

Anhang 4 Erläuterungen zu den Anhängen 1, 2, 3

| | | |
|----|--|----|
| 1 | Dampfdruck und Stofftemperatur..... | 3 |
| 2 | Isentropenexponent..... | 3 |
| 3 | Flüssigkeitsdichte-Temperatur | 3 |
| 4 | Spezifische Wärme der Flüssigphase | 4 |
| 5 | Flashanteil..... | 4 |
| 6 | Mindestlachentiefen..... | 5 |
| 7 | Bernoulli-Gleichung | 5 |
| 8 | Innendruck-Höhe der Flüssigkeitssäule..... | 6 |
| 9 | Gasdichte bei Normaldruck | 6 |
| 10 | Füllstand | 6 |
| 11 | Wärmeleitung durch den Lachenboden | 7 |
| 12 | Schutzwirkung von Häusern, Konzentrationsverhältnis..... | 7 |
| 13 | Stoffeigenschaft Reactivity | 7 |
| 14 | Flammengeschwindigkeit bei geringen Mengen..... | 8 |
| 15 | Spitzenüberdruck beim BLEVE | 10 |
| 16 | Fehlende Schwellen- oder Referenzkonzentrationen | 11 |
| 17 | Zeitverhalten der Lachenfläche bei konstantem Flüssigkeitsvolumenstrom | 12 |
| 18 | Flüssigkeitsvolumenstrom bei auslaufendem Behälter | 13 |
| 19 | Zeitverhalten der Lachenfläche bei sinkendem Flüssigkeitsvolumenstrom. | 15 |
| 20 | Lateinische Formelzeichen | 19 |
| 21 | Griechische Formelzeichen | 26 |

1 Dampfdruck und Stofftemperatur

Der Zusammenhang zwischen Dampfdruck und Stofftemperatur $p_v(\vartheta)$ in °C ist eine Stoffeigenschaft. Für begrenzte Temperaturbereiche kann der Zusammenhang näherungsweise durch eine Exponentialfunktion dargestellt werden:

$$\ln(p_v) = A + \frac{B}{273,15 + \vartheta}$$

Das bietet die Möglichkeit der Interpolation oder Extrapolation zur Bestimmung von Dampfdrücken in der Nähe bekannter Wertepaare $(p_{v,i}, \vartheta_i)$. Zur Bestimmung von A_v und B_v sind zwei Wertepaare erforderlich. Wenn die Wertepaare $(p_{v,1}, \vartheta_1)$ und $(p_{v,2}, \vartheta_2)$ bekannt sind, erhält man:

$$B_v = \frac{\frac{\ln(p_{v,1}) - \ln(p_{v,2})}{1} - \frac{1}{273,15 + \vartheta_1} - \frac{1}{273,15 + \vartheta_2}}{1} \quad \text{und} \quad A_v = \ln(p_{v,1}) - \frac{B_v}{273,15 + \vartheta_1}$$

2 Isentropenexponent

Der Isentropenexponent ist das Verhältnis der spezifischen Wärme bei konstantem Druck c_p und bei konstantem Volumen c_v . Der Zahlenwert ist stoffabhängig und liegt bei Gasen zwischen 1,05 und 1,45. Er ist nur schwach temperaturabhängig. Unter der Voraussetzung idealer Gase gilt mit ausreichender Genauigkeit, daß die Differenz zwischen den beiden Werten die allgemeine Gaskonstante $\mathfrak{R} = 8,31441 \text{ J/K} \cdot \text{mol}$ ist. Da aus meßtechnischen Gründen in der Regel nur die spezifische Wärme bei konstantem Druck c_p verfügbar ist, rechnet man mit:

$$\kappa = \frac{1}{1 - \frac{8,31441 \cdot \frac{\text{J}}{\text{K} \cdot \text{mol}}}{c_p(\vartheta)}}$$

3 Flüssigkeitsdichte-Temperatur

Der Zusammenhang $\rho(\vartheta)$ ist eine Stoffeigenschaft. Die Dichte verringert sich im allgemeinen mit der Temperatur. Für begrenzte Temperaturbereiche kann der Zusammenhang näherungsweise durch eine Geradengleichung dargestellt werden:

$$\rho(\vartheta) = \rho(\vartheta_1) + \frac{\rho(\vartheta_2) - \rho(\vartheta_1)}{\vartheta_2 - \vartheta_1} \cdot (\vartheta - \vartheta_1)$$

Das bietet die Möglichkeit der Interpolation oder Extrapolation.

4 Spezifische Wärme der Flüssigphase

Bei der spezifischen Wärme unterscheidet man auch für die flüssige Phase c_p bei konstantem Druck und c_v bei konstantem Volumen.

Im allgemeinen steht aus meßtechnischen Gründen nur c_p zur Verfügung. Der Zusammenhang zwischen beiden ist durch die folgende Gleichung gegeben:

$$c_p - c_v = \frac{\alpha^2}{\kappa} \cdot T \cdot V_{\text{mol}} \text{ mit der absoluten Temperatur } T$$

Die Kompressibilität κ , der thermische Ausdehnungskoeffizient α und das Molvolumen V_{mol} sowie c_p und c_v sind in der folgenden Tabelle für Wasser und Benzol als Beispiele angegeben.

| Flüssigkeit Molmasse | Kompressibilität κ | Ausdehnungskoeffizient α | Molvolumen V_{mol} bei $T = 298 \text{ K}$ | c_p in $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ | c_v in $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ |
|-------------------------|---------------------------------|-----------------------------------|--|---|---|
| Wasser: 18 g/mol | $0,21 \cdot 10^{-3} / \text{K}$ | $4,90 \cdot 10^{-5} / \text{bar}$ | 18,07 cm^3/mol | 4,18 | 4,15 |
| Benzol: 78 g/mol | $1,24 \cdot 10^{-3} / \text{K}$ | $9,09 \cdot 10^{-5} / \text{bar}$ | 88,87 cm^3/mol | 1,72 | 1,14 |

Das Beispiel Benzol zeigt, daß sich die beiden Werte c_p und c_v erheblich unterscheiden können.

5 Flashanteil

Mit der spezifischen Verdampfungswärme bei Siedetemperatur h_{vb} kann der Flashanteil abgeschätzt werden. Während der Flashverdampfung gilt mit der Lachenmasse m zu einem bestimmten Zeitpunkt, wenn kein Wärmeverlust und kein Wärmeeintrag berücksichtigt werden:

$$h_v(\vartheta) \cdot \dot{m} \cdot \Delta t + c_p(\vartheta) \cdot m \cdot \dot{\vartheta} \cdot \Delta t = 0$$

$$\frac{\dot{m}}{m} = - \frac{c_p(\vartheta)}{h_v(\vartheta)} \cdot \dot{\vartheta}$$

$$\frac{d}{dt} \ln(m) = - \frac{c_p(\vartheta)}{h_v(\vartheta)} \cdot \dot{\vartheta}$$

Näherungsweise wird verwendet:

$$\frac{c_p(\vartheta)}{h_v(\vartheta)} \approx \frac{c_{pb}}{h_{vb}}$$

Zu Beginn der Flashverdampfung ist die Lachenmasse gleich der Gesamtmasse m_g und die Lachentemperatur gleich der Temperatur ϑ_0 vor der Freisetzung.

Am Ende der Flashverdampfung ist die Lachenmasse m_{La} gleich der Differenz aus der Gesamtmasse m_{ges} und dem Flashanteil m_{flash} . Die Lachentemperatur ist gleich der Siedetemperatur ϑ_b .

Damit erhält man die gewünschte Beziehung für den Flashanteil durch einfache Integration und Einsetzen der genannten Integrationsgrenzen.

$$\ln(m_{La}) - \ln(m_{ges}) = -\frac{c_{pb}}{h_{vb}} \cdot (\vartheta_p - \vartheta_b)$$

$$\frac{m_{La}}{m_{ges}} = \frac{m_{ges} - m_{flash}}{m_{ges}} = 1 - \frac{m_{flash}}{m_{ges}} = e^{-\frac{c_{pb} \cdot (\vartheta_p - \vartheta_b)}{h_{vb}}}$$

$$\frac{m_{flash}}{m_{ges}} = 1 - e^{-\frac{c_{pb} \cdot (\vartheta_p - \vartheta_b)}{h_{vb}}}$$

6 Mindestlachentiefen

Die folgende Tabelle enthält Beispiele für Annahmen zu Mindestlachentiefen l_{min} in Abhängigkeit von der Bodenart. Es wird angenommen, daß der Boden undurchlässig ist.

| Bodenart | unebener Kies | ebener Kies | Sand | Beton / Stein | unbekannt |
|-----------------------|---------------|-------------|-------|---------------|-----------|
| Min. Tiefe: l_{min} | 25 mm | 10 mm | 10 mm | 5 mm | 10 mm |

7 Bernoulli-Gleichung

Den Ausgangspunkt der Überlegungen bildet die bekannte Bernoulli-Gleichung für Flüssigkeiten bei stationären Bedingungen. Sie ergibt sich aus dem Impulserhaltungssatz und der Kontinuitätsgleichung. Sie stellt einen einfachen Zusammenhang zwischen dem Druckabfall und der Geschwindigkeitsänderung an einer Drosselstelle her.

Wenn die Geschwindigkeit vor der Drosselstelle als verschwindend angenommen werden kann, ergibt sich die bekannte Formel:

$$\Delta p = \frac{\rho}{2} \cdot u_s^2 \quad (1)$$

Weiterhin macht man sich leicht klar, daß der flächenspezifische Massenstrom \dot{m} gleich dem Produkt aus der Dichte ρ und der Geschwindigkeit u_s ist.

$$\dot{m}'' = \rho \cdot u_s \text{ oder } (\dot{m}'')^2 = (\rho \cdot u_s)^2 \quad (2)$$

Man erhält mit Gleichung (1):

$$(\dot{m}_{\text{fl}}'')^2 = (\rho_{\text{fl}} \cdot u_s)^2 = 2 \cdot \rho_{\text{fl}} \cdot \Delta p \quad (3)$$

8 Innendruck-Höhe der Flüssigkeitssäule

Der Innendruck p_0 kann durch die Höhe der Flüssigkeitssäule H_{fl} über der Öffnung bestimmt sein. Dann gilt:

$$p_0 - p_v = 9,81 \cdot 10^{-5} \cdot \rho_{\text{fl}} \cdot H_{\text{fl}} \quad \text{in bar}$$

Die Drücke p_0 und p_v werden in bar eingesetzt.

Die Flüssigkeitsdichte wird mit ρ_{fl} bezeichnet und in kg/m^3 eingesetzt.

Die Höhe der Flüssigkeitssäule H_{fl} wird in m eingesetzt.

9 Gasdichte bei Normaldruck

Für die Berechnung der Gasdichte bei Normaldruck kann die folgende Beziehung benutzt werden:

$$\rho_N = \frac{M_{\text{mol}}}{22,414 \cdot \left(1 + \frac{\vartheta_0}{273,15}\right)} \quad \text{in } \text{kg/m}^3$$

Die Molmasse M_{mol} ist in g/mol und die Temperatur ϑ_0 ist in °C einzugeben. Es wird mit dem Molvolumen des idealen Gases bei 0 °C von 22,4 l gerechnet.

10 Füllstand

Bei Temperaturen ϑ_0 unter der Siedetemperatur ϑ_b , die eine Stoffeigenschaft ist, existiert der Stoff als Flüssigkeit. Der Behälterinnendruck ist im allgemeinen der gleich dem Außendruck, d. h. gleich dem Normaldruck $p_N = 1,01325$ bar.

Wegen möglicher von außen verursachter Temperaturänderungen darf der Behälter im allgemeinen nicht vollständig mit Flüssigkeit gefüllt sein, weil er in diesem Fall durch die Volumenausdehnung der Flüssigkeit in das Atmungssystem gelangen oder über die Belüftung direkt freigesetzt werden könnte. Falls sich eine direkte offene Verbindung mit der Atmosphäre wegen der Giftigkeit der Dämpfe oder wegen der möglichen Explosionsgefahr verbietet, muß bei plötzlicher Abkühlung auch mit Unterdrücken gerechnet werden.

11 Wärmeleitung durch den Lachenboden

Die folgende Tabelle enthält Beispiele für Annahmen zu Koeffizienten für die Wärmeleitfähigkeit und für die Wärmeleitungsgleichung bei verschiedenen Bodenarten.

| Bodenart | unebener Kies | ebener Kies | trockener Sand | feuchter Sand | Beton Stein | Boden unbekannt |
|--|---------------|-------------|----------------|---------------|-------------|-----------------|
| λ_{soil} in W/(m·K) | 2,5 | 2,5 | 0,3 | 0,6 | 2,5 | 0,9 |
| α_{soil} in $10^{-7}\text{m}^2/\text{s}$ | 11 | 11 | 2,3 | 3,3 | 11 | 4,3 |

12 Schutzwirkung von Häusern, Konzentrationsverhältnis

Für den Fall einer mit der Zeitkonstanten τ ansteigenden äußeren Konzentration kann man das Verhältnis der Innenraumkonzentration C_i zur maximalen äußeren Konzentration C_a abschätzen.

Wegen der Erhaltung der Masse muß bei einer Luftwechselrate n für die Innenraumkonzentration C_i gelten:

$$\dot{C}_i + n \cdot C_i = n \cdot C_{a\infty} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right) \quad \text{und} \quad C_i(0) = 0$$

Für den Zeitverlauf der äußeren Konzentration wird angenommen:

$$C_a = C_{a\infty} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right)$$

Daraus ergibt sich für das Verhältnis der Innenraumkonzentration C_i zur maximalen äußeren Konzentration C_a :

$$\frac{C_i}{C_{a\infty}} = 1 - e^{-n \cdot t} + \frac{1}{1 - \frac{1}{n \cdot \tau}} \cdot \left(e^{-n \cdot t} - e^{-\frac{t}{\tau}}\right)$$

13 Stoffeigenschaft Reactivity

Im Schockwellenmodell der TNO werden die explosionsfähige Atmosphäre bildenden Stoffe nach der auftretenden Geschwindigkeit u_{Flam} der Flammenausbreitung bei Gaswolkenexplosionen im Freien grob in drei Gruppen eingeteilt.

Die folgende Tabelle enthält einige Beispiele.

| Hoch $u_{\text{Flam}} \cong 160 \text{ m/s}$ | Mittel $u_{\text{Flam}} \cong 80 \text{ m/s}$ | | | Niedrig $u_{\text{Flam}} \cong 40 \text{ m/s}$ |
|---|--|-----------------|---------------------|---|
| Acetylen | Acetaldehyd | Dichlormethan | n-Pentan | Ammoniak |
| 1,2-Epoxypropan | Benzin | Dimethylamin | Propan | Chlorethan |
| Ethanthiol | Benzol | Ethan | Schwefelwasserstoff | 3-Chlorpropen |
| Ethylenoxid | 1,3-Butadien | Isopropylbenzol | Toluol | Epichlorhydrin |
| Formaldehyd | n-Butan | Methanol | Vinylchlorid | Kohlenmonoxid |
| Wasserstoff | Dichlormethan | Methylamin | Xylol | Methan |

14 Flammengeschwindigkeit bei geringen Mengen

Der Geltungsbereich des Schockwellenmodell der TNO ist für Stoffe aus den Reactivity-Gruppen Mittel und Niedrig nur für genügend große Reaktionsenergien gültig ($h_c \cdot m_{\text{ExUVCE}} > 800 \text{ MJ}$).

Mit der charakteristische Explosionslänge L_0 wird zur Abschätzung der Spitzenüberdruckes Δp in Abhängigkeit vom Abstand ΔR zur Zündentfernung (untere Explosionsgrenze) ein von der Flammengeschwindigkeit abhängiger, dimensionsloser Faktor η verwendet.

$$L_0 \cong \sqrt[3]{10} \cdot \sqrt[3]{h_c \cdot m_{\text{ExUVCE}}} \quad \text{in m} \quad (1)$$

h_c ist in MJ/kg und m_{ExUVCE} ist in kg einzugeben.

$$\Delta p = \eta \cdot \frac{L_0}{R_0 + \Delta R} \quad \text{in bar} \quad (2)$$

Der Zusammenhang zwischen Flammengeschwindigkeit und dem dimensionslosen Faktor η ist in der folgenden Tabelle dargestellt.

| Reactivity | Keine | Niedrig | Mittel | Hoch |
|-----------------------------|-----------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|-------------------------------------|
| Flammen- geschwindigkeit | $u_{\text{Flam}} = 0 \text{ m/s}$ | $u_{\text{Flam}} = 40 \text{ m/s}$ | $u_{\text{Flam}} = 80 \text{ m/s}$ | $u_{\text{Flam}} = 160 \text{ m/s}$ |
| η | 0,00 | 0,02 | 0,06 | 0,15 |

Wenn man in der folgenden Gleichung u_f in m/s einsetzt, kann der Zusammenhang als Formel dargestellt werden.

$$\eta = 10^{-4} \cdot u_{\text{Flam}} \cdot (1,458 + 0,1016 \cdot u_{\text{Flam}} - 0,0003255 \cdot u_{\text{Flam}}^2) \quad (3)$$

Theoretische Überlegungen und Experimente¹ zeigen, daß folgende Abhängigkeit zwischen der Flammengeschwindigkeit und der Reaktionsenergie unterstellt werden darf.

$$u_{\text{Flam}} \approx \sqrt[6]{h_c \cdot m_{\text{ExUVCE}}} \quad (4)$$

Für die bisher ausgeschlossenen Fälle, wenn $h_c \cdot M_{\text{ex}} < 800 \text{ MJ}$ gilt, können daher die Geschwindigkeit der Flammenausbreitung und damit der dimensionslose Faktor η korrigiert werden.

Reactivity **Niedrig**: $u_f = 40 \cdot \sqrt[6]{\frac{h_c \cdot m_{\text{Ex}}}{800}}$ in m/s (5)

Reactivity **Mittel**: $u_f = 80 \cdot \sqrt[6]{\frac{h_c \cdot m_{\text{Ex}}}{800}}$ in m/s (6)

Mit Gleichung (3) kann daraus der korrigierte Faktor η bestimmt werden.

Der Anfangsradius R_0 soll so bestimmt werden, daß bei der unteren Explosionsgrenze ($\Delta R = 0$) ein Maximalspitzenüberdruck von Δp_{max} eingehalten wird. Die Gleichung (2) liefert dann:

$$R_0 = \eta \cdot \frac{L_0}{\Delta p_{\text{max}}} \quad \text{in m} \quad (7)$$

Durch Einsetzen in Gleichung (2) ergibt sich:

$$\Delta p = \frac{\eta \cdot L_0}{\frac{\eta \cdot L_0}{\Delta p_{\text{max}}} + \Delta R} \quad \text{in bar} \quad (8)$$

$$\frac{\Delta p_{\text{max}}}{\Delta p} = 1 + \frac{\Delta p_{\text{max}}}{\eta \cdot L_0} \cdot \Delta R \quad \text{in bar} \quad (9)$$

Für Δp_{max} kommen je nach der Situation Werte zwischen 2 bar und 0,1 bar in Frage. Der Wert sinkt mit der Reaktionsenergie $h_c \cdot m_{\text{Ex}}$ und mit der Flammengeschwindigkeit. Letztere kann durch teilweise Verdämmung ansteigen.

¹ Vgl. Giesbrecht, H., Hess, K., Leuckel, W., Maurer, B., "Analyse der potentiellen Explosionswirkung von kurzzeitig in die Atmosphäre freigesetzten Brenngasmengen", Teil I in Chem.-Ing.-Tech. 52 (1980) Nr. 2, S. 114-122

Giesbrecht, H., Hemmer, G., Hess, K., Leuckel, W., Stoeckel, A. "Analyse der potentiellen Explosionswirkung von kurzzeitig in die Atmosphäre freigesetzten Brenngasmengen", Teil II in Chem.-Ing.-Tech. 53 (1981) Nr. 1, S. 1-10

Stark vereinfachend wird generell $\Delta p_{\max} = 0,5$ bar gesetzt. Man muß daher mit erheblichen Fehlern bei dieser Abschätzung rechnen.

Mit dieser Annahme ergibt sich:

$$\frac{1}{\Delta p} = 2 + \frac{\Delta R}{\eta \cdot L_0} \quad (10)$$

Daraus wird mit Gleichung (1):

$$\frac{1}{\Delta p} \approx 2 + \frac{\Delta R}{\eta \cdot \sqrt[3]{10} \cdot \sqrt[3]{h_c \cdot m_{\text{ExUVCE}}}} \quad \text{in bar}^{-1} \quad (11)$$

15 Spitzenüberdruck beim BLEVE

Es treten nacheinander zwei Schockwellen mit zwei Druckspitzen auf. Zuerst die Schockwelle durch das Behälterbersten und anschließend die Schockwelle der Gaswolkenexplosion. Weil der Energieumsatz bei der Gaswolkenexplosion sehr viel größer als beim Behälterbersten ist und eine Überlagerung der Druckspitzen nicht angenommen werden muß, soll vereinfachend nur der Spitzenüberdruck der Schockwelle durch die Gaswolkenexplosion (abdeckend) betrachtet werden. Es wird insoweit der ungünstigste Fall betrachtet, als angenommen wird, daß es erst bei einer Temperatur von 200 K über der Siedetemperatur zum Bersten des Behälters kommt. In der Regel wird das bei niedrigeren Temperaturen und folglich niedrigeren Behälterinnendrücken geschehen.

Es wird der in Fig. 4 im Kapitel 9 des Yellow book gegebene Zusammenhang zwischen der normierten Entfernung und dem Spitzenüberdruck verwendet. Abweichend wird anstelle der Masse die Reaktionsenergie $h_c \cdot m_{\text{BLEVE}}$ verwendet. Dabei wird auf die Verbrennungswärme von Propen, für das der gegebene Zusammenhang ermittelt wurde, bezogen.

Für den Zusammenhang findet man:

$$\lg\left(\frac{2,84 \cdot R}{\sqrt[3]{h_c \cdot m_{\text{BLEVE}}}}\right) \leq -0,03621 - 0,6584 \cdot \lg(\Delta p) - 0,02015 \cdot [\lg(\Delta p)]^2$$

Dabei sind einzusetzen:

| | | |
|--------------------|----|-------|
| R | in | m |
| h_c | in | MJ/kg |
| m_{BLEVE} | in | kg |

Einige Umrechnungen liefern:

$$R \leq \frac{\sqrt[3]{h_c \cdot m_{\text{BLEVE}}}}{3,087} \cdot \exp\left(-\frac{\ln(\Delta p)}{1,519} - \frac{\ln^2(\Delta p)}{114}\right)$$

16 Fehlende Schwellen- oder Referenzkonzentrationen

Zur Abschätzung der möglichen Gefahren werden Referenzkonzentrationen C_R und zugehörige Referenzdauern t_R für die Grenzen toxischer Wirkungen beim Einatmen (z.B. ERPG-Werte) benötigt. Sie sind nur für relativ wenige Gefahrstoffe bekannt und fehlen bei Gemischen aus Gefahrstoffen nahezu vollständig.

Für diese Fälle werden anschließend im Sinne von Beispielen mögliche Verfahrensweisen dargestellt.

Einheitliche Gefahrstoffe

Wenn in der in TRGS 900 MAK/TRK-Werte angegeben sind, können sie als Schwellenkonzentration C_S verwendet werden. Daraus kann man vorsichtig eine Referenzkonzentration C_R im Sinne des ERPG2-Wertes schätzen.

$$\begin{array}{ll} \text{Spitzenbegrenzungskategorie} = 4: & C_R = 4 \cdot C_S \\ \text{Spitzenbegrenzungskategorie} = 1: & C_R = 2 \cdot C_S \end{array}$$

Falls in der in TRGS 900 keine MAK/TRK-Werte angegeben sind, können auf der Basis von LC_{L0}/LC_{L50} oder LD_{L0}/LD_{L50} -Werten Abschätzungen gemacht werden².

Gefahrstoffgemische

Wenn in der in TRGS 900 MAK/TRK-Werte angegeben sind, kann wie bei einheitlichen Gefahrstoffen verfahren werden. Andernfalls kann man in Anlehnung an die Verfahrensweise in der TRGS 403 eine Referenzkonzentration oder Schwellenkonzentration und daraus eine ein Referenzkonzentration abschätzen.

Wenn das Gemisch N Gefahrstoffe mit bekannten Referenzkonzentrationen C_{Ri} enthält und v_i der Volumenanteil des i-ten Gefahrstoffes ist, kann eine Referenzkonzentration für das Gemisch C_{gR} nach der folgenden Gleichung abgeschätzt werden:

$$C_{gR} \cong \frac{\sum_{i=1}^{i=N} v_i}{\sum_{i=1}^{i=N} \frac{v_i}{C_{Ri}}}$$

Falls die Referenzkonzentrationen der Gemischkomponenten nicht bekannt sind, kann man folgendermaßen verfahren:

² vgl. auch: American Institut of chemical Engineers: "Guidelines for CHEMICAL PROCESS QUANTITATIVE RISK ANALYSIS", CENTER FOR CHEMICAL PROCESS SAFETY

Wenn das Gemisch N Gefahrstoffe mit den Schwellenkonzentrationen C_{Si} enthält und v_i der Volumenanteil des i-ten Gefahrstoffes ist, kann eine Schwellenkonzentration für das Gemisch C_{gS} nach der folgenden Gleichung abgeschätzt werden:

$$C_{gS} \cong \frac{\sum_{i=1}^{i=N} v_i}{\sum_{i=1}^{i=N} \frac{v_i}{C_{Si}}}$$

Zur Abschätzung der Referenzkonzentration kann die überwiegend zugeordnete Spitzenbegrenzungskategorie verwendet werden.

$$\begin{array}{ll} \text{Überwiegend zugeordnete Spitzenbegrenzungskategorie} = 4: & C_{gR} = 4 \cdot C_{gS} \\ \text{Überwiegend zugeordnete Spitzenbegrenzungskategorie} = 1: & C_{gR} = 2 \cdot C_{gS} \end{array}$$

17 Zeitverhalten der Lachenfläche bei konstantem Flüssigkeitsvolumenstrom

Der Volumenstrom in die Lache \dot{V}_{Fl} teilt sich in den in der Lache verbleibenden Anteil \dot{V}_{La} und den Verdunstungsvolumenstrom \dot{V}_{Ver} :

$$\dot{V}_{Fl} = \dot{V}_{La} + \dot{V}_{Ver} \quad (1)$$

Während der Lachenbildung hat die Lache die Tiefe l_{min} . Wenn \dot{m}_{ver}'' der auf die Lachenfläche bezogene Verdunstungsmassenstrom und ρ_{Fl} die Flüssigkeitsdichte sind, gilt:

$$\dot{V}_{Fl} = l_{min} \cdot \dot{A}_{La} + \frac{\dot{m}_{ver}''}{\rho_{Fl}} \cdot A_{La} \quad (2)$$

$$\dot{A}_{La} + \frac{\dot{m}_{ver}''}{\rho_{Fl} \cdot l_{min}} \cdot A_{La} = \frac{\dot{V}_{Fl}}{l_{min}} \quad (3)$$

Zur Erleichterung der Schreibarbeit wird folgende Abkürzung verwendet:

$$\tau = \frac{\rho_{Fl} \cdot l_{min}}{\dot{m}''} \quad (4)$$

$$\dot{A}_{La} + \frac{1}{\tau} \cdot A_{La} = \frac{\dot{V}_{Fl}}{l_{min}} \quad (5)$$

Da die Lachenfläche bei $t = 0$ ebenfalls Null sein soll, lautet die Lösung der Differentialgleichung (5):

$$A_{La} = \frac{\dot{V}_{Fl}}{l_{min}} \cdot \tau \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right) \quad (6)$$

18**Flüssigkeitsvolumenstrom bei auslaufendem Behälter**

Es wird angenommen, daß der Gasraum des Behälters mit einem Druckpolster mit dem Überdruck Δp_{pol} beaufschlagt ist (z. B. bei der Inertisierung).

Es bedeuten:

| | |
|---|-------------------------|
| Überdruck des Druckpolsters | Δp_{pol} |
| Höhendifferenz zwischen Leck und Flüssigkeitsspiegel zu Beginn des Auslaufens | Δh_0 |
| Auslaufvolumen entsprechend der Höhendifferenz Δh_0 | ΔV_0 |
| Flüssigkeitsdichte bei der Flüssigkeitstemperatur ϑ_{Fl} | ρ_{Fl} |
| Leckquerschnitt | A_{Leck} |

Wenn man einen annähernd gleichbleibenden Querschnitt des Behälters während des Auslaufens annimmt, findet man für die zeitabhängige Höhendifferenz zwischen Leck und Flüssigkeitsspiegel:

$$\Delta h(t) = \Delta h_0 \cdot \left[1 - \frac{V_{\text{Fl}}(t)}{\Delta V_0} \right] \quad (1)$$

$V_{\text{Fl}}(t)$ ist das bis zum Zeitpunkt t ausgelaufene Flüssigkeitsvolumen.

Für die Druckdifferenz infolge der Flüssigkeitssäule findet man mit der Erdbeschleunigung g :

$$\Delta p_g = g \cdot \rho_{\text{Fl}} \cdot \Delta h_0 \cdot \left(1 - \frac{V_{\text{Fl}}}{\Delta V_0} \right) \quad (2)$$

Für die gesamte Druckdifferenz Δp gilt:

$$\Delta p = \Delta p_g + \Delta p_{\text{pol}} \quad (3)$$

Mit der Bernoulligleichung wird das Quadrat der Ausströmgeschwindigkeit bestimmt.

$$u^2 = 2 \cdot \frac{\Delta p}{\rho_{\text{Fl}}} = 2 \cdot \left[\frac{\Delta p_{\text{pol}}}{\rho_{\text{Fl}}} + g \cdot \Delta h_0 \cdot \left(1 - \frac{V_{\text{Fl}}}{\Delta V_0} \right) \right] \quad (4)$$

Mit dem effektiven Leckquerschnitt A_{eff} ergibt sich daraus für das Quadrat des austretenden Flüssigkeitsvolumenstromes:

$$\dot{V}_{\text{Fl}}^2 = 2 \cdot A_{\text{eff}}^2 \cdot \left[\frac{\Delta p_{\text{pol}}}{\rho_{\text{Fl}}} + g \cdot \Delta h_0 \cdot \left(1 - \frac{V_{\text{Fl}}}{\Delta V_0} \right) \right] \quad \text{mit}$$

$$A_{\text{eff}} = C_d \cdot A_{\text{Leck}} \quad (5)$$

Durch Differenzieren nach der Zeit findet man als zeitunabhängigen Wert:

$$\ddot{V}_{Fl} = -k = -\frac{A_{eff}^2 \cdot g \cdot \Delta h_0}{\Delta V_0} \quad (6)$$

Daraus folgt:

$$\dot{V}_{Fl} = -k \cdot t + c \quad \text{und} \quad V_{Fl} = -k \cdot \frac{t^2}{2} + c \cdot t + c_1 \quad (7)$$

Zum Beginn der Freisetzung bei $t = 0$ ist das ausgelaufene Volumen gleich Null. Deshalb verschwindet $c_1 = 0$.

Die Zeit bis zum Versiegen des Leckstromes ohne Gegenmaßnahmen t_{eFlmax} ist dadurch bestimmt, daß der Volumenstrom nur noch durch den Überdruck des Druckpolsters bestimmt ist, und das ausgelaufene Volumen gleich dem Auslaufvolumen ΔV_0 wird.

$$\dot{V}_{Fl}(t_{eFlmax}) = \sqrt{2 \cdot A_{eff}^2 \cdot \frac{\Delta p_{pol}}{\rho_{Fl}}} = -k \cdot t_{eFlmax} + c \quad (8)$$

$$\Delta V_0 = -k \cdot \frac{t_{eFlmax}^2}{2} + c \cdot t_{eFlmax} \quad (9)$$

$$\Delta V_0 = -k \cdot \frac{t_{eFlmax}^2}{2} + \left(\sqrt{2 \cdot A_{eff}^2 \cdot \frac{\Delta p_{pol}}{\rho_{Fl}}} + k \cdot t_{eFlmax} \right) \cdot t_{eFlmax} \quad (10)$$

$$\Delta V_0 = \sqrt{2 \cdot A_{eff}^2 \cdot \frac{\Delta p_{pol}}{\rho_{Fl}} \cdot t_{eFlmax} + \frac{k}{2} \cdot t_{eFlmax}^2} \quad (11)$$

Die maximale Auslaufdauer wird deshalb:

$$t_{eFlmax} = \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta V_0}{k}} \cdot \left\{ \sqrt{1 + \frac{\Delta p_{pol}}{\rho_{Fl} \cdot g \cdot \Delta h_0}} - \sqrt{\frac{\Delta p_{pol}}{\rho_{Fl} \cdot g \cdot \Delta h_0}} \right\} \quad (12)$$

$$\text{Die Gleichungen (7) und (8) liefern: } \dot{V}_{Fl} = \left(\sqrt{2 \cdot A_{eff}^2 \cdot \frac{\Delta p_{pol}}{\rho_{Fl}}} + k \cdot t_{eFlmax} \right) - k \cdot t \quad (13)$$

Der erste Summand ist der Anfangsvolumenstrom \dot{V}_{Fl0} .

$$\dot{V}_{Fl0} = \sqrt{2 \cdot A_{eff}^2 \cdot \frac{\Delta p_{pol}}{\rho_{Fl}}} + k \cdot t_{eFlmax} \quad (14)$$

$$\dot{V}_{Fl} = \dot{V}_{Fl0} - k \cdot t \quad (15)$$

$$V_{Fl} = \dot{V}_{Fl0} \cdot t - k \cdot \frac{t^2}{2} \quad (16)$$

19 Zeitverhalten der Lachenfläche bei sinkendem Flüssigkeitsvolumenstrom

Unbegrenzte Lache

Die Lachentiefe gleich der minimalen Lachentiefe (vgl. auch Abschnitt 6 dieses Anhangs) bleibt unverändert, solange Flüssigphase in die Lache strömt. Die Freisetzung von Flüssigphase soll bei $t = t_{eFl}$ beendet werden. Es muß gelten:

$$t_{eFl} \leq t_{eFl\max} \quad (1)$$

Die Lachenfläche nimmt bis zu diesem Zeitpunkt zu und erreicht ihre größte Fläche $A_{La\max}$.

Es wird angenommen, daß die Lachenfläche bis zum Verdunsten der gesamten in die Lache geströmten Menge an Flüssigkeit diesen Maximalwert behält. Zum Zeitpunkt $t = t_{eFl}$ gilt für das Lachenvolumen:

$$A_{La\max} = \frac{V_{La}(t_{eFl})}{l_{min}} \quad (2)$$

Generell gilt wegen der konstanten Lachentiefe:

$$A_{La} = \frac{V_{La}}{l_{min}} \quad (3)$$

Der verdunstende Flüssigkeitsvolumenstrom ist:

$$\dot{V}_{Ver} = \frac{\dot{m}_{ver}}{\rho_{Fl}} = \frac{\dot{m}''_{ver}}{\rho_{Fl}} \cdot A_{La} \quad (4)$$

Es muß gelten (vgl. auch Abschnitt 17):

$$\dot{V}_{Fl} = \dot{V}_{La} + \dot{V}_{Ver} \quad (5)$$

$$\dot{A}_{La} + \frac{1}{\tau} \cdot A_{La} = \frac{\dot{V}_{Fl0} - k \cdot t}{l_{min}} \quad \text{mit} \quad \tau = \frac{\rho_{Fl} \cdot l_{min}}{\dot{m}''} \quad (6)$$

Da die Lachenfläche bei $t = 0$ ebenfalls Null sein soll, findet man als Lösung:

$$A_{La} = \frac{k \cdot \tau^2}{l_{min}} \cdot \left\{ \left(\frac{\dot{V}_{Fl0}}{\tau \cdot k} + 1 \right) \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right) - \frac{t}{\tau} \right\} \quad (7)$$

Die Gleichung (7) gilt bei der unbegrenzten Lache ohne das Eingreifen zur Abdichtung des Lecks solange bis die Lachenfläche ihr Maximum bei $t_{\max La}$ erreicht hat. Danach überwiegt der Verdunstungsvolumenstrom. Die Lachentiefe wird kleiner als die minimale Lachentiefe und die Lachenfläche bleibt konstant.

Die Bedingung für das Maximum ist:

$$\frac{dA_{La}}{dt} = 0 = \left(\frac{\dot{V}_{Fl0}}{\tau \cdot k} + 1 \right) \cdot e^{-\frac{t_{La max}}{\tau}} - 1 \quad (8)$$

Daraus ergibt sich die Zeit der maximalen Lachengröße für den Fall, daß der Leckstrom nicht vorher zum Zeitpunkt t_{eFl} unterbrochen wird.

$$t_{La max} = \tau \cdot \ln \left(1 + \frac{\dot{V}_{Fl0}}{\tau \cdot k} \right), \quad \text{falls } t_{eFl} \geq t_{La max} \quad (9)$$

Die maximale Lachengröße ist dann:

$$A_{La max} = \frac{k \cdot \tau^2}{l_{min}} \cdot \left\{ \frac{\dot{V}_{Fl0}}{\tau \cdot k} - \ln \left(1 + \frac{\dot{V}_{Fl0}}{\tau \cdot k} \right) \right\}, \quad \text{falls } t_{eFl} \geq t_{La max} \quad (10)$$

Für den Fall, daß der Leckstrom vorher zum Zeitpunkt t_{eFl} unterbrochen wird, gilt:

$$A_{La max} = \frac{k \cdot \tau^2}{l_{min}} \cdot \left\{ \left(\frac{\dot{V}_{Fl0}}{\tau \cdot k} + 1 \right) \cdot \left(1 - e^{-\frac{t_{eFl}}{\tau}} \right) - \frac{t_{eFl}}{\tau} \right\} \quad \text{mit } t_{eFl} < t_{La max} \quad (11)$$

Für den Lachenradius erhält man:

$$R_{La} \cong \sqrt{\frac{A_{La}}{\pi}} \quad (12)$$

Der Verdunstungsmassenstrom kann nunmehr berechnet werden:

$$\dot{m}_{ver}(t) = -0,024 \cdot \frac{u_a^{0,78} \cdot M_{mol} \cdot A_{La}(t)}{R_{La}^{0,11}(t) \cdot (273,15 + \vartheta_{La})} \cdot \ln \left(1 - \frac{p_{va}(\vartheta_{La})}{1,01325} \right) \quad (13)$$

Fall I: Unterbrochener Leckstrom mit $t_{eFl} < t_{La max}$

Für die Zeitspanne $t = 0$ bis $t = t_{eFl}$ sind Lachenfläche und Lachenradius zeitabhängig in die Gleichungen (12) und (13) einzusetzen.

Zum Zeitpunkt $t = t_{eFl}$ erreicht die Lache ihre größte Fläche A_{teFl} . Sie ist in den Gleichungen (12) und (13) zu verwenden.

Das Flüssigkeitsvolumen in der Lache ist zu diesem Zeitpunkt:

$$V_{eFl} = l_{min} \cdot A_{La}(t_{eFl}) \quad (14)$$

In der Zeitspanne $t \geq t_{eFl}$ werden die Lachenfläche und der Verdunstungsmassenstrom so lange unveränderte Werte beibehalten bis das in der Lache vorhandene Flüssigkeitsvolumen V_{eFl} verdunstet ist.

Die maximal mögliche Verdunstungsdauer $t_{evermax}$ ohne Gegenmaßnahmen kann bestimmt werden.

$$t_{evermax} = t_{eFl} + \frac{V_{eFl} \cdot \rho_{Fl}}{\dot{m}_{ver}(t_{eFl})} \quad (15)$$

Fall II: Unterbrochener Leckstrom mit $t_{eFl} \geq t_{La max}$

Für die Zeitspanne $t = 0$ bis $t = t_{La max}$ sind Lachenfläche und Lachenradius zeitabhängig in die Gleichungen (12) und (13) einzusetzen.

Zum Zeitpunkt $t = t_{La max}$ erreicht die Lache ihre größte Fläche $A_{La max}$. Sie ist in den Gleichungen (12) und (13) zu verwenden.

Das Flüssigkeitsvolumen in der Lache ist zu diesem Zeitpunkt:

$$V_{La max} = l_{min} \cdot A_{La max} \quad (14)$$

Ohne Gegenmaßnahmen werden in der Zeitspanne $t \geq t_{eFl}$ die Lachenfläche und der Verdunstungsmassenstrom solange unveränderte Werte beibehalten, bis das in der Lache vorhandene Flüssigkeitsvolumen V_{eFl} und zusätzlich das noch in die Lache strömende Volumen verdunstet sind. Dieser zusätzliche Anteil kann nach Gleichung (16) aus dem Abschnitt 18 dieses Anhangs berechnet werden.

Die maximal mögliche Verdunstungsdauer $t_{evermax}$ ohne Gegenmaßnahmen kann bestimmt werden.

$$t_{evermax} = t_{La max} + \frac{V_{La max} \cdot \rho_{Fl} + \dot{V}_{Fl0} \cdot (t_{eFl} - t_{La max}) - \frac{k}{2} \cdot (t_{eFl}^2 - t_{La max}^2)}{\dot{m}_{ver}(t_{La max})} \quad (15)$$

Fall III: Nicht unterbrochener Leckstrom

Der Fall kann auf den Fall II zurückgeführt werden. In der Gleichung für die maximale Verdunstungsdauer muß der Unterbrechungszeitpunkt t_{eFl} durch die maximale Auslaufdauer $t_{eFl max}$ ersetzt werden.

$$t_{evermax} = t_{La max} + \frac{V_{La max} \cdot \rho_{Fl} + \dot{V}_{Fl0} \cdot (t_{eFl max} - t_{La max}) - \frac{k}{2} \cdot (t_{eFl max}^2 - t_{La max}^2)}{\dot{m}_{ver}(t_{La max})} \quad (16)$$

Begrenzte Lache

Die Lachentiefe bleibt gleich der minimalen Lachentiefe, solange der Tassenboden noch nicht vollständig benetzt ist. Die Freisetzung von Flüssigkeit soll bei $t = t_{eFl}$ beendet werden.

Es kann der Fall eintreten, daß die insgesamt freigesetzte Menge an Flüssigkeit nicht ausreicht, um den Tassenboden vollständig zu benetzen.

Wenn A_{Ta} die Tassenfläche ist, lautet die Bedingung für diesen Fall:

$$A_{Ta} \geq A_{La\max} \quad (17)$$

Die maximale Lachenfläche $A_{La\max}$ kann nach den Gleichungen (10) oder (11) entsprechend dem vorliegenden Fall bestimmt werden.

Wenn die Bedingung (17) erfüllt ist, kann wie im schon behandelten Fall der unbegrenzten Lache verfahren werden.

Wenn die Bedingung (17) nicht erfüllt ist, kann ebenfalls wie im Fall der unbegrenzten Lache verfahren werden, solange der Tassenboden noch nicht vollständig benetzt ist.

Der Zeitpunkt t_{Ta} , bei dem der Tassenboden gerade vollständig benetzt ist, kann aus der Gleichung (18) bestimmt werden.

Ab diesem Zeitpunkt kann die Lachenfläche nicht mehr zunehmen. Es gilt für $t \geq t_{Ta}$:

$$A_{Ta} = A_{La} = \frac{k \cdot \tau^2}{l_{\min}} \cdot \left\{ \left(1 + \frac{\dot{V}_{Fl0}}{k \cdot \tau} \right) \cdot \left(1 - e^{-\frac{t_{Ta}}{\tau}} \right) - \frac{t_{Ta}}{\tau} \right\} \quad (18)$$

Der Zeitpunkt, zu dem der Tassenboden vollständig benetzt ist, kann iterativ oder grafisch aus Gleichung (18) gewonnen werden.

Das Lachenvolumen nimmt aber so lange weiter zu bis das Auslaufen bei t_{eFl} beendet wird. Dabei vergrößert sich die Lachentiefe $l > l_{\min}$. Für den Verdunstungsmassenstrom gilt während dieser Zeit:

$$\dot{m}_{verTa} = -0,024 \cdot \frac{u_a^{0,78} \cdot M_{mol} \cdot A_{Ta}}{R_{Ta}^{0,11} \cdot (273,15 + \vartheta_{La})} \cdot \ln \left(1 - \frac{p_v(\vartheta_{La})}{1,01325} \right) \quad (19)$$

Unter Zuhilfenahme der Gleichung (16) aus Abschnitt 18 findet man für das Flüssigkeitsvolumen in der Lache.

$$V_{La} = l_{\min} \cdot A_{Ta} + \dot{V}_{Fl0} (t_{eFl} - t_{Ta}) - \frac{k}{2} (t_{eFl}^2 - t_{Ta}^2) - \frac{\dot{m}_{verTa}}{\rho_{Fl}} \cdot (t - t_{Ta}) \quad (20)$$

t_{eFl} ist der Zeitpunkt, zu dem der Flüssigkeitsstrom in die Lache unterbrochen wird. Er darf die maximale Auslaufdauer t_{Flmax} nicht überschreiten (vgl. Abschnitt 18).

Die maximale Verdunstungsdauer $t_{evermax}$ ist erreicht, wenn das Volumen V_{La} verschwindet. Das ergibt:

$$t_{evermax} = t_{Ta} + \frac{\rho_{Fl}}{\dot{m}_{verTa}} \cdot \left[l_{min} \cdot A_{Ta} + \dot{V}_{Fl0} \cdot (t_{eFl} - t_{Ta}) - \frac{k}{2} \cdot (t_{eFl}^2 - t_{Ta}^2) \right] \quad (21)$$

20 Lateinische Formelzeichen

Buchstabe A

| | |
|--------------|--|
| A | Fläche |
| A_{La} | Lachenfläche |
| A_{Lamax} | maximale Lachenfläche |
| A_{Ta} | Fläche der Auffangtasche |
| A_{Leck} | Leckquerschnitt |
| A_1 | Nach der ersten Minute brennende Fläche eines Feststoffbrandes |
| A_{Brand} | Brandfläche |
| A_{ges} | gesamte Brandfläche (Vollbrand) |
| A_v | Konstante für die näherungsweise Berechnung des Zusammenhangs zwischen dem Dampfdruck und der Temperatur |
| $AEGL$ | Abkürzung für Acute Exposure Guideline Level |
| a_{probit} | Stoffwert für probit function |

Buchstabe B

| | |
|----------------|--|
| B_{Leck} | Leckbreite |
| $B_{R,AEGL}$ | Referenzbelastung auf der Basis AEGL2- oder AEGL3-Werte |
| B_w | Belastung mit der konzentrationsabhängigen Wichtungsfunktion $w(C)$ |
| B_v | Konstante für die näherungsweise Berechnung des Zusammenhangs zwischen dem Dampfdruck und der Temperatur |
| b_{probit} | Stoffwert für probit function |
| $b_{fak,AEGL}$ | Belastungsfaktor auf der Basis AEGL-Werte |
| b_w | Belastungsfaktor auf der Basis Wichtungsfunktion |
| bar | Dimension Druck (1 bar = 10^5 Pascal) |

Buchstabe C

| | |
|-------------|--|
| $^{\circ}C$ | Dimension der Temperatur ϑ auf der Celsiusskala |
| C | Konzentration |
| C_{stoch} | stöchiometrische Konzentration in Gasen (Konzentration zwischen den Explosionsgrenzen, Luftsauerstoff reicht gerade zur vollständigen Verbrennung) |
| C_{Was0} | Konzentration an der Einleitungsstelle bei vollständiger Vermischung |
| C_{sp} | zeitabhängiges Konzentrationsfeld der dichteneutralen Ausbreitung bei spontaner Freisetzung |
| C_{st} | zeitabhängiges Konzentrationsfeld der dichteneutralen Ausbreitung bei stationärer Freisetzung |
| C_{EB} | Eingreifwerte, auf die Masse an Trockensubstanz des Bodens bezogen |
| C_{EG} | Eingreifwerte, auf das Grundwasservolumen bezogen |

| | |
|-------------|--|
| C_G | Konzentration im zufließenden Wasser |
| C_R | Referenzwerte für Gefahrstoffkonzentrationen in der Atemluft |
| C_S | Schwellenkonzentration für Gefahrstoffkonzentrationen in der Atemluft |
| C_i | Innenraumkonzentration |
| \dot{C}_i | Zeitliche Ableitung der Innenraumkonzentration |
| C_a | Konzentration außerhalb des Raumes |
| C_d | Ausflußziffer (discharge coefficient) |
| c_p | spezifischen Wärme bei konstantem Druck |
| c_v | spezifischen Wärme bei konstantem Volumen |
| c_{pb} | spezifische Wärme der Flüssigphase bei Siedetemperatur und Normaldruck |
| c_{F10} | spezifische Wärme c_p der Flüssigphase bei der Anfangstemperatur ϑ_0 |
| cm | Dimension der Länge, Zentimeter |

Buchstabe D

| | |
|------------|--|
| D_{Leck} | Leckdurchmesser |
| D_i | Innendurchmesser des zylindrischen Mantels |
| D_{Frag} | Durchmesser des Fragmentes |
| DN | Nenndurchmesser von Rohren in mm, lichte Weite |
| D_R | Referenzdosis für Gefahrstoffkonzentrationen in der Atemluft |
| d | Partikeldurchmesser |
| d_{fire} | Durchmesser des Feuerballs bei Explosionen |
| d_{fak} | Dosisfaktor, Verhältnis der auftretenden Dosis zur Referenzdosis |

Buchstabe E

| | |
|------|--|
| ERPG | Abkürzung für Emergency Response Planning Guidelines |
|------|--|

Buchstabe F

| | |
|-----|-----------------------------|
| F | Reibungsfaktor |
| f | Reibungsfaktor nach Fanning |

Buchstabe G

| | |
|-----|---|
| g | Erdbeschleunigung: $9,81 \text{ m/s}^2$ |
| g | Dimension der Masse, Gramm |

Buchstabe H

| | |
|----------|---|
| H | Höhe der Quelle über dem Boden |
| H_{Fl} | Höhe der Flüssigkeitssäule über der Öffnung |
| h_{vb} | spezifische Verdampfungswärme am Siedepunkt bei Normaldruck |
| h_c | massenspezifische Verbrennungswärme eines Stoffes |
| h_d | Dicke des Rezeptorstahlbleches |
| h_{zm} | Wanddicke des zylindrische Mantels |
| h | Dimension Zeit, hour, Stunde |

Buchstabe I

| | |
|------|---|
| i | Zählvariable |
| IDLH | Abkürzung für Immidiately Dangerous to Life or Health |

Buchstabe J

| | |
|---|--------------|
| j | Zählvariable |
|---|--------------|

Buchstabe K

| | |
|-----------------------|---|
| K | Dimension der Temperatur T, absolute Temperaturskala, Kelvin |
| K_R | Mittlere Höhe der Erhebungen infolge der Rauhigkeit der Innenwand des Rohrabschnittes |
| k | normierte Entfernung zur Ladung, k-Faktor |
| k_{verdampf} | Konstante bei der Verdampfung verflüssigten Gases |
| kg | Dimension der Masse, Kilogramm |
| kJ | Dimension der Wärmemenge, Kilojoule |

Buchstabe L

| | |
|-------------------|-------------------------------------|
| l | Lachentiefe |
| l_{\min} | minimale Lachentiefe |
| l_{\max} | maximale Lachentiefe |
| L_{eck} | Lecklänge |
| L_{Dro} | Drossellänge |
| L_u | Ungleichgewichtsfaktor |
| L_{Rohr} | Länge eines Rohrleitungsabschnittes |
| L_0 | charakteristische Explosionlänge |

Buchstabe M

| | |
|------------------------|--|
| m | Masse |
| m_{mix} | Gemischmasse |
| m_{ges} | aus einem Behälter freigesetzte Gesamtmasse an druckverflüssigtem Gas |
| m_{Gas} | im Behälter vorhandene Masse an Gas |
| m_{Beh} | im Behälter noch vorhandene Masse |
| m_{flash} | Spontan verdampfender Anteil bei der Freisetzung von druckverflüssigtem Gas |
| m_{Fl} | Masse an Flüssigkeit im Behälter |
| m_1 | verbrannte Masse nach der ersten Minute |
| m_{gesBrand} | Masse des gesamten Brandgutes |
| m_{ExSpr} | Sprengstoffmasse |
| m_{BLEVE} | Masse des explodierenden Flüssiggases |
| $m_{\text{Exfreejet}}$ | Gasmenge im Bereich explosionsfähiger Atmosphäre |
| m_{ExUVCE} | Gas- oder Dampfmenge im Bereich explosionsfähiger Atmosphäre |
| m_{Brandges} | Zum Zeitpunkt der vollen Entwicklung des Feststoffbrandes verbrannte Menge an Brandgut |
| m_{spontan} | gesamte freigesetzte Masse bei spontaner Freisetzung |
| m_w | größte explosionsfähige Gas- oder Dampfmenge in der Schwergaswolke |
| m_{puff} | spontan freigesetzte Masse bei dichteneutraler Ausbreitung |
| m_{TNT} | Sprengstoffmasse als TNT-Äquivalent |
| m_{Met} | Metallmasse des zylindrische Mantels |
| m_{spr} | Masse des größten Sprengstückes |
| m_{zul} | Zulässige Sprengstückmasse |
| m_{Zyl} | Masse des zylindrischen Stahlteiles |

| | |
|-----------------------|--|
| m_{Frag} | Masse des Fragmentes |
| \dot{m} | Massenstrom, Masse pro Zeiteinheit, $\frac{dm}{dt}$ |
| \dot{m}_{stoff} | Teilmassenstrom eines einzelnen Stoffes bei einem Gasgemisch |
| \dot{m}_{ugr} | untere Grenze des Verdampfungsmassenstromes |
| \dot{m}_{ges} | gesamter Massenstrom bei der Freisetzung aus der Flüssigphase |
| \dot{m}_{La} | Anteil des Massenstromes, der sich bei der Freisetzung aus der Flüssigphase eines druckverflüssigten Gases in einer Lache sammelt |
| \dot{m}_{gas} | gesamter in die Luft freigesetzter Massenstrom |
| \dot{m}_{Fl} | Flüssigkeitsmassenstrom |
| $\dot{m}_{Fl,max}$ | maximaler Anteil des Massenstromes, der sich bei der Freisetzung aus der Flüssigphase eines druckverflüssigten Gases in einer Lache sammeln kann |
| \dot{m}_{ver} | Verdunstungsmassenstromes aus einer Lache |
| \dot{m}_{verTa} | Verdunstungsmassenstromes aus der Auffangtasse |
| \dot{m}_{Ab} | Abbrandrate, verbranntes Brandgut pro Zeiteinheit |
| $\dot{m}_{Brand,i}$ | Massenströme der einzelnen gasförmigen Gefahrstoffe im Brandgas |
| $\dot{m}_{Brand,j}$ | Massenströme der einzelnen nicht gasförmigen Gefahrstoffe im Brandgas |
| $\dot{m}_{stationär}$ | stationärer Massenstrom in die und aus der Schwergaswolke |
| \dot{m}_{Ein} | in Fließgewässer eingeleiteter Gefahrstoffmassenstrom |
| \dot{m}_{ugr} | untere Grenze des Verdampfungsmassenstromes |
| \dot{m}'' | flächenspezifischer Massenstrom, $\frac{dm}{dA}$ |
| \dot{m}_{ver}'' | flächenspezifischer Verdunstungsmassenstrom |
| \dot{m}_{Brand}'' | flächenspezifische Abbrandrate beim Feststoffbrand |
| m_B'' | Vergleichswert für die flächenspezifische Bodenbelastung |
| m_{Boden}'' | flächenspezifische Bodenbelastung |
| M_{mol} | Molmasse |
| $M_{mol,stoff}$ | Molmasse eines im Gemisch enthaltenen Gefahrstoffes |
| $M_{mol,mix}$ | Mittlere Molmasse eines Gasgemisches |
| $M_{Brand,i}$ | Molmasse des i-ten gasförmigen Gefahrstoffes im Brandgas |
| M_{Brand} | mittlere Molmasse des Brandgases |
| M_A | Parameter Splitterverteilung |
| m | Dimension der Länge, Meter |
| mm | Dimension der Länge, Millimeter |
| min | Dimension der Zeit, Minute |
| ml | Dimension Volumen, Milliliter |
| mg | Dimension Masse, Milligramm |

| | |
|-----|--|
| mol | Dimension der Stoffmenge Mol (DIN 1301 Teil 1), Menge, die aus einer bestimmten Anzahl von genau angegebenen Teilchen besteht, $(6,02205 \cdot 10^{23})$ |
| MJ | Dimension der Wärmemenge, Megajoule, 10^6 Joule, $(1 \text{ J} = 1 \text{ Ws})$ |
| MW | Dimension der Wärmeleistung, Megawatt, $1 \text{ MW} = 10^6 \text{ Watt}$, |

Buchstabe N

| | |
|----------------------|--|
| N | Faktor zur Beschreibung der zeitlichen Entwicklung der Abbrandrate |
| n | Exponent der Konzentration für Belastungsmodelle |
| $n_{\text{Brand},j}$ | Massenanteil des j-ten nicht gasförmigen Gefahrstoffes im Brandgas |
| n_{Luft} | Luftwechselrate in Räumen |

Buchstabe O

| | |
|-----------------|--|
| O_{EG} | obere Explosionsgrenze, Stoffkonzentration in der Luft |
|-----------------|--|

Buchstabe P

| | |
|----------------------------|---|
| ppm | Dimension der Konzentration C, parts per million, 10^{-6} |
| p | Druck |
| p_0 | Anfangsdruck |
| p_k | Kritischer Druck beim Ausströmen, bei dem der Massenstrom sein Maximum erreicht |
| $p_{\text{stoff},v}$ | Dampfdruck eines Einzelstoffes im Gasgemisch |
| p_v | Dampfdruck auf der Siedelinie |
| p_{v0} | Dampfdruck bei der Anfangstemperatur ϑ_0 |
| $p_{\bar{u}}$ | Überdruck |
| $p_{\bar{u} \text{max}}$ | maximaler Überdruck |
| p_{vor} | absoluter Vordruck im Behälter |
| p_i | Behälterinnendruck |
| p_{berst} | Berstdruck des Behälters/Raumes |
| p_N | Normaldruck (1,01325 bar) |
| P_{ges} | Gesamte Wärmeleistung |
| P_{Ex} | Wärmeleistung der Explosion |
| P_{BLEVE} | mittlere Explosionsleistung |
| P_{freejet} | mittlere Explosionsleistung |
| P_{Brand} | Brandleistung |
| P_{Str} | Leistung der Wärmestrahlung |
| P''_{Str} | flächenspezifische Wärmeleistung |
| $P''_{\text{Str,red}}$ | wegen der Flammenform reduzierte flächenspezifische Strahlungsleistung |
| $P''_{\text{Str,red,red}}$ | zusätzlich wegen der Verluste auf dem Weg durch die Atmosphäre reduzierte flächenspezifische Strahlungsleistung |
| $P''_{\infty,\text{zul}}$ | zulässige flächenspezifische Strahlungsleistung bei unbegrenzter Dauer |
| $P''_{\text{verk,zul}}$ | zulässige flächenspezifische Strahlungsleistung bei verkürzter Dauer |

Buchstabe R

| | |
|-------------------|--|
| \mathfrak{R} | allgemeine Gaskonstante |
| R | allgemeiner Abstand |
| R_{La} | Lachenradius |
| R_{Ta} | Tassenradius |
| R_{UEG} | Abstand zwischen der Quelle und der Linie am Boden, innerhalb der zündfähige Atmosphäre vorhanden ist. |
| R_{UVCE} | $R_{UVCE} = R_{UEG} + \Delta R_{fire}$, Gesamtabstand zur Quelle |
| R_{Det} | Abstand des Auftreffortes zum Detonationsort |
| R_W | Reichweite des zylindrischen Stahlteiles |
| \bar{R} | normierte Entfernung |
| $R_{symp- pate-}$ | Abstand zwischen Sprengstoffladungen, bis zu dem die Detonation symmetrisch übertragen werden kann |
| R_{Ladung} | Entfernung von der Ladung |
| R_{BLEVE} | Entfernung von der Behältermitte |
| r | Abstand zur Punktquelle bei der dichteneutralen Ausbreitung und bei der Wärmestrahlung |

Buchstabe S

| | |
|---|-------------------------------|
| s | Dimension der Zeit t, Sekunde |
|---|-------------------------------|

Buchstabe T

| | |
|----------------------|---|
| T | absolute Temperatur, $T = T_n \text{ K} + \vartheta$ |
| T_n | Normaltemperatur 273,15 K |
| t | Zeit |
| t_e | Freisetzungsdauer |
| t_{\max} | maximale Freisetzungsdauer |
| t_{evermax} | maximale Verdunstungsdauer |
| t_{eFlmax} | maximale Auslaufdauer |
| t_{eBrand} | Branddauer |
| $t_{eBrandmax}$ | maximale Branddauer |
| t_{Lamax} | Zeitpunkt, wenn die Lachenfläche ihr Maximum erreicht |
| t_k | Zeit bis zu dem Zeitpunkt, wenn der Druck p_k erreicht wird |
| t_l | Schnittpunkt mit der Näherungsgeraden |
| t_{eFl} | Zeitdauer bis zur Beendigung der Flüssigkeitsfreisetzung |
| t_{Ta} | Zeitpunkt, bei dem der Tassenboden gerade vollständig benetzt ist |
| t_{fire} | Dauer des Feuerballs bei Explosionen |
| t_{ges} | Zeitpunkt, zu dem der Feststoffbrand voll entwickelt ist und die Gesamtfläche brennt |
| t_H | Zeit bis zur Halbierung der Konzentration |
| t_{xWas} | Zeit, in der die Strecke x_{Was} bei einer mittleren Fließgeschwindigkeit von zurückgelegt wird |
| u_F | |
| t_C | Dauer erhöhter Konzentration im Fließgewässer |
| t_{beginn} | Zeitpunkt des Beginns des Auftretens erhöhter Konzentration |
| t_{ende} | Zeitpunkt des Endes des Auftretens erhöhte Konzentration |

| | |
|-----------|--|
| t_R | Referenzdauer der Referenzwerte für Gefahrstoffkonzentrationen in der Atemluft |
| t_{1S} | Zeitpunkt des Überschreitens der Schwellenkonzentration |
| t_{2S} | Zeitpunkt des Unterschreitens der Schwellenkonzentration |
| t_{Str} | Dauer der Einwirkung der Wärmestrahlung |

Buchstabe U

| | |
|------------|---|
| U_{EG} | untere Explosionsgrenze, Stoffkonzentration in der Luft |
| u_S | Strömungsgeschwindigkeit der Flüssigkeit |
| u_a | Windgeschwindigkeit in 10 m Höhe über der Lache / dem Boden |
| u_H | Windgeschwindigkeit in Quellhöhe über dem Boden |
| u_{part} | Partikelsinkgeschwindigkeit |
| u_l | Lineare Abbrandgeschwindigkeit im explosionsgefährlichen Stoff |
| u_F | mittlere Fließgeschwindigkeit |
| u_n | Normalkomponente der Auf treffgeschwindigkeit |
| u' | Dimensionslose Vergleichsgeschwindigkeit |
| u_0 | Anfangsgeschwindigkeit |
| u_T | Auf treffgeschwindigkeit |
| u_{Zyl} | Geschwindigkeit des zylindrischen Stahlteiles |
| u_{Flam} | Geschwindigkeit der Flammenausbreitung bei Gaswolkenexplosionen im Freien |
| \bar{u} | normierte Geschwindigkeit |

Buchstabe V

| | |
|------------------|--|
| V | Volumen |
| V_n | Molvolumen idealer Gase bei 0 °C: 22,414 l |
| V_{mol} | Molvolumen |
| V_{La} | Flüssigkeitsvolumen in der Lache |
| V_{eFl} | Flüssigkeitsvolumen in der Lache bei t_{eFl} |
| V_{Fl} | Volumen an Flüssigphase oder Flüssigkeit im Behälter |
| V_B | Volumen des Behälters (nicht das Flüssigkeitsvolumen) |
| V_{Raum} | Volumen eines Raumes im Gebäude |
| V' | Volumen an heißen Schwaden pro kg Brandgut an explosionsgefährlichen Stoffen |
| V'_{Brand} | Brandgasvolumen beim Verbrennen von 1 kg Brandgut |
| \dot{V} | Volumenstrom, Volumenänderung pro Zeiteinheit $\frac{dV}{dt}$ |
| \dot{V}_{mix} | Gasgemischvolumenstrom |
| \dot{V}_{inLa} | Volumenstrom, der in die Lache fließt |
| \dot{V}_{La} | zeitliche Änderung des Lachenvolumens |
| \dot{V}_{ver} | Verdampfungsvolumenstrom an Flüssigphase |
| \dot{V}_{Fl} | Volumenstrom, Flüssigkeit |
| \ddot{V}_{Fl} | zeitliche Ableitung des Volumenstromes |
| \dot{V}_S | Schwadenvolumenstrom |

| | |
|--------------------------|--|
| \dot{V}_{Brand} | Brandgasvolumenstrom auf 0 °C umgerechnet |
| \dot{V}_{Was} | Wasserführung eines Fließgewässers am Einleitungsort |
| v_{stoff} | Prozentualer Volumenanteil eines im Gemisch enthaltenen Gefahrstoffes |
| $v_{\text{Brand},i}$ | Prozentualer Volumenanteil des i-ten im Brandgas enthaltenen Gefahrstoffes |

Buchstabe W

| | |
|-----------------|---|
| W_{Ex} | Explosionswärme |
| WGK | Wassergefährdungsklasse |
| W | Dimension der Leistung, Watt |
| $w(C)$ | konzentrationsabhängige Wichtungsfunktion |

Buchstabe X

| | |
|------------------|--|
| x | Koordinate in Windrichtung |
| x_A | Abstand des Aufpunktes zur Punktquelle in Windrichtung |
| x_{Was} | Entfernung flußabwärts |

Buchstabe Y

| | |
|---------------------|--|
| y | Koordinate quer zur Windrichtung |
| y_A | Abstand des Aufpunktes zur Punktquelle quer zur Windrichtung |
| y_{probit} | Rechenwert für probit function |

Buchstabe Z

| | |
|-------|-----------------------------------|
| z | Koordinate in vertikaler Richtung |
| z_A | Abstand des Aufpunktes zum Boden |

21 Griechische Formelzeichen**Buchstabe α Alpha**

| | |
|------------------------|--|
| α | Abkürzung |
| α | thermischer Ausdehnungskoeffizient |
| α_{soil} | Koeffizient für die Wärmeleitung im Boden für die Wärmeleitungsgleichung |

Buchstabe β Beta

| | |
|---------|-----------|
| β | Abkürzung |
|---------|-----------|

Buchstabe γ Gamma

| | |
|----------|-----------|
| γ | Abkürzung |
|----------|-----------|

Buchstabe Δ, δ Delta

| | |
|-------------------------|--|
| ΔR | Abstand von der Zündentfernung (untere Explosionsgrenze) |
| Δp | Spitzenüberdruck bei der Explosion, Druckdifferenz |
| Δp_{pol} | Überdruck des Druckpolsters beim Auslaufen von Flüssigkeit |

| | |
|--------------|--|
| Δt | kurzer Zeitabschnitt |
| Δh_0 | Höhendifferenz zwischen Leck und Flüssigkeitsspiegel |
| ΔV_0 | Auslaufvolumen entsprechend der Höhendifferenz |

Buchstabe ζ Zeta

| | |
|---------|--|
| ζ | Faktor zur Berücksichtigung der Form der strahlenden Flammen und von der Höhe der bestrahlten Fläche |
|---------|--|

Buchstabe η Eta

| | |
|---------------------|---|
| η | Vervielfachung der Wasserführung |
| η | Funktion der Flammengeschwindigkeit |
| η | Anteil des im Boden befindlichen Gefahrstoffes, der ins Grundwasser gelangt |
| η_{Str} | Anteil der Wärmestrahlung |

Buchstabe ϑ, ϑ Theta

| | |
|---------------------------|---|
| ϑ | Temperatur der Celsiusskala, $\vartheta = T - 273,15 \text{ K}$ |
| ϑ_b | Siedetemperatur bei Normaldruck von 1,01325 bar |
| ϑ_{Raum} | Raumtemperatur |
| ϑ_0 | Anfangstemperatur, Freisetzungstemperatur |
| ϑ_u | Temperatur der Umgebungsluft |
| ϑ_{mix} | Freisetzungstemperatur des Gemischs |
| ϑ_{La} | Temperatur der Flüssigkeit an der Lachenoberfläche |
| ϑ_{Fl} | Flüssigkeitstemperatur |
| θ | Abkürzung |

Buchstabe κ Kappa

| | |
|----------|--------------------|
| κ | Isentropenexponent |
| κ | Kompressibilität |

Buchstabe λ Lambda

| | |
|-------------------------|---|
| λ | Verhältnis Länge zu Durchmesser des Stahlteiles |
| λ_{soil} | Wärmeleitfähigkeit des Bodens |

Buchstabe μ My

| | |
|---------|--|
| μg | Dimension Masse, Mikrogramm, 10^{-6} g |
|---------|--|

Buchstabe ν Ny

| | |
|-------------------|---|
| ν_{fg} | Differenz der spezifischen Volumina der Gas- und Flüssigphase |
|-------------------|---|

Buchstabe π Pi

| | |
|-------|--|
| π | Zahl, Verhältnis von Umfang zum Durchmesser beim Kreis |
|-------|--|

Buchstabe ρ Rho ρ Dichte**Buchstabe σ Sigma** σ Streuung der Normalverteilung**Buchstabe τ Tau** τ Abkürzung τ Zeitkonstante τ Alter des Puffs τ_a Faktor, der die Reduzierung der Wärmestrahlung in der Atmosphäre berücksichtigt, atmospheric transmissivity**Buchstabe ϕ Phi** ϕ Winkel zwischen Flugbahn und der Normalen der Auftrefffläche**Buchstabe χ Chi** χ_{La} wirklicher Lachenanteil unterhalb des maximalen Anteils χ_0 Füllungsgrad mit Flüssigphase vor dem Auftreten des Lecks**Buchstabe Ω, ω Omega** ω Abkürzung