

Abschätzung von Schadenfolgen als Grundlage für die Festlegung von Schutzmaßnahmen

Prof. Dr.-Ing. habil. S. Bussenius

Menschen und Sachwerte können nur bestimmte Belastungen ertragen. Sobald es nicht möglich ist, einen Störfall zuverlässig auszuschließen, müssen Vorkehrungen getroffen werden, um die Schadenfolgen zu beherrschen.

Im Folgenden sollen besonders die Schadenfolgen von Bränden, Explosionen und Zerknallen behandelt werden (siehe Tabelle 1).

Zunächst gilt es, bestimmte Grenzwerte den Betrachtungen zugrunde zu legen.

Aufgrund der Arbeiten von Glasstone [1], Schardin [2] und anderer [3] sowie eigener Untersuchungen ist es möglich, folgende Grenzwerte zu nennen (siehe Tabelle 2):

Sobald eine bestimmte Schwelle für die Wärmestromdichte \dot{q}_0 überschritten, ist die Frage der Zündung nur noch eine Frage der Zeit τ_s , innerhalb derer sich die für die Zündung erforderliche Oberflächentemperatur T_0 einstellt.

$$T_0 \geq 1,13 \cdot \dot{q}_0 \frac{\tau_s^{0,5}}{b}$$

$$b = \sqrt{c \cdot \rho \cdot \lambda}$$

$$\dot{q}_0 \leq \dot{q}_K$$

Aber auch beim Menschen kann die Wärmebelastung nach einer bestimmten Zeit τ zum Kollaps führen

$$\tau_h = \frac{4,1 \cdot 10^8}{T_L^{3,61}}$$

Unter dem Einfluß der Wärme verlieren alle Werkstoffe mehr oder minder ihre Tragfähigkeit, dadurch kann es zum Einsturz von Konstruktionen kommen (siehe Tabelle 3 Seite 65).

In ähnlicher Weise können Überdrücke Δp , die an einem Objekt im Ergebnis von Explosionen, Zerknallen oder Detonationen auftreten, Schädigungen verursachen. Aber auch hier muß ein Zeiteinfluß [4], der sich aus der Eigenschwingzeit der getroffenen Objekte ergibt, beachtet werden (siehe Tabelle 4 Seite 65).

Tabelle 1: Häufigkeit industrieller Havarien und die daran beteiligten Stoffe

Havariart	Anteil %	Anteil beteiligter Stoffe				
		Gase	Lösemittel	Stäube	Festst.	unbek.
Brand	11	11	17	9	60	3
Explosion	44	60	11	10	3	16
Zerknall	6	100				
Giftausbruch	33	70	16	5	5	4
Andere	6	2	1	2	80	15

Anteil mit Wirkung nach außen	
Brand	> 40
Explosion	≈ 70
Zerknall	≈ 100
Giftausbruch	≈ 100
Andere	unbek.

* Aus Erhebungen der TU Magdeburg mit Organen der Zivilverteidigung der ehemaligen DDR. Die Tabelle zeigt, daß der größte Teil der Wirkungen der jeweiligen Havarie über das betroffene Objekt (Gebäude, Behälter, Anlage) hinausging. Aus diesem Grunde schreibt die Störfallordnung vor, Schutzmaßnahmen in die Sicherheitsanalysen mit einzubeziehen und bei der Feststellung des Restrisikos mit zu bewerten

Tabelle 2: Kritische Wärmestromdichten von Feststoffen

Material	Zeit min	Wärmestromdichte \dot{q}_K		Wärmedichte kJ.m^{-2}
		Fremdzündung kJ.m.s^{-1}	Eigenzündung	
Holzfaserplatte	15	11	24	800
helles Holz	15	15	13	344
dunkles Holz	12	2	20	320
Papier	0	8	9	100
Baumwolle grün	0	8	10	250
Kunstfaser	0	7	9	150
Styropor	0	3	3,7	120
Organische Substanzen	1	> 37		
Platzen von Fensterscheiben	10	> 5		

1. Brandereignisse

Wärmeabgabe aus Flammen:
Der Wärmestrom aus Flammen beträgt

$$\dot{Q}_s = (\alpha_K + \alpha_s) \cdot A_{Fl} \cdot (T_{Fl} - T_U)$$

Er setzt sich aus einem konvektivem und einem radiativen Anteil zusammen.
Konvektive Wärmeübergangszahl:

$$\alpha_K = 1,17 \cdot 10^{-3} [4 + 0,3 \cdot 10^{-2} \cdot T_{Fl}] \cdot$$

$$\frac{W_L^{0,61}}{d_{Fl}^{0,31}}$$

Radiative Wärmeübergangszahl:

$$\alpha_s = \frac{2 \cdot 10^{-11}}{T_{Fl} - T_u} \cdot [T_{Fl}^4 - T_u^4]$$

Es sind besonders die Flammentemperatur T_{Fl} und die Flammenfläche A_{Fl} , welche die Abstrahlungsleistung bestimmen. Ein Objekt im Abstand x von der Flammenachse mit einer bestrahlten Oberfläche A_0 erhält den Wärmestrom

$$\dot{Q}_{sx} = \frac{C_{Fl} \cdot C_0 \cdot A_{Fl} \cdot A_0}{65,24 \cdot 10^8 \cdot x^2} [T_{Fl}^4 - T_0^4]$$

Institutsleiter
Prof. Dr.-Ing. habil. S. Bussenius
Technische Universität
„Otto von Guericke“
INSTITUT FÜR
SICHERHEITSTECHNIK,
Magdeburg

In Flammen und Lichtbögen entstehen durch die Wärmereaktionen Wärmestromdichten von

$$2 < \dot{q} < 200 \text{ kJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-2},$$

davon werden etwa 40 % abgestrahlt. Vereinfacht kann man die Wärmestromdichte im Abstand x von der Flammenachse ermitteln mit Hilfe von

$$\dot{q}_x = 0,15 \cdot \varepsilon \cdot \dot{q} \left(\frac{d_{\text{Fl}}}{x} \right)^2.$$

Zunächst dürfte beim Vergleich zwischen den Wärmestromdichten aus Flammen und Lichtbögen mit den kritischen Wärmestromdichten aus Tabelle 2 einleuchtend sein, daß jede Berührung eines brennbaren Stoffes mit einer Flamme zur Zündung führen wird; es dürfte aber auch einleuchtend sein, daß die zu erwartende Strahlungsleistung der Flamme einen generellen Schutzabstand x erforderlich macht. Mit welcher Beziehung man auch immer den benötigten Schutzabstand x berechnen will, benötigt werden in jedem Falle die Maße der Flammenfläche und entweder die Flammentemperatur T_{Fl} oder die Wärmestromdichte \dot{q} . Die Strahlungsabsorptionszahl ε ist abhängig von den Absorptionszahlen von Flamme, Wand und Körper.

$$\varepsilon = \frac{1}{\frac{\varepsilon_{\text{Fl}}}{\varepsilon_w} + \frac{1}{\varepsilon_s}} \approx 0,5;$$

bei Gasflammen $\varepsilon \approx 0,05 \sqrt{M_G}$ (siehe Tabelle 5).

Feststoffbrände

Wärmestromdichte etwa $\dot{q} = \varepsilon \cdot 5,7 \cdot 10^{-11} [T_{\text{Fl}}^4 - T_u^4]$ (siehe Tabelle 6).

Anzunehmender äquivalenter Durchmesser der Flamme

$$d_{\text{ä}} \approx \frac{2 \cdot a \cdot b}{a + b}$$

also aus Kantenmaßen a, b der Brandstelle zu ermitteln.

Sofern man die Abbrandgeschwindigkeit des Feststoffes V_a kennt, kann man eine genauere Formel verwenden:

$$\frac{l_{\text{Fl}}}{d_{\text{ä}}} \approx 56 \cdot \frac{\dot{m}_s}{\rho_L \cdot W_L} \left[\frac{W_L^2}{g \cdot d_{\text{ä}}} \right]^{0,13}$$

$$\approx 0,01 \dots 100$$

bei Windeinfluß

$$\dot{m}_s = V_a \cdot A_{\text{Fl}} \cdot \rho;$$

$$A_{\text{Fl}} = 0,89 \cdot l_{\text{Fl}} \cdot d_{\text{ä}} \text{ bzw. } d_{\text{ä}} \approx 0,5 \cdot d_{\text{Fl}}$$

$$\dot{q} = \text{Hu} \cdot V_a \cdot \rho (1 - \eta)$$

$$\text{Abbrandverlust } \eta \approx 0,25 \dots 0,65$$

Flüssigkeitsbrände

(keine Tankbrände)

Tabelle 3: Festigkeitsabfall von Stählen in %

	20 °C	200 °C	400 °C	500 °C	600 °C
Normalstahl	0	10-20	≥ 40	100	
niedrig legierte Stähle	0	≤ 10	≤ 30	≤ 45	
Austenite	0	≈ 0	≤ 10	≤ 30	

Tabelle 4: Wirkungen von Spitzenüberdrücken auf Gebäude und Anlagen

Spitzenüberdruck Δp kPa	Impuls kPa ms	Wirkung
< 3	< 1	ungefährlich
3 ... 5	10 ... 80	leichte Beschädigungen an Holz- und mehrgeschossigen Steinhäusern
5 ... 10	100	leichte Beschädigungen an Dächern, Metall- und Stahlbetonbauten, Holzbrücken
10 ... 30	100	mittlere Zerstörungen an Ziegelbauten, Metallbauten, Holzbrücken
40 ... 80	10 ³	Totalzerstörungen von Industriebauten, Rohrbrücken usw. sind zu erwarten
> 70		Tötung von Menschen möglich
100 ... 200		Überlandleitungen, Betonbrücken, Umspannwerke werden zerstört
> 1000		Erdkabel, Erdleitungen usw. können zerstört werden.

Tabelle 5: Flammentemperaturen

Stoff	Flammentemperatur in Luft K	in Sauerstoff K
Ethin	2 173	3 473
Wasserstoff	2 273	3 273
Flüssiggas/Propan	2 190	3 023
Alkohole	1 180	—
Treibstoffe	1 200 ... 1 400	—
Feststoffbrände	1 200 ... 1 600 (Metalle)	—
Schwefel	2 000	—

Tabelle 6: Wärmestromdichten von Feststoffbränden

Material	Lagerungsdichte ρ kg·m ⁻³	T_{Fl} K	\dot{q} kJ·m ⁻² ·s ⁻¹		
			$\varepsilon = 0,6$	0,8	0,95
Baumwolle	50	600	6	5	4
Papier	25	680	10	8	6
Kiefernholz	100	1 270	150	120	90
Plexiglas	25	1 380	210	170	120
Braunkohlen/Briketts	600	1 470	270	220	160
Polystyren	25	1 370	200	160	120
Polystyren	50	1 620	390	310	240
Schnittholz		1 500	≈ 250		
Gummi		1 400	≈ 200		

$$\frac{l_{\text{Fl}}}{d_{\text{ä}}} \approx 42 \cdot \left[\frac{\dot{m}_s}{\rho_L \sqrt{g \cdot d_{\text{ä}}}} \right]^{0,61}$$

für $W_L < 5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ andernfalls $\frac{l_{\text{Fl}}}{d_{\text{ä}}}$ wie

$$\text{bei Feststoffbrand ermitteln}$$

$$\frac{l_{\text{Fl}}}{d_{\text{ä}}} \approx 1,5 \dots 20 \quad \frac{A_{\text{Fl}}}{A_L} \approx 4,13$$

$$\dot{m}_{\text{sq}} = \frac{2,33 \cdot 10^{-11} \cdot T_{\text{Fl}}^4}{1 - \exp(-6 d_{\text{ä}})} \cdot \Gamma_v$$

$$\dot{q} = 0,785 \cdot \text{Hu} \cdot \dot{m}_s \text{ oder}$$

$$\dot{q} = 5,79 \cdot 10^{-11} \cdot T_{\text{Fl}}^4$$

Der äquivalente Durchmesser ist aus dem Umfang der Flüssigkeitsfläche zu ermitteln.

$$\frac{d_{\text{Fl}}}{d_{\text{ä}}} = \frac{\left[0,6 \cdot \exp\left(\frac{d_{\text{ä}}^2}{16 \cdot \delta_o^2}\right) - 1 \right]^{1,1}}{\left(\frac{0,19}{\delta_o}\right)^{1,1} \cdot d_{\text{ä}}} \approx 1,73$$

$$\delta_o = 0,26 \cdot d_{\text{ä}}^{1,12}$$

Tankbrände

Mit absinkendem Flüssigkeitsspiegel wirkt die Wärmerückstrahlung der Tankwände immer mehr verdampfungsfördernd. Die Flamme schießt über die Tankmündung hinaus, sobald das Tankdach zerstört ist /5/. Maximale Wärmeerzeugung der Flamme

$$\dot{q}_{\max} = 2,32 \cdot 10^{-11} \cdot T_{\text{Fl}}^4 \approx 10^3 \text{ kJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$$

davon an die Umgebung

$$\dot{q} = 0,41 \cdot \dot{q}_{\max} [1 - \exp(-0,181 \cdot d_T)]$$

$$\frac{l_{\text{Fl}}}{d_T} \approx \frac{\left[\exp\left(\frac{d_T^2}{16 \cdot \delta^2}\right) - 1 \right]^{\frac{1}{f}}}{\left(\frac{F}{\delta}\right)^{\frac{1}{f}} \cdot d_T} \approx 2 \dots 7$$

$$\begin{aligned} \delta &\approx 0,257 \cdot d_T^{1,12} \\ F &\approx 0,17 \cdot d_T^{0,03} \\ F &\approx 0,97 \end{aligned}$$

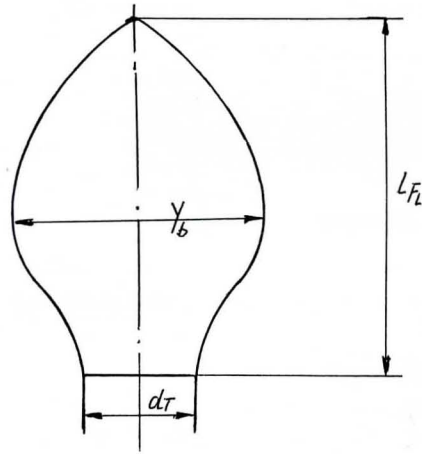


Abb. 1: Halsstruktur einer Tankflamme

$$\frac{y_b}{d_T} = \frac{0,86 \cdot \delta \cdot \exp\left(\frac{d_T^2}{16 \cdot \delta^2}\right)}{d_T}$$

Wärmeabgabe an Objekt im Abstand x von der Flammenachse

$$\dot{q}_x \approx 0,18 \cdot \dot{q} \left(\frac{y_b}{x}\right)^2$$

Flüssiggasbrände

Die Verhältnisse sind etwa ähnlich wie bei Tankbränden

$$\frac{l_{\text{Fl}}}{d_T} \approx \frac{\left[\exp\left(\frac{1}{16 \cdot p^2}\right) - 1 \right]^{\frac{1}{f}}}{\left(\frac{F}{p}\right)^{\frac{1}{f}}} \cdot d_T \cdot \frac{1}{f-1}$$

$$\frac{l_{\text{Fl}}}{d_T} \approx 1,73 + 0,33 \cdot d_T^{-1,43}$$

$$\frac{y_b}{d_T} = 1,73 \cdot p \cdot \exp\left(\frac{1}{16 p^2}\right)$$

wenn jedoch ein Brand über einer ausgelaufenen Flüssiggasmenge m_f entsteht:

$$d_L \triangleq d_T; \quad d_L \approx 4,48 \cdot m_f^{0,33}$$

Tabelle 7: Werte für p, abhängig von d_T

d_T m	1	10	100
p	0,22	0,33	0,37
$\frac{A_{\text{Fl}}}{A_T}$	1,0	0,9	0,8

$$0,17 < F < 0,47;$$

$$0,59 < f < 0,97$$

$$\dot{m}_{\text{sq}} = 1,5 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{Hu}{r_v} \cdot \rho$$

$$\dot{q} = 0,785 \cdot \dot{m}_s \cdot Hu$$

Tabelle 8: Ausdampfen von Flüssiggasen aus Bodenlachen $T_u - T_s \leq 70$ K

Zeit nach Austritt	200	600	1000	1400 s
\dot{m}_{sq} ohne Abdeckung	2,9	1,4	1,4	1,0
\dot{m}_{sq} mit Abdeckung durch Schaum	1,0	0,7	0,5	0,4

Gasbrände

$$\dot{q}_x = \frac{\varepsilon \cdot \dot{m}_s \cdot Hu}{4 \cdot \pi \cdot x^2} \approx 697 \cdot \frac{m_G^{0,661}}{x^2}$$

$$\varepsilon \approx 0,05 \sqrt{M_G}$$

$$\dot{m}_s = \frac{m_G}{\tau} \approx 3,11 \cdot m_G^{0,66}$$

$$\tau \approx 0,299 \cdot m_G^{0,33}$$

oder

$$\dot{q} = \varepsilon \cdot Hu_G$$

$$r_{\text{Fl}} = b \cdot m_G^{0,32} \quad 1,93 < b < 3,11$$

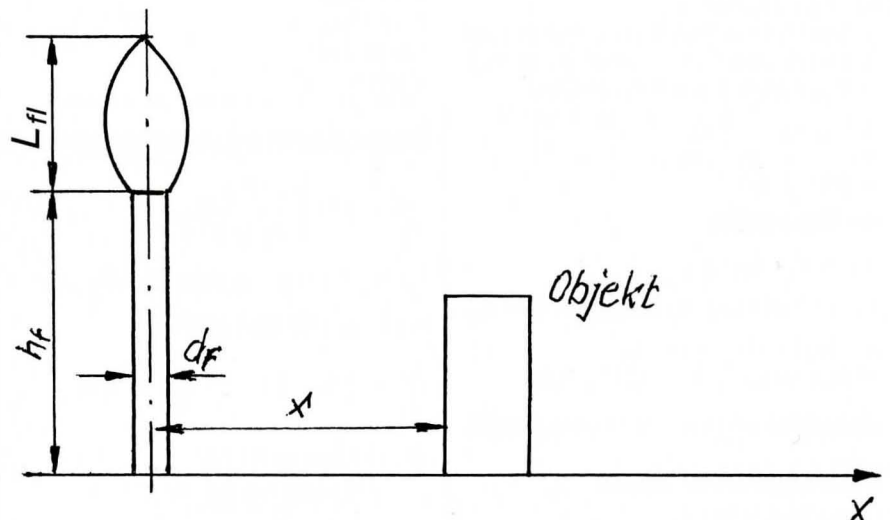
$$\dot{q}_x = 0,6 \cdot \varepsilon \cdot \dot{q} \cdot \left(\frac{r_{\text{Fl}}}{x}\right)^2$$

Wärmebelastung eines Objektes im Abstand x von einer Fackel

$$\dot{q}_x = \frac{\varepsilon \cdot \dot{m}_s \cdot Hu}{4 \cdot \pi [x^2 + h_F (h_F + b \cdot d_F)]}$$

$$b = \frac{l_{\text{Fl}}}{d_F} = 70 \dots 180 \approx 200$$

Abb. 2 (unten): Wärmewirkungen von Fackeln auf ihre Umgebung



Ökonomische Schäden bei Bränden

$$S = a \cdot \tau_m^c \quad 1,17 < c < 1,51 \approx 1,37$$

Tabelle 9: Schadenfaktor a

Brandobjekt	DM · min ⁻¹
1. Produktionsgebäude und -stätten zur Gewinnung, Herstellung und Bearbeitung verschiedener Produkte (z. B. feste Brennstoffe, Holz, Papier, Plaste, Elaste, Textilien, Gummi, chem. Erzeugnisse, Maschinen, Fahrzeuge, brennbare Flüssigkeiten u. a.)	5 531,-
2. Anlagen zur Gewinnung, Speicherung und Weiterleitung von Wärmeenergie, Wasser, Erdöl, Erd-, Stadtgas, Industriegas	200,-
3. Anlagen zur Gewinnung, Speicherung und Weiterleitung von Elektroenergie	525,-
4. Objekte des Bauwesens	257,-
5. Lager > 1 Mio. DM Lagergut zur Zeit des Brandes	4 432,-
6. Lager < 1 Mio. DM Lagergut zur Zeit des Brandes	1 188,-
7. Objekte der Land- und Nahrungsgüterwirtschaft	983,-
8. Objekte der Forstwirtschaft	117,-
9. Verkehrs- und Transportmittel	512,-
10. Bauten und Anlagen des Verkehrs	1 341,-
11. Handelseinrichtungen	544,-
12. Dienstleistungseinrichtungen und Gewerbe	153,-
13. Gebäude und Räume (Gesellschaftsbauten)	558,-
14. Wohnstätten	72,-

Hinzu kämen die Produktionsverluste, Verluste an Marktanteilen, die durch erhöhte Kosten (Werbung, Preisnachlässe usw.) wieder ausgeglichen werden müßten.

2. Zerknalle und Explosionen

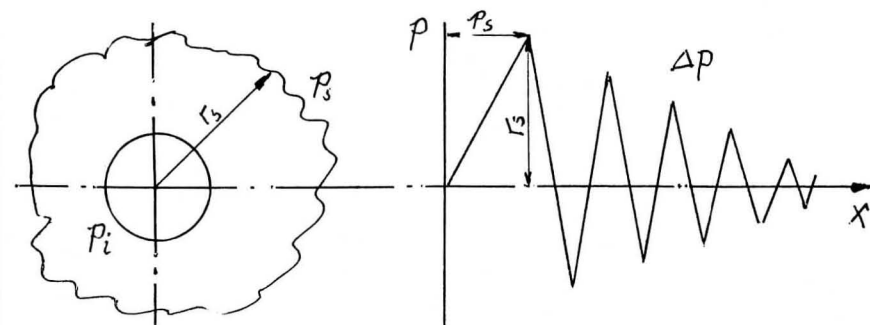
- Druckwirkungen bei Zerknallen gespeicherter Energie

$$E_0 = p_i \cdot V_B \left[\ln \frac{p_i}{p_u} - 1 + \frac{p_u}{p_i} \right]$$

Infolge der benötigten Aufreißarbeit und der Verzögerungen bei der Freisetzung werden nur 40...60% von E_0 freigesetzt, d. h., $E \approx 0,6 \cdot E_0$

Im Abstand von r_s um den Ort des Zerknalles baut sich eine Stoßfront auf mit dem Druck p_s .

Abb. 3: Stoßfront bei Behälterzerknallen



$$r_s = \left[\frac{E}{12 \cdot p_u} \right]^{0,33}$$

$$p_s = p_u \cdot \frac{2x_L - x_L - 1}{M^2} \cdot M^2$$

$$M = \frac{W_0}{W_s} \text{ Machzahl; } W_s = \sqrt{x_L \cdot R_L \cdot T_U}$$

Expansionsgeschwindigkeit des Druckgases

$$W_0 = \sqrt{\frac{2x_D}{x_D - 1} R_D \cdot T_i}$$

Spitzendruck auf Objekt im Abstand x vom Berstzentrum

$$\Delta p = p_u \left[\frac{7 \cdot q}{x^3} + \frac{2,7 \cdot q^{0,66}}{x^2} + \frac{0,84 \cdot q^{0,33}}{x} \right]$$

$$\text{mit } q = \frac{E}{4,3 \cdot 10^6}$$

- Druckwirkungen bei Explosionen

Die Schwierigkeiten bei der Abschätzung der Druckwirkungen ergeben sich aus zwei Tatbeständen

- der Anteil der reagierenden Masse ist mit rechnerischen Verfahren zwar zu ermitteln, entspricht aber nicht den Realitäten, d. h., er wird rechnerisch meist zu hoch eingeschätzt

- wie fremde und eigene Versuche zeigen, spielt der Radius r_w der Gemischwolke, neben der Gasart, eine große Rolle beim Aufbau des Spitzenüberdruckes Δp . [4]

$$\Delta p = a \cdot r_w^b$$

Die meisten Explosionsversuche wurden bisher mit Gasvolumen $< 1000 \text{ m}^3$ durchgeführt.

Von weiterem Einfluß sind noch

- die Art der Freisetzung und damit Bildung des Gemisches, wie z. B. langsame Bildung und Vermischung nach Austritt aus abgerissenen Rohrleitungen usw. oder schlagartige Freisetzung aus Flächen $> 1 \text{ m}^2$

- Umschließungszustand der reagierenden Gaswolken (siehe Tabelle 10 Seite 68)

- Vom Institut für Bergbausicherheit, Bereich Freiberg, wurde für Wolkenvolumina $< 600 \text{ m}^3$ folgende Formel angegeben, wofür auch von uns durchgeführte Vergleiche gute Übereinstimmung ergeben haben

$$\Delta p = 5,8 \frac{r^{1,7}}{x}$$

$$r = \left[\frac{V_R}{4,19} \right]^{0,33} \quad \text{mit } V_R = \frac{V_G}{C_{st}}$$

Für größere Wolkenvolumen ergaben unsere Untersuchungen, daß ein Ansatz nach dem Modellgesetz von Cranz und Hopkinson realistische Werte erwarten läßt.

Dimensionslose Entfernung

$$R = \frac{x \cdot p_u^{0,33}}{(C \cdot \text{Hu} \cdot m_G)^{0,33}}$$

(siehe Tabelle 11 Seite 68)

Es gibt noch eine Reihe anderer Formeln, teilweise basierend auf dem TNT-Äquivalent, schwierig bei allen ist die Bestimmung der Radien und der reagierenden Massen sowie die Berücksichtigung des Einflusses der Zündquelle.

- Druckwirkungen bei Detonationen [6]

$$\Delta p = 2,63 \cdot \frac{E^{0,56}}{x^a}$$

$$1,6 < a < 2,1 \approx 1,7$$

$$E = V_G \cdot Hu \cdot C$$

$$0,06 < C < 0,17$$

Zusammenfassung

Es ist möglich, bei Sicherheitsanalysen die Wirkungen von Bränden, Zerknallen und Explosionen abzuschätzen. Natürlich muß man sich dabei im klaren sein, daß man Ungenauigkeiten in Kauf nehmen muß. Die erzielten Ergebnisse sind zur Festlegung von Schutzmaßnahmen ausreichend.

Formelzeichen

a, b, c		Faktoren
a, b	m	Kantenmaße für Ermittlung $d_{\ddot{a}}$
A_{Fl}, A_O	m^2	Flammenfläche, bestrahlte Oberfläche
b	$kJ \cdot m^{-2} \cdot K^{-1} \cdot s^{-0,5}$	Wärmeeindringzahl des Materials
C, C_{st}	-	Konzentration, stöchiometrische Konzentration
C_{Fl}, C_O	$kJ \cdot m^{-2} \cdot s^{-1} \cdot K^{-4}$	Strahlungszahlen
c	$kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$	Wärmekapazität
d	m	Durchmesser
\ddot{a}		äquivalenter
Fl		Flamme
f		Fackel
T		Tank
E_O, E	I	Energie
F, f, p	-	meteorologische Parameter
g	$m \cdot s^{-2}$	Erdbeschleunigung
h_f	m	Höhe der Fackel
Hu	$kJ \cdot kg^{-1}$	unterer Heizwert
Hu_G	$kJ \cdot m^{-3}$	Feststoff, Flüssigkeit unterer Heizwert Gas
L	$m^3 \cdot m^{-3}$	Luftbedarf zur Verbrennung
l_{Fl}	m	Länge der Flamme
M	-	Machzahl
M_G	$kg \cdot kmol^{-1}$	Molzahl des Gases
m_f, m_G	kg	Masse
\dot{m}_s	$kg \cdot s^{-1}$	Massenstrom
\dot{m}_{sq}	$kg \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$	auf Fläche bezogener Massenstrom
P_i, P_u, P_s	Pa	Innen- bzw. Umgebungsdruck, Stoßdruck
Δp	Pa, kPa	Spitzenüberdruck
Q_{sx}	$kJ \cdot s^{-1}$	Wärmestrom
q, \dot{q}_x	$kJ \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$	Wärmestromdichte
q	$kJ \cdot m^{-2}$	Wärmedichte
R_L, R_D	$m^2 \cdot s^{-2} \cdot K^{-1}$	Gaskonstante Luft, Gas
r_v	$kJ \cdot kg^{-1}$	Verdampfungswärme
r_{Fl}	m	Flammenradius
S	DM	Schaden

Tabelle 10: Wirkungen deflagrierender Gaswolken

Umschließungszustand	Volumen m^3	w $m \cdot s^{-1}$	Δp kPa
frei Propan	800	11	1
frei Wasserstoff	800	15	2
teilweise umschlossen H_2	1 500	60	6
im Anlagenbereich H_2	2 000	150	20

Tabelle 11: Spitzenüberdruckverhältnis $\frac{\Delta p}{P_u}$ als Funktion der dimensionslosen Entfernung R

R	0,2	0,5	1,0	2,0	5,00	10,00	20,00
$\frac{\Delta p}{P_u}$	2,0	1,0	0,5	0,2	0,05	0,02	0,01

mit $C = b \cdot C_{st}$ und $C_{st} = \frac{1}{1+L}$; $0,23 < b < 0,41$

$T_i, T_L, T_u, T_o, T_{Fl}$	K	Innen-, Luft-, Umgebungs-, Flammen-, Oberflächentemperatur
V_B, V_G, V_R	m^3	Volumen, Behälter, Gas reaktionsfähiges
v_a	$m \cdot s^{-1}$	Abbrandgeschwindigkeit
W_L	$m \cdot s^{-1}$	Windgeschwindigkeit
w_o, w_s	$m \cdot s^{-1}$	Gasgeschwindigkeiten
x	m	Entfernung
y_b	m	Breite
δ	-	Parameter
$\epsilon, \epsilon_{ss}, \epsilon_{Fl}, \epsilon_w$	-	Adsorptionszahlen der Strahlung
α_K, α_s	$kJ \cdot m^{-2} \cdot s^{-1} \cdot K^{-1}$	Wärmeübergangszahlen, Konvektion, Strahlung
τ_h	h	Zeit
τ_m	min	Brandzeit bis zur Liquidierung
τ_s	s	Einwirkzeit
λ	$kJ \cdot m^{-1} \cdot s^{-1} \cdot K^{-1}$	Wärmeleitfähigkeit
$\kappa_{L,D}$	-	Adiabatenexponent Luft, Gas
ρ	$kg \cdot m^{-3}$	Dichte
ρ_L	$m \cdot g^{-1}$	Flammenfortpflanzungsgeschwindigkeit

Literaturnachweis

- Glasstone, S.: Die Wirkungen von Kernwaffen s. Heymanns Verlag KG Köln 1964
- Schardin, H.: Wirkung von Spreng- und Atombomben auf Bauwerke Ziviler Luftschutz 1954, Heft 12 S. 291... 293
- Giesbrecht, H.; Hess, K.; Leuckel, W.; Maurer, B.; Stoeckel, A.: Analyse der potentiellen Explosionswirkungen von kurzzeitig in die Atmosphäre freigesetzten Brenngasmengen Heary Gas and Risk Assessment Battelle-Institut e.V. Frankfurt S. 207... 244, 1980
- Lösch, F.: Auswirkungen von Gasexplosionen Brandschutz, Explosionsschutz Aus Forschung und Praxis Heft 10, Staatsverlag der DDR Berlin 1984
- Schönbucher, A.: Habilitationsschrift TU Stuttgart (1979) VDI Forschungsbericht Reihe 6, Nr. 83 (1981) VDI-Verlag
- Lyamin G.G.; Kogarko, S.M.; Adushkin, V.V. An investigation for spherical detonations of gas mixtures International Chemical Engineering, 6 (1966) 3 American Institut of Chemical Engineers, New York