

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	Mindestlachtiefen	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	Flammgeschwindigkeit 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:

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

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:

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

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	$0,21 \cdot 10^{-3} / \text{K}$	$4,90 \cdot 10^{-5} / \text{bar}$	$18,07 \text{ cm}^3/\text{mol}$	4,18	4,15
Benzol: 78 g/mol	$1,24 \cdot 10^{-3} / \text{K}$	$9,09 \cdot 10^{-5} / \text{bar}$	$88,87 \text{ cm}^3/\text{mol}$	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:

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

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:

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

Die Molmasse M_{mol} ist in g/mol und die Temperatur ϑ_0 ist in $^{\circ}\text{C}$ einzugeben. Es wird mit dem Molvolumen des idealen Gases bei 0°C von $22,4 \text{ l}$ 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 $p_N = 1,01325 \text{ bar}$.

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.

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

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
Flammgeschwindigkeit	$u_{\text{Flam}} = 0 \text{ m/s}$	$u_{\text{Flam}} = 40 \text{ m/s}$	$u_{\text{Flam}} = 80 \text{ m/s}$	$u_{\text{Flam}} = 160 \text{ m/s}$
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**:
$$u_f = 40 \cdot \sqrt[6]{\frac{h_c \cdot m_{\text{Ex}}}{800}} \quad \text{in m/s} \quad (5)$$

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

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 $h_c m_{\text{Ex}}$ 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 $\Delta p_{\max} = 0,5 \text{ bar}$ 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):

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

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 Behälterinnendrüken 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.

Spitzenbegrenzungskategorie = 4: $C_R = 4 \cdot C_S$

Spitzenbegrenzungskategorie = 1: $C_R = 2 \cdot C_S$

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 vorgehen:

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.

Überwiegend zugeordnete Spitzenbegrenzungskategorie = 4: $C_{gR} = 4 \cdot C_{gS}$

Überwiegend zugeordnete Spitzenbegrenzungskategorie = 1: $C_{gR} = 2 \cdot C_{gS}$

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:

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

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

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:

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

Daraus folgt:

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

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.

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

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

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

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

Die maximale Auslaufdauer wird deshalb:

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

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

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

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

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

$$V_{\text{Fl}} = \dot{V}_{\text{Fl}0} \cdot t - k \cdot \frac{t^2}{2} \quad (16)$$

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 $t = t_{\text{eFl}}$ beendet werden. Es muß gelten:

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

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

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

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

Generell gilt wegen der konstanten Lachentiefe:

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

Der verdunstende Flüssigkeitsvolumenstrom ist:

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

Es muß gelten (vgl. auch Abschnitt 17):

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

$$\dot{A}_{\text{La}} + \frac{1}{\tau} \cdot A_{\text{La}} = \frac{\dot{V}_{\text{Fl}0} - k \cdot t}{l_{\text{min}}} \quad \text{mit} \quad \tau = \frac{\rho_{\text{Fl}} \cdot l_{\text{min}}}{\dot{m}''} \quad (6)$$

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

$$A_{\text{La}} = \frac{k \cdot \tau^2}{l_{\text{min}}} \cdot \left\{ \left(\frac{\dot{V}_{\text{Fl}0}}{\tau \cdot k} + 1 \right) \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right) - \frac{t}{\tau} \right\} \quad (7)$$

Die Gleichung (7) gilt bei der unbegrenzten Lache ohne das Eingreifen zur Abdichtung des Lecks solange bis die Lachenfläche ihr Maximum bei $t_{\max Lach}$ 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:

$$\frac{dA_{La}}{dt} = 0 = \left(\frac{\dot{V}_{F10}}{\tau \cdot k} + 1 \right) \cdot e^{-\frac{t_{La \max}}{\tau}} - 1 \quad (8)$$

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

$$t_{La \max} = \tau \cdot \ln \left(1 + \frac{\dot{V}_{F10}}{\tau \cdot k} \right), \quad \text{falls } t_{eFl} \geq t_{La \max} \quad (9)$$

Die maximale Lachengröße ist dann:

$$A_{La \max} = \frac{k \cdot \tau^2}{l_{\min}} \cdot \left\{ \frac{\dot{V}_{F10}}{\tau \cdot k} - \ln \left(1 + \frac{\dot{V}_{F10}}{\tau \cdot k} \right) \right\}, \quad \text{falls } t_{eFl} \geq t_{La \max} \quad (10)$$

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

$$A_{La \max} = \frac{k \cdot \tau^2}{l_{\min}} \cdot \left\{ \left(\frac{\dot{V}_{F10}}{\tau \cdot k} + 1 \right) \cdot \left(1 - e^{-\frac{t_{eFl}}{\tau}} \right) - \frac{t_{eFl}}{\tau} \right\} \quad \text{mit } t_{eFl} < t_{La \max} \quad (11)$$

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 Lachtiefe bleibt gleich der minimalen Lachtiefe, 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 Lachtiefe $l > l_{\min}$. 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 $t_{Fl \max}$ nicht überschreiten (vgl. Abschnitt 18).

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

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

20 Lateinische Formelzeichen

Buchstabe A

A	Fläche
A_{La}	Lachenfläche
A_{Lamax}	maximale Lachenfläche
A_{Ta}	Fläche der Auffangtasse
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 Zusammenhanges zwischen dem Dampfdruck und der Temperatur
AEGL	Abkürzung für Acute Exposure Guideline Level
a_{probit}	Stoffwert für probit function

Buchstabe B

B_{Leck}	Leckbreite
$B_{\text{R,AEGL}}$	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 Zusammenhanges zwischen dem Dampfdruck und der Temperatur
b_{probit}	Stoffwert für probit function
$b_{\text{fak,AEGL}}$	Belastungsfaktor auf der Basis AEGL-Werte
b_w	Belastungsfaktor auf der Basis Wichtungsfunktion
bar	Dimension Druck (1 bar = 10^5 Pascal)

Buchstabe C

$^{\circ}\text{C}$	Dimension der Temperatur ϑ auf der Celsiusskala
C	Konzentration
$C_{\text{stöch}}$	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_{Fl0}	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 zylindrischen Mantels
h	Dimension Zeit, hour, Stunde

Buchstabe I

i	Zählvariable
IDLH	Abkürzung für Immediately 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 Rauigkeit der Innenwand des Rohrabchnittes
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 Explosionslänge

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 zylindrischen 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
$\dot{m}_{\text{Fl,max}}$	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
$\dot{m}_{\text{Brand,i}}$	Massenströme der einzelnen gasförmigen Gefahrstoffe im Brandgas
$\dot{m}_{\text{Brand,j}}$	Massenströme der einzelnen nicht gasförmigen Gefahrstoffe im Brandgas
$\dot{m}_{\text{stationär}}$	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
$M_{\text{mol,stoff}}$	Molmasse eines im Gemisch enthaltenen Gefahrstoffes
$M_{\text{mol,mix}}$	Mittlere Molmasse eines Gasgemisches
$M_{\text{Brand,i}}$	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, $1 \text{ MW} = 10^6$ 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}	Abstand zwischen Sprengstoffladungen, bis zu dem die Detonation symptomatisch 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_{emax}	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 Auftreffgeschwindigkeit
u'	Dimensionslose Vergleichsgeschwindigkeit
u_0	Anfangsgeschwindigkeit
u_T	Auftreffgeschwindigkeit
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 ς Zeta

ς	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 Celsiuskala, $\vartheta = T - 273,15 \text{ K}$
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 v Ny

v_{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