

Quelle: <https://www.arbeitssicherheit.de//document/24501c27-36d5-3e52-aaaf-e632104a2505>

<b>Bibliografie</b>	
<b>Titel</b>	Technische Regeln für Gefahrstoffe Tätigkeiten mit Gasen - Gefährdungsbeurteilung (TRGS 407)
<b>Amtliche Abkürzung</b>	TRGS 407
<b>Normtyp</b>	Technische Regel
<b>Normgeber</b>	Bund
<b>Gliederungs-Nr.</b>	Keine FN

## Anhang 4 TRGS 407 - zu TRGS 407 Sicherheitstechnisch relevante Eigenschaften zur Beurteilung von Gefährdungen bei Tätigkeiten mit Acetylen

### A.4.1

#### Sicherheitstechnisch relevante Kenngrößen von Acetylen

In der folgenden Tabelle sind die wichtigsten sicherheitstechnisch relevanten Kenngrößen und Eigenschaften von Acetylen zusammengestellt. Auf deren Basis können unter Berücksichtigung der betrieblichen Randbedingungen geeignete Maßnahmen für die sichere Handhabung von gasförmigem Acetylen festgelegt werden.

Tabelle 1: Wichtige sicherheitstechnische Kenngrößen von Acetylen

<b>Eigenschaft</b>	<b>Wert</b>
Sublimationspunkt bei 101,3 kPa (1,013 bar)	- 84,0 °C
Dampfdruck bei 20 °C	4250 kPa (42,5 bar)
Kritische Temperatur	35,2 °C
Kritischer Druck	6190 kPa (61,9 bar)
Rel. Dichte (Luft = 1)	0,91
Zerfallsenthalpie bei 25 °C und einem Standarddruck von 101,3 kPa (1,013 bar)	228 kJ/mol bzw. 8764 kJ/kg
Explosionsbereich in Luft bei 20 °C und einem Standarddruck von 101,3 kPa (1,013 bar)	2,3 Vol.-% bis 100 Vol.-%
Explosionsdruckverhältnis im Gemisch mit Luft bei 20 °C	11
Explosionsdruckverhältnis für den deflagrativen Zerfall bei 20 °C	10
Explosionsdruckverhältnis für den detonativen Zerfall (stabile Detonation) bei 20 °C	40

Eigenschaft	Wert
Detonationsgeschwindigkeit (stabile Detonation)	1970 m/s
Zündtemperatur im Gemisch mit Luft bei einem Standarddruck von 101,3 kPa (1,013 bar)	305 °C
Zündtemperatur für den Zerfall bei einem Standarddruck von 101,3 kPa (1,013 bar)	550 °C
Mindestzündenergie im Gemisch mit Luft	0,019 mJ
Explosionsgruppe	II C
Temperaturklasse	T2

**A.4.2**

**Kondensation von Acetylen und Acetylenhydratbildung**

(1) Gemäß Nummer 3.2.6 Absatz 4 sind Drücke und Temperaturen zu vermeiden, bei denen es zur Bildung von Acetylen in kondensierter Phase kommen kann. Dies ist gewährleistet, wenn bei der vorliegenden Temperatur der Betriebsdruck niedriger als der Dampfdruck ist. Insbesondere bei im Freien liegenden Rohrleitungen, in denen Acetylen unter Überdruck vorliegt, könnte der Betriebsdruck aber größer als der Dampfdruck Fall sein. Solche Leitungen müssen dann erforderlichenfalls in geeigneter Weise beheizt werden.

(2) Der Dampfdruck von Acetylen in Abhängigkeit von der Temperatur ist in Abbildung 1 wiedergegeben.

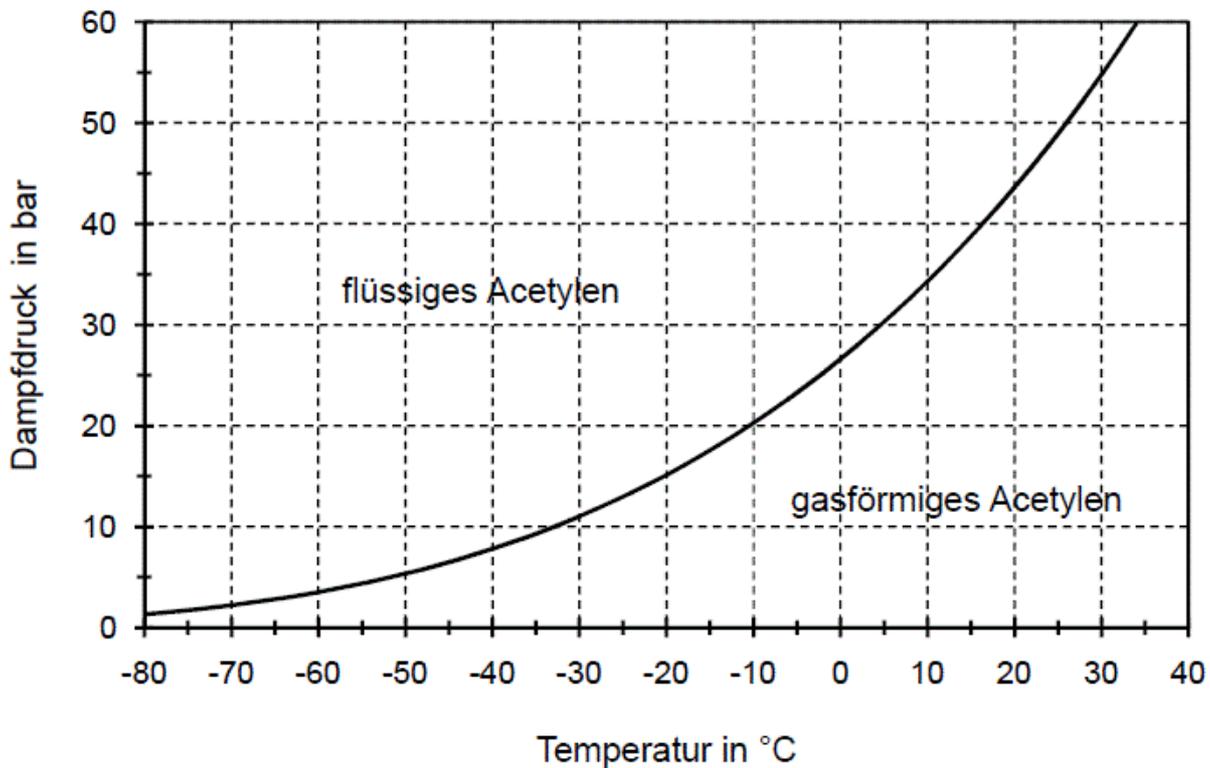


Abbildung 1:  
Dampfdruck von Acetylen in Abhängigkeit von der Temperatur /19/

(3) Bei feuchtem Acetylen kann sich außerdem festes Acetylenhydrat bilden, das zur Verstopfung von Rohrleitungen führen kann.

**A.4.3**

**Vermeiden des Zerfalls von Acetylen durch Phlegmatisierung**

(1) Acetylen kann durch Zumischen stabiler Gase phlegmatisiert werden, so dass eine nicht zerfallsfähige Gasphase resultiert. Bei der Phlegmatisierung von Acetylen sind besondere Kenntnisse und Fachkunde erforderlich (siehe [Anhang 3](#)). Dabei müssen die zugemischten stabilen Gase nicht unbedingt Inertgase sein, es können auch Brenngase sein, die aber selbst nicht zerfallsfähig sind. Es ist zu beachten, dass ein bezüglich des Zerfalls phlegmatisiertes Gasgemisch trotzdem noch entzündbar sein kann, also nicht notwendigerweise auch im Sinne des Explosionsschutzes inertisiert ist.

(2) Druckabhängige Konzentrationsgrenzen für Acetylen im Gemisch mit anderen, nicht zerfallsfähigen Gasen unterhalb derer eine Einstufung gemäß GHS/CLP als chemisch instabiles Gas nicht erforderlich ist, sind im UN-Handbuch über Prüfungen und Kriterien /3/ in Section 35 enthalten.

(3) Die Stabilitätsgrenzen von Gemischen mit Acetylen hängen auch vom Volumen und der Zündquelle ab. Weitere Stabilitätsgrenzen können der Literatur entnommen werden /20/.

#### A.4.4

##### Zündenergie

(1) Die zur Auslösung eines Zerfalls von gasförmigem Acetylen erforderliche Zündenergie variiert stark mit dem Anfangsdruck. Messdaten für reines Acetylen bei Raumtemperatur sind in Abbildung 2 gezeigt.

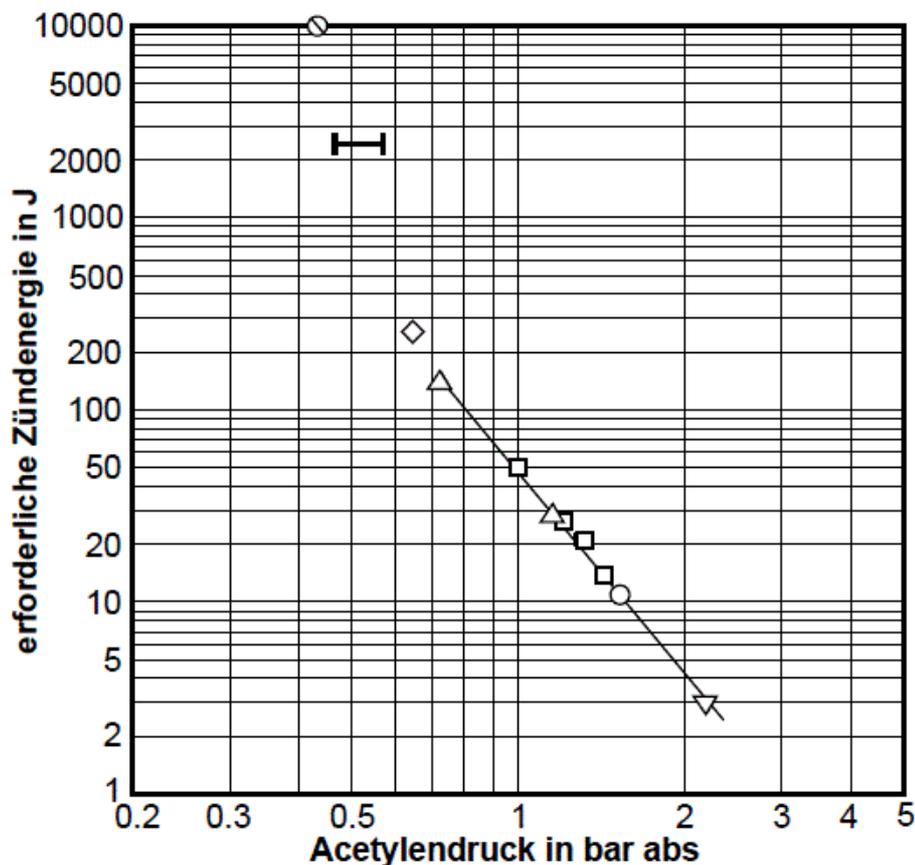


Abbildung 2:  
Zündenergie von reinem Acetylen bei Raumtemperatur /21/

	Induktionsfunke, 1 s, 1 l-Behälter
--	------------------------------------

schmelzender Pt-Draht ohne Lichtbogen, 24 V, DC

schmelzender Pt-Draht mit Lichtbogen, Transformator

schmelzender Pt-Draht mit Lichtbogen, Kondensatorentladung

schmelzender Pt-Draht mit Lichtbogen, Phasenanschnittsteuerung

Induktionsfunke, 1 s, 1 l-Behälter

zwei chemische Zünder mit je 5000 J, 255 l-Behälter

angegebener Bereich in /22/, chemischer Zünder, Rohr NW 450

(2) Eine Abschätzung der Zündenergien bei höheren Acetylenanfangsdrücken ist durch lineare Extrapolation gemäß folgender Gleichung möglich:

$$ZE = 50 J \cdot \frac{1}{(p/1 \text{ bar})^{3,57}} \quad [6]$$

mit

$ZE$  = Zündenergie, in J

$p$  = Acetylenanfangsdruck in bar (absolut)

(3) Die Energie von betriebsüblichen, punktuell und kurzzeitig auftretenden Zündquellen, wie z. B. elektrostatischen Entladungen, liegt in der Regel unterhalb von 20 J. Die Energie von elektrischen Kurzschlussfunken kann dahingegen auch höher sein.

(4) Es ist zu beachten, dass die Zündwirksamkeit von längerfristig wirkenden Zündquellen, wie heißen Oberflächen und Flammen, nicht über Abbildung 2 beurteilt werden kann, sondern die Zündtemperatur herangezogen werden muss.

**A.4.5  
Zündtemperatur**

(1) Die Zündtemperatur für den Zerfall von reinem Acetylen hängt vom Druck ab und sinkt mit steigendem Druck von 550 °C bei 1 bar abs bis etwa 370 °C bei 25 bar abs, siehe dazu Abbildung 3.

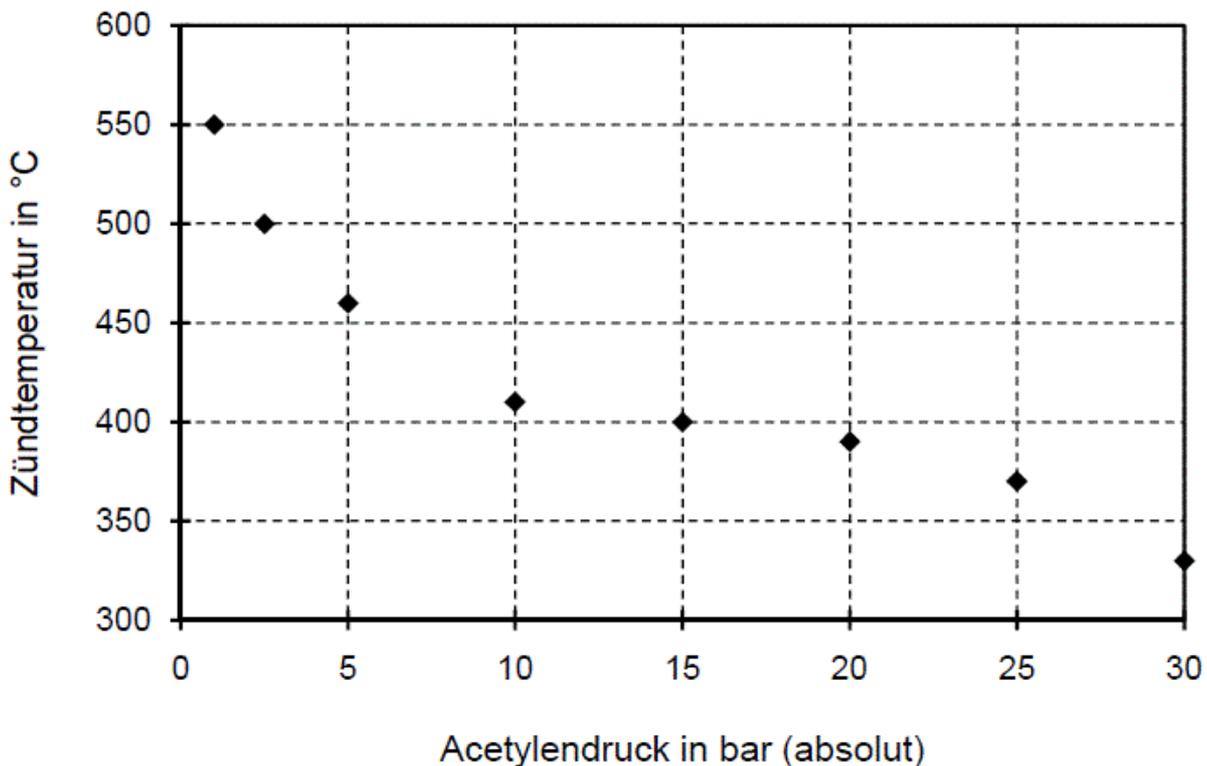


Abbildung 3:  
Zündtemperatur für die Auslösung einer Zerfallsreaktion von reinem Acetylen in Abhängigkeit vom Druck

Werte sind bestimmt in Anlehnung an DIN EN 14522 /23/, Schrittweite abweichend 10 K anstatt 2 K, Volumen des Reaktionsgefäßes: 0,2 l

(2) Acetylen im Gemisch mit Luft hat bei 1 bar abs eine Zündtemperatur von 305 °C.

**A.4.6 Explosionsdruck bei deflagrativem Acetylenzerfall**

Das Explosionsdruckverhältnis (Verhältnis von Explosionsdruck zu Anfangsdruck) für den deflagrativen Zerfall von reinem Acetylen in einem geschlossenen Behälter bei 20 °C beträgt etwa 10. Das Explosionsdruckverhältnis hängt von der Temperatur ab und kann für andere Temperaturen mit folgender Gleichung abgeschätzt werden:

$$r_{T1} = 1 + (r_{T0} - 1) \cdot \frac{T_0}{T_1} \quad [7]$$

mit

- $r_{T1}$  = Explosionsdruckverhältnis bei Anfangstemperatur  $T_1$
- $r_{T0}$  = Explosionsdruckverhältnis bei Anfangstemperatur  $T_0$  ( $r_{T0} = 10$  bei 20 °C)

$T_0$  und  $T_1$  sind in Kelvin einzusetzen.

**A.4.7 Zerfallsverlauf in Rohrleitungen**

(1) Wird in einer mit Acetylen gefüllten Rohrleitung durch eine Zündquelle lokal ein Acetylenzerfall ausgelöst, so hängt der weitere Ablauf bei der Ausbreitung des Zerfalls vom Anfangsdruck in der Rohrleitung und dem Rohrdurchmesser sowie der Energie der Zündquelle ab. Die entsprechenden Grenzdrücke sind in Abbildung 4 gezeigt.

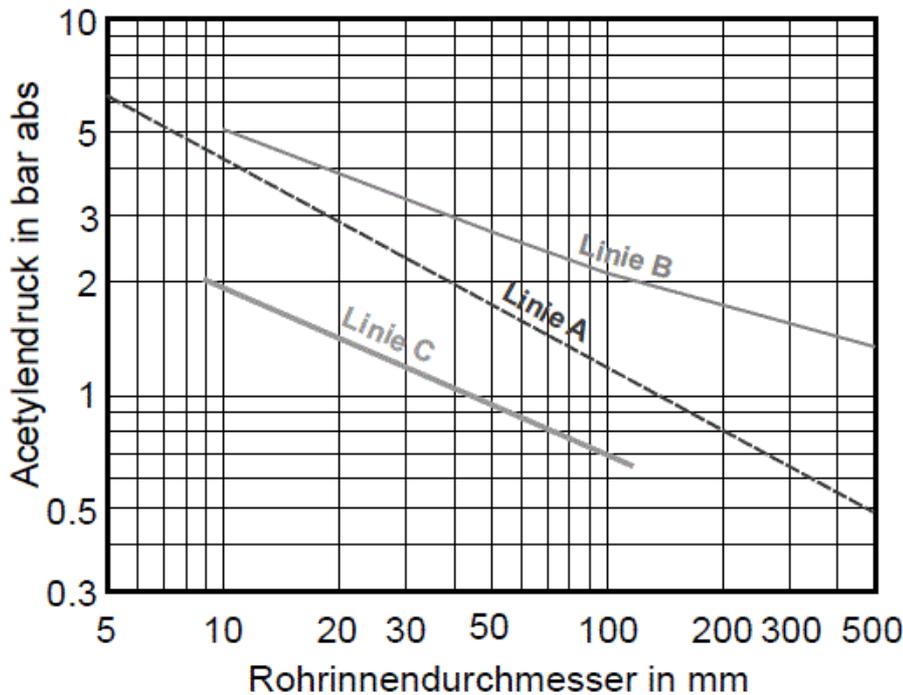


Abbildung 4: Grenzdrücke für die Ausbreitung von deflagrativen Acetylenzerfällen, für den Übergang von deflagrativen zu detonativen Acetylenzerfällen und für die Ausbreitung von detonativen Acetylenzerfällen in Rohrleitungen. Die Daten gelten für Acetylen bei Raumtemperatur.

Linie A:	Mindestens erforderlicher Druck zur Weiterleitung einer Deflagration durch eine Rohrleitung /24/
----------	--

Linie B: Mindestens erforderlicher Druck, damit eine Deflagration in eine Detonation umschlagen kann /25, 26/

Linie C: Mindestens erforderlicher Druck zur Weiterleitung einer durch eine detonative Zündquelle (z. B. einlaufende Detonation) ausgelöste Detonation durch eine Rohrleitung /25, 26/

(2) Wählt man die Rohrlungsdurchmesser in Abhängigkeit vom Acetylendruck so, dass man sich unterhalb der Linie A in Abbildung 4 befindet, so ist nicht mit einer Ausbreitung eines lokal ausgelösten deflagrativen Zerfalls durch die Rohrleitung zu rechnen. Unterhalb von Linie B kann Acetylen zwar deflagrativ zerfallen, aber es ist nicht mit dem Umschlagen in eine Detonation zu rechnen. Unterhalb von Linie C ist mit einem durchlaufenden Acetylenzerfall nicht zu rechnen, unabhängig von der Art möglicher Zündquellen, selbst nicht bei einer detonativen Zündquelle.

#### A.4.8

##### Detonationsanlaufstrecken in Rohrleitungen

Ein Acetylenzerfall in einer Rohrleitung braucht eine Anlaufstrecke, um in eine Detonation umzuschlagen. Diese Strecke zwischen Zündquelle und Umschlag in eine Detonation wird Detonationsanlaufstrecke genannt. Sie hängt u. a. vom Innendurchmesser der Rohrleitung und vom Acetylenanfangsdruck ab. In der Literatur werden bei Raumtemperatur und für Acetylenanfangsdrücke von 1 bar bis 30 bar Werte zwischen dem 40- und 100-fachen des Rohrlungsdurchmessers angegeben. Bei Rohrlungslängen, die kleiner als das 40-fache des Rohrlungsdurchmessers sind, ist daher nicht mit dem Anlaufen einer Detonation zu rechnen (konstruktiver Explosionsschutz).

#### A.4.9

##### Bemessungsdrücke/Auslegungskriterien

(1) Rohrleitungen für Acetylen, in denen bei einem Zerfall auch Detonationen auftreten können, sind für die dabei auftretenden Druckbelastungen auszulegen. Ob ein Acetylenzerfall in eine Detonation umschlagen kann, hängt vor allem vom Druck, vom Innendurchmesser der Rohrleitung und von ihrer Länge ab (siehe dazu Nummer A.4.7 und A.4.8).

(2) Bei einer Detonation in einer Rohrleitung treten zeitlich, und damit auch räumlich, nacheinander die folgenden detonativen Druckszenarien auf:

1. Der Bereich, in dem der Umschlag vom deflagrativen zum detonativen Zerfall (DDT: Deflagration to Detonation Transition) stattfindet, erstreckt sich in axialer Richtung über eine Länge von ca. 1,5 Rohrlungsdurchmessern. In diesem Bereich treten besonders hohe Drücke auf.
2. Nach dem DDT folgt über eine Strecke von bis zu ca. 50 Rohrlungsdurchmessern die Phase der instabilen Detonation, in der der Druck vom Wert gemäß Ziffer 1 auf den Wert der nachfolgenden stabilen Detonation gemäß Ziffer 3 abfällt.
3. Nach der instabilen Detonation folgt die Phase der stabilen Detonation, die das gesamte restliche Rohr durchläuft.
4. Falls im Rohr geschlossene Enden vorhanden sind (z. B. geschlossene Ventile oder blindgeflanschte Rohrenden), erfolgt an diesen Stellen eine Reflexion der Schockwelle, die an die einlaufende stabile Detonation gekoppelt ist (mit Änderung der Ausbreitungsrichtung um 180°). Die Druckbelastung der Rohrwand im Bereich der Reflexion ist deutlich höher als im Bereich der stabilen Detonation.

(3) Die Druckpeaks, die bei einer Detonation auftreten können, haben eine geringere verformende Wirkung als ein gleich hoher statischer Druck. Daher werden die Drücke nach Absatz 2 in statische Vergleichsdrücke umgerechnet /27, 28/. Für die Festlegung von Bemessungsdrücken zur Auslegung von Rohrleitungen können dann die statischen Vergleichsdrücke zugrunde gelegt werden.

(4) Der statische Vergleichsdruck im Bereich der stabilen Detonation nach Absatz 2 Nr. 3 ist gegeben durch:

$$p_{stat\_stabil} = 0,66 \cdot p_{CJ\_r} \cdot p_{anfang} \quad [8]$$

mit

$p_{stat\_stabil}$	=	statischer Vergleichsdruck einer stabilen Detonation in einer geraden Acetylenrohrleitung in bar abs
$p_{anfang}$	=	Anfangsdruck des Acetylens in bar abs
$p_{CJ\_r}$	=	Explosionsdruckverhältnis für den detonativen Zerfall (stabile Detonation) bei 20 °C gemäß Tabelle 1 ( $p_{CJ\_r} = 40$ für 20 °C). Dieser Wert ist umgekehrt proportional zur absoluten Temperatur. Bei anderen Anfangstemperaturen $T$ muss dieser Wert deshalb mit dem Faktor 293,15 K/ $T$ multipliziert werden, wobei $T$ in Kelvin einzusetzen ist.

(5) Der statische Vergleichsdruck am Ort des DDT nach Absatz 2 Nr. 1 lässt sich aus dem statischen Vergleichsdruck der stabilen Detonation berechnen. Er ergibt sich in Abhängigkeit vom Anfangsdruck gemäß den nachstehenden Gleichungen 9, 10 oder 11. Die Gleichungen gelten zumindest für Anfangsdrücke bis 30 bar. Druckangaben erfolgen gemäß Nummer 1 Absatz 5 als Absolutdruck.

$$p_{stat\_DDT} = 3 \cdot p_{stat\_stabil} \quad \text{für } p_{anfang} \leq 1,5 \text{ bar} \quad [9]$$

$$p_{stat\_DDT} = \left( 1,5 + \frac{1,5 \cdot (20 - p_{anfang})}{18,5} \right) \cdot p_{stat\_stabil} \quad \text{für } 1,5 \text{ bar} < p_{anfang} < 20 \text{ bar} \quad [10]$$

$$p_{stat\_DDT} = 1,5 \cdot p_{stat\_stabil} \quad \text{für } p_{anfang} \geq 20 \text{ bar} \quad [11]$$

mit

$p_{stat\_DDT}$	=	statischer Vergleichsdruck am Umschlagpunkt von Deflagration zu Detonation in einer langen Rohrleitung, in bar abs; die Rohrleitung im Bereich des Umschlagpunktes ist als gerade angenommen.
$p_{stat\_stabil}$	=	statischer Vergleichsdruck einer stabilen Detonation in einer geraden Acetylenrohrleitung, in bar abs; der statische Vergleichsdruck wird gemäß Gleichung 8 berechnet.

(6) Wird eine stabile Detonation an einem geschlossenen Rohrende gemäß Absatz 2 Nr. 4 reflektiert, tritt dabei folgender statischer Vergleichsdruck in der Rohrwandung auf.

$$p_{stat\_stabil\_reflekt} = 2,5 \cdot p_{stat\_stabil} \quad [12]$$

mit

$p_{stat\_stabil\_reflekt}$	=	statischer Vergleichsdruck einer reflektierten stabilen Detonation in einer Acetylenrohrleitung in bar abs
-----------------------------	---	--

(7) Rohre mit Rohrbögen, deren Krümmungsradius  $\geq 5$  Durchmesser ist, ("5DBögen") können hinsichtlich der auf die Wand einwirkenden Druckbelastung bei einer durchlaufenden Detonation wie gerade Rohrleitungen bewertet werden. Bei Bögen mit Krümmungsradien  $< 5D$  und einer Umlenkung um 90° erhöht sich die Belastung in der Wandung an der Außenseite des Bogens bei Durchlauf einer Detonation etwa um den Faktor 1,5 gegenüber der Wandbelastung im geraden Rohr. Dies bedeutet, dass beim Auftreten eines DDT in einem Rohrbogen mit einem Krümmungsradius  $< 5D$  die durch die Gleichungen 9, 10 und 11 ermittelten statischen Vergleichsdrücke noch mit dem Faktor 1,5 multipliziert werden müssen. Ebenso muss beim Durchlauf einer stabilen Detonation durch einen derartigen Bogen der gemäß Gleichung 8 ermittelte statische Vergleichsdruck mit dem Faktor 1,5 multipliziert werden.

(8) Bei Rohrleitungen mit Innendurchmessern größer als ca. 300 mm können die statischen Vergleichsdrücke wegen der geringeren Eigenfrequenz der radialsymmetrischen Grundschwingung der Rohrleitungen geringer ausfallen als durch die obigen Gleichungen berechnet.

(9) Für Ausrüstungsteile und alternativ zur Auslegung gemäß dem berechneten Bemessungsdruck kann auch eine experimentelle Auslegung mittels Acetylenzerfallsprüfung erfolgen. Für die Durchführung der Acetylenzerfallsprüfung siehe z. B. DIN EN ISO 15615 /29/. Bei der Acetylenzerfallsprüfung darf keine sichtbare permanente Deformation und keine Undichtigkeit auftreten.

(10) Für den Bemessungsdruck braucht nur die stabile Detonation gemäß Gleichung 8 und an Stellen möglicher Reflektion der Druck gemäß Gleichung 12 berücksichtigt werden

1. bei Rohrleitungen in Füllanlagen basierend auf TRBS 3145/TRGS 745 Nummer 4.3.1 Absatz 2 und 3 und den besonderen Maßnahmen gemäß TRBS 3145/TRGS 745 Nummer 4.3.6 Absatz 1,
2. bei Batterieanlagen für Acetylen, wenn diese DIN EN ISO 14114 /30/ entsprechen und der Hochdruckteil in einem Bereich angeordnet ist, zu dem nur besonders unterwiesene Personen Zugang haben.

(11) Von einer explosionsdruckfesten Auslegung von Rohrleitungen kann abgewichen werden, und es kann eine explosionsdruckstoßfeste Auslegung erfolgen. In dem Fall müssen nach einem Acetylenzerfall die Rohrleitungen auf sichtbare Deformationen untersucht und ggf. ausgetauscht werden.

(12) Die Rohrleitungen müssen dann so bemessen sein, dass der anwendbare Bemessungsdruck gemäß Absatz 4, 5 oder 6 den gemäß folgender Gleichung berechneten Druck nicht überschreitet /31, 32/:

$$p_{ex-stoßfest} = \frac{10 \cdot R_{p\ 0,2}}{\sqrt{3}} \cdot \ln \frac{r_o^2}{r_i^2} \quad [13]$$

mit

$p_{ex-stoßfest}$  = Druck, der gerade zur Plastifizierung über die gesamte Wandstärke der Rohrleitung führt, in bar abs

$R_{p\ 0,2}$  = Dehngrenze, in N/mm<sup>2</sup>

$r_o$  = äußerer Radius der Rohrleitung, in mm

$r_i$  = innerer Radius der Rohrleitung, in mm

Die mindestens erforderliche Wandstärke  $s$  ( $= r_o - r_i$ ) ergibt sich damit aus Gleichung 13 wie folgt:

$$s = r_o \cdot \left( 1 - \exp \left( \frac{-p_{ex-stoßfest} \cdot \sqrt{3}}{20 \cdot R_{p\ 0,2}} \right) \right) \quad [14]$$

mit

$s$  = Wandstärke, in mm

(13) Prüfdrücke für die Prüfung vor Inbetriebnahme gemäß PED und für wiederkehrende Prüfungen gemäß BetrSichV und TRBS 1201-2 bleiben unberührt.

Bei der explosionsdruckstoßfesten Auslegung ist darüber hinaus aber zu beachten, dass der Prüfdruck bei der Prüfung vor Inbetriebnahme niedriger sein muss als der Bemessungsdruck, um Schäden an der Rohrleitung zu verhindern. In der Regel ist von einem Prüfdruck von  $0,9 \times$  Bemessungsdruck auszugehen, siehe dazu auch Abschnitt 6.3 der DIN EN 14460 /32/.