

Ausgabe: Februar 2016 ^{*)}

**GMBI 2016 S. 328-364 [Nr. 12-17] (v. 26.04.2016)
geändert und ergänzt: GMBI 2016 S. 880 [Nr. 44] (v. 26.10.2016)**

Technische Regeln für Gefahrstoffe	Tätigkeiten mit Gasen - Gefährdungsbeurteilung	TRGS 407
---	---	-----------------

Die Technischen Regeln für Gefahrstoffe (TRGS) geben den Stand der Technik, Arbeitsmedizin und Arbeitshygiene sowie sonstige gesicherte arbeitswissenschaftliche Erkenntnisse für Tätigkeiten mit Gefahrstoffen, einschließlich deren Einstufung und Kennzeichnung, wieder.

Sie werden vom

Ausschuss für Gefahrstoffe (AGS)

ermittelt bzw. angepasst und vom Bundesministerium für Arbeit und Soziales im Gemeinsamen Ministerialblatt bekannt gegeben.

Diese TRGS konkretisiert im Rahmen ihres Anwendungsbereichs Anforderungen der Gefahrstoffverordnung. Bei Einhaltung der Technischen Regeln kann der Arbeitgeber insoweit davon ausgehen, dass die entsprechenden Anforderungen der Verordnung erfüllt sind. Wählt der Arbeitgeber eine andere Lösung, muss er damit mindestens die gleiche Sicherheit und den gleichen Gesundheitsschutz für die Beschäftigten erreichen.

Inhaltsverzeichnis

- 1 Anwendungsbereich
- 2 Begriffsbestimmungen
- 3 Informationsermittlung und Gefährdungsbeurteilung
- 4 Schutzmaßnahmen bei Tätigkeiten mit Gasen

Anhang 1 zu TRGS 407 Einteilung der Gase in Gruppen und gasspezifische Maßgaben

Anhang 2 zu TRGS 407 Einstufung von Gasgemischen

Anhang 3 zu TRGS 407 Gasgemische-Diagramm

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

Literatur

^{*)} Hinweis: Die Neufassung enthält neben redaktionellen Ergänzungen und Aktualisierungen, z.B. bei in Bezug genommenen Regelwerken, Ergänzungen zu Acetylen, insbesondere in Nummer 3.2.6 und im neuen Anhang 4.

1 Anwendungsbereich

- (1) Diese TRGS gilt für Tätigkeiten mit Gasen, einschließlich Flüssiggas und Gasen zu Brennzwecken.
- (2) Diese TRGS gilt auch für Tätigkeiten mit Cyanwasserstoff (HCN).
- (3) Diese TRGS beschreibt in Ergänzung zu TRGS 400 „Gefährdungsbeurteilung für Tätigkeiten mit Gefahrstoffen“ Vorgehensweisen bei der Informationsermittlung und Gefährdungsbeurteilung sowie gasspezifische Schutzmaßnahmen bei Tätigkeiten mit Gasen.
- (4) In dieser TRGS werden Einstufungen gemäß Verordnung (EG) Nr. 1272/2008 (im Folgenden CLP-Verordnung genannt) verwendet.
- (5) In dieser TRGS werden Druckangaben als Absolutdruck gemacht und in der Regel in kPa (und ggf. zusätzlich in bar) angegeben, außer es wird ausdrücklich darauf hingewiesen, dass es sich um einen Überdruck handelt.

2 Begriffsbestimmungen

(1) In dieser TRGS werden die Begriffe so verwendet, wie sie im „Begriffsglossar zu den Regelwerken der Betriebssicherheitsverordnung (BetrSichV), Biostoffverordnung (BioStoffV) und der Gefahrstoffverordnung (GefStoffV)“ des ABAS, ABS und AGS bestimmt sind (siehe www.baua.de/de/Themen-von-A-Z/Gefahrstoffe/Glossar/Glossar.html). Weitere Begriffe werden im Folgenden bestimmt.

(2) Gase im Sinne dieser Technischen Regel und gemäß CLP-Verordnung sowie Gefahrgutrecht sind Stoffe oder Gemische, die

1. bei 50 °C einen Dampfdruck von mehr als 300 kPa (3 bar) haben oder
2. bei 20 °C und einem Standarddruck von 101,3 kPa vollständig gasförmig sind.

In dieser TRGS wird der Begriff „Gas“ im Sinne von „Gas und Gasgemisch“ verwendet, andernfalls wird explizit darauf hingewiesen, z. B. durch die Verwendung des Begriffs „reines Gas“ oder die alleinige Verwendung des Begriffs „Gasgemisch“.

(3) Gase sind, bezogen auf den Zustand nach Austritt, d. h. bei der jeweiligen Temperatur des Gases und dem Druck der Umgebungsatmosphäre,

1. schwerer als Luft, wenn ihre Dichte $> 1,3 \text{ kg/m}^3$ ist,
2. gleich schwer wie Luft, wenn ihre Dichte $\leq 1,3 \text{ kg/m}^3$ und $\geq 1,2 \text{ kg/m}^3$ ist bzw.
3. leichter als Luft, wenn ihre Dichte $< 1,2 \text{ kg/m}^3$ ist.

Verflüssigte Gase haben nach Freisetzung tiefe Temperaturen und sind in diesem Zustand daher in der Regel schwerer als Luft.

(4) Tiefgekühlt verflüssigte Gase sind Gase, deren flüssiger Zustand durch Kühlung, Verdampfung oder Wärmedämmung bei einer Temperatur gehalten wird, die unter der Temperatur der Umgebung liegt.

(5) Gasgemische sind Gemische, die der Definition für Gase der CLP-Verordnung entsprechen und die aus zwei oder mehreren Gasen oder ggf. auch Flüssigkeiten

bestehen. Sie haben bei 50 °C einen Dampfdruck von mehr als 300 kPa (3 bar) oder sind bei 20 °C und einem Standarddruck von 101,3 kPa vollständig gasförmig. Sie können auch einen oder mehrere kondensierbare Stoffe enthalten. Als kondensierbar gilt dabei jedes Gas mit einer kritischen Temperatur $T_k \geq -50$ °C und jede Flüssigkeit.

(6) Technische Gasgemische sind Gasgemische, die im ADR /1/ Abschnitt 4.1.4.1 Verpackungsanweisung P200, aufgeführt sind und eine dem spezifischen Gemisch zugeordnete UN-Nummer haben.

(7) Gasgemische-G (gasförmig) sind Gasgemische, die beim höchstzulässigen Druck der Füllung bei 15 °C nur im gasförmigen Zustand vorliegen. Die Bestimmung der Füllmenge erfolgt im Allgemeinen durch Druckmessung (manometrisch).

(8) Gasgemische-L (flüssig bzw. liquid) sind Gasgemische, die im Druckgasbehälter bei 15 °C sowohl im flüssigen als auch im gasförmigen Zustand vorliegen. Die Bestimmung der Füllmenge erfolgt im Allgemeinen nach Gewicht (gravimetrisch).

(9) Druckgasbehälter sind Druckbehälter für Gase, unabhängig vom Druck. Zum Druckgasbehälter gehören die Ausrüstungsteile, die dessen Sicherheit beeinflussen können. Es werden ortsbewegliche und ortsfeste Druckgasbehälter unterschieden. Druckgasbehälter sind

1. ortsbewegliche Druckgeräte im Sinne der Richtlinie 2010/35/EU (TPED) bzw. der Ortsbewegliche-Druckgeräte-Verordnung (ODV),
2. Druckgefäße im Sinne des Gefahrgutrechts (Flaschen, Großflaschen, Druckfässer, verschlossene Kryo-Behälter und Flaschenbündel),
3. Multiple-Element Gas Container (MEGC), Tanks und Batteriefahrzeuge im Sinne des Gefahrgutrechts,
4. einfache Druckbehälter im Sinne der Richtlinie 2009/105/EG (zukünftig Richtlinie 2014/29/EU) bzw. der Verordnung über die Bereitstellung von einfachen Druckbehältern auf dem Markt (6. ProdSV),
5. Druckgeräte im Sinne der Richtlinie 97/23/EG (zukünftig Richtlinie 2014/68/EU) (PED) bzw. der Druckgeräteverordnung (14. ProdSV) für Gase sowie
6. andere Druckgasbehälter oder Kryo-Behälter für Gase, die von diesen Rechtsbereichen nicht erfasst sind, wie z. B. Behälter, die vor Inkrafttreten der PED in Verkehr gebracht worden sind.

(10) Druckanlagen im Sinne dieser TRGS sind Druckanlagen gemäß TRBS 2141, soweit sie für Gase bestimmt sind.

(11) Gefahrenbereiche im Sinne dieser Technischen Regel sind Bereiche, in denen gefährliche Gaskonzentrationen auf Grund der örtlichen und betrieblichen Verhältnisse nicht ausgeschlossen werden können, z. B. infolge betriebsbedingter Freisetzung von Gasen beim Anschließen oder Lösen von Leitungsverbindungen oder beim Öffnen von Peilventilen.

(12) Sicherheitsabstand im Sinne dieser Technischen Regel ist der erforderliche Abstand zwischen einer ortsfesten Druckanlage für Gase und einem Schutzobjekt.

(13) Schutzobjekte sind Einrichtungen, Gebäude und Anlagen, in denen oder bei denen sich dauernd oder regelmäßig Beschäftigte oder andere Personen aufhalten, zu deren Schutz nicht ebensolche Vorsorgemaßnahmen getroffen sind, wie für die im Bereich der ortsfesten Druckanlage für Gase selbst Beschäftigten (z. B. Maßnahmen zur Alarmierung und Gefahrenabwehr).

(14) Schutzabstände sind Abstände zwischen Druckanlagen für Gase und benachbarten Anlagen, Einrichtungen, Gebäuden und öffentlichen Verkehrswegen, deren Zweck es ist, die Druckanlage vor einem Schadensereignis, wie Erwärmung infolge Brandbelastung oder mechanischer Beschädigung zu schützen.

(15) Explosionsgrenzen sind Grenzen des Explosionsbereiches. Die untere Explosionsgrenze (UEG) bzw. die obere Explosionsgrenze (OEG) sind der untere bzw. obere Grenzwert der Konzentration (Stoffmengenanteil) eines brennbaren Stoffes in einem Gemisch von Gasen, Dämpfen, Nebeln und/oder Stäuben mit Luft (oder einem anderen Oxidationsmittel), in dem sich nach dem Zünden eine von der Zündquelle unabhängige Flamme gerade nicht mehr selbstständig fortpflanzen kann.

(16) Die Sauerstoffgrenzkonzentration (SGK bzw. LOC für limiting oxygen concentration) ist die maximale Sauerstoffkonzentration, bei der in einem Gemisch eines brennbaren Stoffes mit Luft und inertem Gas eine Explosion nicht mehr auftreten kann, wobei die Anteile von brennbarem Stoff und Inertgas beliebig variiert werden können.

3 Informationsermittlung und Gefährdungsbeurteilung

3.1 Gefahrstoffeigenschaften

3.1.1 Allgemeine Hinweise zu Eigenschaften

(1) Die gefährlichen Eigenschaften von Gasen werden im Wesentlichen durch die gefahrstoffrechtliche Einstufung und Kennzeichnung wieder gegeben und erkennbar. Einstufung und Kennzeichnung gasförmiger Gefahrstoffe sind daher auch Grundlage für die Gefährdungsbeurteilung bei Tätigkeiten mit Gasen. Gemäß CLP-Verordnung werden Gase entsprechend ihrer entzündbaren oder oxidierenden Eigenschaften sowie gemäß ihrer Gesundheits- und/oder Umweltgefahren eingestuft und gekennzeichnet. Unabhängig davon erfolgt nach CLP-Verordnung die Einstufung und Kennzeichnung als „Gase unter Druck“ (verdichtete Gase ab einem Überdruck von 200 kPa (2 bar), verflüssigte Gase, tiefgekühlt verflüssigte Gase und gelöste Gase). Die Einstufung und Kennzeichnung bei innerbetrieblichen Tätigkeiten erfolgt nach TRGS 201 „Einstufung und Kennzeichnung bei Tätigkeiten mit Gefahrstoffen“. Ortsbewegliche Gasflaschen sind in der Regel auch mit einer Farbkennzeichnung versehen, die die Identifizierung des Inhalts auch aus der Entfernung erlaubt (z. B. im Gefahrenfall), siehe DIN EN 1089-3 /2/.

(2) Zusätzlich zu den einstuferrelevanten gefährlichen Eigenschaften können Gase weitere Eigenschaften haben, die bei der Gefährdungsbeurteilung zu berücksichtigen und in den folgenden Absätzen 3 bis 15 aufgeführt sind.

(3) Temperatur und Druck beeinflussen die Eigenschaften von Gasen erheblich und hängen auch voneinander ab. So führt eine Temperaturerhöhung zu einer Druckerhöhung im Druckgasbehälter (durch Wärmeausdehnung bei Permanentgasen (siehe Nummer 3.1.2 Absatz 2) bzw. durch Dampfdruckerhöhung bei verflüssigten Gasen). Umgekehrt führt eine Druckerhöhung durch adiabatische Verdichtung zu einer Temperaturerhöhung. Bei verflüssigten Gasen führt die Temperaturerhöhung auch zur Ausdehnung der Flüssigphase und kann in geschlossenen Behältern bzw. Anlagen (z. B. bei Überschreitung der Füllfaktoren von ortsbeweglichen Druckgasbehältern) zu sehr hohen Drücken führen.

(4) Als entzündbar eingestufte Gase können ggf. zusätzlich pyrophor (selbstentzündlich) sein, d. h., sie können sich an Luft von selbst entzünden und dadurch besondere Brand- und Explosionsgefährdungen verursachen. Gemäß UN-GHS (und zukünftig gemäß CLP-Verordnung) werden Gase als pyrophore Gase eingestuft, wenn ihre Zündtemperatur ≤ 54 °C ist. Beispiele sind Silan oder Phosphan (veraltet Phosphin). Die Zündtemperatur kann z. B. in Anlehnung an DIN 51794 bestimmt werden.

(5) Gase können ggf. chemisch instabil sein, d. h., sie können ohne die Anwesenheit von Sauerstoff (oder Luft) explosionsartig reagieren (zerfallen). Im Allgemeinen handelt es sich dabei um entzündbare Gase wie z. B. Acetylen (Ethin), Ethylenoxid (1,2-Epoxyethan), Propadien oder Methylvinylether (Methoxyethen). Eine Liste mit einigen entzündbaren chemisch instabilen Gasen einschließlich Konzentrationsgrenzen ist im UN Handbuch über Prüfungen und Kriterien /3/ in Section 35 enthalten. Es gibt auch nicht entzündbare Gase, die chemisch instabil sind, wie z. B. Ozon oder Distickstoffoxid (Lachgas); diese werden aber gemäß CLP-Verordnung nicht als chemisch instabil eingestuft und gekennzeichnet.

(6) Gase können ggf. als solche oder in Verbindung mit Wasser oder Feuchtigkeit korrosiv wirken und dadurch Behälter- bzw. Konstruktionswerkstoffe angreifen. Beispiele sind Ammoniak, Schwefelwasserstoff oder Halogenwasserstoffe bzw. Gase, die durch Reaktion mit Wasser diese Gase bilden. Dazu zählen insbesondere Gase, die durch Reaktion mit Wasser Halogenwasserstoff bilden, wie z. B. Fluor, Chlor oder zahlreiche andere Gase, die Halogene enthalten. Durch Reaktion mit Wasser oder Feuchtigkeit können aber auch andere korrosive Stoffe entstehen, wie z. B. bei der Reaktion von Schwefeldioxid mit Wasser zu Schweflige Säure (veraltet Schweflige Säure).

(7) Gase können ggf. polymerisieren. Polymerisationsreaktionen können je nach Lager- bzw. Umgebungsbedingungen heftig und unter starkem Druck- und Temperaturanstieg oder langsam ablaufen. Beispiele für heftig ablaufende Reaktionen sind die Polymerisation von Ethylenoxid zu Polyethylenglykol, von 1,3-Butadien zu Polybutadienen oder von Ethylen (Ethen) zu Polyethylen.

(8) Sauerstoffgrenzkonzentrationen von entzündbaren Gasen im Gemisch mit den Inertgasen Stickstoff und Kohlendioxid sind in der TRGS 722 "Vermeidung oder Einschränkung gefährlicher explosionsfähiger Atmosphäre" in Nummer 2.3.3.2 Tabelle 1 aufgeführt. Explosionsgrenzen und Sauerstoffgrenzkonzentrationen für weitere Gasgemische sind in den sicherheitstechnischen Datenbanken GSBL /4/ und Chemsafe /5/ und in der Literatur /6, 7/ zu finden. Prüfmethode für die Bestimmung von Explosionsgrenzen sind in DIN EN 1839 /8/ und für Sauerstoffgrenzkonzentrationen in DIN EN 14756 /9/ beschrieben.

(9) Im Allgemeinen werden Explosionsgrenzen für atmosphärische Bedingungen angegeben. Bei erhöhter Temperatur und/oder erhöhtem Druck weitet sich der Explosionsbereich in der Regel auf, d. h. die UEG verschiebt sich zu niedrigeren und die OEG zu höheren Werten. Deshalb kann ein Gas, das unter atmosphärischen Bedingungen keinen Explosionsbereich hat und dementsprechend nicht als entzündbares Gas eingestuft ist, bei erhöhter Temperatur und/oder erhöhtem Druck einen Explosionsbereich haben. Beispiele sind teilhalogenierte Kohlenwasserstoffe, wie z. B. das Kältemittelgas R134a.

(10) Ein erhöhter Sauerstoffgehalt oder ein anderes Oxidationsmittel als Luft verändern die Explosionsgrenzen ebenfalls. In reinem Sauerstoff ist der Explosionsbereich in der Regel erheblich aufgeweitet und insbesondere die OEG verschiebt sich zu höheren Werten.

(11) Andere Eigenschaften, wie z. B. oxidierende Eigenschaften oder chemische Instabilität, verändern sich ebenfalls in Abhängigkeit von Temperatur und Druck.

(12) Mit Ausnahme von Sauerstoff oder Luft (oder auch anderen Atemgasen) wirken Gase in genügend hohen Konzentrationen grundsätzlich erstickend, da sie den Luftsauerstoff verdrängen. Bei Kohlendioxid ist zu beachten, dass es auf das Atemzentrum wirkt und daher schon in wesentlich geringerer Konzentration als zur Verdrängung des Luftsauerstoffs erforderlich ist, eine erstickende Wirkung entfaltet.

(13) Gasgemische mit Gasen, die leichter als Luft sind (z. B. Wasserstoff), können durch die anderen Bestandteile im Gemisch eine höhere Dichte als Luft haben und sich daher in Bodennähe ansammeln. Die Gemische entmischen sich unter Einwirkung der Schwerkraft nicht.

(14) Befinden sich Gase unterhalb ihrer kritischen Temperatur, lassen sie sich verflüssigen. Bei entsprechenden Temperaturen kann es daher zur Kondensation von Gasen kommen, was ggf. zur Entstehung von Unterdruck im Druckgasbehälter oder in der Druckanlage und damit zu gefährlichen Zuständen führen kann.

(15) Tiefgekühlt verflüssigte Gase können aufgrund ihrer niedrigen Temperatur zu Kälteverbrennungen führen, wenn sie mit der Haut in Berührung kommen. Auch die Armaturen für solche Gase können sehr niedrige Temperaturen haben.

3.1.2 Einteilung der Gase in Gruppen

(1) Gase können aufgrund ihrer Eigenschaften in Gruppen eingeteilt werden. Die Einteilung erfolgt anhand der kritischen Temperatur und anhand bestimmter gefährlicher Eigenschaften (Entzündbarkeit, chemische Instabilität). Diese Einteilung in Gruppen ist in Anhang 1 für einige wichtige technische Gase angegeben. Daten für reine Gase sind in Anhang 1 Nummer A.1.1 enthalten und für Gasgemische in Anhang 1 Nummer A.1.2. Aus der Zuordnung zu einer Gruppe können grundlegende gemeinsame sicherheitstechnische Eigenschaften und Anforderungen abgeleitet werden. Weitere Eigenschaften, wie der Siedepunkt, die Dichte (bzw. die relative Dichte) und Informationen, die aus dem Gefahrgutrecht stammen, wie die UN-Nr. und der Klassifizierungscode sind dort zusätzlich angegeben. Diese Informationen können als Unterstützung für die Gefährdungsbeurteilung genutzt werden.

(2) Tabelle 1 in Anhang 1 enthält die sogenannten Permanentgase mit einer kritischen Temperatur $T_k \leq -50$ °C. Diese Gase lassen sich auch unter Druck nicht

verflüssigen (gilt für Temperaturen $> -50\text{ °C}$). Innerhalb von Tabelle 1 sind die Gase nach ihrer Entzündbarkeit in die Gruppen 1.1 und 1.2 unterteilt.

(3) Tabelle 2 in Anhang 1 enthält Gase mit einer kritischen Temperatur $-50\text{ °C} < T_k \leq 65\text{ °C}$. Diese Gase lassen sich unter vergleichsweise hohem Druck verflüssigen (gilt für Temperaturen $< T_k$). Innerhalb von Tabelle 2 sind die Gase nach ihrer Entzündbarkeit und ihrer chemischen Stabilität in die Gruppen 2.1 bis 2.3 eingeteilt.

(4) Tabelle 3 in Anhang 1 enthält Gase mit einer kritischen Temperatur $T_k > 65\text{ °C}$. Diese Gase lassen sich bereits unter vergleichsweise geringem Druck verflüssigen. Innerhalb von Tabelle 3 sind die Gase nach ihrer Entzündbarkeit und ihrer chemischen Stabilität in die Gruppen 3.1 bis 3.3 eingeteilt.

(5) Darüber hinaus enthalten die Tabellen in Anhang 1 Bemerkungen und besondere Maßgaben, die für innerbetriebliche Tätigkeiten mit Gasen gelten, wie z. B. das Füllen für Zwecke der innerbetrieblichen Verwendung. Die Gefahrgutvorschriften einschließlich der Regelungen aus ADR /1/ und RID bleiben durch diese Bemerkungen und besonderen Maßgaben unberührt.

3.1.3 Gasgemische

(1) Gasgemische können die gleichen Gefahrstoffeigenschaften aufweisen wie reine Gase. Für innerbetrieblich hergestellte und nicht in Verkehr gebrachte Gasgemische wird eine entsprechende Einstufung nach CLP-Verordnung empfohlen (siehe dazu Anhang 2).

(2) Die Eigenschaften eines Gasgemischs werden auch durch die enthaltenen inerten Gase bestimmt, da diese in unterschiedlichem Maß inertisierend wirken. Argon wirkt beispielsweise wesentlich weniger inertisierend als Stickstoff. Zwei Gasgemische, die dasselbe entzündbare Gas oder dasselbe oxidierende Gas in derselben Konzentration enthalten, können daher - je nach Inertgas - trotzdem unterschiedliche Entzündbarkeit oder unterschiedliches Oxidationsvermögen haben. Der Explosionsbereich bzw. das Oxidationsvermögen eines Gasgemischs werden vom Inertgas mitbestimmt.

(3) Für einige Stoffe sind die bei Inertisierung sicher zu unter- oder überschreitenden Grenzwerte entzündbarer Gase und Dämpfe bei 100 kPa (1 bar) Gesamtdruck in TRGS 722 Nummer 2.3.3.2 Tabelle 1 angegeben.

(4) Gasgemische, die transportiert werden sollen, sind mit Ausnahme der Technischen Gasgemische mit eigener UN-Nr. einer Sammeleintragung nach ADR zuzuordnen. Diese Sammeleintragungen „n.a.g“ (nicht anderweitig genannt) sind über einen Klassifizierungscode den Eigenschaften erstickend (A), entzündbar (F), oxidierend (O), giftig (T) und ätzend (C) Gasgruppen zugeordnet.

(5) Gasgemische, die pyrophore Gase mit einem Stoffmengenanteil von mehr als 1 Mol-% enthalten, sind ebenfalls als pyrophor einzustufen, sofern keine anderen Erkenntnisse dazu vorliegen.

(6) Auch ein nicht entsprechend eingestuftes Gasgemisch kann, wenn es entzündbare und oxidierende Bestandteile enthält, unter Druck, z. B. in Druckgasbehältern, trotzdem gefährlich reagieren.

(7) Gasgemische, die chemisch instabile Gase, wie z. B. Acetylen, enthalten, können auch ohne Oxidationsmittel, wie z. B. Luftsauerstoff, gefährlich reagieren. Tabellen mit chemisch instabilen Gasen sowie entsprechenden Konzentrationsgrenzen sind im UN Handbuch über Prüfungen und Kriterien /3/ in Section 35 enthalten.

(8) Für Gasgemische, die gegenüber Behälter- und Konstruktionswerkstoffen korrosive Gase enthalten, kann keine allgemeine Konzentrationsgrenze festgelegt werden, unterhalb derer mit einer korrosiven Wirkung des Gasgemischs nicht mehr gerechnet werden muss. Sie hängt von dem enthaltenen korrosiven Gas ab, aber auch von den zu berücksichtigenden Werkstoffen. Hinweise auf die Korrosivität von Gasen finden sich z. B. in den Tabellen in Anhang 1.

(9) Bei der Herstellung von Gasgemischen ist zu berücksichtigen, dass auch die einzelnen Gase des Gemisches gefährlich miteinander reagieren können (siehe Nummer 3.2.8 und Anhang 3).

3.2 Gefährdungsermittlung und -beurteilung

3.2.1 Allgemeine Hinweise zur Gefährdungsbeurteilung

(1) Der Arbeitgeber hat im Rahmen der Gefährdungsbeurteilung gemäß § 5 Arbeitsschutzgesetz sowie § 6 GefStoffV und § 3 BetrSichV zu ermitteln, ob sich durch die Tätigkeiten mit Gasen Gefährdungen für die Beschäftigten oder andere Personen ergeben, und entsprechende Schutzmaßnahmen zu ergreifen. Zur Durchführung der Gefährdungsbeurteilung wird insbesondere auf die TRGS 400 und die TRBS 1111 sowie für die dermale und inhalative Exposition auf die TRGS 401 „Gefährdung durch Hautkontakt – Ermittlung, Beurteilung, Maßnahmen“ und TRGS 402 „Ermitteln und Beurteilen der Gefährdungen bei Tätigkeiten mit Gefahrstoffen: Inhalative Exposition“ verwiesen.

(2) Die wichtigsten Informationsquellen für die bei der Gefährdungsbeurteilung für Tätigkeiten mit Gasen zu berücksichtigenden Eigenschaften der Gase sind die Kennzeichnung nach CLP-Verordnung und/oder nach den Gefahrgutvorschriften und das Sicherheitsdatenblatt nach Verordnung (EG) Nr. 1907/2006 in der aktuellen Fassung sowie ergänzende Angaben des Herstellers.

(3) Weitere nützliche Informationsquellen sind die Sicherheitshinweise und Merkblätter des Industriegasverband (IGV) sowie DGUV-Regeln und Informationen (siehe Literaturverzeichnis).

(4) Gefährdungen bei Tätigkeiten mit Gasen können sich insbesondere ergeben durch

1. den Druck von Gasen in Druckgasbehältern oder Druckanlagen (siehe dazu auch TRBS 2141),
2. betriebsbedingte Freisetzung von Gasen,
3. Freisetzung von Gasen z. B. durch unbeabsichtigtes Öffnen von unter Druck stehenden Anlagenteilen,

4. Abweichungen vom bestimmungsgemäßen Betrieb (Abweichungen von den zulässigen Betriebsparametern, Undichtigkeiten) und störungsbedingte Freisetzung von Gasen,
5. Einwirkungen von außerhalb auf den Druckgasbehälter oder die Druckanlage,
6. das Mischen von Gasen,
7. erstickende Wirkung durch Verdrängung von Luftsauerstoff,
8. unsachgemäße Wartungs- und Instandsetzungsarbeiten.

(5) Erkenntnisse über Schadensursachen aus eigener Betriebserfahrung aber auch aus anderen Quellen sollen als Unterstützung bei der Gefährdungsbeurteilung und der Auswahl geeigneter Schutzmaßnahmen genutzt werden. Eine Gefährdung kann verschiedene und auch mehrere Ursachen haben (z. B. Undichtigkeit eines Anschlusses aufgrund einer beschädigten Dichtung oder unterlassener Dichtheitskontrolle nach der Montage oder Bersten eines Behälters aufgrund von Materialermüdung, Korrosion oder Fehlbedienung).

(6) Kann unter atmosphärischen Bedingungen die Bildung gefährlicher explosionsfähiger Atmosphäre nicht vermieden werden, so gelten für die Festlegung explosionsgefährdeter Bereiche und die dort erforderlichen Schutzmaßnahmen Anhang I Nummer 1.6 GefStoffV. Für weitere Informationen siehe TRGS 720 ff und TRBS 2152 Teil 3 ff. „Gefährliche explosionsfähige Atmosphäre“. Für detaillierte Hinweise zur Einteilung explosionsgefährdeter Bereiche in Zonen siehe DGUV Regel 113-001 Anlage 4 (Beispielsammlung) Nummer 1 und Nummer 4.7 (Acetylen).

(7) Insbesondere bei

1. zeitlich und örtlich begrenzten Tätigkeiten, bei denen nur für die Dauer dieser Tätigkeiten mit dem Auftreten gefährlicher explosionsfähiger Atmosphäre gerechnet werden muss,
2. An- und Abfahrprozessen in Anlagen, die nur sehr selten oder ausnahmsweise durchgeführt werden müssen und
3. Errichtungs- oder Instandhaltungsarbeiten

können die Maßnahmen für explosionsgefährdete Bereiche auch ohne Zoneneinteilung auf der Grundlage der Gefährdungsbeurteilung festgelegt werden (siehe Anhang I Nummer 1.8 Absatz 4 GefStoffV). Für Explosionsgefährdungen während und durch Instandhaltungsarbeiten ist die TRBS 1112 Teil 1 zu berücksichtigen.

(8) Bei Tätigkeiten mit entzündbaren oder chemisch instabilen Gasen ist in der Gefährdungsbeurteilung auch die Bildung explosionsfähiger Gemische bzw. die Möglichkeit explosionsartiger Reaktionen zu ermitteln und zu berücksichtigen.

(9) Bei Tätigkeiten mit Gasen sind im Rahmen der Gefährdungsbeurteilung verschiedene Bereiche und Abstände zu ermitteln und festzulegen, um die folgenden Gefährdungen zu berücksichtigen:

1. Gefährdungen durch die mögliche Freisetzung von Gasen (siehe dazu Nummer 3.2.4 Absatz 4):

- a) Festlegung des Gefahrenbereichs (für die Begriffsbestimmung siehe Nummer 2 Absatz 11); in Bezug auf die entzündbaren Eigenschaften ist dies der explosionsgefährdete Bereich, siehe § 2 Absatz 14 GefStoffV;
 - b) Festlegung des Sicherheitsabstands zu Schutzobjekten (für die Begriffsbestimmungen siehe Nummer 2 Absatz 12 und 13); der Sicherheitsabstand ist zu bestimmen für ortsfeste Druckanlagen für entzündbare oder akut toxische Gase bei Aufstellung im Freien;
2. Gefährdungen durch mögliche auf die Druckanlage einwirkende Schadensereignisse (siehe dazu Nummer 3.2.5 Absatz 4):
Festlegung des Schutzabstands (für die Begriffsbestimmung siehe Nummer 2 Absatz 14).

(10) Anhand der ermittelten Gefährdungen sind die erforderlichen Schutzmaßnahmen festzulegen. Hierbei sind insbesondere auch die in der TRGS 500 „Schutzmaßnahmen“, TRGS 800 „Brandschutzmaßnahmen“ und der TRGS 720 ff sowie TRBS 2152 Teil 3 ff. beschriebenen Schutzmaßnahmen zu berücksichtigen.

3.2.2 Berücksichtigung der Eigenschaften von Gasen in der Gefährdungsbeurteilung

(1) Die gefährlichen Eigenschaften von Gasen sind insbesondere vor dem Hintergrund ihrer hohen Volatilität (Flüchtigkeit) und der Handhabung unter Druck zu beurteilen.

(2) Die Kompatibilität von Gasen mit Konstruktionswerkstoffen hängt nicht nur vom Gas selber ab, sondern kann zusätzlich durch im Gas enthaltene andere Stoffe bestimmt sein, wie z. B. Verunreinigungen oder die Lösemittel Aceton oder Dimethylformamid (DMF) in Acetylen, die insbesondere Dichtmaterialien angreifen können oder ggf. auch durch Reaktionsprodukte. Korrosion kann auch durch Eintrag von Feuchtigkeit entstehen. Außerdem können auch durch Reaktion des Gases mit Feuchtigkeit entstehende Stoffe zu Inkompatibilitäten führen, z. B. die Entstehung von Halogenwasserstoffen, die zur Korrosion metallischer Werkstoffe führen können. Hinweise zur Auswahl geeigneter Werkstoffe finden sich z. B.

1. für metallische Werkstoffe in DIN EN ISO 11114-1 /10/,
2. für nichtmetallische Werkstoffe in DIN EN ISO 11114-2 /11/,
3. für Kryo-Behälter in DIN EN 1797 /12/.

(3) Die Temperatur- und Druckabhängigkeit der Eigenschaften von Gasen ist zu berücksichtigen, d. h. Prozesse sind daraufhin zu überprüfen, ob erforderliche physikalische und chemische Parameter einschließlich der sicherheitstechnischen Kenngrößen, wie z. B. Explosionsgrenzen, auch für die relevanten Prozessbedingungen vorliegen oder ob ein Gas unter den Prozessbedingungen z. B. chemisch instabil wird oder polymerisieren oder in anderer Weise gefährlich reagieren kann.

(4) Es ist zu berücksichtigen, dass die Eigenschaften eines Gasgemischs auch von den enthaltenen inerten Gasen abhängen. Kenngrößen eines Gemischs lassen sich daher nur begrenzt auf ein anderes Gemisch übertragen, selbst wenn beide gleiche

Konzentrationen haben und sich nur bezüglich des enthaltenen Inertgases unterscheiden.

(5) Chemisch instabile Gase bzw. Gasgemische, die ein entzündbares und ein oxidierendes Gas beinhalten, können unter Umständen explosionsartig reagieren. Hierbei sind neben den bekannten Zündquellen wie z. B. offene Flammen, Funken oder heiße Oberflächen auch weniger bekannte Zündquellen zu berücksichtigen, die insbesondere innerhalb von Druckgasbehältern oder Druckanlagen für Gase wirksam werden können. Beispiele dafür sind:

1. Durch Entlastung eines unter höherem Druck stehenden Anlagenteils (z. B. eines Flaschenbündels) in ein unter geringerem/keinem Überdruck stehenden Anlagenteil (z. B. Rohrleitungen oder Schläuche zu den Entnahmeeinrichtungen des Bündels, Abblaseleitung) wird das Gas in den Rohrleitungen bzw. Schläuchen adiabatisch verdichtet und erwärmt sich. Durch diese Erwärmung kann unter Umständen die Zündtemperatur überschritten werden.
2. Bei schnellen Strömungsvorgängen können mitgerissene Partikel wirksame Zündquellen sein.
3. Katalytisch wirkende Stoffe, wie z. B. Rost, können den Zerfall chemisch instabiler Gase initiieren.

Zu Zündquellen ist die TRBS 2152 Teil 3 zu berücksichtigen, Diese TRBS bezieht sich zwar auf explosionsfähige Atmosphäre und nicht auf chemisch instabile Gase, liefert aber unabhängig davon hilfreiche Informationen über mögliche Zündquellen.

(6) Unter bestimmten Umständen kann der Druck in Druckgasbehältern oder Druckanlagen auch unter Atmosphärendruck absinken (d. h. es entsteht Unterdruck). Dies kann dazu führen, dass Luft (und damit Sauerstoff) oder andere Stoffe aus verbundenen Behältern oder Anlagenteilen eindringen und ggf. in gefährlicher Weise mit dem Gas reagieren können. Ursachen für die Entstehung von Unterdruck können sein:

1. Gase, die sich unterhalb ihrer kritischen Temperatur befinden, können durch Abkühlung kondensieren. Die Kondensation ist temperatur- und druckabhängig und kann den Dampfdruckwerten für das Gas bei der entsprechenden Temperatur entnommen werden. Diese Verflüssigung des Gases kann ein Absinken des Drucks auch unter Atmosphärendruck zur Folge haben.
2. Bei der Entnahme aus der Gasphase eines Druckgasbehälters mit verflüssigtem Gas sinkt die Temperatur durch die Verdampfung von Flüssigkeit. Erfolgt die Entnahme mithilfe von Pumpen, kann der Druck im Druckgasbehälter unter Atmosphärendruck absinken.

(7) Bei Tätigkeiten mit tiefgekühlt verflüssigten Gasen sind ihre niedrige Temperatur und die Möglichkeit von Kälteverbrennungen zu berücksichtigen.

(8) Das Ausbreitungsverhalten von Gasen (leichter als Luft oder schwerer als Luft) in Abhängigkeit von ihrer Dichte und in Abhängigkeit von dem Gemisch, in dem sie vorliegen, ist zu berücksichtigen. Eventuell zu ergreifende Maßnahmen sind daran zu orientieren, wie z. B. die Belüftung und die Positionierung von Gaswarngeräten.

(9) Die Konzentration von Gasen ist im Hinblick auf eine mögliche erstickende Wirkung zu beurteilen.

(10) Sauerstoff ist selbst nicht brennbar, ermöglicht und fördert aber die Verbrennung. Die Luft der Erdatmosphäre enthält 21 Vol.-% Sauerstoff. Schon eine geringe Anreicherung bewirkt eine lebhaftere Verbrennung, d. h. eine beträchtliche Steigerung der Verbrennungsgeschwindigkeit. Bei erhöhtem Sauerstoffgehalt der Luft kann sich z. B. aus einem Glimmbrand eine lebhafte Flamme entwickeln.

(11) Sauerstoff kann eine Selbstentzündung von Öl und Fett sowie von Textilien, die mit Öl und Fett verunreinigt sind, bewirken.

(12) Bei erhöhten Sauerstoffkonzentrationen können sich auch sicherheitstechnische Kenngrößen verändern. Beispiele sind obere Explosionsgrenzen, Staubexplosionsklassen, Druckanstiegsgeschwindigkeiten, Zünd- und Glimmtemperaturen, Explosionsdrücke und Flammentemperaturen. Einige nicht als entzündbar eingestufte Gase (Kältemittel, teilhalogenierte Kohlenwasserstoffe) können in Sauerstoff einen Explosionsbereich haben.

(13) Mit Ausnahme der Edelmetalle und der Metalloxide der höchsten Oxidationsstufe sind alle Konstruktionswerkstoffe in Sauerstoff, vor allem in verdichtetem Sauerstoff, brennbar. Das trifft auch auf Stoffe und Materialien zu, die in Luft nicht zur Entzündung gebracht werden können.

(14) Sauerstoff geht mit fast allen Elementen Verbindungen ein. Die meisten Stoffe reagieren mit Sauerstoff so heftig, dass sie entweder nach der Entzündung verbrennen oder sich sogar von selbst entzünden. Die Reaktionen können stark durch Fremdstoffen beeinflusst werden, die als Katalysator oder als Inhibitor wirken.

(15) Bei der Tieftemperatur-Luftzerlegung können sich im flüssigen Sauerstoff Kohlenwasserstoffe (z. B. Acetylen) anreichern. Bei einer Acetylenkonzentration von 5,6 ppm in flüssigem Sauerstoff kristallisiert das Acetylen aus und kann zu einer explosionsartigen Reaktion führen.

(16) Das Mischen von Gasen kann ihre Eigenschaften in gefährlicher Weise verändern, siehe dazu Nummer 3.2.8.

3.2.3 Berücksichtigung von Gefährdungen durch Tätigkeiten mit Gasen unter Druck

(1) Für Tätigkeiten mit Gasen sind bei der Gefährdungsbeurteilung alle Gefährdungen durch Druck sowohl beim bestimmungsgemäßen Betrieb als auch bei Abweichungen davon zu ermitteln (siehe auch TRBS 1111 und TRBS 2141).

(2) Mögliche Gefährdungen bei Tätigkeiten mit Gasen unter Druck für Beschäftigte und andere Personen können beispielsweise sein:

1. Gefährdungen durch Druck:

- a) unkontrolliert bewegte Teile (z. B. wegfliegende Teile, schlagende Leitungen),
- b) Zerknall, Bersten (z. B. Druckwelle und weggeschleuderte Trümmerteile aufgrund des Berstens oder Zerknalls eines Druckgasbehälters bei Über- oder Unterschreiten der zulässigen Betriebsparameter),

2. Gefährdungen durch spezielle physikalische Einwirkungen:
Lärm (z. B. lautes Zischen durch plötzliches Austreten großer Gasmengen aus Druckentlastungsöffnungen),
3. Kontakt mit heißen oder kalten Medien, z. B.:
 - a) Unterkühlung/Festkleben der Haut bei Kontakt zu Luftverdampfern an Tanks für tiefgekühlt verflüssigte Gase,
 - b) Verbrennungen der Haut durch Kontakt mit Oberflächen von Leitungen oder Druckgasbehältern, die sich durch adiabatische Verdichtung stark erwärmt haben,
 - c) Erfrierungen/Festkleben der Haut durch Kontakt mit Gasen, die sich durch adiabatisches Entspannen stark abgekühlt haben, oder mit den entsprechend abgekühlten Armaturen,
4. hohe Strömungsgeschwindigkeit (z. B. Einwirken eines Gasstrahls auf das Auge).

(3) Durch Öffnen von Verschlüssen, Klappen, Deckeln etc., die unter Druck stehen, kann eine Gefährdung durch die freigesetzte Energie entstehen. Beispiele sind Schnellöffnungsventile, Schnellverschlüsse, Lösen von Verbindungen bei der Demontage etc. Auch bei geöffneter Absperrarmatur ist nicht in jedem Fall eine vollständige Druckentlastung gegeben, z. B. wenn der Entlastungsquerschnitt verstopft, verklebt oder zu gering ist. Für Hinweise dazu siehe z. B. DIN EN ISO 25760 /13/.

(4) Bei einigen Gasen können, insbesondere durch ungewollte Polymerisation von z. B. Butadien, Ethylen oder Propylen, Druckentlastungs- oder Druckmessenrichtungen beeinträchtigt oder unwirksam werden und so unzulässig hohen Druck oder eine falsche Druckanzeige zur Folge haben.

(5) Bei der Verdichtung von Gasen, die Feuchtigkeit enthalten, wie z. B. Luft, kann diese Feuchtigkeit kondensieren und zu Korrosion führen.

(6) Ursachen für die in Absatz 2 genannten Gefährdungen können z. B. Materialversagen, Gas- oder Stoffunverträglichkeiten, Fehlbedienung oder unsachgemäße Aufstellung sein. Konkrete Beispiele für solche Ursachen und geeignete Maßnahmen sind in TRBS 2141 Teil 1 Nummer 3.1 sowie TRBS 2141 Teil 2 Nummer 3.1 aufgeführt. Die Ermittlung dieser Ursachen kann als Unterstützung bei der Gefährdungsbeurteilung und der Auswahl geeigneter Schutzmaßnahmen genutzt werden.

3.2.4 Berücksichtigung von Gefährdungen durch Freisetzung von Gasen

(1) Der Arbeitgeber hat zu ermitteln, welche Mengen von Gasen bei bestimmungsgemäßem Betrieb betriebsbedingt austreten. Dabei hat er insbesondere zu berücksichtigen:

1. Füll- und Entleervorgänge,
2. temperaturbedingte Ausdehnungen,
3. Dichtheit des Druckgasbehälters oder der Druckanlage (z. B. technisch dicht oder auf Dauer technisch dicht, siehe dazu auch TRGS 722 Nummer 2.4.3),
4. Spül- und Reinigungsvorgänge,

5. Entspannung von Rohrleitungen,
6. regelmäßig vorhergesehene Instandhaltungsarbeiten.

(2) Der Arbeitgeber hat darüber hinaus zu ermitteln, inwieweit durch vernünftigerweise nicht auszuschließende Abweichungen vom bestimmungsgemäßen Betrieb größere Mengen von Gasen austreten können. Als vernünftigerweise nicht auszuschließende Abweichungen vom bestimmungsgemäßen Betrieb sind insbesondere

1. Leckagen (z. B. an Ventilen, Flanschverbindungen oder anderen Dichtflächen oder durch Korrosion),
2. Freisetzung von Gasen beim Öffnen von Anlagenteilen (z. B. durch nicht erkannten Überdruck oder Fehlbedienung),
3. Ansprechen von Sicherheitseinrichtungen, wie z. B. Sicherheitsventile oder Berstscheiben,
4. Abriss von Schlauchverbindungen,
5. Überschreiten zulässiger Füllungsgrade

auf Relevanz zu überprüfen und erforderlichenfalls zu berücksichtigen.

(3) Bei der Betrachtung sind die sicherheitstechnischen Kenngrößen des Gases sowie das Ausbreitungsverhalten (siehe Nummer 3.2.2 Absatz 8) zu berücksichtigen.

(4) Basierend auf der Freisetzung von Gasen gemäß Absatz 1 und 2 sind im Rahmen der Gefährdungsbeurteilung Gefahrenbereiche festzulegen. Dabei ist zu berücksichtigen, dass Gefährdungen ggf. auch außerhalb des Betriebsgeländes auftreten können, wenn sie von den Auswirkungen der entsprechenden Gasfreisetzung betroffen sein können. Der explosionsgefährdete Bereich ist der Gefahrenbereich, der sich aufgrund der entzündbaren Eigenschaften ergibt. Andere Eigenschaften, wie z. B. akut toxische Eigenschaften, sind separat zu beurteilen. Darüber hinaus sind für ortsfeste Druckanlagen für entzündbare oder akut toxische Gase bei Aufstellung im Freien Sicherheitsabstände zu Schutzobjekten festzulegen, siehe dazu TRBS 3146 / TRGS 726 Nummer 4.5.3.2.

(5) Die Gefährdungen, die aus den möglicherweise austretenden Gasmengen im bestimmungsgemäßen Betrieb oder bei vernünftigerweise nicht auszuschließenden Abweichungen davon resultieren können, sind bei der Gefährdungsbeurteilung und bei den Maßnahmen zur Alarmierung (z. B. Gaswarneinrichtungen) und zur Gefahrenabwehr im Hinblick auf die Beschäftigten und andere Personen zu berücksichtigen.

(6) Der Arbeitgeber hat zu beurteilen, ob aufgrund der schnellen Ausbreitung von Gasen eine selbstständige Flucht von Beschäftigten und anderen Personen unmöglich werden kann.

3.2.5 Berücksichtigung von Gefährdungen durch Einwirkungen von außerhalb der Druckanlage

(1) Der Arbeitgeber hat zu ermitteln, inwieweit durch vernünftigerweise nicht auszuschließende Einwirkungen aus dem Bereich um die Druckanlage Gefährdungen auftreten können.

(2) Als Einwirkungen sind insbesondere zu betrachten:

1. Brand im Umfeld der Druckanlage,
2. umgebungsbedingt wahrscheinliche Naturereignisse wie Blitzeinschlag, Hochwasser oder Erdbeben,
3. Einwirkung durch Unbefugte,
4. Energieeinwirkungen aus anderen Anlagen oder Tätigkeiten,
5. Zwischenfälle mit kraftbetätigten Fahrzeugen.

(3) Die durch diese Ereignisse entstehenden Einwirkungen sind mit der Auslegung der Druckanlage abzugleichen und in der Gefährdungsbeurteilung und bei den Notfallmaßnahmen zu berücksichtigen.

(4) Ausgehend von den Einwirkungen gemäß Absatz 1 ist im Rahmen der Gefährdungsbeurteilung ein Schutzabstand (für die Begriffsbestimmung siehe Nummer 2 Absatz 14) festzulegen, in dem keine den Betrieb der Druckanlage beeinflussenden Ereignisse erfolgen dürfen oder geeignete Notfallmaßnahmen festgelegt werden müssen.

3.2.6 Besondere Gefährdungen durch Tätigkeiten mit Acetylen

(1) Innerhalb von Acetylenanlagen einschließlich Behältern und Rohrleitungen ist die Möglichkeit eines Acetylenzerfalls zu berücksichtigen. Dabei sind die Prinzipien des Explosionsschutzes in geeigneter Weise innerhalb der Anlage / der Rohrleitung / des Behälters zu beachten und anzuwenden:

1. Vermeiden des Zerfalls von Acetylen, z. B. durch Phlegmatisierung oder Unterschreitung des Stabilitätsgrenzdrucks;
2. Vermeiden von Zündquellen für die Zerfallsreaktion von Acetylen (siehe auch Absatz 6);
3. Konstruktiver Explosionsschutz.

(2) Die Zerfallsfähigkeit des Acetylens hängt von den zu erwartenden Betriebszuständen (insbesondere Druck und Temperatur) ab. Der Zerfall kann deflagrativ oder detonativ verlaufen. Die entstehenden Explosionsdrücke können vom zehnfachen bis elffachen des Anfangsdrucks bei deflagrativem Zerfall und bis zum 40-fachen (in Spezialfällen sogar noch mehr) des Anfangsdrucks bei detonativem Zerfall reichen. Detonationen können zumeist in Rohrleitungen anlaufen, aber auch innerhalb von Behältern kann ein detonativer Zerfall von Acetylen nicht ausgeschlossen werden. Weitere Informationen zu sicherheitstechnischen Kenngrößen sowie zum Deflagrati-

ons- und Detonationsverhalten und den resultierenden Bemessungsdrücken von Acetylen sind in Anhang 4 enthalten.

(3) Die bei der Zerfallsreaktion von Acetylen entstehenden Reaktionsprodukte (Wasserstoff und Ruß) sind selbst brennbar, so dass (anders als bei Explosionen von anderen Brenngasen mit Luft oder mit einem anderen oxidierenden Gas) nach der Freisetzung der Reaktionsprodukte aus einem geschlossenen Anlagenteil mit einer weiteren Explosion des explosionsfähigen Gemischs aus Wasserstoff, Ruß und Luft gerechnet werden muss.

(4) Acetylen lässt sich relativ leicht verflüssigen oder verfestigen und Acetylen in flüssiger oder fester Phase ist sehr instabil und leicht zur Explosion zu bringen. Dies ist insbesondere im Hinblick auf die zu erwartenden Betriebszustände zu berücksichtigen. Beim Betrieb sind daher Drücke und Temperaturen zu vermeiden, bei denen es zur Bildung von Acetylen in kondensierter Phase kommen kann, siehe dazu Anhang 4 Nummer A.4.2.

(5) In Abhängigkeit von Temperatur und Feuchtigkeitsgehalt ist die Bildung von festem Acetylenhydrat, das ggf. zur Verstopfung von Rohrleitungen führen kann, zu berücksichtigen.

(6) Wegen der Zerfallsfähigkeit von Acetylen können Zündquellen (siehe dazu auch TRBS 2152 Teil 3) auch bei Abwesenheit von Luft innerhalb von Anlagen, Behältern und Rohrleitungen für Acetylen wirksam werden. Dabei sind insbesondere folgende Zündquellen zu berücksichtigen:

1. Durch Entlastung eines unter höherem Druck stehenden Anlagenteils (z. B. eines Flaschenbündels) in ein unter geringerem oder keinem Überdruck stehenden Anlagenteil (z. B. Rohrleitungen oder Schläuche zu den Entnahmeeinrichtungen des Bündels) wird das Gas in den Rohrleitungen bzw. Schläuchen adiabatisch verdichtet und erwärmt sich. Durch diese Erwärmung kann unter Umständen die Zündtemperatur des Acetylens überschritten werden, zu den Zündtemperaturen von Acetylen mit und ohne Anwesenheit von Luft siehe Anhang 4 Nummer A.4.5.
2. Bei schnellen Strömungsvorgängen, insbesondere bei Anwesenheit von Luft (z. B. bei nicht ausreichender Phlegmatisierung bzw. Spülung) können Zündquellen entstehen durch
 - a) mitgerissene Partikel,
 - b) Temperaturerhöhungen durch lokale adiabatische Verdichtungen.
3. Katalytisch wirkende Stoffe, wie z. B. Rost, können den Zerfall chemisch instabiler Gase initiieren.
4. Acetylen bildet mit bestimmten Metallen (Kupfer und Silber) ein schlagempfindliches Acetylid, das wiederum durch seinen Zerfall als Zündquelle dienen kann.
5. Bei Acetylen ist eine Verflüssigung darüber hinaus besonders gefährlich, da flüssiges Acetylen einen sehr hohen Energiegehalt hat und sehr leicht explosionsartig zerfällt.

(7) Die Möglichkeit eines explosionsartigen Acetylenzerfalls ist auch bei der Art und Anordnung von Sicherheitseinrichtungen zur Druckentlastung und von Zerfallssperren sowie der Ausrüstung von Druckgasflaschen zu berücksichtigen.

(8) Falls ein Acetylenzerfall bei den zu erwartenden Betriebszuständen nicht sicher ausgeschlossen werden kann, müssen die dabei auftretenden Druckbeanspruchungen durch deflagrativen oder detonativen Zerfall unter Beachtung der möglichen Explosionsdrücke berücksichtigt werden (siehe dazu auch Anhang 4 Nummer A.4.6 und Nummer A.4.9).

(9) Die Auswirkungen einer Explosion müssen bei der Gestaltung von Aufstellräumen für Acetylenanlagen berücksichtigt werden.

3.2.7 Besondere Gefährdungen durch Tätigkeiten mit Sauerstoff

(1) Bei Druckgasbehältern und Druckanlagen ist ggf. mit hohen Strömungsgeschwindigkeiten, insbesondere in Armaturen, zu rechnen. Es ist dann mit Zündung und somit mit Ausbränden von Anlagenteilen zu rechnen, wenn:

1. Verunreinigungen aller Art sich im Sauerstoffstrom befinden,
2. sicherheitstechnisch ungeeignete Werkstoffe verwendet werden,
3. sicherheitstechnisch ungeeignetes Dichtungsmaterial oder Gleitmittel verwendet wird,
4. sicherheitstechnisch als geeignet getestete Armaturen im Nachhinein in ihrer Geometrie geändert oder in anderer Weise manipuliert wurden oder
5. (unabhängig davon) die Strömungsgeschwindigkeit einen bestimmten Grenzwert überschreitet.

(2) Durch adiabatische Druckstöße können Materialien oder Armaturen, die ansonsten als sicherheitstechnisch für den Einsatz mit Sauerstoff als geeignet eingestuft wurden, dennoch durch die entstehende Verdichtungswärme gezündet werden. So kann z. B. das Elastomer im Regeleinsatz eines Druckminderers beim schlagartigen Öffnen eines Sauerstoffdruckgasflaschenventils entzündet werden, wenn diese Armatur nicht entlastet ist.

(3) Bei nicht abgeschirmten Kolbenverdichtern, Sauerstoff-Turboverdichtern und Turbogebläsen mit Betriebsüberdrücken > 1 bar kann es bei einer unbeabsichtigten Zündung zu intensiven Bränden kommen, die explosionsartig sein können. In der Nähe befindliche Personen sind in diesem Fall extrem gefährdet.

(4) Es kann zur Selbstentzündung kommen, wenn Verunreinigungen wie Öl, Fett oder andere organische Materialien mit Sauerstoff in Berührung kommen.

(5) Bei Verwendung von ungeeigneten Werkstoffen kann eine Zünd- und somit Brandgefahr bestehen. So dürfen beispielsweise Zirkon und dessen Legierungen oder Titan und dessen Legierungen in Sauerstoff nicht verwendet werden.

(6) Bei Tätigkeiten mit tiefgekühlt verflüssigten Sauerstoff entstehen zusätzlich besondere Gefährdungen:

1. Bei ungeschütztem Hautkontakt ist mit Erfrierungen zu rechnen.
2. Sobald verflüssigter Sauerstoff auf organisches Material (z. B. Holz, PE/PP-Kunststoff, bituminöser Straßenbelag) tropft, ist selbst bei geringsten Zündener-

gien mit heftigsten Reaktionen bis hin zu explosionsartigen Reaktionen zu rechnen.

3. Bei Verwendung von Betriebsmitteln aus ungeeignetem Werkstoff ist mit Materialversprödung zu rechnen.

(7) Sauerstoffaustritt, z. B. bedingt durch Undichtigkeiten, führt zu Sauerstoffanreicherung außerhalb des Druckgasbehälters bzw. der Druckanlage und kann somit auch zur Sauerstoffanreicherung in der Arbeitskleidung der Beschäftigten führen. Die gleiche Gefährdung durch Sauerstoffanreicherung ist bei Instandhaltungsmaßnahmen an Anlagen, in denen Sauerstoff eingesetzt worden ist, gegeben. Sauerstoffanreicherung durch Leckagen in brennbaren Dämmstoffen führt zu unbeherrschbaren Brandlasten im Falle einer Zündung.

(8) Sauerstoff unter Druck darf nicht an Stelle von Druckluft verwendet werden. Dies gilt insbesondere für:

1. Verwendung beim Farbspritzen,
2. Antrieb von maschinellen Werkzeugen,
3. Anlassen von Motoren,
4. Fortblasen von Spänen und Staub,
5. Abblasen der Kleidung,
6. Verbesserung der Raumluft.

(9) Bei längerfristiger Einatmung hoher Sauerstoffkonzentrationen, insbesondere unter hohem Druck, kann sich ein Lungenödem bilden.

3.2.8 Besondere Gefährdungen beim Mischen von Gasen

(1) Beim Mischen von Gasen können aufgrund ihrer physikalischen und chemischen Eigenschaften besondere Gefährdungen auftreten. Gefährdungen aufgrund physikalischer Eigenschaften sind z. B. temperatur- und druckabhängiges Entmischen sowie unbekanntes Ausdehnungsverhalten von Gemischen. Gefährdungen aufgrund chemischer Eigenschaften sind mögliche gefährliche Reaktionen zwischen den Stoffen eines Gemisches oder Reaktionen mit dem Behälterwerkstoff (Korrosivität) sowie Ausrüstungsteilen und Dichtmaterialien.

(2) Gasgemische werden in gasförmige Gasgemische-G und flüssige Gasgemische-L unterteilt (siehe Begriffsbestimmungen). Als dritte Kategorie gibt es technische Gasgemische (mit eigener UN-Nr.), die entweder gasförmig oder flüssig sein können. Der Aggregatzustand kann über die UN-Nr. ermittelt werden.

(3) Aus dem Aggregatzustand eines Gasgemisches können sich zusätzliche Gefährdungen ergeben durch:

1. Entmischen bei der Entnahme,
2. Auskondensieren von Gasen im Druckgasbehälter oder in der Druckanlage,
3. Druckanstieg im Druckgasbehälter oder in der Druckanlage aufgrund von Temperaturanstieg.

(4) Bei der Herstellung von Gasgemischen ist besonders zu berücksichtigen, dass die Stoffe des Gemisches nicht gefährlich miteinander reagieren können (siehe Nummer 4.2 und Anhang 3). Beispiele für Gefährdungen sind explosionsartige Reaktionen von entzündbaren Gasen mit Oxidationsmitteln, z. B. mit Sauerstoff oder halogenhaltigen Gasen.

3.3 Festlegung von Betriebsparametern zur Auswahl bzw. Auslegung von Arbeitsmitteln

(1) Die in dieser TRGS beschriebenen Eigenschaften der verwendeten Gase oder Gasgemische müssen bei der Festlegung von Betriebsparametern und der Auswahl von Konstruktionswerkstoffen berücksichtigt werden. Sie sind erforderlich für die Auswahl bzw. Auslegung von Druckgasbehältern, Druckanlagen sowie von Arbeitsmitteln und Ausrüstungsteilen, die besonderen Anforderungen unterliegen, wie z. B. an den Explosionsschutz, sowie bei der Festlegung von Aufstellbedingungen.

(2) Die maximale und die minimale Betriebstemperatur sowie der maximale und der minimale Betriebsdruck sind unter Berücksichtigung der im Druckgasbehälter bzw. in der Druckanlage zu erwartenden Drücke und Temperaturen festzulegen. Dabei sind Eigenschaften des Gases bzw. der Gase und chemische Reaktionen gemäß Nummer 3.1 und 3.2 zu berücksichtigen, wie z. B.

1. Druckerhöhung aufgrund von Wärmeausdehnung der Flüssigphase und der Gasphase bzw. Dampfdruckerhöhung der Flüssigphase,
2. Druckerniedrigung aufgrund von Entspannung bzw. Kondensation,
3. Druck- und Temperaturerhöhung aufgrund von adiabatischer Verdichtung,
4. Drücke (ggf. auch Explosionsdrücke) und Temperaturen, die aufgrund von chemischen Reaktionen entstehen können.

(3) Konstruktionswerkstoffe von Druckgasbehältern bzw. Druckanlagen einschließlich aller Ausrüstungsteile und Sicherheitseinrichtungen müssen unter Berücksichtigung der vorgesehenen Betriebsparameter geeignet sein. Primär sollen dazu die Angaben des Inverkehrbringers zur bestimmungsgemäßen Verwendung herangezogen werden. Gibt es keine entsprechenden Informationen, können Informationen zur Kompatibilität der Konstruktionswerkstoffe aus entsprechenden Normen entnommen werden, siehe dazu Nummer 3.2.2 Absatz 2.

(4) Die verwendeten Druckgasbehälter bzw. Druckanlagen einschließlich ihrer Ausrüstungsteile müssen für die vorgesehenen Betriebsparameter geeignet sein, d. h. sie müssen unter Berücksichtigung der TRBS 2141 entsprechend ausgewählt werden bzw. die Betriebsparameter müssen bei der Auslegung von Druckgasbehältern und Druckanlagen entsprechend berücksichtigt (an den Hersteller kommuniziert) werden. Die Betriebsparameter sind auch bei der Auswahl und Anordnung von Sicherheitseinrichtungen zu berücksichtigen, die eine Abweichung von den Betriebsparametern verhindern sollen.

(5) Arbeitsmittel mit Anforderungen an den Explosionsschutz müssen unter Berücksichtigung der vorgesehenen Betriebsparameter geeignet sein. Daher sind,

basierend auf den Eigenschaften der entzündbaren Gase bzw. Gasgemische, für die Auswahl dieser Arbeitsmittel Parameter zu ermitteln, wie z. B.

1. Gerätekategorie (für Geräte im Sinne der Explosionsschutzverordnung) bzw. Maß der Zündquellenfreiheit, resultierend entweder aus der Zone, in der das Gerät bzw. sonstige Arbeitsmittel verwendet werden soll oder aus der Wahrscheinlichkeit und Dauer des Vorhandenseins explosionsfähiger Atmosphäre oder explosionsfähiger Gemische (wenn keine Zoneneinteilung erforderlich ist),
 2. Temperaturklasse bzw. maximal zulässige Oberflächentemperatur, resultierend aus der niedrigsten Zündtemperatur der Gase,
 3. Explosionsuntergruppe (Grenzspaltweite (MESG) bzw. Mindestzündstromverhältnis (MIC)),
 4. Ableitwiderstand.
- (6) Die entsprechenden Informationen bzw. Anforderungen ergeben sich aus der Gefährdungsbeurteilung bzw. dem Explosionsschutzdokument.

4 Schutzmaßnahmen bei Tätigkeiten mit Gasen

4.1 Regeln zu Schutzmaßnahmen

(1) Allgemeine Regelungen zu Schutzmaßnahmen bei Tätigkeiten mit Gasen finden sich in

1. TRGS 500 „Schutzmaßnahmen“,
2. TRGS 800 „Brandschutzmaßnahmen“,
3. TRGS 526 „Laboratorien“,
4. TRBS 2141, alle Teile (Gefährdungen durch Dampf und Druck),
5. Technische Regeln zum Explosionsschutz:
 - a) TRGS 720 „Gefährliche explosionsfähige Atmosphäre - Allgemeines“,
 - b) TRGS 721 „Gefährliche explosionsfähige Atmosphäre - Beurteilung der Explosionsgefährdung“,
 - c) TRGS 722 „Vermeidung oder Einschränkung gefährlicher explosionsfähiger Atmosphäre“,
 - d) TRBS 2152 Teil 3 „Gefährliche explosionsfähige Atmosphäre - Vermeidung der Entzündung gefährlicher explosionsfähiger Atmosphäre“,
 - e) TRBS 2152 Teil 4 „Gefährliche explosionsfähige Atmosphäre - Maßnahmen des konstruktiven Explosionsschutzes, welche die Auswirkung einer Explosion auf ein unbedenkliches Maß beschränken und
 - f) TRGS 727 „Vermeidung von Zündgefahren infolge elektrostatischer Aufladungen“.

(2) Regelungen zu Schutzmaßnahmen bei bestimmten Tätigkeiten finden sich in

1. TRGS 510 „Lagerung von Gefahrstoffen in ortsbeweglichen Behältern“,

2. TRGS 512 „Begasungen“, TRGS 513 "Tätigkeiten an Sterilisatoren mit Ethylenoxid und Formaldehyd", TRGS 522 "Raumdesinfektionen mit Formaldehyd",
3. TRGS 525 „Gefahrstoffe in Einrichtungen der medizinischen Versorgung“,
4. TRGS 528 „Schweißtechnische Arbeiten“,
5. TRGS 529 "Tätigkeiten bei der Herstellung von Biogas",
6. TRBS 3151 / TRGS 751 „Vermeidung von Brand-, Explosions- und Druckgefährdungen an Tankstellen und Füllanlagen zur Befüllung von Landfahrzeugen“.

(3) Spezifische Schutzmaßnahmen bei Tätigkeiten mit Gasen sind geregelt in

1. TRBS 3145 / TRGS 745 „Ortsbewegliche Druckgasbehälter - Füllen, Bereithalten, innerbetriebliche Beförderung, Entleeren“,
2. TRBS 3146 / TRGS 746 „Ortsfeste Druckanlagen für Gase“.

Darüber hinaus sind in Nummer 4.2 Schutzmaßnahmen für das Mischen von Gasen aufgeführt.

(4) Weitere Hinweise finden sich u. a. im Informationsportal Gase unter Druck der BG RCI /14/, in DGUV Regel 113-001 "Explosionsschutzregeln" Anlage 4 (Beispielsammlung zur Zoneneinteilung) sowie in den DGUV Informationen 213-073 "Sauerstoff", 213-075 "Liste der nichtmetallischen Materialien" (zu 231-073) und 213-076 "Liste der Armaturen, Schläuche und Anlagenteile" (zu 213-073).

(5) Für weiterführende Hinweise zu Acetylen siehe ergänzend /15/ und für Gasgemische siehe /16/.

4.2 Schutzmaßnahmen beim Mischen von Gasen

(1) Bei der Herstellung oder bestimmungsgemäßen Entstehung von Gasgemischen in Druckgasbehältern bzw. Druckanlagen muss sichergestellt werden, dass die Integrität der Behälter bzw. Anlagen nicht beeinträchtigt wird. Dabei sind mögliche Reaktionen der einzelnen Gemischbestandteile untereinander sowie mit Konstruktionswerkstoffen zu berücksichtigen.

(2) Beim Mischen von Gasen muss das Rückströmen der einzelnen Gase bzw. des Gemischs in Leitungen oder die Vorratsbehälter verhindert werden.

(3) Ein ortsbeweglicher Druckgasbehälter darf nur mit einem Gasgemisch-G oder Gasgemisch-L gefüllt werden wenn:

1. die Bestandteile des Gemischs sowie ihre jeweiligen Anteile bekannt sind,
2. die Bestandteile des Gemischs, soweit sie zu den Gasen zählen, in den Listen der Gase im ADR /1/ Abschnitt 4.1.4.1 P200 genannt sind,
3. das Gemisch bei den unter normalen Betriebsbedingungen auftretenden Temperaturen (höchstens +70 °C) und Drücken nicht in gefährlicher Weise reagieren kann (bei der Beurteilung, ob Bestandteile des Gemisches in gefährlicher Weise reagieren können, ist Anhang 3 als Grundlage heranzuziehen),

4. das Gemisch hinsichtlich Entzündbarkeit, chemischer Instabilität, pyrophorer Eigenschaften, starkem korrosivem Angriff auf den Behälterwerkstoff sowie gesundheitsgefährdender Eigenschaften klassifiziert worden ist,
5. der Druckgasbehälter vor dem erneuten Füllen gereinigt und evakuiert worden ist. Dieser Maßnahme bedarf es nicht, wenn das zuletzt gefüllte Gasgemisch die gleichen Bestandteile enthielt.

(4) Gasgemische dürfen nur gefüllt werden

1. bis zum höchstzulässigen Füllungsgrad nach ADR /1/ Abschnitt 4.1.4.1 P200,
2. in ortsbewegliche Druckgasbehälter, die abhängig von den Eigenschaften des Gasgemisches in Bezug auf Behälterart und -größe, Werkstoff, Prüfdruck, Ausrüstung, Kennzeichnung und Prüffrist den im Sammeleintrag nach ADR /1/ Abschnitt 4.1.4.1 P200 genannten Maßgaben entsprechen.

(5) Unter Beachtung von Absatz 2 dürfen Gasgemische-G mit kondensierbaren Stoffen (siehe dazu Nummer 2 Absatz 5) nur bis zu einem Druck gefüllt werden, bei dem der Partialdruck des kondensierbaren Stoffs seinen Dampfdruck bei +5 °C nicht übersteigt. Dabei sind alle kondensierbaren Stoffe im Gemisch zu berücksichtigen. Die Berechnung erfolgt nach folgender Gleichung:

$$p_{Füll} + 1 \leq \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{x_i}{p_{v_i}}} \quad [1]$$

mit

- $p_{Füll}$ = Maximal zulässiger Überdruck der Füllung des Gemisches in bar
 p_{v_i} = Dampfdruck der kondensierbaren Komponente i bei + 5 °C in bar (absolut)
 x_i = Stoffmengenanteil der kondensierbaren Komponente i im Gasgemisch
 n = Anzahl der kondensierbaren Komponenten im Gasgemisch

- (6) Zu jedem Gasgemisch muss dem Füllbetrieb eine Füllanweisung vorliegen.
- (7) Einer möglichen Entmischung eines Gasgemisches beim Entleeren bzw. der Entnahme muss durch geeignete Maßnahmen begegnet werden.
- (8) Bei zweiphasigen (verflüssigten) Gasgemischen hat die Gasphase in der Regel eine andere Zusammensetzung als die Flüssigphase. Die Gasphase enthält einen größeren Anteil der leichter siedenden Stoffe (mit höherem Dampfdruck) und die Flüssigphase enthält einen größeren Anteil der Stoffe mit niedrigerem Dampfdruck. Bei Entnahme aus der Gasphase ist daher zu berücksichtigen, dass die Zusammensetzung und damit auch die Eigenschaften des Gemischs sich mit der Entnahme ändern (wie bei einer Destillation). Wenn dies verhindert werden soll, dann muss die Entnahme über ein Steigrohr aus der Flüssigphase erfolgen.
- (9) Für die Herstellung von Brenngas/Luft- oder Brenngas/Sauerstoff-Gemischen, sind folgende Maßgaben zu berücksichtigen:

1. Brenngas/Luft-Gemische mit einem Brenngasanteil unterhalb der unteren Explosionsgrenze (UEG) dürfen in Abhängigkeit vom Stoffmengenanteil x des entzündbaren Bestandteils bis zu folgenden Drücken gefüllt werden:
 - ($0 \% < x \leq 25 \%$) UEG: bis zum maximalen Betriebsüberdruck des Druckgasbehälters, höchstens jedoch bis 200 bar
 - ($25 \% < x \leq 50 \%$) UEG: bis zum maximalen Betriebsüberdruck des Druckgasbehälters, höchstens jedoch bis 150 bar
 - ($50 \% < x \leq 75 \%$) UEG: bis zum 0,1-fachen des maximalen Betriebsüberdrucks des Druckgasbehälters

Achtung: Teilhalogenierte Kohlenwasserstoffe, z. B. Kältemittelgase, können bei atmosphärischen Bedingungen nicht entzündbar sein, d. h. sie haben keine untere Explosionsgrenze. Bei höheren Drücken können diese Gase mit Luft trotzdem explosionsfähige Gemische bilden.
2. Brenngas/Luft-Gemische mit einem Brenngasanteil oberhalb der oberen Explosionsgrenze (OEG) dürfen in Abhängigkeit vom Sauerstoffanteil y bis zu folgenden Drücken gefüllt werden:
 - ($0 \% < y \leq 50 \%$) SGK: bis zum maximalen Betriebsüberdruck des Druckgasbehälters
 - ($50 \% < y \leq 75 \%$) SGK: bis zum 0,05-fachen des maximalen Betriebsüberdrucks des Druckgasbehälters
3. Brenngas/Sauerstoff-Gemische mit einem Brenngasanteil unterhalb der unteren Explosionsgrenze (UEG) dürfen in Abhängigkeit vom Sauerstoffanteil y bis zu folgendem Druck gefüllt werden:
 - ($0 < y \leq 1000$) ppm(V): bis zum maximalen Betriebsüberdruck des Druckgasbehälters

Für die Ermittlung von Explosionsgrenzen und Sauerstoffgrenzkonzentrationen siehe Nummer 3.1.1 Absatz 8 und 9.

(10) Ob die einzelnen Gase eines Gasgemisches in gefährlicher Weise miteinander reagieren können, kann Anhang 3 entnommen werden. Die Prüfung der Herstellbarkeit eines Gemisches mit Gasen, die nach Anhang 3 gefährlich miteinander reagieren können, und bei denen die unter Absatz 9 genannten Maßgaben nicht erfüllt sind, sowie die Herstellung von Gemischen mit Acetylen oder mit Fluor erfordert besondere Kenntnisse und Fachkunde und ist in einem schriftlichen Bericht festzulegen. Über die erforderlichen Kenntnisse und die Fachkunde zur Beurteilung der Herstellbarkeit solcher Gasgemische verfügt die BAM.

(11) Für die Herstellung von Gasgemischen in Druckgasbehältern ist die Reihenfolge der Füllung von Bedeutung. Die Bestandteile sind möglichst so zu füllen, dass der Explosionsbereich beim Füllvorgang nicht durchschritten wird. Lässt sich dies nicht vermeiden, sind weitere Schutzmaßnahmen zu ergreifen, um eine Gefährdung von Personen auszuschließen.

(12) Wird bei der Herstellung von Gasgemischen Sauerstoff bei hohem Druck gefüllt, müssen die Druckgasbehälter, Ventile und Armaturen der Fülleinrichtung für Sauerstoff geeignet sein. Sauerstoff darf ohne Spülung der Armaturen und Leitungen bei hohem Druck nicht direkt im Anschluss an entzündbare Gase gefüllt werden.

Anhang 1 zu TRGS 407

Einteilung der Gase in Gruppen und gasspezifische Maßgaben

(1) Die besonderen Maßgaben der folgenden Tabellen gelten für innerbetriebliche Tätigkeiten mit Gasen, wie z. B. das Füllen für Zwecke der innerbetrieblichen Verwendung. Die Gefahrgutvorschriften einschließlich ADR /1/ und RID bleiben durch die Bemerkungen und besonderen Maßgaben in den folgenden Tabellen unberührt.

(2) Folgende Erläuterungen gelten für die Tabellen:

1. Gase werden in den Tabellen als stark korrosiv bezeichnet, wenn sie Behälter bzw. Konstruktionswerkstoffe stark angreifen (nicht zu verwechseln mit der Einstufung als hautätzend bzw. hautreizend).
2. Der Klassifizierungscode (KC) nach Gefahrgutrecht (siehe auch ADR 2.2.2.1.2 und 2.2.2.1.3) hat folgende Bedeutungen:
1 = verdichtetes Gas, 2 = verflüssigtes Gas, 3 = tiefgekühlt verflüssigtes Gas, 4 = gelöstes Gas, A = erstickend, O = oxidierend, F = entzündbar, T = giftig, TF = giftig, entzündbar, TC = giftig, ätzend, TO = giftig, oxidierend, TFC = giftig, entzündbar, ätzend, TOC = giftig, oxidierend, ätzend.
3. Zur Vermeidung von Gefährdungen durch Verwechslungen (z. B. die Verwechslung von entzündbaren und oxidierenden Gasen) sollen die seitlichen Anschlussstutzen gemäß DIN 477-1 gewählt werden. Daher wird bei Gasen, bei denen eine mögliche Verwechslung besondere Gefährdungen birgt, in den folgenden Tabellen explizit auf bestimmte Ausgangsanschlüsse hingewiesen.
4. Verschlussmuttern werden im Gefahrgutrecht auch als Stopfen oder Kappe bezeichnet.

A.1.1 Reine Gase

Tabelle 1: Permanentgase mit einer kritischen Temperatur $T_k \leq -50$ °C: Diese Gase lassen sich unter Druck nicht verflüssigen. Innerhalb der Tabelle sind die Gase nach ihrer Entzündbarkeit in die Gruppen 1.1 und 1.2 unterteilt. Die Füllmenge wird üblicherweise manometrisch bestimmt.

Permanentgase, Gruppe 1.1: nicht entzündbar						
Gas	T_k in °C	Sdp. in °C	Rel. Dichte	Korrosiv	UN-Nr.	KC
Argon Ar	- 122,4	- 185,9	1,38		1006 1951	1A 3A

Permanentgase, Gruppe 1.1: nicht entzündbar						
Gas	T_k in °C	Sdp. in °C	Rel. Dichte	Korrosiv	UN-Nr.	KC
Fluor F ₂	- 129,0	- 188,1	1,31	Ja	1045	1TOC
	Oxidierendes Gas, kann mit oxidierbaren Materialien gefährlich reagieren. Besondere Maßgaben: 1. Die Werkstoffauswahl zur Verwendung mit Fluor (inklusive ausreichender Passivierung des Stahls) ist von besonderer Bedeutung, da ansonsten spontan heftige Reaktionen auftreten können. Aluminiumlegierungen dürfen nicht verwendet werden. 2. Die meisten üblichen Dichtmaterialien sind für Fluor nicht geeignet und können sich spontan entzünden (wie z.B. Dichtmaterialien in der Verschlussmutter). Deshalb dürfen nur speziell für Fluor geeignete Werkstoffe (z.B. PTFE und andere vollfluorierte Kunststoffe) verwendet werden. 3. Eine Flasche darf nicht mehr als 5 kg Fluor enthalten. 4. Der Ausgangsanschluss der Flaschenventile muss das für Chlor zu verwendende 1"-Gewinde haben. 5. Die Ventile müssen gasdicht schließende und unverlierbar mit dem Ventil verbundene Verschlussmuttern besitzen. Die Verschlussmuttern müssen für Fluor geeignete, unbeschädigte Dichtungen haben. Sie müssen bis zu einem Überdruck von 40 bar gasdicht sein. 6. Für Beförderung und Lagerung müssen die Verschlussmuttern fest aufgeschraubt sein. 7. Werden vor dem Füllen Fremdstoffe oder Feuchtigkeit in der Flasche festgestellt, müssen diese vor dem Füllen entfernt werden. 8. Gasberührte Ausrüstungsteile, die mit organischen Verunreinigungen wie Fett oder Öl verunreinigt sind, müssen vor dem Füllen gereinigt werden. 9. Das zu füllende Gas muss trocken sein, d.h. der Taupunkt muss < - 10 °C sein und darf nur in trockene Behälter gefüllt werden.					
Helium He	- 268,0	- 268,9	0,14		1046 1963	1A 3A
Krypton Kr	- 63,8	- 153,4	2,90		1056 1970	1A 3A
Neon Ne	- 228,8	- 246,0	0,70		1065 1913	1A 3A
Sauerstoff O ₂	- 118,4	- 183,0	1,10		1072 1073	1O 3O
	Oxidierendes Gas, kann mit oxidierbaren Materialien gefährlich reagieren. Besondere Maßgaben: 1. Völlig entleerte Flaschen für Tauch- und Atemschutzgeräte sind vor dem Füllen (mit Sauerstoff oder mit einem sauerstoffhaltigen Gemisch) einer Besichtigung des Flascheninnern zu unterziehen. Die Flasche darf nur gefüllt werden, wenn sich das Innere der Flasche in einem einwandfreien Zustand befindet oder der einwandfreie Zustand wieder hergestellt worden ist. Dies gilt auch, wenn dem Sauerstoff noch andere Stoffe beigemischt sind. 2. Gasberührte Ausrüstungsteile (Armaturen und Rohrleitungen) müssen in Abhängigkeit von Druck und Temperatur ausgewählt werden. Hinweise hierzu gibt es in den entsprechenden Tabellen zur DGUV Information 213-073. 3. Gasberührte Ausrüstungsteile, die mit organischen Verunreinigungen wie Fett oder Öl verunreinigt sind, müssen vor dem Füllen gereinigt werden.					
Stickstoff N ₂	- 146,9	- 195,8	0,97		1066 1977	1A 3A

Permanentgase, Gruppe 1.1: nicht entzündbar						
Gas	T_k in °C	Sdp. in °C	Rel. Dichte	Korrosiv	UN-Nr.	KC
Stickstoffmonoxid NO	- 92,9	- 151,8	1,04		1660	1TOC
	Oxidierendes Gas, kann mit oxidierbaren Materialien gefährlich reagieren. Trockenes Stickstoffmonoxid greift ferritische Stähle praktisch nicht an. Es bildet mit Sauerstoff sofort NO ₂ bzw. N ₂ O ₄ . Feuchtes N ₂ O ₄ greift Stahl stark an. Besondere Maßgaben: 1. Es dürfen nur Flaschen bis zu einem Fassungsraum von 85 l verwendet werden. 2. Der Ausgangsanschluss der Flaschenventile muss das für Chlor zu verwendende 1"-Gewinde haben.					

Permanentgase, Gruppe 1.2: entzündbar						
Gas	T_k in °C	Sdp. in °C	Rel. Dichte	Korrosiv	UN-Nr.	KC
Deuterium D ₂	- 234,8	- 249,5	0,14		1957	1F
Kohlenmonoxid CO	- 140,2	- 191,5	0,97		1016	1TF
	Bei Behältern aus Stahl besteht Gefahr der Spannungsrisskorrosion durch Verunreinigung mit Schwefelwasserstoff. Besondere Maßgaben: 1. Werden vor dem Füllen Fremdstoffe oder Feuchtigkeit in der Flasche festgestellt, müssen diese vor dem Füllen entfernt werden. 2. Das zu füllende Gas muss trocken sein, d.h. der Taupunkt muss < - 10 °C sein und darf nur in trockene Behälter gefüllt werden. 3. Bei Verwendung von Behältern aus Stahl gelten für Kohlenmonoxid und Gasgemische, die Kohlenmonoxid enthalten, die besonderen Maßgaben für Schwefelwasserstoff (s. Gruppe 3.2) sinngemäß.					
Methan CH ₄	- 82,5	- 161,5	0,55		1971 1972	1F 3F
	Besondere Maßgaben: 1. Es darf nur Methan gefüllt werden, das frei von Cyanwasserstoff ist. Methan, das Schwefelverbindungen enthält, darf nur gefüllt werden, wenn die Schwefelverbindungen nach Art und Menge keine Spannungsrisskorrosion verursachen können. 2. Werden vor dem Füllen Fremdstoffe oder Feuchtigkeit in der Flasche festgestellt, müssen diese vor dem Füllen entfernt werden. 3. Das zu füllende Gas muss trocken sein, d.h. der Taupunkt < - 10 °C sein und darf nur in trockene Behälter gefüllt werden.					
Wasserstoff H ₂	- 239,9	- 252,8	0,07		1049 1966	1F 3F

Tabelle 2: Gase mit einer kritischen Temperatur $-50\text{ °C} < T_k \leq 65\text{ °C}$: Diese Gase lassen sich nur unter vergleichsweise hohem Druck verflüssigen. Innerhalb der Tabelle sind die Gase nach ihrer Entzündbarkeit und ihrer chemischen Stabilität in die Gruppen 2.1 bis 2.3 eingeteilt. Die Füllmenge wird üblicherweise gravimetrisch bestimmt.

Unter hohem Druck zu verflüssigende Gase, Gruppe 2.1: nicht entzündbar, chemisch stabil						
Gas	T_k in °C	Sdp. in °C	Rel. Dichte	Korrosiv	UN-Nr.	KC
Bortrifluorid BF ₃	- 12,2	- 100,3	2,37		1008	2TC
	Besondere Maßgaben: 1. Das Gas ist nach Gewicht zu füllen. 2. Werden vor dem Füllen Fremdstoffe oder Feuchtigkeit in der Flasche festgestellt, müssen diese vor dem Füllen entfernt werden. 3. Das zu füllende Gas muss trocken sein, d. h., der Taupunkt muss $< -10\text{ °C}$ sein und darf nur in trockene Behälter gefüllt werden.					
Chlortrifluormethan (R13) CClF ₃	28,8	- 81,9	3,64		1022	2A
Chlorwasserstoff HCl	51,5	- 85,0	1,27	Ja	1050	2TC
	Besondere Maßgaben: 1. Werden vor dem Füllen Fremdstoffe oder Feuchtigkeit in der Flasche festgestellt, müssen diese vor dem Füllen entfernt werden. 2. Das zu füllende Gas muss trocken sein, d. h., der Taupunkt muss $< -10\text{ °C}$ sein und darf nur in trockene Behälter gefüllt werden.					
Kohlendioxid CO ₂	31,0	- 78,5 *	1,53		1013 2187	2A 3A
	Besondere Maßgaben: 1. Werden vor dem Füllen Fremdstoffe oder Feuchtigkeit in der Flasche festgestellt, müssen diese vor dem Füllen entfernt werden. 2. Das zu füllende Gas muss trocken sein, d. h., der Taupunkt muss $< -40\text{ °C}$ sein und darf nur in trockene Behälter gefüllt werden.					
Schwefelhexafluorid SF ₆	45,6	- 63,8 *	5,11		1080	2A
Stickstofftrifluorid NF ₃	- 39,3	- 129,0	2,44		2451	2O
	Besondere Maßgaben: 1. Die Ventile müssen gasdicht schließende und unverlierbar mit dem Ventil verbundene Verschlussmuttern besitzen. Die Verschlussmuttern müssen geeignete, unbeschädigte Dichtungen haben. 2. Die Behälter müssen innen trocken und frei sein von Stoffen, die mit dem Gas in gefährlicher Weise reagieren können.					
Tetrafluormethan (R14) CF ₄	- 45,7	- 128,0	3,04		1982	2A
Trifluormethan (R23) CHF ₃	26,0	- 82,2	2,44		1984	2A
Xenon Xe	16,6	- 108,1	4,56		2036 2591	2A 3A

* Sublimationspunkt

Unter hohem Druck zu verflüssigende Gase, Gruppe 2.2: entzündbar, chemisch stabil						
Gas	T_k in °C	Sdp. in °C	Rel. Dichte	Korrosiv	UN-Nr.	KC
Ethan C ₂ H ₆	32,3	- 88,6	1,05		1035 1961	2F 3F
Ethylen C ₂ H ₄	9,2	- 103,8	0,97		1962 1038	2F 3F
Phosphan PH ₃	51,9	- 87,8	1,18		2199	2TC
Pyrophores Gas, kann sich an Luft von selbst entzünden. Besondere Maßgaben: 1. Es dürfen nur Flaschen mit einem Fassungsraum bis zu 85 l verwendet werden. 2. Der Ausgangsanschluss der Flaschenventile muss das für Wasserstoff zu verwendende Gewinde W 21,80 x 1/14 LH haben. 3. Die Ventile müssen gasdicht schließende und unverlierbar mit dem Ventil verbundene Verschlussmutter besitzen. Die Verschlussmutter müssen geeignete, unbeschädigte Dichtungen haben. 4. Für Beförderung und Lagerung müssen die Verschlussmutter fest aufgeschraubt sein. 5. Jede Flasche ist vor dem Füllen mit gereinigtem Wasserstoff zu spülen und anschließend zu evakuieren. 6. Werden vor dem Füllen Fremdstoffe oder Feuchtigkeit in der Flasche festgestellt, müssen diese vor dem Füllen entfernt werden. 7. Das zu füllende Gas muss trocken sein, d. h., der Taupunkt muss < - 10 °C sein und darf nur in trockene Behälter gefüllt werden. 8. Bei Tätigkeiten mit Phosphan ist Gasdichtheit durch Prüfung sicherzustellen.						
Monosilan SiH ₄	- 3,5	- 111,4	1,11		2203	2F
Pyrophores Gas, kann sich an Luft von selbst entzünden. Besondere Maßgaben: 1. Es dürfen nur Flaschen aus Stahl mit einem Fassungsraum bis zu 85 l verwendet werden. 2. Der Ausgangsanschluss der Flaschenventile muss das für Wasserstoff zu verwendende Gewinde W 21,80 x 1/14 LH haben. 3. Die Ventile müssen gasdicht schließende und unverlierbar mit dem Ventil verbundene Verschlussmutter besitzen. Die Verschlussmutter müssen geeignete, unbeschädigte Dichtungen haben. 4. Für Beförderung und Lagerung müssen die Verschlussmutter fest aufgeschraubt sein. 5. Jede Flasche ist vor dem Füllen mit gereinigtem Wasserstoff zu spülen und anschließend zu evakuieren.						

Unter hohem Druck zu verflüssigende Gase, Gruppe 2.3: chemisch instabil						
Gas	T_k in °C	Sdp. in °C	Rel. Dichte	Korrosiv	UN-Nr.	KC
Difluorethylen (R1132a) C ₂ H ₂ F ₂	29,7	- 84,0	2,23		1959	2F
Distickstoffoxid N ₂ O	36,4	- 88,5	1,53		1070	2O
Oxidierendes Gas, kann mit oxidierbaren Materialien gefährlich reagieren.						

Unter hohem Druck zu verflüssigende Gase, Gruppe 2.3: chemisch instabil						
Gas	T_k in °C	Sdp. in °C	Rel. Dichte	Korrosiv	UN-Nr.	KC
Ozon O ₃	- 12,1	- 110,5	1,66			
	Oxidierendes Gas, kann mit oxidierbaren Materialien gefährlich reagieren. Ozon wird im Allgemeinen nicht in verflüssigter Form gehandhabt. Es darf auch nicht transportiert werden und hat daher keine UN-Nr. Besondere Maßgaben: Die Verflüssigung von Ozon muss unbedingt vermieden werden, da es sich in flüssiger Phase leicht zur Explosion bringen lässt.					
Vinylfluorid (Fluor- ethen) (R1141) C ₂ H ₃ F	54,7	- 72,2	1,62		1860	2F

Tabelle 3: Gase mit einer kritischen Temperatur $T_k > 65$ °C: Diese Gase lassen sich bereits unter vergleichsweise geringem Druck verflüssigen. Innerhalb der Tabelle sind die Gase nach ihrer Entzündbarkeit und ihrer chemischen Stabilität in die Gruppen 3.1 bis 3.3 eingeteilt. Die Füllmenge wird üblicherweise gravimetrisch oder volumetrisch bestimmt.

Unter geringem Druck zu verflüssigende Gase, Gruppe 3.1: nicht entzündbar, chemisch stabil						
Gas	T_k in °C	Sdp. in °C	Rel. Dichte	Korrosiv	UN-Nr.	KC
Bortrichlorid BCl ₃	178,8	12,5	4,06		1741	2TC
	Besondere Maßgaben: 1. Werden vor dem Füllen Fremdstoffe oder Feuchtigkeit in der Flasche festgestellt, müssen diese vor dem Füllen entfernt werden. 2. Das zu füllende Gas muss trocken sein, d.h., der Taupunkt muss < - 10 °C sein und darf nur in trockene Behälter gefüllt werden.					
Bromchlordifluor- methan(R12B1)CBrClF ₂	154,0	- 3,3	5,88		1974	2A
Bromtrifluormethan (R13B1) CBrF ₃	66,8	- 57,9	5,23			
Bromwasserstoff HBr	89,9	- 66,7	2,82	Ja	1048	2TC
	Besondere Maßgaben: 1. Werden vor dem Füllen Fremdstoffe oder Feuchtigkeit in der Flasche festgestellt, müssen diese vor dem Füllen entfernt werden. 2. Das zu füllende Gas muss trocken sein, d. h., der Taupunkt muss < - 10 °C sein und darf nur in trockene Behälter gefüllt werden.					
Carbonylchlorid (Phosgen) COCl ₂	182,3	7,4	3,50		1076	2TC
	Besondere Maßgaben: 1. Werden vor dem Füllen Fremdstoffe oder Feuchtigkeit in der Flasche festgestellt, müssen diese vor dem Füllen entfernt werden. 2. Das zu füllende Gas muss trocken sein, d.h., der Taupunkt muss < - 10 °C sein und darf nur in trockene Behälter gefüllt werden.					

Unter geringem Druck zu verflüssigende Gase, Gruppe 3.1: nicht entzündbar, chemisch stabil						
Gas	T_k in °C	Sdp. in °C	Rel. Dichte	Korrosiv	UN-Nr.	KC
Chlor Cl ₂	144,0	- 34,1	2,49	Ja	1017	2TOC
	Oxidierendes Gas, kann mit oxidierbaren Materialien gefährlich reagieren. Besondere Maßgaben: 1. Die Ventile müssen gasdicht schließende und unverlierbar mit dem Ventil verbundene Verschlussmuttern besitzen. Die Verschlussmuttern müssen geeignete, unbeschädigte Dichtungen haben. 2. Werden vor dem Füllen Fremdstoffe oder Feuchtigkeit in der Flasche festgestellt, müssen diese vor dem Füllen entfernt werden. 3. Gasberührte Ausrüstungsteile, die mit organischen Verunreinigungen wie Fett oder Öl verunreinigt sind, müssen vor dem Füllen gereinigt werden. 4. Das zu füllende Gas muss trocken sein, d.h., der Taupunkt muss < -10 °C sein und darf nur in trockene Behälter gefüllt werden.					
Chlordifluormethan (R22) CHClF ₂	96,2	- 40,6	2,99		1018	2A
Chlorpentafluor- ethan (R115) C ₂ ClF ₅	80,0	- 39,1	5,44		1020	2A
2-Chlor-1,1,1-tri- fluorethan (R133a) C ₂ H ₂ ClF ₃	150,0	6,9	4,09		1983	2A
Chlortrifluorid ClF ₃	174,0	11,8	3,29		1749	2TOC
	Oxidierendes Gas, kann mit oxidierbaren Materialien gefährlich reagieren. Besondere Maßgaben: 1. Werden vor dem Füllen Fremdstoffe oder Feuchtigkeit in der Flasche festgestellt, müssen diese vor dem Füllen entfernt werden. 2. Gasberührte Ausrüstungsteile, die mit organischen Verunreinigungen wie Fett oder Öl verunreinigt sind, müssen vor dem Füllen gereinigt werden. 3. Das zu füllende Gas muss trocken sein, d.h., der Taupunkt muss < -10 °C sein und darf nur in trockene Behälter gefüllt werden.					
Dichlordifluormethan (R12) CCl ₂ F ₂	112,0	- 24,9	4,26		1028	2A
Dichlorfluormethan (R21) CHCl ₂ F	178,5	8,9	3,65		1029	2A
Dichlortetrafluor- ethan (R114) C ₂ Cl ₂ F ₄	145,7	3,5	6,11		1958	2A
Heptafluorpropan (R227) C ₃ HF ₇	100,0	- 17,0	(5,87)		3296	2A
Hexafluorpropen (R1216) C ₃ F ₆	86,2	- 29,6	(5,28)		1858	2A
Oktafluorocyclobutan (RC318) C ₄ F ₈	115,3	- 6,4	7,17		1976	2A
Oktafluorpropan (R218) C ₃ F ₈	71,9	- 36,7	8,54		2424	2A
Pentafluorethan (R125) C ₂ HF ₅	66,2	- 48,1	1,21		3220	2A

Unter geringem Druck zu verflüssigende Gase, Gruppe 3.1: nicht entzündbar, chemisch stabil						
Gas	T_k in °C	Sdp. in °C	Rel. Dichte	Korrosiv	UN-Nr.	KC
Schwefeldioxid SO ₂	157,5	- 10,0	2,26	Ja	1079	2TC
	Besondere Maßgaben: 1. Werden vor dem Füllen Fremdstoffe oder Feuchtigkeit in der Flasche festgestellt, müssen diese vor dem Füllen entfernt werden. 2. Das zu füllende Gas muss trocken sein, d.h., der Taupunkt muss < - 10 °C sein und darf nur in trockene Behälter gefüllt werden.					
Stickstofftetroxid N ₂ O ₄	158,2	21,1	2,83	Ja	1975	2TOC
	Oxidierendes Gas, kann mit oxidierbaren Materialien gefährlich reagieren. Besondere Maßgaben: 1. Werden vor dem Füllen Fremdstoffe oder Feuchtigkeit in der Flasche festgestellt, müssen diese vor dem Füllen entfernt werden. 2. Gasberührte Ausrüstungsteile, die mit organischen Verunreinigungen wie Fett oder Öl verunreinigt sind, müssen vor dem Füllen gereinigt werden. 3. Das zu füllende Gas muss trocken sein, d.h., der Taupunkt muss < - 10 °C sein und darf nur in trockene Behälter gefüllt werden.					
Sulfurylfluorid SO ₂ F ₂	91,8	- 55,4	3,47		2191	2T
1,1,1,2-Tetrafluorethan (R134a) C ₂ H ₂ F ₄	101,0	- 26,1	3,59		3159	2A
	Besondere Maßgaben: Das zu füllende Gas muss trocken sein, d.h., der Taupunkt muss < - 10 °C sein und darf nur in trockene Behälter gefüllt werden.					
Trifluoracetylchlorid CF ₃ COCl	(109)	(- 24,8)	(4,57)		3057	2TC
	Besondere Maßgaben: Das zu füllende Gas muss trocken sein, d.h. der Taupunkt muss < - 10 °C sein und darf nur in trockene Behälter gefüllt werden.					
Wolframhexafluorid WF ₆	170,0	17,1	10,28		2196	2TC
	Besondere Maßgaben: 1. Es sind nur Flaschen bis zu einem Fassungsraum von 85 l zulässig. 2. Die Behälter müssen innen trocken und frei sein von Stoffen, die mit dem Gas in gefährlicher Weise reagieren. 3. Die Ventile müssen gasdicht schließende und unverlierbar mit dem Ventil verbundene Verschlussmuttern besitzen. Die Verschlussmuttern müssen geeignete, unbeschädigte Dichtungen haben. 4. Das Gas darf bis zu einem Gesamtüberdruck von 5 bar (bei 15 °C) mit Argon überlagert werden.					

Unter geringem Druck zu verflüssigende Gase, Gruppe 3.2: entzündbar, chemisch stabil						
Gas	T_k in °C	Sdp. in °C	Rel. Dichte	Korrosiv	UN-Nr.	KC
Ethylamin C ₂ H ₅ NH ₂	183,4	16,6	1,61		1036	2F
Ethylchlorid (R160) C ₂ H ₅ Cl	187,2	12,3	2,31		1037	2F

Unter geringem Druck zu verflüssigende Gase, Gruppe 3.2: entzündbar, chemisch stabil						
Gas	T_k in °C	Sdp. in °C	Rel. Dichte	Korrosiv	UN-Nr.	KC
Ammoniak NH ₃	132,4	- 33,4	0,60		1005	2TC
n-Butan C ₄ H ₁₀	152,0	- 0,5	2,11		1011	2F
i-Butan C ₄ H ₁₀	135,0	- 11,7	2,11		1969	2F
1-Buten C ₄ H ₈	146,4	- 6,2	2,00		1012	2F
cis-2-Buten C ₄ H ₈	162,4	3,7	2,00		1012	2F
trans-2-Buten C ₄ H ₈	155,5	0,9	2,00		1012	2F
i-Buten C ₄ H ₈	144,7	- 7,1	2,00		1055	2F
Chlordifluorethan (R142b) C ₂ H ₃ ClF ₂	137,1	- 9,6	3,61		2517	2F
Cyclopropan C ₃ H ₆	124,6	- 32,9	1,45		1027	2F
Dichlorsilan SiH ₂ Cl ₂	176,3	8,4	3,56		2189	2TFC
	Besondere Maßgaben: 1. Der Ausgangsanschluss der Flaschenventile muss das Gewinde 1 LH haben. 2. Die Ventile müssen gasdicht schließende und unverlierbar mit dem Ventil verbundene Verschlussmuttern besitzen. Die Verschlussmuttern müssen geeignete, unbeschädigte Dichtungen haben. 3. Das zu füllende Gas muss trocken sein, d.h., der Taupunkt muss < - 10 °C sein und darf nur in trockene Behälter gefüllt werden.					
1,1-Difluorethan (R152a) C ₂ H ₄ F ₂	113,5	- 25,0	2,34		1030	2F
Difluormethan (R32) CH ₂ F ₂	78,4	- 51,7	1,82		3252	2F
Dimethylether C ₂ H ₆ O	126,9	- 24,8	1,63		1033	2F
Dimethylamin C ₂ H ₆ NH	164,6	7,4	1,60		1032	2F
Dimethylsilan (CH ₃) ₂ SiH ₂	125,0	- 19,6	2,11			
	Besondere Maßgaben: Die besonderen Maßgaben für Methylsilan (s. Gruppe 3.2) gelten sinngemäß.					

Unter geringem Druck zu verflüssigende Gase, Gruppe 3.2: entzündbar, chemisch stabil						
Gas	T_k in °C	Sdp. in °C	Rel. Dichte	Korrosiv	UN-Nr.	KC
Methanthiol CH ₃ SH	196,8	6,0	1,70		1064	2TF
	Bei Behältern aus Stahl besteht die Gefahr der Spannungsrisskorrosion durch Verunreinigungen mit Schwefelwasserstoff. Besondere Maßgaben: 1. Werden vor dem Füllen Fremdstoffe oder Feuchtigkeit in der Flasche festgestellt, müssen diese vor dem Füllen entfernt werden. 2. Das zu füllende Gas muss trocken sein, d.h., der Taupunkt muss < - 10 °C sein und darf nur in trockene Behälter gefüllt werden. 3. Die besonderen Maßgaben für Schwefelwasserstoff (s. Gruppe 3.2) gelten für Methanthiol und Gemische, die Methanthiol enthalten, sinngemäß.					
Methylamin CH ₃ NH ₂	156,9	- 6,3	1,80		1061	2F
Methylbromid (R40B1) CH ₃ Br	194,0	3,6	3,07		1062	2T
Methylchlorid (R40) CH ₃ Cl	143,0	- 23,8	1,78		1063	2F
Methylsilan CH ₃ SiH ₃	79,3	- 57,5	1,61			
	Besondere Maßgaben: Der Ausgangsanschluss der Flaschenventile muss das für Wasserstoff zu verwendende Gewinde W 21,80 x 1/14 LH haben.					
Propan C ₃ H ₈	96,8	- 42,1	1,55		1978	2F
Propen C ₃ H ₆	91,8	- 47,7	1,48		1077	2F
Schwefelwasserstoff H ₂ S	100,4	- 60,2	1,19	Ja	1053	2TF
	Es besteht die Gefahr der Spannungsrisskorrosion. Besondere Maßgaben: 1. Werden vor dem Füllen Fremdstoffe oder Feuchtigkeit in der Flasche festgestellt, müssen diese vor dem Füllen entfernt werden. 2. Das zu füllende Gas muss trocken sein, d.h., der Taupunkt muss < - 10 °C sein und darf nur in trockene Behälter gefüllt werden. Besondere Maßgaben für Behälter aus Stahl: 1. Werkstoffe müssen gegen Wasserstoffversprödung beständig sein. 2. Ein Behälter, bei dem Verdacht auf Sulfid-Spannungskorrosion besteht, darf nicht gefüllt werden. Ein Behälter, dessen Inneres bei der Besichtigung den Eindruck der "Grübchenbildung" erweckt, darf nur weiterverwendet werden, wenn nach einer geeigneten Untersuchung der inneren Behälteroberfläche der Behälter freigegeben wurde. Als geeignete Untersuchungen gelten das Magnetpulververfahren und die Ultraschallprüfung. 3. Die Behälter sollen nicht vollständig entleert werden. Ist ein Behälter vollständig entleert worden, so muss er vor dem Füllen einer geeigneten Innenbehandlung unterzogen werden. 4. Ein mit "Schwefelwasserstoff" gekennzeichnete Behälter darf auf ein anderes Gas nur umgestempelt werden, wenn der Nachweis erbracht ist, dass Sulfid-Spannungskorrosion nicht eingetreten ist. 5. Die Maßgaben 1 bis 4 gelten auch für Gemische, die Schwefelwasserstoff enthalten.					
1,1,1-Trifluorethan (R143a) C ₂ H ₃ F ₃	73,0	- 47,6	2,95		2035	2F

Unter geringem Druck zu verflüssigende Gase, Gruppe 3.2: entzündbar, chemisch stabil						
Gas	T_k in °C	Sdp. in °C	Rel. Dichte	Korrosiv	UN-Nr.	KC
3,3,3-Trifluorpropen (TFP) $C_3H_3F_3$	107,0	- 30,0	3,32			
	Besondere Maßgaben: Das zu füllende Gas muss trocken sein, d.h., der Taupunkt muss < - 10 °C sein und darf nur in trockene Behälter gefüllt werden.					
Trimethylamin (CH_3) ₃ N	160,2	2,9	2,00		1083	2F
Trimethylsilan (CH_3) ₃ SiH	155,0	6,7	(2,61)			
	Besondere Maßgaben: Die besonderen Maßgaben für Methylsilan (s. Gruppe 3.2) gelten sinngemäß.					

Unter geringem Druck zu verflüssigende Gase, Gruppe 3.3: chemisch instabil (in der Regel entzündbar)						
Gas	T_k in °C	Sdp. in °C	Rel. Dichte	Korrosiv	UN-Nr.	KC
Ethylenoxid C_2H_4O	195,8	10,5	1,52		1040	2TF
	Chemisch instabiles Gas, kann auch ohne Luftsauerstoff beim Wirksamwerden einer Zündquelle explosionsartig reagieren. Besondere Maßgaben: 1. Für Behälter mit einem Volumen von $V > 1m^3$ muss die Gasphase inertisiert werden. Über die erforderlichen Kenntnisse und die Fachkunde zur Beurteilung der Inertisierung ethylenoxidhaltiger Gasphasen verfügt die BAM. 2. Hinweis: Für einige Druckgasbehälter ist ggf. ein Sonnenschutz erforderlich (siehe z. B. Gefahrgutvorschriften).					
1,2-Butadien C_4H_6	170,6	10,9	1,95		1010	2F
	Besondere Maßgaben: 1. Hinweis: Für einige Druckgasbehälter ist ggf. ein Sonnenschutz erforderlich (siehe z. B. Gefahrgutvorschriften). 2. Der Volumengehalt des Sauerstoffes in der Gasphase darf 50 ppm nicht übersteigen.					
1,3-Butadien C_4H_6	152,0	- 4,5	1,92		1010	2F
	Butadien ist zwar nicht als chemisch instabil eingestuft (UN-Prüfhandbuch, Section 35), kann aber bereits mit Spuren von Sauerstoff Peroxide bilden, die dann zu explosionsartigen Reaktionen führen können. Besondere Maßgaben 1. Hinweis: Für einige Druckgasbehälter ist ggf. ein Sonnenschutz erforderlich (siehe z. B. Gefahrgutvorschriften). 2. Dem Gas muss ein Stabilisator in ausreichender Menge zugegeben sein.					

Unter geringem Druck zu verflüssigende Gase, Gruppe 3.3: chemisch instabil (in der Regel entzündbar)						
Gas	T_k in °C	Sdp. in °C	Rel. Dichte	Korrosiv	UN-Nr.	KC
Chlorcyan ClCN	(175,0)	12,9	2,19		1589	2TC
	<p>Chlorcyan ist bei nicht-atmosphärischen Bedingungen ein chemisch instabiles Gas, das ohne Anwesenheit anderer Stoffe gefährlich reagieren kann. Chlorcyan ist nicht entzündbar. Bei Behältern aus Stahl besteht die Gefahr der Spannungsrisskorrosion bei Anwesenheit von Cyaniden.</p> <p>Besondere Maßgaben</p> <ol style="list-style-type: none"> Um gefährliche Reaktionen zu vermeiden, muss das Gas in bestimmter Reinheit vorliegen und ein geeigneter Stabilisator in ausreichender Menge beigegeben sein. Über die erforderlichen Kenntnisse und die Fachkunde zur Beurteilung der Stabilisierung verfügt die BAM. Es dürfen nur Flaschen und Flaschenbündel verwendet werden. Ein Behälter, bei dem der Verdacht auf Spannungsrisskorrosion besteht, darf nur gefüllt werden, wenn nach einer geeigneten Untersuchung der inneren Behälteroberfläche der Behälter freigegeben wurde. Werden vor dem Füllen Fremdstoffe oder Feuchtigkeit in der Flasche festgestellt, müssen diese vor dem Füllen entfernt werden. Das zu füllende Gas muss trocken sein, d.h., der Taupunkt muss < - 10 °C sein und darf nur in trockene Behälter gefüllt werden. <p>Besondere Maßgaben für Behälter aus Stahl:</p> <ol style="list-style-type: none"> Die Behälter sollen nicht vollständig entleert werden. Ist ein Behälter vollständig entleert worden, so muss er vor dem Füllen einer geeigneten Innenbehandlung unterzogen werden. Die Maßgabe 1 gilt auch für Gemische, die Chlorcyan enthalten. 					
Chlortrifluorethylen (R1113) C ₂ ClF ₃	105,8	- 28,4	4,11		1082	2TF
	<p>Besondere Maßgaben</p> <ol style="list-style-type: none"> Hinweis: Für einige Druckgasbehälter ist ggf. ein Sonnenschutz erforderlich (siehe z. B. Gefahrgutvorschriften). Dem Gas muss ein geeigneter Stabilisator in ausreichender Menge zugegeben sein. 					
Cyanwasserstoff HCN	183,5	25,7	0,95		1051	TF1
	<p>Bei Behältern aus Stahl besteht die Gefahr der Spannungsrisskorrosion bei Anwesenheit von Cyaniden.</p> <p>Besondere Maßgaben:</p> <ol style="list-style-type: none"> Die besonderen Maßgaben für Chlorcyan (s. Gruppe 3.3) gelten entsprechend. Es darf nur Cyanwasserstoff gefüllt werden, dessen Wassergehalt 3 % nicht übersteigt und der frei von Alkalien oder anderen Stoffen ist, die eine Polymerisation begünstigen. Vom Datum des Füllens an muss der Inhalt jeder gefüllten Flasche innerhalb eines Jahres entweder zum Verbrauch entnommen oder gefahrlos vernichtet werden. 					
Dicyan C ₂ N ₂	126,6	- 21,2	1,80		1026	2TF
	<p>Besondere Maßgaben</p> <ol style="list-style-type: none"> Es dürfen nur Flaschen bis zu einem Fassungsraum von 50 l verwendet werden. Bei Verwendung von unlegierten Baustählen muss das Gas trocken sein. Werden vor dem Füllen Fremdstoffe oder Feuchtigkeit in der Flasche festgestellt, müssen diese vor dem Füllen entfernt werden. Das zu füllende Gas muss trocken sein, d.h., der Taupunkt muss < - 10 °C sein und darf nur in trockene Behälter gefüllt werden. 					
Vinylbromid (R1140B1) C ₂ H ₃ Br	198,0	15,7	3,7		1085	2F
Vinylchlorid (R1140) C ₂ H ₃ Cl	156,5	- 13,7	2,16		1086	2F

Unter geringem Druck zu verflüssigende Gase, Gruppe 3.3: chemisch instabil (in der Regel entzündbar)						
Gas	T_k in °C	Sdp. in °C	Rel. Dichte	Korrosiv	UN-Nr.	KC
Vinylmethylether C_3H_6O	172,0	6,0	2,06		1087	2F
	Besondere Maßgaben: Hinweis: Für einige Druckgasbehälter ist ggf. ein Sonnenschutz erforderlich.					

Acetylen: entzündbar, chemisch instabil						
Gas	T_k in °C	Sdp. in °C	Rel. Dichte	Korrosiv	UN-Nr.	KC
Acetylen C_2H_2	35,2	- 84,0 *	0,91		1001 3374	4F 2F
	Besondere Maßgaben: 1. Es dürfen nur Flaschen u. Flaschenbündel verwendet werden. Sie müssen mit einem entsprechend den Gefahrgutvorschriften zugelassenen porösen Material gefüllt sein. 2. Bis auf Flaschen für lösemittelfreies Acetylen (UN-Nr. 3374) müssen die Flaschen die entsprechend Gefahrgutvorschriften zugelassene Menge Lösemittel enthalten. 3. Der maximale Acetylengehalt darf den entsprechend den Gefahrgutvorschriften zugelassenen Acetylengehalt nicht überschreiten.					

* Sublimationspunkt

A.1.2 Gasgemische

Für definierte Gasgemische wird, soweit möglich, für die kritische Temperatur T_k die pseudo-kritische Temperatur angegeben. Zur Berechnung der pseudo-kritischen Temperatur von Gasgemischen siehe Anhang 2 Nummer A.2.1 Absatz 2. Wenn vorhanden, wird für den Siedepunkt der Siedebeginn angegeben.

Tabelle 1: Permanentgasgemische mit einer kritischen Temperatur $T_k \leq -50$ °C: Diese Gase lassen sich unter Druck nicht verflüssigen. Innerhalb der Tabelle sind die Gase nach ihrer Entzündbarkeit in die Gruppen 1.1 und 1.2 unterteilt. Die Füllmenge wird üblicherweise manometrisch bestimmt.

Permanentgase, Gruppe 1.1: nicht entzündbar						
Gas	T_k in °C	Sdp. in °C	Rel. Dichte	Korrosiv	UN-Nr.	KC
Luft	- 140,7	- 194,4	1		1002 1003	1A 3O

Permanentgase, Gruppe 1.2: entzündbar						
Gas	T_k in °C	Sdp. in °C	Rel. Dichte	Korrosiv	UN-Nr.	KC
Gemisch aus Wasserstoff und Methan					2034	1F
	Besondere Maßgaben: Das zu füllende Gas muss trocken sein, d. h. der Taupunkt muss < -10 °C sein und darf nur in trockene Behälter gefüllt werden.					

Tabelle 2: Gasgemische mit einer kritischen Temperatur $-50\text{ °C} < T_k \leq 65\text{ °C}$: Diese Gase lassen sich nur unter vergleichsweise hohem Druck verflüssigen. Innerhalb der Tabelle sind die Gase nach ihrer Entzündbarkeit und ihrer chemischen Stabilität in die Gruppen 2.1 bis 2.3 eingeteilt. Die Füllmenge wird üblicherweise gravimetrisch bestimmt.

Unter hohem Druck zu verflüssigende Gase, Gruppe 2.1: nicht entzündbar, chemisch stabil						
Gas	T_k in °C	Sdp. in °C	Rel. Dichte	Korrosiv	UN-Nr.	KC
Azeotropes Gemisch aus 59,9 % Chlortrifluormethan und 40,1 % Trifluormethan (R503)	27,6				2599	2A

Tabelle 3: Gasgemische mit einer kritischen Temperatur $T_k > 65\text{ °C}$: Diese Gase lassen sich bereits unter vergleichsweise geringem Druck verflüssigen. Innerhalb der Tabelle sind die Gase nach ihrer Entzündbarkeit und ihrer chemischen Stabilität in die Gruppen 3.1 bis 3.3 eingeteilt. Die Füllmenge wird üblicherweise gravimetrisch oder volumetrisch bestimmt.

Unter geringem Druck zu verflüssigende Gase, Gruppe 3.1: nicht entzündbar, chemisch stabil						
Gas	T_k in °C	Sdp. in °C	Rel. Dichte	Korrosiv	UN-Nr.	KC
Gemisch aus 44 % R125, 4 % R134a und 52 % R143a (R404A)	71,2				3337	2A
	Besondere Maßgaben: 1. Das zu füllende Gas muss trocken sein und darf nur in trockene Behälter gefüllt werden. 2. Das Gasgemisch darf nur aus der flüssigen Phase entnommen werden.					
Gemisch aus 20 % R32, 40 % R125 und 40 % R134a (R407A)	82,6				3338	2A
	Besondere Maßgaben: 1. Das zu füllende Gas muss trocken sein und darf nur in trockene Behälter gefüllt werden. 2. Das Gasgemisch darf nur aus der flüssigen Phase entnommen werden.					
Gemisch aus 10 % R32, 70 % R125 und 20 % R134a (R407B)	74,4				3339	2A
	Besondere Maßgaben: 1. Das zu füllende Gas muss trocken sein und darf nur in trockene Behälter gefüllt werden. 2. Das Gasgemisch darf nur aus der flüssigen Phase entnommen werden.					
Gemisch aus 23 % R32, 25 % R125 und 52 % R134a (R407C)	87,1				3340	2A
	Besondere Maßgaben: 1. Das zu füllende Gas muss trocken sein und darf nur in trockene Behälter gefüllt werden. 2. Das Gasgemisch darf nur aus der flüssigen Phase entnommen werden.					
Azeotropes Gemisch aus 73,8 % R12 und 26,2 % R152a (R500)	112,4				2602	2A

Unter geringem Druck zu verflüssigende Gase, Gruppe 3.1: nicht entzündbar, chemisch stabil						
Gas	T_k in °C	Sdp. in °C	Rel. Dichte	Korrosiv	UN-Nr.	KC
Azeotropes Gemisch aus 48,8 % R22 und 51,2 % R115 (R502)	87,9				1973	2A

Unter geringem Druck zu verflüssigende Gase, Gruppe 3.2: entzündbar, chemisch stabil						
Gas	T_k in °C	Sdp. in °C	Rel. Dichte	Korrosiv	UN-Nr.	KC
Flüssiggas (entsprechend DIN 51622)					1075	2F
Gemische aus Kohlenwasserstoffen, z.B. Gemisch A, A01, A02, A0, A1, B1, B2, B oder C					1965	2F

Unter geringem Druck zu verflüssigende Gase, Gruppe 3.3: chemisch instabil (in der Regel entzündbar)						
Gas	T_k in °C	Sdp. in °C	Rel. Dichte	Korrosiv	UN-Nr.	KC
Gemisch aus maximal 87 % Ethylenoxid mit Kohlendioxid					3300	2TF
	Besondere Maßgaben: Das Gasgemisch darf nur aus der flüssigen Phase entnommen werden, entweder aus Überkopfstellung oder mittels Steigrohr.					
Gemisch aus Dichlordifluormethan mit maximal 12 % Ethylenoxid					3070	2A
	Besondere Maßgaben: Das Gasgemisch darf nur aus der flüssigen Phase entnommen werden, entweder aus Überkopfstellung oder mittels Steigrohr.					
Methylacetylen/Propadien-Gemisch I, z.: Gemisch P1 oder P2					1060	2F
	Besondere Maßgaben: 1. Der Ausgangsanschluss der Flaschenventile muss das Innengewinde W 21,80 x 1/14 LH haben. 2. Das Gasgemisch darf nur aus der flüssigen Phase entnommen werden. Abweichend davon darf auch aus der gasförmigen Phase entnommen werden - bei Flaschen mit einem Fassungsraum von mehr als 79 l, - bei sonstigen Behältern, wenn durch analytische Überwachung sichergestellt ist, dass eine gefährliche Anreicherung von Methylacetylen und von Propadien verhindert wird. 3. Die Entnahme aus der gasförmigen Phase zum Verbrauch darf nur über Druckminderer mit fest verbundener Gasrücktrittsicherung und mit Flammensperre erfolgen.					

Anhang 2 zu TRGS 407 Einstufung von Gasgemischen

Die Einstufung und Kennzeichnung von Gasgemischen beim Inverkehrbringen muss spätestens seit dem 1. Juni 2015 gemäß CLP-Verordnung erfolgen. Für innerbetrieblich hergestellte und nicht in Verkehr gebrachte Gasgemische wird eine entsprechende Einstufung nach CLP-Verordnung empfohlen, die im Folgenden näher erläutert ist.

A.2.1 Physikalisch-chemische Gefahren

(1) Gasgemische sind dann Gase unter Druck, wenn sie in einem Behältnis unter einem Überdruck von 200 kPa (2 bar) oder mehr enthalten sind oder verflüssigt oder verflüssigt und tiefgekühlt sind. Dazu gehören verdichtete, verflüssigte, gelöste und tiefgekühlt verflüssigte Gase (siehe dazu auch Nummer 3.1.1 Absatz 1 Satz 4).

(2) Für Gasgemische kann die pseudo-kritische Temperatur aus den kritischen Temperaturen der Bestandteile wie folgt berechnet werden:

$$T_{k,pseudo} = \sum_{i=1}^n x_i \cdot T_{k,i} \quad [2]$$

mit

$T_{k,pseudo}$ = Pseudo-kritische Temperatur des Gasgemisches in K (oder °C)

$T_{k,i}$ = Kritische Temperatur des Bestandteils i in K (oder °C)

x_i = Stoffmengenanteil des Bestandteils i im Gasgemisch

n = Anzahl der Bestandteile im Gasgemisch

Mithilfe der pseudo-kritischen Temperatur erfolgt die Zuordnung zu einer Gruppe innerhalb der Gefahrenklasse Gase unter Druck nach der CLP-Verordnung sowie die Zuordnung zu einer Gruppe nach Anhang 1 Nummer A.1.2.

(3) Die Entzündbarkeit ist durch Prüfungen zu bestimmen. Für Gemische kann sie auch durch Berechnung nach DIN EN ISO 10156 /17/ in der jeweils aktuellen Fassung erfolgen, wenn die dafür erforderlichen Daten vorliegen. Reicht die Datenlage für die Anwendung des Berechnungsverfahrens nicht aus, kann das Prüfverfahren nach DIN EN 1839 /8/ "Bestimmung der Explosionsgrenzen von Gasen und Dämpfen" in der jeweils aktuellen Ausgabe angewandt werden.

(4) Liegen für ein Gasgemisch die Grenzwerte der Entzündbarkeit für alle enthaltenen entzündbaren Stoffe (Gase oder Dämpfe) sowie die Stickstoffäquivalenzkoeffizienten für alle inerten Gase vor, so kann wie folgt berechnet werden, ob auch das Gemisch entzündbar ist:

$$\sum_{i=1}^n A_i \left(\frac{100}{T_{ci}} - 1 \right) \leq \sum_{k=1}^p B_k K_k \quad [3]$$

mit

- A_i = Stoffmengenanteil des entzündbaren Gases oder Dampfes i in Mol-%
 T_{ci} = Maximaler Anteil des entzündbaren Gases oder Dampfes i in Stickstoff, bei dem das Gemisch in Luft gerade noch nicht entzündbar ist (Grenzwert der Entzündbarkeit) in Mol-%
 B_k = Stoffmengenanteil des inerten Gases k
 K_k = Stickstoffäquivalenzkoeffizient des inerten Gases k
 n = Anzahl der entzündbaren Komponenten im Gasgemisch
 p = Anzahl der inerten Komponenten im Gasgemisch

Die Werte für T_{ci} und K_k sind in den Tabellen der DIN EN ISO 10156 /17/ in der jeweils aktuellen Fassung zu finden.

Ist die Gleichung [3] erfüllt, so ist das Gemisch bei einem Standarddruck von 101,3 kPa und 20 °C **nicht** entzündbar.

(5) Die Oxidationskraft eines Gasgemisches mit oxidierenden Gasen ist durch Prüfungen oder Berechnung nach DIN EN ISO 10156 /17/ in der jeweils aktuellen Fassung zu bestimmen.

(6) Liegen für ein Gasgemisch die Sauerstoffäquivalenzkoeffizienten für alle oxidierenden Gase sowie die Stickstoffäquivalenzkoeffizienten für alle inerten Gase vor, so kann wie folgt berechnet werden, ob auch das Gemisch oxidierend ist:

$$OP = \frac{\sum_{i=1}^n x_i C_i}{\sum_{i=1}^n x_i + \sum_{k=1}^p B_k K_k} \quad [4]$$

mit

- OP = Oxidationskraft
 x_i = Stoffmengenanteil des oxidierenden Gases i in Mol-%
 C_i = Sauerstoffäquivalenzkoeffizient des oxidierenden Gases i
 B_k = Stoffmengenanteil des inerten Gases k
 K_k = Stickstoffäquivalenzkoeffizient des inerten Gases k
 n = Anzahl der oxidierenden Komponenten im Gasgemisch
 p = Anzahl der inerten Komponenten im Gasgemisch

Die Werte für C_i und K_k sind in den Tabellen der DIN EN ISO 10156 /17/ in der jeweils aktuellen Fassung zu finden.

Ist die Oxidationskraft des Gemisches $OP \geq 23,5$ %, ist das Gemisch als oxidierend einzustufen.

(7) Enthalten Gasgemische brennbare und oxidierende Stoffe, sind gefährliche Reaktionen der Stoffe in Betracht zu ziehen. Die Einstufung ist entsprechend Abschnitt 5 der DIN EN ISO 10156 /17/ vorzunehmen. Die Herstellung solcher Gemische erfordert die Beachtung besonderer Maßgaben (siehe Nummer 3.2.8, Nummer 4.2 und Anhang 3).

A.2.2 Gesundheitsgefahren

(1) Gasgemische sind nach ihrer akuten Toxizität in vier Kategorien, entsprechend CLP-Verordnung, einzustufen:

Kategorie 1: ($ATE \leq 100$) ppm(V)

Kategorie 2: ($100 < ATE \leq 500$) ppm(V)

Kategorie 3: ($500 < ATE \leq 2500$) ppm(V)

Kategorie 4: ($2500 < ATE \leq 20\ 000$) ppm(V)

ATE = Schätzwert der akuten Toxizität bei 4 h inhalativer *Exposition*

(2) Die akute Toxizität für Gasgemische kann entsprechend der CLP-Verordnung nach folgender Gleichung ermittelt werden:

$$\frac{100}{ATE_{mix}} = \sum_{i=1}^n \frac{C_i}{ATE_i} \quad [5]$$

mit

n = Anzahl der Bestandteile

C_i = Stoffmengenanteil von Bestandteil i in % v/v oder Mol-%

Liegen ATE-Werte für 4 h Exposition nicht vor, lassen sich diese aus den LC_{50} -Werten (1 h inhalative Exposition) der Bestandteile nach ADR /1/ Abschnitt 4.1.4.1 P200 oder ISO 10298 /18/ in der jeweils aktuellen Fassung durch Teilen mit dem Faktor 2 berechnen.

(3) Die Ätz-/Reizwirkung von Gasgemischen ist, wenn keine anderen Erkenntnisse vorliegen, dann zu unterstellen, wenn das Gemisch mehr als 1 Mol-% eines ätzenden/ reizenden Bestandteils enthält.

(4) Weitere Einstufungen in die Gefahrenklassen Schwere Augenschädigung/Augenreizung, Sensibilisierung der Atemwege oder der Haut, Keimzellmutagenität, Karzinogenität, Reproduktionstoxizität sowie Spezifische Zielorgantoxizität erfolgen entsprechend CLP-Verordnung.

Anhang 3 zu TRGS 407 Gasgemische-Diagramm

Die folgende Kreuztabelle ist bei der Beurteilung, ob die einzelnen Gase eines Gemisches in gefährlicher Weise reagieren können, heranzuziehen.

Legende:

- X Die Gase können in beliebigen Konzentrationen gemischt werden, gefährliche Reaktionen sind nicht möglich.
- Die Gase können in bestimmten Konzentrationen gemischt werden, aber gefährliche Konzentrationen sind möglich.
- Die Gase dürfen nicht gemischt werden (Ausnahmen sind möglich, erfordern jedoch besondere Kenntnisse und Fachkunde und sind in einem schriftlichen Bericht festzulegen. Über die erforderlichen Kenntnisse und die Fachkunde zur Beurteilung der Herstellbarkeit solcher Gasgemische verfügt die BAM.

leer Keine Informationen vorhanden.

Gas	Acetylen	Ammoniak	Argon	Arsenwasserstoff	Bortrichlorid	Bortrifluorid	Bromwasserstoff	Butadien	n-Butan	i-Butan	1-Buten	cis-2-Buten	trans-2-Buten	i-Buten	Carbonylchlorid	Carbonylfluorid	Chlor	Chlorwasserstoff	Chlorcyan	Cyanwasserstoff	Cyclopropan	Deuterium	Diboran	Dicyan	Dimethylamin	Dimethylether	Dimethylsilan	Distickstoffoxid	Ethan	Ethylamin	
Acetylen	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Ammoniak	■	X						X	X	X	X	X	X	X	■	■	■	■	■	■	X	X	■	■	X	X		■	X	X	
Argon	■	X		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	■	X	X	X	X	X	X	X	X
Arsenwasserstoff	■		X														■					X	■							■	
Bortrichlorid	■	■	X					■				■	■	■								■	■	■		■				■	
Bortrifluorid	■	■	X					■				■	■	■								■	■	■		■				■	
Bromwasserstoff	■	■	X					■	X	X	■	■	■	■			■	X				■	X	■	■	■			■	X	■
Butadien	■	■	X		■	■	■		X	X	X	X	X	X	■	■	■	■	■	■		X	X	■		■	X		■	X	■
n-Butan	■	X	X				X	X	X	X	X	X	X	X	■	■	■	■	X	■	X	X	X	■	X	X	X	X	■	X	X
i-Butan	■	X	X				X	X	X		X	X	X	X	■	■	■	■	X	■	X	X	X	■	X	X	X	X	■	X	X
1-Buten	■	X	X		■	■	■	X	X	X		X	X	X	■	■	■	■	■	■	X	X	X	■	X	X	X	X	■	X	X
cis-2-Buten	■	X	X		■	■	■	X	X	X	X		X	X	■	■	■	■	■	■	X	X	X	■	X	X	X	X	■	X	X
trans-2-Buten	■	X	X		■	■	■	X	X	X	X	X		X	■	■	■	■	■	■	X	X	X	■	X	X	X	X	■	X	X
i-Buten	■	X	X				■	X	X	X	X	X	X		■	■	■	■	■	■	X	X	X	■	X	X	X	X	■	X	X
Carbonylchlorid	■	■	X					■	■	■	■	■	■	■			X				■		■		■		■		■	■	
Carbonylfluorid	■	■	X					■	■	■	■	■	■	■			X				■		■		■		■		■	■	
Chlor	■	■	X	■			■	■	■	■	■	■	■	■	X	X		X			■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	
Chlorwasserstoff	■	■	X				X	X	X		■	■	■	■			X				■	X	■		■	■			■	X	■
Chlorcyan	■	■	X					■	■	■	■	■	■	■							■		■						■	■	
Cyanwasserstoff	■	■	X					X	X	X	X	X	X	X			■				X	X	■						■	X	
Cyclopropan	■	X	X				■	X	X	X	X	X	X	X	■	■	■	■	■	■	X		X	■	X	X	X	X	■	X	X
Deuterium	■	X	X	X			X	X	X	X	X	X	X	X			■	X			X	X		■	X	X	X	X	■	X	X
Diboran	■	■	■	■			■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Dicyan	■	■	X					X	X	X	X	X	X	X			■				X	X	■					■	X		
Dimethylamin	■	X	X		■	■	■	■	X	X	X	X	X	X	■	■	■	■	■	■	X	X	■			X		■	X	X	
Dimethylether	■	X	X				■	X	X	X	X	X	X	X			■	■			X	X	■		X			■	X	X	
Dimethylsilan	■		X					X	X	X	X	X	X	X	■	■	■				X	X	■					■	X		
Distickstoffoxid	■	■	X	■				■	■	■	■	■	■	■			■				■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	
Ethan	■	X	X				X	X	X	X	X	X	X	X	■	■	■	X	■	X	X	X	■	X	X	X	X	■		X	
Ethylamin	■	X	X		■	■	■	■	X	X	X	X	X	X	■	■	■	■	■	■	X	X	■		X	X		■	X		
Ethylen	■	X	X		■	■	■	X	X	X	X	X	X	X	■	■	■	■	■	■	X	X	X	■	X	X	X	X	■	X	X
Ethylenoxid	■	■	X		■	■	■	■	X	X	X	X	X	X	■	■	■	■	■	■	X		■		■			■	X	■	
Fluor	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Germaniumwasserstoff	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■

Gas	Acetylen	Ammoniak	Argon	Arsenwasserstoff	Bortrichlorid	Bortrifluorid	Bromwasserstoff	Butadien	n-Butan	i-Butan	1-Buten	cis-2-Buten	trans-2-Buten	i-Buten	Carbonylchlorid	Carbonylfluorid	Chlor	Chlorwasserstoff	Chlorcyan	Cyanwasserstoff	Cyclopropan	Deuterium	Diboran	Dicyan	Dimethylamin	Dimethylether	Dimethylsilan	Distickstoffdioxid	Ethan	Ethylamin	
Helium	■	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	■	X	X	X	X	X	X	X	X
Kohlendioxid	■	■	X	■			X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		X			X	X	■		■	X		X	X	■	
Kohlenmonoxid	■	■	X					X	X	X	X	X	X	X			■				X	X	■		■	X		■	X	■	
Krypton	■	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	■	X	X	X	X	X	X	X	X
Luft	■	O	X	■			■	■	O	O	O	O	O	O			X	■		■	■	O	■	■	O	O	■	X	O	O	
Methan	■	X	X				X	X	X	X	X	X	X	X	■	■	■	X	■	X	X	X	■	X	X	X	X	■	X	X	
Methanthiol	■	■	X					X	X	X	X	X	X	X	■	■	■				X	X	■		■			■	X	■	
Methylamin	■	X	X		■	■	■	■	X	X	X	X	X	X	■	■	■	■	■	■	X	X	■		X	X		■	X	X	
Methylsilan	■		X					X	X						■	■	■	■	■	■		X	■				X	■	X		
Monosilan	■		X					X	X						■	■	■	■	■	■		X	■		■		X	■	X		
Neon	■	X	X	X	X	X		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	■	X	X	X	X	X	X	X	X
Ozon	■	■	■	■	■	■		■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Phosphan	■	■	X					■	X	X							■	■				X	■		■		X	■	X	■	
Propan	■	X	X					X	X	X	X	X	X	X	■	■	■	X	■	X	X	X	■	X	X	X	X	■	X	X	
Propylen (Propen)	■	X	X					X	X	X	X	X	X	X	■	■	■	■	■	■	X	X	■	X	X	X	X	■	X	X	
R12 (CCl ₂ F ₂)	■		X					X	X	X	X	X	X				X				X	X	■			X		■	X		
R12B1 (CBrClF ₂)	■		X					X	X	X	X	X	X				X				X	X	■			X		■	X		
R13 (CClF ₃)	■		X					X	X	X	X	X	X				X				X	X	■			X		■	X		
R13B1 (CBrF ₃)	■		X					X	X	X	X	X	X				X				X	X	■			X		■	X		
R14 (CF ₄)	■		X					X	X	X	X	X	X				X				X	X	■			X		■	X		
R21 (CCl ₂ F)	■		X					X	X	X	X	X	X			■	X				X	X	■			X		■	X		
R22 (CHClF ₂)	■		X					X	X	X	X	X	X			■	X				X	X	■			X		■	X		
R23 (CHF ₃)	■		X					X	X	X	X	X	X			■	X				X	X	■			X		■	X		
R40 (CH ₃ Cl)	■		X					X	X	X	X	X	X			■	X				X	X	■			X		■	X		
R40B1 (CH ₃ Br)	■		X					X	X	X	X	X	X			■	X				X	X	■			X		■	X		
R114 (C ₂ Cl ₂ F ₄)	■		X					X	X	X	X	X	X				X				X	X	■			X		■	X		
R115 (C ₂ ClF ₅)	■		X					X	X	X	X	X	X				X				X	X	■			X		■	X		
R116 (C ₂ F ₆)	■		X					X	X	X	X	X	X				X				X	X	■			X		■	X		
R125 (C ₂ HF ₅)	■		X					X	X	X	X	X	X			■	X				X	X	■			X		■	X		
R133a (C ₂ H ₂ ClF ₃)	■		X					X	X	X	X	X	X			■	X				X	X	■			X		■	X		
R134a (C ₂ H ₂ F ₄)	■		X					X	X	X	X	X	X			■	X				X	X	■			X		■	X		
R142b (C ₂ H ₃ ClF ₂)	■		X					X	X	X	X	X	X			■	X				X	X	■			X		■	X		
R143a (C ₂ H ₃ F ₃)	■		X					X	X	X	X	X	X			■	X				X	X	■			X		■	X		
R152a (C ₂ H ₄ F ₂)	■		X					X	X	X	X	X	X			■	X				X	X	■			X		■	X		
R160 (C ₂ H ₅ Cl)	■		X					X	X	X	X	X	X			■	X				X	X	■			X		■	X		
R1113 (C ₂ ClF ₃)	■		X					■								■	■		■				■					■			
R1132a (C ₂ H ₂ F ₂)	■		X					■								■	■		■				■					■			
R1140B1 (C ₂ H ₃ Br)	■		X					■								■	■		■				■					■			
R1141 (C ₂ H ₃ F)	■		X					■								■	■		■				■					■			
R218 (C ₃ F ₈)	■		X					X	X	X	X	X	X				X				X	X	■			X		■	X		
R227 (C ₃ HF ₇)	■		X					X	X	X	X	X	X			■	X				X	X	■			X		■	X		
Sauerstoff	■	O	X	■				■	O	O	O	O	O				■		■	■	O	■	■	O	O	■	X	O	O		
Schwefeldioxid	■	■	X					■	X	X							■						■		■			■	X	■	
Schwefelhexafluorid	■		X																				■						X		
Schwefelwasserstoff	■	■	X					X	X	X	X	X	X			■					X	X	■		■			■	X	■	
Stickstoff	■	X	X	X	X	X		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	■	X	X	X	X	X	X	X	
Stickstoffdioxid	■	■	X	■				■	■	■	■	■	■				■				■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	
Stickstoffmonoxid	■	■	X	■				■	■	■	■	■	■				■				■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	
Stickstofftrifluorid	■	■	X	■				■	■	■	■	■	■				■				■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	
Trimethylamin	■	X	X		■	■	■	X	X	X	X	X	X	■	■	■	■	■	■		X	X	■		X	X		■	X	X	
Trimethylsilan	■		X					X	X	X	X	X	X	■	■	■	■	■	■		X	■				X	■	X			
Vinylchlorid (Chlorethen)	■	■	X					■	X	X						■	■		■				■		■			■	X	■	
Wasserstoff	■	X	X	X			X	X	X	X	X	X	X			■	X		X	X	X	X	■	X	X	X		■	X	X	
Xenon	■	X	X	X	X	X		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	■	X	X	X	X	X	X	X	

Gas	Ethylen		Ethylenoxid		Fluor	Germaniumwasserstoff	Helium	Kohlendioxid	Kohlenmonoxid	Krypton	Luft	Methan	Methanthiol	Methylamin	Methylsilan	Monosilan	Neon	Ozon	Phosphan	Propan	Propylen (Propen)	R12 (CCl ₂ F ₂)	R12B1 (CBrClF ₂)	R13 (CClF ₃)	R13B1 (CBrF ₃)	R14 (CF ₄)	R21 (CCl ₂ F)	R22 (CHClF ₂)	R23 (CHF ₃)	R40 (CH ₃ Cl)	R40B1 (CH ₃ Br)	R114 (C ₂ Cl ₂ F ₄)				
Acetylen	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■			
Ammoniak	X	■	■	■	X	■	■	X	O	X	■	X	■	X	■	■	X	■	■	X	X	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■			
Argon	X	X	■	■	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	■	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X			
Arsenwasserstoff			■	■	X	■	X	■									X	■																		
Bortrichlorid	■	■	■	■	X			X					■			X	■																			
Bortrifluorid	■	■	■	■	X			X					■			X	■																			
Bromwasserstoff	■	■	■	■	X	X		X	■	X		■	■	■	■	X	■	■	X	■	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X			
Butadien	X	■	■	■	X	X	X	X	■	X		■		■		X	■	■	X	X	X	X														
n-Butan	X	X	■	■	X	X	X	X	O	X	X	X	X	X	X	X	■	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		
i-Butan	X	X	■	■	X	X	X	X	O	X	X	X	X	X	X	X	■	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		
1-Buten	X	X	■	■	X	X	X	X	O	X	X	X				X	■		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		
cis-2-Buten	X	X	■	■	X	X	X	X	O	X	X	X				X	■		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		
trans-2-Buten	X	X	■	■	X	X	X	X	O	X	X	X				X	■		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		
i-Buten	X	X	■	■	X	X	X	X	O	X	X	X				X	■		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		
Carbonylchlorid	■	■	■	■	X	X		X		■		■	■	■	■	X	■		■	■																
Carbonylfluorid	■	■	■	■	X	X		X		■		■	■	■	■	X	■		■	■																
Chlor	■	■	■	■	X		■	X	X	■	■	■	■	■	■	X	■	■	■	■								■	■	■	■	■	■	■		
Chlorwasserstoff	■	■	■	■	X	X		X	■	X		■	■	■	■	X	■	■	X	■	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		
Chlorcyan	■	■	■	■	X			X		■		■	■	■	■	X	■		■	■																
Cyanwasserstoff	X		■	■	X			X	■	X						X	■		X	X																
Cyclopropan	X	X	■	■	X	X	X	X	■	X	X	X	X			X	■		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		
Deuterium	X		■	■	X	X	X	X	O	X	X	X	X	X	X	X	■	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		
Diboran	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	
Dicyan	X		■	■	X			X	■	X						X	■		X	X																
Dimethylamin	X	■	■	■	X	■	■	X	O	X	■	X				X	■	■	X	X																
Dimethylether	X		■	■	X	X	X	X	O	X		X				X	■		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		
Dimethylsilan	X		■	■	X			X	■	X				X	X	X	■	X	X	X																
Distickstoffoxid	■	■	■	■	X	X	■	X	X	■	■	■	■	■	■	X	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	
Ethan	X	X	■	■	X	X	X	X	O	X	X	X	X	X	X	X	■	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
Ethylamin	X	■	■	■	X	■	■	X	O	X	■	X				X	■	■	X	X																
Ethylen		X	■	■	X	X	X	X	■	X	X	X				X	■		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
Ethylenoxid	X		■	■	X	X		X	■	X	■	■	■	■	■	X	■	■	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
Fluor	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Germaniumwasserstoff	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Helium	X	X	■	■			X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	■	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
Kohlendioxid	X	X	■	■	X		X	X	X	X	X	■				X	■		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
Kohlenmonoxid	X		■	■	X	X		X	O	X		■				X	■		X	X																
Krypton	X	X	■	■	X	X	X		X	X	X	X	X	X	X	X	■	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
Luft	■	■	■	■	X	X	O	X		O	O	O	■	■	■	X	■	■	O	O	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
Methan	X	X	■	■	X	X	X	X	O		X	X	X	X	X	X	■	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
Methanthiol	X	■	■	■	X	X		X	O	X		■				X	■		X	X																
Methylamin	X	■	■	■	X	■	■	X	O	X	■					X	■	■	X	X																
Methylsilan		■	■	■	X			X	■	X				X	X	X	■	X	X																	
Monosilan		■	■	■	X			X	■	X		■	X		X	■	X	X																		
Neon	X	X	■	■	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	■	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
Ozon	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Phosphan		■	■	■	X			X	■	X		■	X	X	X	■		X																		
Propan	X	X	■	■	X	X	X	X	O	X	X	X	X	X	X	X	■	X		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	

Gas	R115 (C ₂ ClF ₅)	R116 (C ₂ F ₆)	R125 (C ₂ HF ₅)	R133a (C ₂ H ₂ ClF ₃)	R134a (C ₂ H ₂ F ₄)	R142b (C ₂ H ₃ ClF ₂)	R143a (C ₂ H ₃ F ₃)	R152a (C ₂ H ₄ F ₂)	R160 (C ₂ H ₅ Cl)	R1113 (C ₂ ClF ₃)	R1132a (C ₂ H ₂ F ₂)	R1140B1 (C ₂ H ₃ Br)	R1141 (C ₂ H ₃ F)	R218 (C ₃ F ₈)	R227 (C ₃ HF ₇)	Sauerstoff	Schwefeldioxid	Schwefelhexafluorid	Schwefelwasserstoff	Stickstoff	Stickstoffdioxid	Stickstoffmonoxid	Stickstofftrifluorid	Trimethylamin	Trimethylsilane	Vinylchlorid(Chlorethen)	Wasserstoff	Xenon		
Acetylen	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■			
Ammoniak																○	■		■	X	■	■	■	X			X	X		
Argon	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		
Arsenwasserstoff																■				X	■	■	■				X	X		
Bortrichlorid																					X			■		■		X		
Bortrifluorid																					X			■		■		X		
Bromwasserstoff	X	X	X	X	X	X	X	X	X	■	■	■	■	X	X	■				X	■	■	■	■	■	■	■	X	X	
Butadien										■	■	■	■			■	■			X	■	■	■	■	■	■	■	X	X	
n-Butan	X	X	X	X	X	X	X	X	X					X	X	○	X		X	X	■	■	■	■	X	X	X	X	X	
i-Butan	X	X	X	X	X	X	X	X	X					X	X	○	X		X	X	■	■	■	■	X	X	X	X	X	
1-Buten	X	X	X	X	X	X	X	X	X					X	X	○			X	X	■	■	■	■	X		X	X	X	
cis-2-Buten	X	X	X	X	X	X	X	X	X					X	X	○			X	X	■	■	■	■	X		X	X	X	
trans-2-Buten	X	X	X	X	X	X	X	X	X					X	X	○			X	X	■	■	■	■	X		X	X	X	
i-Buten	X	X	X	X	X	X	X	X	X					X	X	○			X	X	■	■	■	■	X		X	X	X	
Carbonylchlorid																				X				■	■			X		
Carbonylfluorid																				X				■	■			X		
Chlor			■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	X				■	■	■	■	■	X	
Chlorwasserstoff	X	X	X	X	X	X	X	X	X	■	■	■	■	X	X	■				X	■	■	■	■	■	■	■	■	X	X
Chlorcyan																				X									X	
Cyanwasserstoff										■	■	■	■			■	■			X	■	■	■			■	X	X		
Cyclopropan	X	X	X	X	X	X	X	X	X					X	X	■			X	X	■	■	■	■	X		X	X	X	
Deuterium	X	X	X	X	X	X	X	X	X					X	X	○			X	X	■	■	■	■	X	X		X	X	
Diboran	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Dicyan																■				X	■	■	■					X	X	
Dimethylamin																○	■		■	X	■	■	■	X		■	X	X		
Dimethylether	X	X	X	X	X	X	X	X	X					X	X	○				X	■	■	■	■	X		X	X	X	
Dimethylsilan																				X	■	■	■		X				X	
Distickstoffoxid	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	X	■	■	■	■	■	■	■	■	■	X
Ethan	X	X	X	X	X	X	X	X	X					X	X	○	X		X	X	■	■	■	■	X	X	X	X	X	
Ethylamin																○	■		■	X	■	■	■	■	X		■	X	X	
Ethylen	X	X	X	X	X	X	X	X	X					X	X	■			X	X	■	■	■	■	X		X	X	X	
Ethylenoxid	X	X	X	X	X	X	X	X	X					X	X	■	■		■	X	■	■	■	■	■	■	■	■		X
Fluor	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
German	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Helium	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Kohlendioxid	X	X	X	X	X	X	X	X	X					X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	■				X	X	
Kohlenmonoxid																				X	■	■	■	■				X	X	
Krypton	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Luft	X	X	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	X	■	X	X	X	X	○	X	X	■	X	○	■	■	○	X	
Methan	X	X	X	X	X	X	X	X	X					X	X	○	X	X	X	X	■	■	■	■	X	X	X	X	X	
Methanthiol																○				X	■	■	■	■			X	X		
Methylamin																○	■		■	X	■	■	■	X		■	X	X		
Methylsilan																				X	■	■	■		X		X	X		
Monosilan																				X	■	■	■	■	X		X	X		
Neon	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Ozon	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Phosphan																				X	■	■	■	■	X		X	X		
Propan	X	X	X	X	X	X	X	X	X					X	X	○			X	X	■	■	■	■	X	X		X	X	

Gas	R115 (C ₂ ClF ₅)	R116 (C ₂ F ₆)	R125 (C ₂ HF ₅)	R133a (C ₂ H ₂ ClF ₃)	R134a (C ₂ H ₂ F ₄)	R142b (C ₂ H ₃ ClF ₂)	R143a (C ₂ H ₃ F ₃)	R152a (C ₂ H ₄ F ₂)	R160 (C ₂ H ₅ Cl)	R1113 (C ₂ ClF ₃)	R1132a (C ₂ H ₂ F ₂)	R1140B1 (C ₂ H ₃ Br)	R1141 (C ₂ H ₃ F)	R218 (C ₃ F ₈)	R227 (C ₃ HF ₇)	Sauerstoff	Schwefeldioxid	Schwefelhexafluorid	Schwefelwasserstoff	Stickstoff	Stickstoffdioxid	Stickstoffmonoxid	Stickstofftrifluorid	Trimethylamin	Trimethylsilan	Vinylchlorid (Chlorethen)	Wasserstoff	Xenon
Propylen (Propen)	X	X	X	X	X	X	X	X	X					X	X	O			X	X						X	X	
R12 (CCl ₂ F ₂)	X	X	X	X	X	X	X	X	X					X	X					X								X
R12B1 (CBrClF ₂)	X	X	X	X	X	X	X	X	X					X	X					X								X
R13 (CClF ₃)	X	X	X	X	X	X	X	X	X					X	X					X								X
R13B1 (CBrF ₃)	X	X	X	X	X	X	X	X	X					X	X					X								X
R14 (CF ₄)	X	X	X	X	X	X	X	X	X					X	X	X				X								X
R21 (CCl ₂ F)	X	X	X	X	X	X	X	X	X					X	X					X								X
R22 (CHClF ₂)	X	X	X	X	X	X	X	X	X					X	X					X								X
R23 (CHF ₃)	X	X	X	X	X	X	X	X	X					X	X					X								X
R40 (CH ₃ Cl)	X	X	X	X	X	X	X	X	X					X	X					X								X
R40B1 (CH ₃ Br)	X	X	X	X	X	X	X	X	X					X	X					X								X
R114 (C ₂ Cl ₂ F ₄)	X	X	X	X	X	X	X	X	X					X	X					X								X
R115 (C ₂ ClF ₅)		X	X	X	X	X	X	X	X					X	X					X								X
R116 (C ₂ F ₆)	X		X	X	X	X	X	X	X					X	X					X								X
R125 (C ₂ HF ₅)	X	X		X	X	X	X	X	X					X	X					X								X
R133a (C ₂ H ₂ ClF ₃)	X	X	X		X	X	X	X	X					X	X					X								X
R134a (C ₂ H ₂ F ₄)	X	X	X	X		X	X	X	X					X	X					X								X
R142b (C ₂ H ₃ ClF ₂)	X	X	X	X	X		X	X	X					X	X					X								X
R143a (C ₂ H ₃ F ₃)	X	X	X	X	X	X		X	X					X	X					X								X
R152a (C ₂ H ₄ F ₂)	X	X	X	X	X	X	X		X					X	X					X								X
R160 (C ₂ H ₅ Cl)	X	X	X	X	X	X	X	X						X	X					X								X
R1113 (C ₂ ClF ₃)																				X								X
R1132a (C ₂ H ₂ F ₂)																				X								X
R1140B1 (C ₂ H ₃ Br)																				X								X
R1141 (C ₂ H ₃ F)																				X								X
R218 (C ₃ F ₈)	X	X	X	X	X	X	X	X	X						X					X								X
R227 (C ₃ HF ₇)	X	X	X	X	X	X	X	X	X					X						X								X
Sauerstoff																				O	X	X			O			X
Schwefeldioxid																					X							X
Schwefelhexafluorid																					X							X
Schwefelwasserstoff																	O				X						X	X
Stickstoff	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Stickstoffdioxid																					X							X
Stickstoffmonoxid																					X	X						X
Stickstofftrifluorid																					X							X
Trimethylamin																	O				X						X	X
Trimethylsilan																					X						X	X
Vinylchlorid (Chlorethen)																					X							X
Wasserstoff																				O						X	X	X
Xenon	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X

Anhang 4 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

Eigenschaft	Wert
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
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.

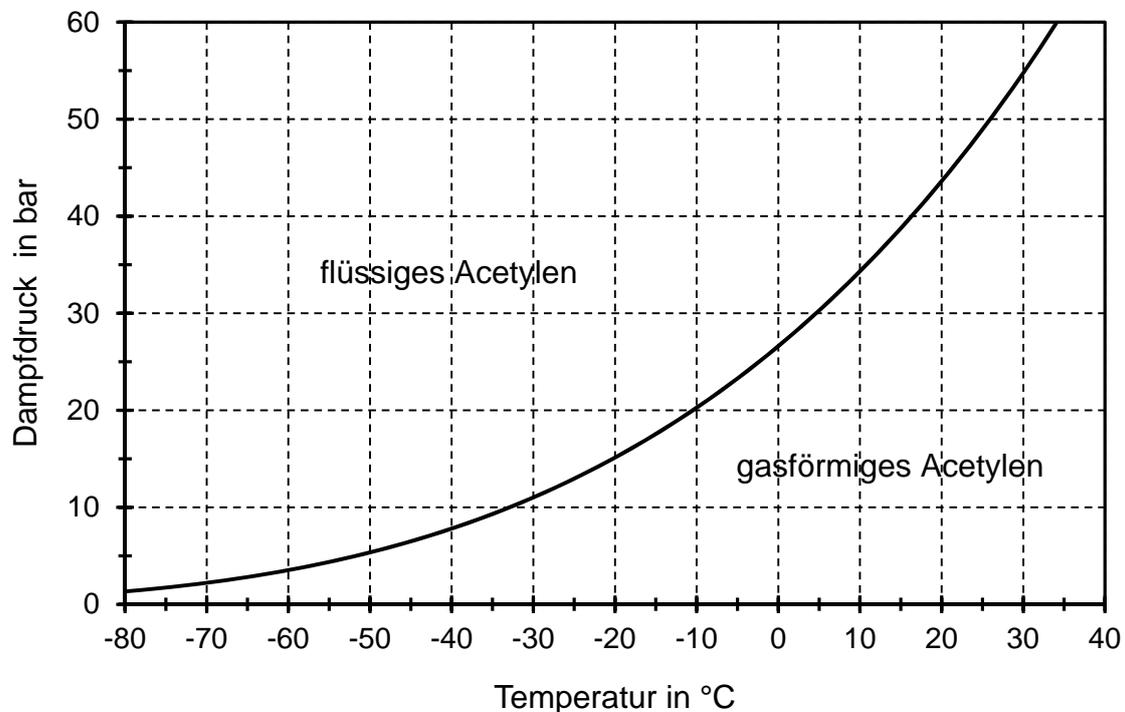


Abbildung 1: Dampfdruck von Acetylen in Abhängigkeit von der Temperatur /19/

(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.

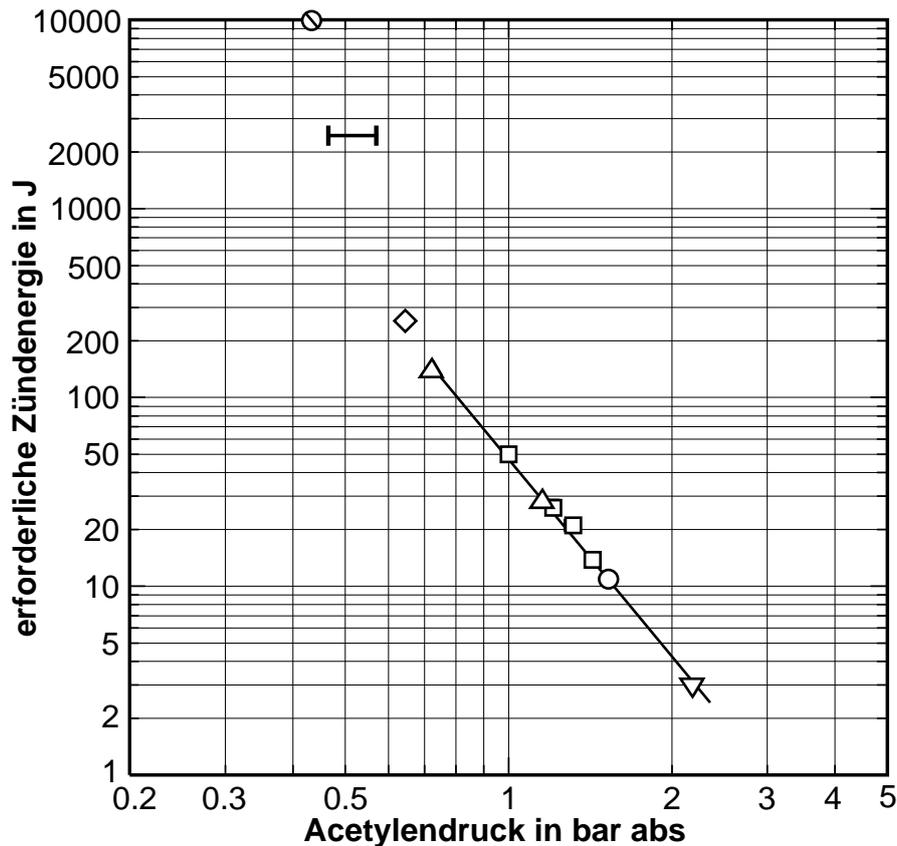


Abbildung 2: Zündenergie von reinem Acetylen bei Raumtemperatur /21/

- ▽ 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
- ⊙ 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 Acetylenanfängsdrücken ist durch lineare Extrapolation gemäß folgender Gleichung möglich:

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

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.

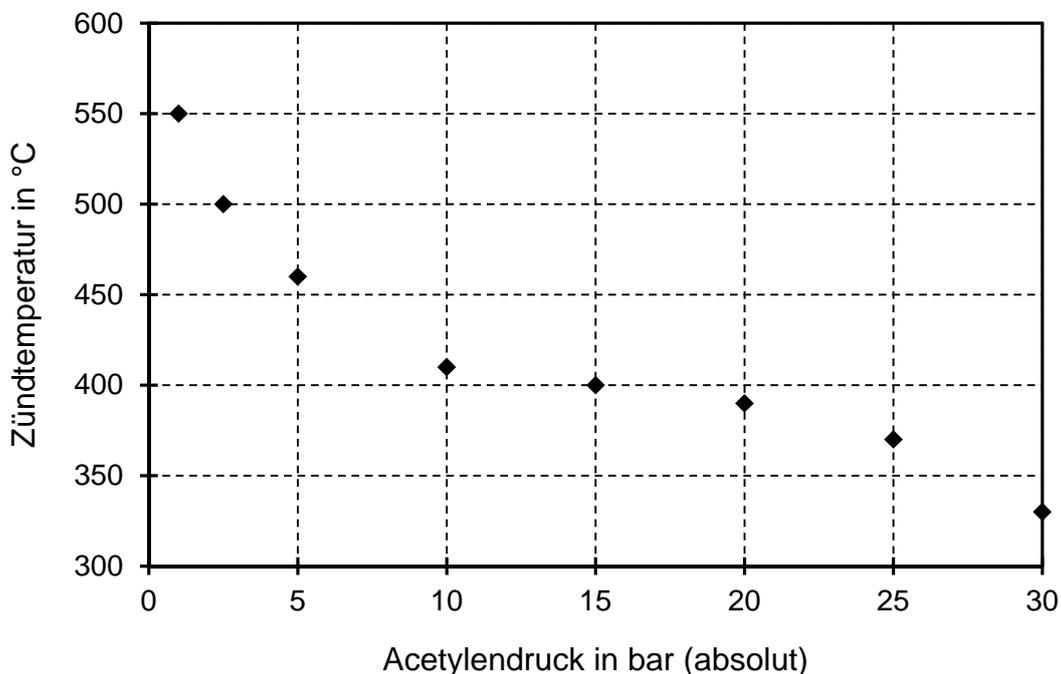


Abbildung 3: Zündtemperatur für die Auslösung einer Zerfallsreaktion von reinem Acetylen in Abhängigkeit vom Druck

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:

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

mit

r_{T_1} = Explosionsdruckverhältnis bei Anfangstemperatur T_1

r_{T_0} = Explosionsdruckverhältnis bei Anfangstemperatur T_0 ($r_{T_0} = 10$ 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 Rohrrinnendurchmesser sowie der Energie der Zündquelle ab. Die entsprechenden Grenzdrücke sind in Abbildung 4 gezeigt.

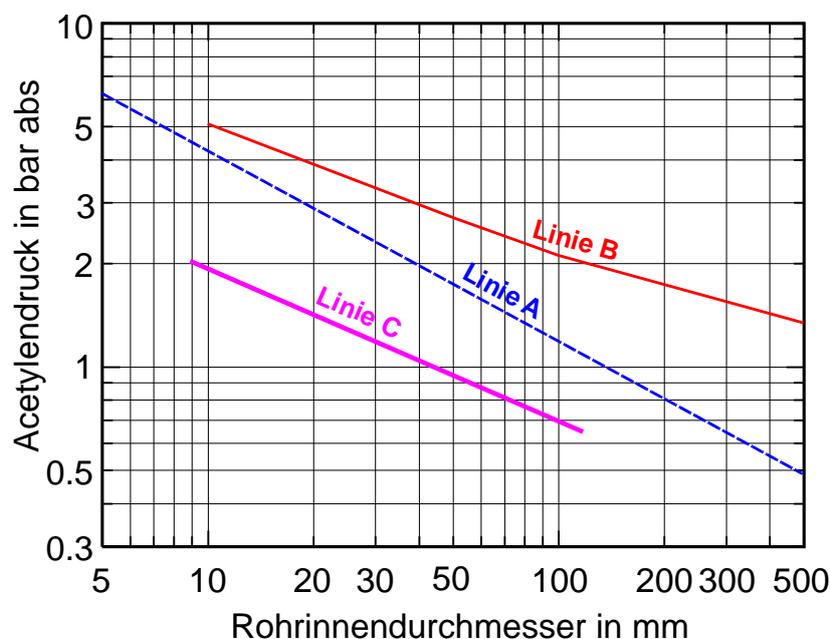


Abbildung 4: Grenzdrücke für die Ausbreitung von deflagrativen Acetylenzerfällen, für den Übergang von deflagrativen zu detonativen Acetylenzerfällen und für die Ausbreitung von detonativen Acetylenzerfällen in Rohrleitungen. Die Daten gelten für Acetylen bei Raumtemperatur.

- 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 Acetylenanfängsdrücke 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 $293,15 \text{ K} / T$ 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 ≥ 5 Durchmesser ist, ("5D-Bögen") 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/mm²

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 x Bemessungsdruck auszugehen, siehe dazu auch Abschnitt 6.3 der DIN EN 14460 /32/.

Literatur

- /1/ ADR (European Agreement concerning the International Carriage of Dangerous Goods by Road):
www.unece.org/trans/danger/publi/adr/adr2015/15contentse.html
- /2/ DIN EN 1089-3 „Ortsbewegliche Gasflaschen - Gasflaschen-Kennzeichnung (ausgenommen Flüssiggas (LPG)) - Teil 3: Farbcodierung"
- /3/ UN Handbuch über Prüfungen und Kriterien (UN Manual of Tests and Criteria):
www.unece.org/trans/danger/publi/manual/rev5/manrev5-amendments.html
- /4/ GSBL - Gemeinsamer Stoffdatenpool Bund/Länder: www.gsbl.de
- /5/ Chemsafe- Datenbank mit bewerteten sicherheitstechnischen Kenngrößen, DECHEMA, BAM und PTB, Frankfurt/M.: www.dechema.de/chemsafe.html
- /6/ Brandes, E., Möller, W.: Safety Characteristic Data, Volume 1: Flammable Liquids and Gases", NW-Verlag, Bremerhaven 2008
- /7/ Molnarne, M., Schendler, Th., Schröder, V.: Safety Characteristic Data, Volume 2: Explosion Regions of Gas Mixtures, NW-Verlag, Bremerhaven 2008
- /8/ DIN EN 1839 „Bestimmung der Explosionsgrenzen von Gasen und Dämpfen"
- /9/ DIN EN 14756 „Bestimmung der Sauerstoffgrenzkonzentration (SGK) für brennbare Gase und Dämpfe"
- /10/ DIN EN ISO 11114-1 „Gasflaschen - Verträglichkeit von Werkstoffen für Gasflaschen und Ventile mit den in Berührung kommenden Gasen - Teil 1: Metallische Werkstoffe"
- /11/ DIN EN ISO 11114-2 "Gasflaschen - Verträglichkeit von Flaschen- und Ventilwerkstoffen mit den in Berührung kommenden Gasen - Teil 2: Nichtmetallische Werkstoffe"
- /12/ DIN EN 1797 „Kryo-Behälter - Verträglichkeit von Gas/Werkstoffen"
- /13/ DIN EN ISO 25760 „Gasflaschen - Verfahren für das sichere Entfernen von Ventilen aus Gasflaschen"
- /14/ Informationsportal Gase unter Druck der BG RCI:
www.gase.bgrci.de
- /15/ IGC-Dokument 123/13 „Code of Practice Acetylen" der EIGA, für die deutsche Fassung „Praxisleitfaden zum sicheren Umgang mit Acetylen" siehe:
www.industriegaseverband.de/downloads
- /16/ IGC-Document 39/14 „The Safe Preparation of Gas Mixtures" und IGC-Document 139/15 „Safe Preparation of Compressed Oxidant-Fuel Gas Mixtures in Cylinders" der EIGA, siehe: www.eiga.eu/index.php?id=181
- /17/ DIN EN ISO 10156 „Gase und Gasgemische - Bestimmung der Brennbarkeit und des Oxidationsvermögens zur Auswahl von Ventilausgängen"

- /18/ ISO 10298 „Determination of toxicity of a gas or gas mixture“ (zurzeit existiert keine entsprechende DIN)
- /19/ B. E. Poling, J. M. Prausnitz, J. P. O'Connell: The Properties of Gases and Liquids, McGraw-Hill 5. Aufl. 2000
- /20/ T. Schendler, H.-P. Schulze, Chem.-Ing.-Tech. 62 (1990) Nr. 1, S. 41-43
- /21/ H. Große-Wortmann, N. Kalkert, H.-G. Schecker, Chem.-Ing.-Tech. 53 (1981) Nr. 6, S. 461-463
- /22/ D. Lietze, J. Trapper, Arbeitsschutz 11 (1977), 291-296
- /23/ DIN EN 14522 „Bestimmung der Zündtemperatur von Gasen und Dämpfen“
- /24/ H. B. Sargent, Chemical Engineering 64 (1957), No. 2, 250-254
- /25/ D. Lietze, Amts- und Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Materialprüfung (BAM) 16 (1986) Nr. 1, S. 23-28
- /26/ D. Lietze, Chem.-Ing.-Tech. 63 (1991) Nr. 11, S. 1148-1149
- /27/ H.P. Schildberg, J. Smeulers, G. Pape, Experimental determination of the static equivalent pressure of gas phase detonations in pipes and comparison with numerical models, Proc. ASME 2013 Pressure Vessels and Piping Conference, Paris (Frankreich), 14. bis 18. Juli 2013, Volume 5: High-Pressure Technology. ISBN: 978-0-7918-5569-0; doi: 10.1115/PVP2013-97677
- /28/ H.P. Schildberg, Experimental determination of the static equivalent pressure of detonative decompositions of acetylene in long pipes and Chapman-Jouguet pressure ratio, Proc. ASME 2014 Pressure Vessels and Piping Conference, Anaheim (Kalifornien, USA), 20. bis 24. Juli 2014, Volume 5: High-Pressure Technology. ISBN: 978-0-7918-4602-5; doi: 10.1115/PVP2014-28197
- /29/ DIN EN ISO 15615 „Gasschweißgeräte - Acetylenflaschen-Batterieanlagen für Schweißen, Schneiden und verwandte Prozesse - Sicherheitsanforderungen für Hochdruckeinrichtungen“
- /30/ DIN EN ISO 14114 „Gasschweißgeräte - Acetylenflaschen-Batterieanlagen für Schweißen, Schneiden und verwandte Verfahren - Allgemeine Anforderungen“
- /31/ S. Schwaigerer, „Festigkeitsberechnung im Dampfkessel- Behälter- und Rohrleitungsbau“, 4. Auflage, Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, 1990, ISBN 3-540-12255-9
- /32/ DIN EN 14460 „Explosionsfeste Geräte“: sinngemäße Anwendung auf den detonativen Zerfall (statischer Vergleichsdruck) von Abschnitt 6 und insbesondere Abschnitt 6.2.1 auf dickwandige Rohre