb der unter der Zusatzbedingungen $D/D_A = 1$ ermittelte Detonationsanlaufdurchmesser mit „kritischer Behälterdurchmesser D_{krit} “ bezeichnet werden.

Es wird hier ein völlig neues Verfahren vorgestellt, mit dessen Hilfe in kugelförmigen Gefäßen bei Zündung in Gefäßmitte der Detonationsanlaufdurchmesser von detonationsfähigen Gasphasen bestimmt werden kann.

6.2 Angaben zum Versuchsaufbau und zur Versuchsdurchführung

Auf dem **Bild 41** sind die bei den Versuchen eingesetzten, nahezu kugelförmigen Behälter skizziert. Sie wurden aus Haushalts-Propangasflaschen hergestellt, die verschrotet werden sollten.

Der jeweils eingesetzte Behälter wurde evakuiert und anschließend aus einem Mischgefäß mit dem vorbereiteten Gemisch gefüllt. Die Zündung des Gemisches erfolgte in der Mitte des Behälters durch Durchschmelzen eines Metalldrahtes. Die Anfangsbedingungen waren Atmosphärendruck und Raumtemperatur. Nach jedem Versuch musste das Versuchsgefäß deshalb zunächst wieder auf Raumtemperatur abgekühlt werden. Variiert wurde bei den Versuchen der Behälterdurchmesser, das Brenngas und die Zusammensetzung der Brenngas/Sauerstoff- bzw. Brenngas/Sauerstoff/Stickstoff-Gemische.

Für den Explosionsdruck wurde bei den Versuchen wieder mit Hilfe der Berstscheibenverformungsmethode der statische Vergleichsdruck p_{stat} bestimmt.

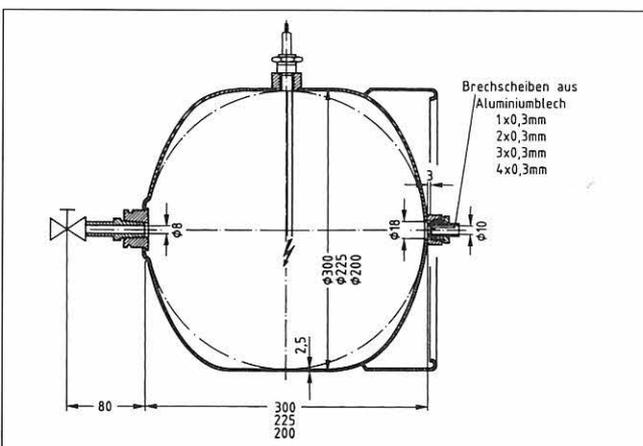


Bild 41: Die bei den Versuchen eingesetzten, nahezu kugelförmigen Behälter mit 200, 225 und 300 mm Durchmesser

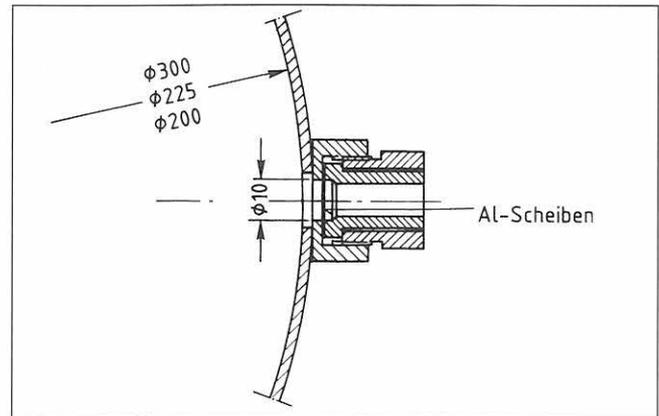


Bild 42: Verspannung der Scheiben aus Aluminiumblech bei den Versuchen mit den nahezu kugelförmigen Behältern

Die Verspannung der Al-Scheiben mit der Behälterwand ist auf dem **Bild 42** dargestellt. Sie sind so mit der Behälterwand verspannt, dass sie auf einer freien Fläche von 10 mm Durchmesser von dem in Richtung der Reaktionsfortpflanzung auftretenden Stoß beansprucht werden.

Zur Messung des genauen zeitlichen Verlaufes des Explosionsdruckes am Messort konnte auch ein Quarzkristalldruckaufnehmer in den Messsondenstutzen an der Behälterwand eingesetzt werden. Die Registrierung der vom Quarzkristalldruckaufnehmer abgegebenen und dann verstärkten Signale erfolgte mit Hilfe eines Speicheroszillographen. Der nach diesem Verfahren ermittelte maximale Explosionsdruck wird mit dem nach der „Berstscheibenverformungsmethode“ ermittelten statischen Vergleichsdruck p_{stat} verglichen.

Außerdem sollte noch der Druck bestimmt werden, der für die Bemessung des Behälters bei der Beanspruchung durch eine detonativ verlaufende Reaktion herangezogen werden muss. Dazu mussten dann Versuche ausgeführt werden, bei denen der Behälter durch die detonativ verlaufende Reaktion bleibend verformt worden ist. Auch hier wurde für den Behälter unter statischer Belastung der Druck bestimmt, bei dem es zu gleichgroßen Verformungen am Behälter kommt wie bei der dynamischen Belastung durch die detonativ verlaufende Reaktion.

Dieser nach der „Behälterwandverformungsmethode“ ermittelte statische Vergleichsdruck p'_{stat} wird mit dem nach der „Berstscheibenverformungsmethode“ ermittelten statischen Vergleichsdruck p_{stat} verglichen. Nach Abschnitt 5.3.2 besteht zwischen dem nach der „Rohrwandverformungsmethode“ ermittelten statischen Vergleichsdruck p'_{stat} und p_{stat} die Beziehung: $p'_{stat} = 0,5 \times p_{stat}$.

6.3 Detonationsanlaufdurchmesser für Raumdetonationen in kugelförmigen Gefäßen

Die bei den Versuchen mit einer Reaktion von Acetylen/Sauerstoff-Gemisch in den nahezu kugelförmigen Behältern mit 200 mm und 300 mm Durchmesser ermittelten Ergebnisse sind in den Diagrammen auf den **Bildern 43 und 44** zusammengestellt.

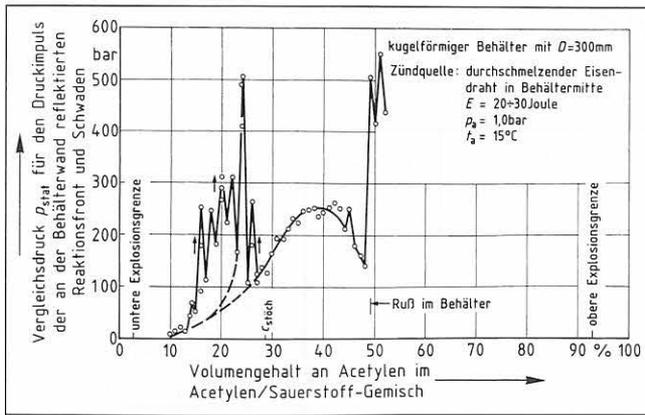


Bild 43: Vergleichsdruck p_{stat} als Funktion der Gemischzusammensetzung bei Versuchen mit Acetylen/Sauerstoff-Gemisch von Atmosphärendruck und Raumtemperatur im nahezu kugelförmigen Behälter mit 300 mm Durchmesser

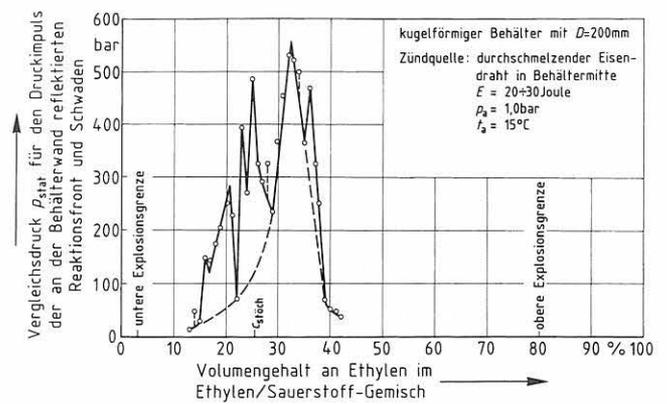


Bild 46: Vergleichsdruck p_{stat} als Funktion der Gemischzusammensetzung bei Versuchen mit Ethylen/Sauerstoff-Gemisch von Atmosphärendruck und Raumtemperatur im nahezu kugelförmigen Behälter mit 200 mm Durchmesser

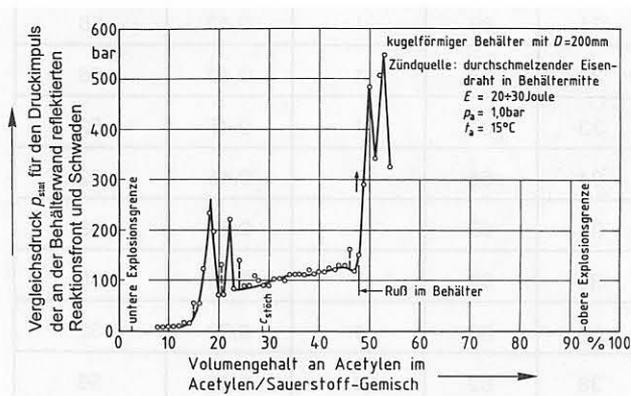


Bild 44: Vergleichsdruck p_{stat} als Funktion der Gemischzusammensetzung bei Versuchen mit Acetylen/Sauerstoff-Gemisch von Atmosphärendruck und Raumtemperatur im nahezu kugelförmigen Behälter mit 200 mm Durchmesser

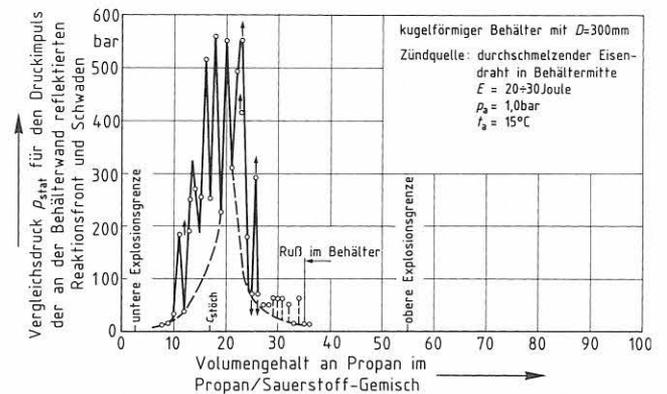


Bild 47: Vergleichsdruck p_{stat} als Funktion der Gemischzusammensetzung bei Versuchen mit Propan/Sauerstoff-Gemisch von Atmosphärendruck und Raumtemperatur im nahezu kugelförmigen Behälter mit 300 mm Durchmesser

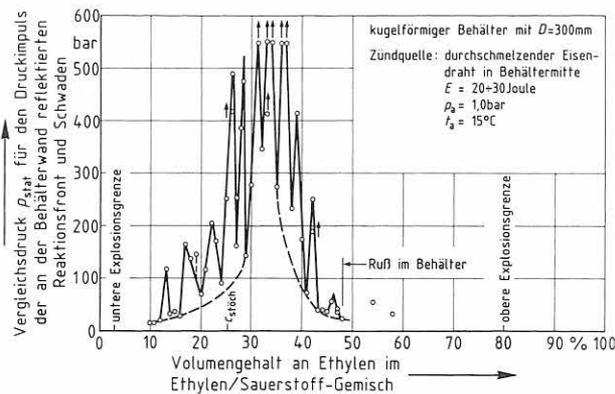


Bild 45: Vergleichsdruck p_{stat} als Funktion der Gemischzusammensetzung bei Versuchen mit Ethylen/Sauerstoff-Gemisch von Atmosphärendruck und Raumtemperatur im nahezu kugelförmigen Behälter mit 300 mm Durchmesser

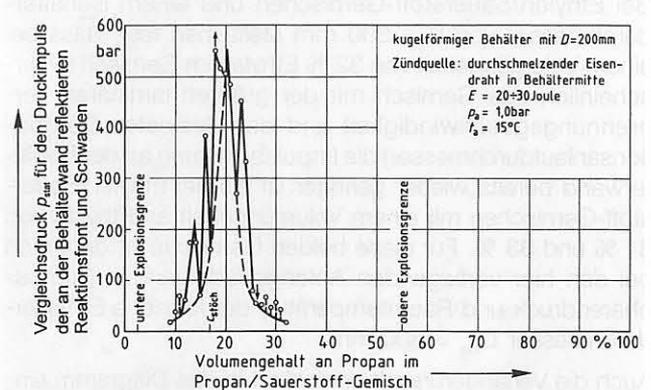


Bild 48: Vergleichsdruck p_{stat} als Funktion der Gemischzusammensetzung bei Versuchen mit Propan/Sauerstoff-Gemisch von Atmosphärendruck und Raumtemperatur im nahezu kugelförmigen Behälter mit 200 mm Durchmesser

Die Diagramme auf den **Bildern 45 und 46** zeigen die bei den Versuchen mit einer Reaktion von Ethylen/Sauerstoff-Gemisch in den nahezu kugelförmigen Gefäßen erhaltenen Ergebnisse und die Diagramme auf den **Bildern 47 und 48** die bei den Versuchen mit einer Reaktion von Propan/Sauerstoff-Gemisch erhaltenen Ergebnisse. Die bei den Versuchen mit einer Reaktion von Methan/Sauerstoff- und Wasserstoff/Sauerstoff-Gemisch in dem nahezu kugelförmigen Gefäß mit 300 mm Durchmesser ermittelten Ergebnisse sind in den **Tabellen 13 und 14** (Seite 42) zusammengestellt.

Beim Vergleich der Diagramme fällt auf, dass die Kurven für den in Abhängigkeit von der Gemischzusammensetzung angegebenen Druckimpuls bei Acetylen/Sauerstoff-Gemisch einen anderen Verlauf haben als bei Ethylen/Sauerstoff- und Propan/Sauerstoff-Gemisch. Durch Vergleich mit den Kurven für den in Abhängigkeit von der Gemischzusammensetzung am Ende von beidseitig geschlossenen Rohrleitungen ermittelten Druckimpuls (siehe dazu beispielhaft die Versuchsergebnisse auf **Bild 49**, Seite 42) kommt man auf dem Weg des Analogieschlusses zu der Feststellung, dass bei den Acetylen/Sauerstoff-Gemischen,

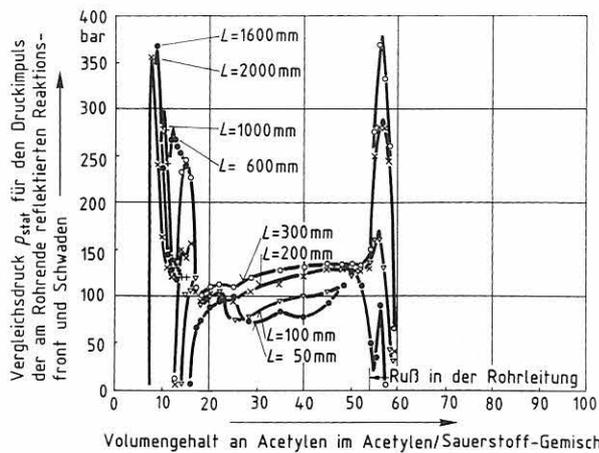


Bild 49: Vergleichsdruck p_{stat} als Funktion der Gemischzusammensetzung bei Versuchen mit Acetylen/Sauerstoff-Gemisch von Atmosphärendruck und Raumtemperatur in glatten Rohrleitungen DN 20 mit den angegebenen Rohrlängen

bei denen die extrem hohen Druckimpulse an der Behälterwand aufgetreten sind, der Behälterdurchmesser D genauso groß ist wie der Detonationsanlaufdurchmesser D_A bei den hier vorliegenden Anfangsbedingungen. Bei diesen Anfangsbedingungen entspricht also der Behälterdurchmesser D dem kritischen Behälterdurchmesser D_{krit} (Belastungsfall 6').

Bei Acetylen/Sauerstoff-Gemischen, die zwischen den beiden Gemischen liegen, bei denen die extrem hohen Impulsbelastungen an der Behälterwand aufgetreten sind, ist der Behälterdurchmesser D offensichtlich bereits größer als der Detonationsanlaufdurchmesser D_A . Bei diesen Anfangsbedingungen wird die Behälterwand durch eine bereits über eine kurze Wegstrecke als Raumdetonation gelaufene Reaktionsfront (stabile/instabile Detonation bei instationären Bedingungen, Belastungsfall 5') beansprucht.

Bei Ethylen/Sauerstoff-Gemischen und einem Behälterdurchmesser von $D = 300$ mm stellt man fest, dass bei einem Volumengehalt von 32 % Ethylen im Gemisch (wahrscheinlich das Gemisch mit der größten laminaren Verbrennungsgeschwindigkeit und dem kleinsten Detonationsanlaufdurchmesser) die Impulsbelastung an der Behälterwand bereits wieder geringer ist als bei Ethylen/Sauerstoff-Gemischen mit einem Volumengehalt an Ethylen von 31 % und 33 %. Für diese beiden Gemische ist demnach bei den hier vorliegenden Anfangsbedingungen (Atmosphärendruck und Raumtemperatur) der kritische Behälterdurchmesser $D_{krit} = 300$ mm.

Auch die Verlängerung der strichliert in das Diagramm eingetragenen Kurven, die die niedrigsten Vergleichsdrücke p_{stat} miteinander verbinden, endet bei diesen beiden Ethylen/Sauerstoff-Gemischen. Beim Behälter mit nur 200 mm Durchmesser dagegen endet die Verlängerung dieser Verbindung zwischen den niedrigsten Vergleichsdrücken p_{stat} bei dem Gemisch mit 32 % Volumenanteilen Ethylen, dem Gemisch mit dem kleinsten Detonationsanlaufdurchmesser.

Auch bei Propan/Sauerstoff-Gemischen ist bei den hier gewählten Anfangsbedingungen die Impulsbelastung der Behälterwand bereits extrem hoch. Eventuell ist hier aber der kritische Behälterdurchmesser noch geringfügig größer als 300 mm. Hier endet die Verlängerung der strichliert in das Diagramm eingetragenen Kurven, durch die die niedrigsten Vergleichsdrücke p_{stat} miteinander verbunden wer-

Tabelle 13: Versuche mit einer Reaktion von Methan/Sauerstoff-Gemisch von Atmosphärendruck und Raumtemperatur in einem nahezu kugelförmigen Behälter von 300 mm Durchmesser bei Zündung durch einen durchschmelzenden Eisendraht in Behältermitte

Gemischzusammensetzung		Zahl der Al-Scheiben	Ausbeulung	Vergleichsdruck
CH ₄	O ₂	(-)	(mm)	p_{stat}
(Volumengehalt in %)				(bar)
25	75	1	0,20	32
28	72	1	0,35	48
29	71	1	0,30	42
30	70	1	0,45	62
31	69	1	0,40	56
32	68	1	0,40	56
33	67	1	0,45	62
34	66	1	0,45	62
35	65	1	0,50	68
36	64	1	0,40	56
37	63	1	0,20	32
38	62	1	0,40	56
39	61	1	0,12	25
40	60	1	0,20	32

den, bei beiden Behältergrößen noch beim gleichen Gemisch mit 20 % Volumenanteilen Propan, wahrscheinlich wieder das Gemisch mit der größten laminaren Verbrennungsgeschwindigkeit und dem kleinsten Detonationsanlaufdurchmesser.

Auch bei den mit einer Reaktion von Methan/Sauerstoff- und Wasserstoff/Sauerstoff-Gemisch in dem Behälter mit 300 mm Durchmesser ausgeführten Versuchen waren die mit Hilfe des statischen Vergleichsdruckes ermittelten Druckimpulse auf die Behälterwand größer als die in der Literatur für diese Gemische angegebenen Explosionsdrücke (siehe zum Beispiel Tabelle 7 auf Seite 199 im Handbuch der Raumexplosionen [21]). Auch hier muss also die Behälterwand bereits durch den Druckimpuls einer mit einer Stoßwelle gekoppelten Reaktionsfront beansprucht worden sein (Belastungsfall 7'). Allerdings sind bei einer Reaktion der hier betrachteten Brenngas/Sauerstoff-Gemische die auf die Behälterwand ausgeübten Druckimpulse noch relativ klein gegenüber den Druckimpulsen, die zum Beispiel bei einer Reaktion von Propan/Sauerstoff-Gemisch für die gleichen Anfangsbedingungen ermittelt worden sind.

Nimmt man an, dass bei der Reaktion verschiedener Gasphasen in kugelförmigen Gefäßen die Detonationsanlaufdurchmesser D_A bzw. die kritischen Behälterdurchmesser D_{krit} für die einzelnen Gasphasen in einem ähnlichen Verhältnis zueinander stehen wie die Detonationsanlaufstrecken L_A bzw. die kritischen Rohrlängen L_{krit} bei der Reaktion dieser Gasphasen in Rohrleitungen, dann ist nach

Tabelle 14: Versuche mit einer Reaktion von Wasserstoff/Sauerstoff-Gemisch von Atmosphärendruck und Raumtemperatur in einem nahezu kugelförmigen Behälter von 300 mm Durchmesser bei Zündung durch einen durchschmelzenden Eisendraht in Behältermitte

Gemischzusammensetzung		Zahl der Al-Scheiben	Ausbeulung	Vergleichsdruck
H ₂	O ₂			
(Volumengehalt in %)		(-)	(mm)	p _{stat} (bar)
50	50	1	0,03	10
55	45	1	0,07	17
60	40	1	0,05	15
62	38	1	0,17	28
64	36	1	0,15	26
66	34	1	0,20	32
68	32	1	0,20	32
69	31	1	0,25	38
70	30	1	0,25	38
71	29	1	0,25	38
72	28	1	0,15	26
74	26	1	0,20	32
76	24	1	0,05	15

den Ergebnissen in [3] zu erwarten, dass der kritische Behälterdurchmesser D_{krit} für stöchiometrisches Methan/Sauerstoff- bzw. Wasserstoff/Sauerstoff-Gemisch bei einem Wert von etwa 700 mm liegen wird.

Mit dem Behälter mit 300 mm Durchmesser sind auch noch Versuche mit Acetylen/Sauerstoff/Stickstoff-, Ethylen/Sauerstoff/Stickstoff- und Propan/Sauerstoff/Stickstoff-Gemisch bei Atmosphärendruck und Raumtemperatur ausgeführt worden. Die Ergebnisse dieser Versuche sind in den Dreieckskoordinatendiagrammen auf den **Bildern 50, 51 und 52** zusammengestellt. Mit Hilfe dieser Dreieckskoordinatendiagramme können dann auch die Bereiche von Gemischzusammensetzungen angegeben werden, in dem die Gefäßwand bereits durch eine Raumdetonation beansprucht wird (durch die Kurve a begrenzter Bereich im Diagramm auf Bild 50 für Acetylen/Sauerstoff/Stickstoff-Gemische), bzw. in dem die Gefäßwand durch eine erst anlaufende Raumdetonation, d. h. durch eine bereits an eine Stoßwelle gekoppelte Reaktionsfront beansprucht wird (schraffierter Bereich zwischen den Kurven a und b im Diagramm auf Bild 50 für Acetylen/Sauerstoff/Stickstoff-Gemische bzw. schraffierter Bereich innerhalb der Kurve b auf den Bildern 51 und 52 für Ethylen/ bzw. Propan/Sauerstoff/Stickstoff-Gemische).

Bei Propan- und Ethylen/Sauerstoff/Stickstoff-Gemischen ist der Abstand zwischen der Grenze für den Bereich, in dem die Behälterwand bereits durch eine anlaufende Raumdetonation beansprucht wird und der Kurve für Brenngas/Luft-Gemische mit etwa 50 % bzw. 40 % Volumenanteilen zu wenig Stickstoff noch relativ groß.

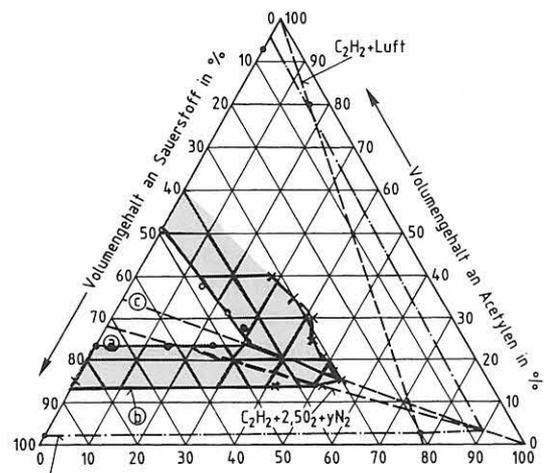


Bild 50: Räumliche Detonation (begrenzt durch Kurve a) lönd anlaufende räumliche Detonation (begrenzt durch die Kurven a und b) bei der Reaktion von Acetylen/Sauerstoff/Stickstoff-Gemisch von Atmosphärendruck und Raumtemperatur im Behälter mit 300 mm Durchmesser (Kurve c: Gemisch mit der größten laminaren Verbrennungsgeschwindigkeit bei gleichem Volumengehalt an Stickstoff)

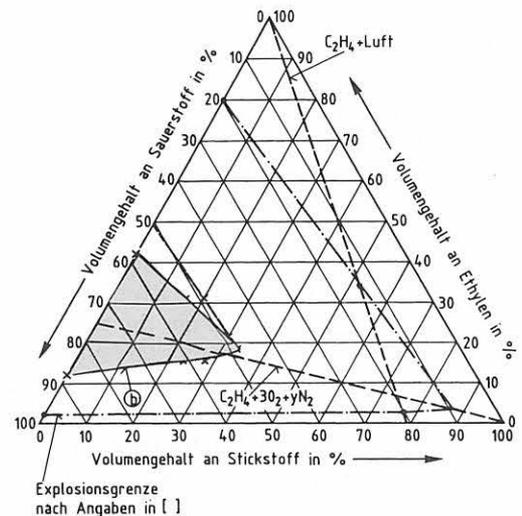


Bild 51: Anlaufende räumliche Detonation bei der Reaktion von Ethylen/Sauerstoff/Stickstoff-Gemisch von Atmosphärendruck und Raumtemperatur im Behälter mit 300 mm Durchmesser

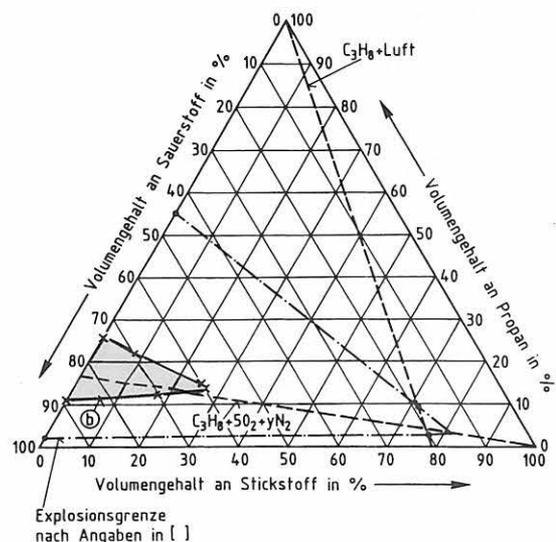


Bild 52: Anlaufende räumliche Detonation bei der Reaktion von Propan/Sauerstoff/Stickstoff-Gemisch von Atmosphärendruck und Raumtemperatur im Behälter mit 300 mm Durchmesser

Bei Acetylen/Sauerstoff/Stickstoff-Gemischen ist dieser Abstand mit nur noch 15 % Volumenanteilen zu wenig Stickstoff bereits relativ klein, so dass hier evtl. bereits bei Behältern mit nur einem Meter Durchmesser erwartet werden muss, dass es auch bei Acetylen/Luft-Gemischen zur Beanspruchung der Behälterwand (bzw. der daran angeschlossenen Armaturen) durch eine anlaufende Raumdetonation kommen kann.

Die für Acetylen/Sauerstoff/Stickstoff-Gemische erhaltenen Ergebnisse können mit den in [22] für die räumliche Detonation von Acetylen/Sauerstoff/Stickstoff-Gemisch angegebenen Detonationsgrenzen verglichen werden.

6.4 Ergebnisse der Druckmessung

Wie bei der Bemessung von Rohrleitungen auf ausreichende Detonationsfestigkeit, so kann auch bei der Bemessung von Behältern auf ausreichende Detonationsfestigkeit der nach der Berstscheibenverformungsmethode ermittelte statische Vergleichsdruck p_{stat} nicht direkt für die Berechnung der erforderlichen Druckfestigkeit eingesetzt werden.

Bei der ersten Versuchsreihe mit dem Behälter mit 300 mm Durchmesser, bei der die Versuche mit einer Reaktion von Acetylen/Sauerstoff-Gemisch bei Atmosphärendruck, Raumtemperatur und Variation der Gemischzusammensetzung ausgeführt worden sind (siehe Ergebnisse im Diagramm auf Bild 43), sind erste bleibende Verformungen an der Behälterwand nach dem Versuch festgestellt worden, bei dem der Volumengehalt an Acetylen im Gemisch 51 % betrug. Der bei diesem Versuch mit Hilfe des statischen Vergleichsdruckes ermittelte Explosionsdruck betrug $p_{stat} = 550$ bar. Bei der Druckprobe an drei Propangasflaschen, die alle die gleichen Abmessungen hatten wie die Propangasflasche, aus der der nahezu kugelförmige Behälter mit 300 mm Durchmesser hergestellt worden ist, wurden erste bleibende Verformungen an der Behälterwand bei einem Druck von 70 bar festgestellt. Damit ergibt sich nach der Behälterwandverformungsmethode ein statischer Vergleichsdruck p_{stat}'' , der wesentlich kleiner ist als der nach der Berstscheibenverformungsmethode ermittelte statische Vergleichsdruck p_{stat} .

Damit kugelförmige Behälter bzw. Behälter mit $L/D = 1$ durch die bei der Reflexion von detonativ verlaufenden Reaktionen auftretenden dynamischen Beanspruchungen nicht bleibend verformt werden, müssen sie nach den bisher vorliegenden Ergebnissen für einen statischen Vergleichsdruck von mindestens $p_{stat}'' = 0,13 \times p_{stat}$ bemessen sein, wobei der Vergleichsdruck p_{stat} mit Hilfe des bisher bei den Untersuchungen angewendeten Berstscheibenverformungsverfahrens bestimmt werden kann.

Kugelförmige Behälter bis zu einem Behälterdurchmesser von $D = 300$ mm sind auch für den bei Reflexion einer gerade angelaufenen Raumdetonation ($D = D_{krit}$) auftretenden Explosionsdruck als ausreichend druckfest zu betrachten, wenn sie für einen Prüfdruck ausgelegt sind, der mindestens das 70fache des absoluten Anfangsdruckes beträgt, vorausgesetzt es wird ein Behälterwerkstoff gewählt, dessen Bruchdehnung A_5 mindestens 25 % beträgt.

In den Diagrammen auf den **Bildern 53, 54 und 55** sind die Aufzeichnungen vom zeitlichen Verlauf des Druckes wiedergegeben, die bei drei Versuchen mit einer Reaktion von Brenngas/Sauerstoff-Gemisch bei Atmosphärendruck und Raumtemperatur in dem Gefäß mit 300 mm Durch-

messer mit Hilfe des Speicheroszillographen registriert worden sind.

Beim Versuch mit der Druckaufzeichnung von Bild 53 ist der Druckaufnehmer durch die Front einer bereits über eine Laufstrecke von mindestens 50 mm gelaufenen Raumdetonation beansprucht worden ($D > D_{krit}$ mit $D_{krit} < 200$ mm nach den Angaben auf Bild 44). Belastung der Behälterwand durch eine stabile/instabile Detonation bei instationären Bedingungen (Belastungsfall 5'). Hier ist der nach der Berstscheibenverformungsmethode ermittelte Vergleichsdruck p_{stat} (245 bar nach Bild 43) größer als der maximale Explosionsdruck auf der Druckaufzeichnung.

Beim Versuch mit der Druckaufzeichnung von Bild 54 bzw. mit der Druckaufzeichnung von Bild 55 ist der Druckaufnehmer durch die Front einer erst anlaufenden Raum-

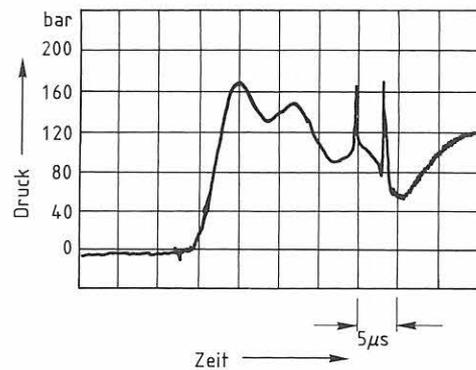


Bild 53: Zeitlicher Verlauf des Explosionsdruckes bei der Reaktion von Acetylen/Sauerstoff-Gemisch mit 35 Vol.-% Acetylen bei Atmosphärendruck und Raumtemperatur im nahezu kugelförmigen Behälter mit 300 mm Durchmesser, Zündung in Behältermitte

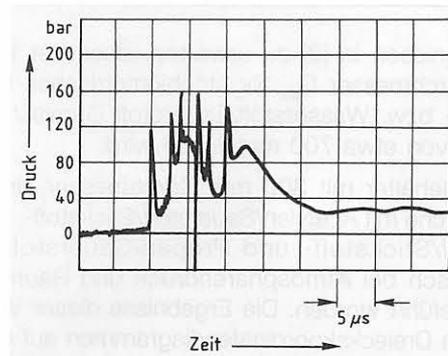


Bild 54: Zeitlicher Verlauf des Explosionsdruckes bei der Reaktion von Methan/Sauerstoff-Gemisch mit 35 Vol.-% Methan bei Atmosphärendruck und Raumtemperatur im nahezu kugelförmigen Behälter mit 300 mm Durchmesser, Zündung in Behältermitte

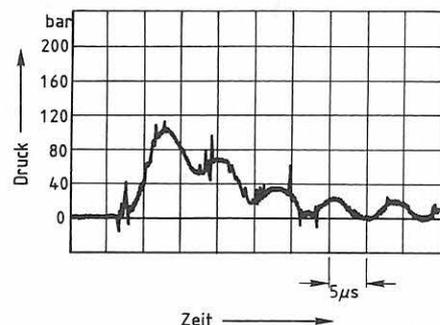


Bild 55: Zeitlicher Verlauf des Explosionsdruckes bei der Reaktion von stöchiometrischem Wasserstoff/Sauerstoff-Gemisch bei Atmosphärendruck und Raumtemperatur im nahezu kugelförmigen Behälter mit 300 mm Durchmesser, Zündung in Behältermitte

detonation ($D = 300 \text{ mm} < D_{\text{krit}}$) beansprucht worden. Belastung der Behälterwand durch eine anlaufende Detonation bei instationären Bedingungen (Belastungsfall 7'). Hier ist der nach der Berstscheibenverformungsmethode ermittelte Vergleichsdruck p_{stat} (siehe Tabelle 13 und Tabelle 14: $p_{\text{stat}} = 68 \text{ bar}$ bzw. 32 bar) kleiner als der maximale Explosionsdruck auf der Druckaufzeichnung.

Es sollten auch noch Aufzeichnungen vom zeitlichen Verlauf des Druckes bei Versuchen gemacht werden, bei denen der Druckaufnehmer von einer gerade angelaufenen Raumdetonation beansprucht worden ist. Belastung der Behälterwand durch eine instabile Detonation bei extrem instationären Bedingungen, d. h. bei $D = D_{\text{krit}} = 300 \text{ mm}$ (Belastungsfall 6'). Dies war aber leider nicht möglich, da bei diesen Versuchen das Messkabel unmittelbar an der Verschraubung mit dem Druckaufnehmer immer abgebrochen ist. Wegen der geringen Dicke (Masse) der Behälterwand treten unter diesen Bedingungen an der Verbindungsstelle zwischen Druckaufnehmer und Messkabel extrem große Beschleunigungskräfte auf.

Um auch unter diesen Bedingungen eine Druckmessung ausführen zu können, müsste ein Behälter mit einer wesentlich größeren Wanddicke eingesetzt werden.

Auf allen drei Druckaufzeichnungen sind extrem kurzzeitige Druckspitzen mit einer Dauer von weniger als einer Mikrosekunde und einer Druckanstiegsrate von mehr als 10^9 bar/s (die Druckanstiegsrate in der Reaktionsfront beträgt auf allen drei Aufzeichnungen nur etwa $4 \times 10^7 \text{ bar/s}$) registriert worden. Sie müssen durch Stoßwellen verursacht worden sein. Anders als bei Reaktionen in Rohrleitungen hat man bei Reaktionen im Behälter mit Zündung in Behältermitte offenbar Randbedingungen vorliegen, bei denen einige der beim Detonationsanlaufvorgang erzeugten Stoßwellen erst dann am Druckaufnehmer eintreffen, wenn die Schwaden kurz nach der Detonationsfront mit hoher Schwadengeschwindigkeit auf den Druckaufnehmer auftreffen. Der bereits hohe Impuls der Schwaden kann durch die Stoßwellen kurzzeitig erhöht und diese Impulsverstärkung kann dann auch vom Druckaufnehmer registriert werden. Auf die Probleme bei der messtechnischen Erfassung von Stoßwellen, die bei dem Vorgang des Anlaufens von Detonationen erzeugt werden, ist bereits in [23] näher eingegangen worden.

Nach den Formeln der Gasdynamik [24] beträgt bei einem idealen Gas mit konstanter spezifischer Wärme der in der Stoßwelle erzeugte Drucksprung

$$p_2/p_a = [2 \kappa M^2 - (\kappa - 1)] / (\kappa + 1).$$

In dieser Formel muss für die MACH-Zahl M das Verhältnis von Stoßwellengeschwindigkeit zu Schallgeschwindigkeit der Gasphase eingesetzt werden. Wegen der nahezu dreimal so großen Schallgeschwindigkeit bei vergleichbar großen Stoßwellengeschwindigkeiten und κ -Werten müssen demnach die durch die Stoßwellen bewirkten Druckpeaks beim Versuch mit dem hier betrachteten Wasserstoff/Sauerstoff-Gemisch erheblich kleiner sein als bei den Versuchen mit dem Acetylen/ bzw. Methan/Sauerstoff-Gemisch. Dies erklärt auch die Unterschiede bei der Höhe der kurzzeitigen Druckpeaks auf den drei Druckaufzeichnungen.

Im Abschnitt 5.4 ist festgestellt worden, dass beim Durchlaufen einer Detonation durch eine Rohrleitung der mit Hilfe des hier angewandten Messverfahrens (Quarkristalldruckaufnehmer und Speicheroszillographen) ermittelte maximale Explosionsdruck etwa genauso groß ist wie der nach der „Rohrwandverformungsmethode“ ermittelte statische Vergleichsdruck p'_{stat} . Bei der Reflexion einer stabilen Detonation bei stationären Bedingungen ist der nach der Rohrwandverformungsmethode ermittelte statische Vergleichsdruck, zumindest bei Rohrleitungen DN 20, kleiner als der gemessene maximale Explosionsdruck, bei der Reflexion einer instabilen Detonation bei extrem instationären Bedingungen dagegen, d. h. bei der Bedingung $L = L_{\text{krit}}$ ist er erheblich kleiner als der gemessene maximale Explosionsdruck.

In Analogie stellt man hier fest, dass bei der Reflexion einer räumlichen Detonation an der Behälterwand der nach der „Behälterwandverformungsmethode“ ermittelte statische Vergleichsdruck $p''_{\text{stat}} = 0,13 \times p_{\text{stat}}$ erheblich kleiner ist als der mit Hilfe der Druckmessung gemessene maximale Explosionsdruck. Der mit Hilfe der Druckmessung ermittelte maximale Explosionsdruck kann für die Bemessung eines detonationsgefährdeten Behälters nicht herangezogen werden.

In den Technischen Regeln für Acetylenanlagen und Calciumcarbidlager (TRAC) wird in TRAC 204 Nummer 7.8 für Lötflussmittel-Zugabegeräte (Gasflux-Geräte) gefordert:

„Ortsbewegliche Gasflux-Geräte müssen bei betriebsmäßiger Ausrüstung Flammenrückschlägen in einem Gemisch aus 35 % Volumenanteilen Acetylen und 65 % Volumenanteilen Sauerstoff bei einem Überdruck des Gemisches von 3 bar sicher standhalten. Dies bedeutet, dass die Geräte für einen Prüfdruck von etwa 100 bar bemessen sein müssen“.

Nach dieser Vorschrift wird eine Explosionsdruckstoßfestigkeit des Behälters der Gasflux-Geräte gefordert. Nach den Ergebnissen dieser Untersuchungen müsste dann aber gefordert werden, dass die Prüfung auf Explosionsdruckstoßfestigkeit mit einem Gemisch aus 50 % Volumenanteilen Acetylen und 50 % Volumenanteilen Sauerstoff ausgeführt wird, da etwa bei diesem Gemisch die höchsten Explosionsdrücke auftreten – zumindest bei den für Gasflux-Geräte üblicherweise gewählten Behälterabmessungen. Eine Explosionsdruckstoßfestigkeit ist nach den bisher vorliegenden Ergebnissen dann gegeben, wenn die Geräte für einen Prüfdruck bei statischer Belastung von etwa $70 \times 4 \text{ bar} = 280 \text{ bar}$ bemessen werden (70facher absoluter Anfangsdruck). Lässt man bleibende Verformungen am Behälter zu, könnte der Faktor möglicherweise von 70 auf 50 reduziert werden. Dies würde bedeuten, dass die Geräte für einen Prüfdruck von mindestens 200 bar bemessen sein müssen.

7 Zusammenfassung der Ergebnisse

Im BAM-Forschungsbericht 196 [3] wurde über Untersuchungen zum Anlaufen von Detonationen im Inneren geschlossener Systeme berichtet. Dabei wurde zur Charakterisierung des Detonationsanlaufvorganges die sogenannte Detonationsanlaufstrecke herangezogen.

Detonationsanlaufstrecken werden in der Literatur im allgemeinen aus der für die Fortpflanzung der Reaktionsfront ermittelten Weg/Zeit-Kurve bestimmt. In dem Forschungsbericht wurde für die Bestimmung der Länge von Detonationsanlaufstrecken ein ganz anderes Verfahren angewendet.

Dieses Verfahren nutzt die Tatsache, dass extrem hohe Explosionsdrücke dann auftreten, wenn die Reflexion der Reaktionsfront und der nachfolgenden Schwaden kurz hinter dem Umschlagspunkt zur Detonation erfolgt. Diese unter der Zusatzbedingung „Länge der Rohrleitung L gleich Länge der Detonationsanlaufstrecke L_A “ ermittelte Detonationsanlaufstrecke wurde wegen des bei diesen Randbedingungen auftretenden extrem hohen Explosionsdruckes mit „kritische Rohrlänge L_{krit} “ bezeichnet ($L_A = L_{krit}$, wenn $L/L_A = 1$). Auch bei der Prüfung von Detonationsicherungen auf Flammendurchschlagsicherheit liegen die ungünstigsten Randbedingungen dann vor, wird also der niedrigste Grenzdruck für die Flammendurchschlagsicherheit dann erreicht, wenn die Sicherung etwa im Abstand dieser kritischen Rohrlänge von der Zündquelle entfernt in die Rohrleitung eingebaut wird [25]. Diese kritische Rohrlänge ist einige Rohrdurchmesser kürzer als die in längeren Rohrleitungen mit $L \gg L_A$ ermittelte Detonationsanlaufstrecke.

Analog konnte nach diesem Verfahren durch Versuche in kugelförmigen Gefäßen mit Zündung in Gefäßmitte der Detonationsanlaufdurchmesser D_A für Raumdetonationen ermittelt werden. Hier gilt entsprechend $D_A = D_{krit}$, wenn $D/D_A = 1$ ist. Es konnte damit ein völlig neues Verfahren für die Ermittlung des Detonationsanlaufdurchmessers für Raumdetonationen vorgestellt werden.

Mit welchem Explosionsdruck bzw. mit welcher daraus resultierenden Beanspruchung der Rohr- bzw. Behälterwand bei detonativ verlaufenden Gasreaktionen gerechnet werden muss, hängt außer von der reaktionsfähigen Gasphase und dem Anfangsdruck ganz wesentlich von der Lage des Umschlagspunktes zur Detonation in dem jeweils betrachteten System ab.

Bei Detonationen in Rohrleitungen müssen mit Bezug auf den Umschlagspunkt zur Detonation die folgenden Belastungsfälle unterschieden werden, die zu unterschiedlich hohen Beanspruchungen an der Rohrwand führen:

- 1) Belastung der Rohrwand beim Durchlaufen einer stabilen Detonation bei nahezu stationären Bedingungen in Bezug auf den Zustand der Gasphase, d. h. bei nicht mehr durch die beim Anlaufvorgang erzeugten und in das Frischgas vorgelaufenen Druckwellen veränderten Anfangsbedingungen ($L \gg L_A$).
- 2) Belastung der Rohrwand beim Durchlaufen einer stabilen bzw. instabilen Detonation bei instationären Bedingungen ($L > L_A$).
- 3) Belastung der Rohrwand beim Durchlaufen einer instabilen Detonation bei den extrem instationären Bedingungen am Umschlagspunkt ($L = L_A$).

- 4) Belastung der Rohrwand bei Reflexion einer stabilen Detonation bei nahezu stationären Bedingungen ($L \gg L_A$).
- 5) Belastung der Rohrwand bei Reflexion einer stabilen bzw. instabilen Detonation bei instationären Bedingungen ($L > L_A = L_{krit}$).
- 6) Belastung der Rohrwand bei Reflexion einer instabilen Detonation bei den extrem instationären Bedingungen am Umschlagspunkt ($L = L_A = L_{krit}$).
- 7) Belastung der Rohrwand bei Reflexion einer instabilen Detonation bei instationären Bedingungen bei Rohrlängen $L < L_{krit}$, d. h. bei Reflexion einer noch anlaufenden Detonation.

Bei Detonationen in Behältern müssen mit Bezug auf den Umschlagspunkt zur Detonation analog zu den Belastungsfällen 4 bis 7 bei Rohrleitungen die folgenden Belastungsfälle unterschieden werden:

- 4') Belastung der Behälterwand bei Reflexion einer stabilen Detonation bei nahezu stationären Bedingungen ($D \gg D_A$).
- 5') Belastung der Behälterwand bei Reflexion einer stabilen bzw. instabilen Detonation bei instationären Bedingungen ($D > D_A = D_{krit}$).
- 6') Belastung der Behälterwand bei Reflexion einer instabilen Detonation bei den extrem instationären Bedingungen am Umschlagspunkt ($D = D_A = D_{krit}$).
- 7') Belastung der Behälterwand bei Reflexion einer instabilen Detonation bei instationären Bedingungen ($D < D_{krit}$).

Bei den Untersuchungen über das Anlaufen von Detonationen in [3] wurde der Explosionsdruck bei Rohrleitungen und den Belastungsfällen 4 bis 7 und bei Behältern und den Belastungsfällen 5' bis 7' (der maximale Behälterdurchmesser betrug nur $D = 300$ mm) über die Verformung von Scheiben aus Aluminiumblech und den für eine gleichgroße Verformungsarbeit erforderlichen statischen Vergleichsdruck p_{stat} bestimmt. „Berstscheibenverformungsmethode“ zur Bestimmung von p_{stat} .

Bei den Untersuchungen über die Beanspruchung von Rohrleitungen und Behältern bei detonativ verlaufenden Gasreaktionen wurde der Explosionsdruck bei Rohrleitungen und den Belastungsfällen 1 bis 7 und bei Behältern und dem Belastungsfall 6' auch über die Verformung der Rohr- bzw. Behälterwand und den für eine gleichgroße Verformungsarbeit erforderlichen statischen Vergleichsdruck p'_{stat} bzw. p''_{stat} bestimmt, d. h. p'_{stat} nach der „Rohrwandverformungsmethode“ und p''_{stat} nach der „Behälterwandverformungsmethode“.

Zwischen dem nach der Berstscheibenverformungsmethode bestimmten statischen Vergleichsdruck p_{stat} und den nach der Rohrwandverformungsmethode und der Behälterwandverformungsmethode bestimmten statischen Vergleichsdrücken p'_{stat} und p''_{stat} bestehen die Beziehungen (ermittelt durch Versuche in Rohren DN 20 und Behältern DN 300):

$$\begin{aligned} p'_{stat} &= 0,5 \times p_{stat} \\ p''_{stat} &= 0,13 \times p_{stat} \end{aligned}$$

Die statischen Vergleichsdrücke p'_{stat} und p''_{stat} sind die Explosionsdrücke, die für die Bemessung detonationsgefährdeter Rohrleitungen bzw. Behälter herangezogen werden müssen.

Bei Versuchen in Rohrleitungen und Behältern wurde bei einigen Belastungsfällen auch noch der zeitliche Verlauf des Explosionsdruckes durch eine Druckmessung bestimmt.

Durch Vergleich der Versuchsergebnisse konnte gezeigt werden, dass bei Rohrleitungen DN 20 und dem Belastungsfall 1 der bei der Druckmessung ermittelte maximale Explosionsdruck und der nach der Rohrwandverformungsmethode ermittelte statische Vergleichsdruck p'_{stat} etwa gleich groß sind. Beim Belastungsfall 4 ist der bei der Druckmessung ermittelte maximale Explosionsdruck größer und beim Belastungsfall 6 ist er etwa dreimal so groß wie der nach der Rohrwandverformungsmethode ermittelte statische Vergleichsdruck p'_{stat} .

Die weitere Diskussion der Versuchsergebnisse deutet aber an, dass bei Rohrleitungen mit größeren Durchmessern auch beim Belastungsfall 4 der in der Rohrachse bei der Druckmessung ermittelte maximale Explosionsdruck etwa genauso groß sein müsste wie der nach der Rohrwandverformungsmethode ermittelte statische Vergleichsdruck p'_{stat} . Hier müssten zur Ergänzung auch noch Versuche mit Verformung von Rohren mit größerem Durchmesser ausgeführt werden, wenn die dazu erforderlichen finanziellen Mittel bereitgestellt werden könnten.

Bei Behältern kann der bei der Druckmessung ermittelte maximale Explosionsdruck nicht für die Dimensionierung detonationsgefährdeter Behälter herangezogen werden. Hier wurde bereits bei den Belastungsfällen 5' und 7' ein mehr als doppelt so hoher maximaler Explosionsdruck gemessen wie der beim Belastungsfall 6' nach der Behälterwandverformungsmethode ermittelte statische Vergleichsdruck p'_{stat} .

Auf den Einfluss des Durchmessers bei der Beanspruchung von Rohrleitungen bei detonativ verlaufenden Gasreaktionen wird näher eingegangen.

Die Diskussion der Versuchsergebnisse führt dann noch auf eine neue Theorie über die Ursache für den Spin bei detonativ verlaufenden Gasreaktionen in Rohrleitungen.

8 Schlussbetrachtung

Zum Thema des Forschungsberichts „Beanspruchung von Bauteilen bei der Belastung durch detonativ verlaufende Gasreaktionen“ sind vom Autor inzwischen noch die folgenden Arbeiten veröffentlicht worden, auf die in dem Forschungsbericht noch nicht Bezug genommen werden konnte:

- Analyse eines Unfalls mit einer Flaschenbatterieanlage für Wasserstoff; in: Technische Überwachung 41 (2000) H. 9, S. 38-39

Mit Hilfe der Untersuchungsergebnisse aus dem Forschungsbericht konnten der Unfallhergang und die Unfallursache zweifelsfrei geklärt werden.

- Untersuchungen mit einem Zerfall von Tetrafluorethylen in längeren Rohrleitungen; in: Z. Chemie Ingenieur Technik 73 (2001) H. 4, S. 393-399

Bei diesen Untersuchungen konnte insbesondere gezeigt werden, dass es bei relativ langsam und deshalb über sehr lange Anlaufstrecken $L_A > 250 \times d_i$ (Rohrinnendurchmesser) zur Detonation anlaufenden Reaktionen auch noch mehrere Anlaufstrecken hinter dem Umschlagspunkt zur Detonation zu extrem hohen Beanspruchungen der Rohrleitung bei Reflexion der Reaktionsfront und Schwaden am Rohrende kommen kann. Bei den Untersuchungen, über die in dem Forschungsbericht berichtet worden ist, sind Gasphasen mit wesentlich kürzeren Anlaufstrecken eingesetzt worden. Bei diesen Gasphasen ist es nur bei Rohrlängen in der Größenordnung der Länge der Detonationsanlaufstrecke zu vergleichbar hohen Beanspruchungen der Rohrleitung am Rohrende gekommen. Nach einem Laufweg für die Reaktionsfront von maximal zwei Detonationsanlaufstrecken, d. h. nur eine Anlaufstrecke hinter dem Umschlagspunkt, ist das Rohrende bereits durch eine stabile Detonation bei stationären Bedingungen, d. h. bei nicht mehr durch vorgelaufene Druckwellen veränderten Anfangsbedingungen (Belastungsfall 4), belastet worden.

- Pressure resistance requirements for safety device housings im Journal of Loss Prevention in the Process Industries 12 (1999) S. 245-247 und
- Anforderungen an die Festigkeit der Gehäuse von Sicherheitseinrichtungen nach EN 730,
- Zeitschrift Chemie Ingenieur Technik 73 (2001) H. 12, S. 1603-1606

Hier wird gezeigt, wie die Gehäuse von derartigen Sicherheitseinrichtungen mit relativ kleinen Abmessungen bei der Belastung durch Einlaufen einer Detonation beansprucht werden. Untersucht wurden die Gehäuse von Sicherheitseinrichtungen mit und ohne Einbauten. Am Leergehäuse mit nur 30 mm Durchmesser (Verhältnis von Länge L zu Durchmesser d gleich 1,5; Volumen ca. 30 cm³) wird bei der dynamischen Belastung durch die Reaktion die gleiche Verformungsarbeit geleistet wie bei der statischen Belastung mit dem Fünfundzwanzigfachen absoluten Anfangsdruck. Analog zur Rohrleitung wird auch beim Behälter die Beanspruchung der Behälterwand mit der Zunahme des Behälterdurchmessers zunehmen. Bei der gerade durchgeführten Prüfung eines Lötflussmittelzugabegerätes ist ein Behälter mit $L/d = 1,0$ und einem Volumen von 30 l auf ausreichende Festigkeit bei der Be-

lastung durch eine Detonation in Acetylen/Sauerstoff-Gemisch geprüft worden. Der Volumenanteil an Acetylen im Gemisch betrug 35 %. Die Zündung des Gemisches im Behälter erfolgte durch Einlaufen einer Reaktionsfront aus einer an den Behälter angeschlossenen Schlauchleitung DN 8.

Bei einem ersten Versuch mit dem Prüfdruck nach TRAC 204 (5) von 4,0 bar (3,0 bar Überdruck) ist ein erster Behälter geborsten. Bei einem zweiten Versuch mit einem weiteren Behälter und 2,0 bar Anfangsdruck ist dieser Behälter noch nicht bleibend verformt worden. Bei einem dritten Versuch mit 3,0 bar Anfangsdruck ist dieser zweite Behälter dann bleibend verformt worden. Mit einem dritten Behälter konnte dann noch ein weiterer Versuch bei 3,5 bar Anfangsdruck durchgeführt werden.

Dabei ist dieser Behälter Nr. 3 dann stärker bleibend verformt worden als der Behälter Nr. 2 beim Versuch mit 3,0 bar Anfangsdruck. Er ist aber noch nicht geborsten. Mit dem Behälter Nr. 2 ist dann noch eine Druckprüfung bei statischer Belastung durchgeführt worden. Bei einem statischen Druck von 120 bar ist es an diesem Behälter zu einer etwa gleichgroßen bleibenden Verformung gekommen wie am Behälter Nr. 3 bei der dynamischen Belastung durch die Reaktion bei 3,5 bar Anfangsdruck.

An dem wesentlich größeren Leergehäuse mit einem Volumen von 30 l (30 000 cm³) wird bei der dynamischen Belastung durch die Reaktion demnach etwa die gleiche Verformungsarbeit geleistet wie bei der statischen Belastung mit dem Fünfunddreißigfachen absoluten Anfangsdruck. Eine um den Faktor 1,4 höhere Belastung als beim 30 cm³-Leergehäuse.

9 Literatur

- [1] Lietze, D.: Anforderungen an die Festigkeit von Rohrleitungen für Hochdruck-Acetylen, Arbeitsschutz (1973) 2, S. 61- 66
- [2] DIN 2391-2, Nahtlose Präzisionsstahlrohre mit besonderer Maßgenauigkeit – Technische Lieferbedingungen, Sept. 1994
- [3] Lietze, D.: Untersuchungen über das Anlaufen von Detonationen im Inneren geschlossener Systeme, BAM-Forschungsbericht 196, Dez. 1993, NW Verlag – Verlag für neue Wissenschaft GmbH, Bremerhaven
- [4] Verordnung über Acetylenanlagen und Calcium-carbidlager
- [5] Technische Regeln für Acetylenanlagen und Calcium-carbidlager (TRAC)
- [6] Lietze, D.: Untersuchungen über den Ablauf eines Zerfalls von Hochdruck-Acetylen in verzweigten Rohrsystemen, Chem.-Ing.-Techn. 62 (1990) 3, S. 238-239
- [7] Lietze, D.: Festes Rohrende für detonationsgefährdete Rohrleitungen am Beispiel von Rohrleitungen für Acetylen Berufsgenossenschaft (1976) 4, S. 139-142
- [8] DIN 17455 Nahtlose kreisförmige Rohre aus nichtrostenden Stählen für allgemeine Anforderungen – Technische Lieferbedingungen, Juli 1985
- [9] EN 854 Gummischläuche und -schlauchleitungen – Hydraulikschläuche mit Textilgeflechteinlage, Anforderungen, Januar 1993
- [10] EN 853 Gummischläuche und -schlauchleitungen - Hydraulikschläuche mit Drahtgeflechteinlage, Anforderungen, Januar 1993
- [11] Jost, W.: Explosions- und Verbrennungsvorgänge in Gasen, Julius Springer Verlag Berlin 1939
- [12] Sargent, H. B.: How to design a hazard free system to handle acetylene Chem. Eng. 64 (1957) 2, S. 250-254
- [13] Schott, G. L.: Structure, Chemistry and Instability of Detonation in Gases, Fourth Symposium on Detonation (1965) S. 67-77
- [14] Lewis, B. und von Elbe, G.: Combustion, Flames and Explosions of Gases, New York, Academic Press Inc., 1951
- [15] Edwards, D. H., Williams, G. T. and Breeze, J. C.: Pressure and velocity measurements on detonation waves in hydrogen-oxygen mixtures, Journal of Fluid Mechanics 6 (1959) S. 497-517
- [16] Fickett, W. und Davis, W. C.: Detonation, University of California Press, Berkeley and Los Angeles, California, 1978
- [17] Strehlow, R. A.: Combustion Fundamentals, Mc Graw-Hill, 1985
- [18] Fay, J. A.: Mechanical Theory of spinning detonation, J. Chem. Phys. Bd. 20 (1952) 6, S. 942-950
- [19] Wetzel, F.: Untersuchung der Mechanismen bei Detonationsentstehungs- und Detonationsausbreitungsvorgängen Fortschritt Berichte, VDI Reihe 7 (1993) Nr. 228, VDI Verlag 1993
- [20] Holzapfel, G. und Schön, G.: Zur Ausbildung von Gasetonationen in Rohren, Chem. Ing. Techn. 37 (1965) 5, S. 493- 497
- [21] Freytag, H. H.: Handbuch der Raumexplosionen, Verlag Chemie, Weinheim/Bergstraße, 1965
- [22] Freiwald, H. und Koch, H. W.: Die Bereiche der räumlichen Detonation von Acetylen-Sauerstoff-Stickstoff-Gemischen in Abhängigkeit von der Art und Stärke der Zündung, Dechema Monographien Band 42 (1962) Nr. 661 B 667, S. 9 -123
- [23] Lietze, D.: Grenze der Flammendurchschlagsicherheit von Sintermetalleinsätzen bei der Reaktion von Brenngas/Luft-Gemischen, Technische Überwachung, Bd. 35 (1994) Nr. 4, S. 164-171
- [24] Greene, E. F. und Toennies, J. P.: Chemische Reaktionen in Stoßwellen, Dr. Dietrich Steinkopff Verlag, Darmstadt 1959
- [25] Lietze, D.: Untersuchungen zur Flammendurchschlagsicherheit von Detonationssicherungen, Teil 1 und 2, Technische Überwachung, Bd 40 (1999) Nr. 5, S.11-16 und Nr. 6, S. 25-30

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“.

