

Anhang 2 Methodische Hinweise zur Abschätzung der Ausbreitung

2.1	Ausbreitung von Gefahrstoffen im Boden und im Grundwasser	3
2.2	Ausbreitung von Gefahrstoffen in Oberflächengewässern	3
2.2.1	Ausbreitung von Gefahrstoffen in stehenden Oberflächengewässern	3
2.2.2	Ausbreitung von Gefahrstoffen in Fließgewässern.....	4
2.3	Ausbreitung von Gefahrstoffen in umbauten Räumen	6
2.3.1	Lüftung	6
2.3.2	Schwergas- und Auftriebseffekte.....	6
2.4	Ausbreitung von Gefahrstoffen im Freien	7
2.4.1	Ausbreitung von gasförmigen Gefahrstoffen als Freistrahl (Turbulent free jet).....	7
2.4.2	Ausbreitung von gasförmigen Gefahrstoffen als Schwergas.....	9
2.4.2.1	Allgemeines zur Schwergasausbreitung	9
2.4.2.2	Entscheidung zur Bildung einer Schwergaswolke.....	10
2.4.2.3	Untere Explosionsgrenzen und Zündentfernungen.....	11
2.4.2.4	Explosionsfähige Stoffmenge in der Schwergaswolke.....	11
2.4.2.5	Schwergaswolke als Quelle für die dichteneutrale Ausbreitung	13
2.4.3	Dichteneutrale Ausbreitung von Gefahrstoffen.....	14
2.5	Ausbreitung von bei Explosionen gebildeten Fragmenten	17
2.5.1	Sprengstücke und Splitter	17
2.5.2	Trümmer und Wurfstücke.....	19
2.6	Ausbreitung der Wärmestrahlung.....	22
2.6.1	Anteil der Wärmestrahlung an der Gesamtleistung bei Explosionen	22
2.6.2	Anteil der Wärmestrahlung an der Gesamtleistung bei Flüssigkeitsbränden.....	22
2.6.3	Anteil der Wärmestrahlung an der Gesamtleistung bei Feststoffbränden	24
2.6.4	Punktquelle für Wärmestrahlung.....	24
2.6.4.1	Halbkugelförmiger Strahler	25
2.6.5	Absorption der Wärmestrahlung in der Atmosphäre.....	25
2.6.6	Weiterführende Modelle.....	25
2.7	Ausbreitung von Druckwellen.....	26
2.7.1	Detonationen von explosionsgefährlichen Stoffen	26
2.7.2	Explosionsfähige Atmosphäre in Behältern und Räumen	27
2.7.3	Explosionsfähige Atmosphäre im Freien (Freistrahle, UVCE).....	28
2.7.4	Unterfeuerte Flüssiggasbehälter im Freien (BLEVE).....	29

2.1 Ausbreitung von Gefahrstoffen im Boden und im Grundwasser

Durch Störfälle können Gefahrstoffe einerseits in Form von luftgetragenen Aerosolen und Stäuben über große Bodenflächen verteilt werden (siehe auch Abschnitt 2.4.3 “Dichteneutrale Ausbreitung von Gefahrstoffen“) oder andererseits direkt auf kleinere Bodenflächen gelangen.

Ein Teil der Gefahrstoffe kann bei Aerosolen durch Verdunsten oder bei Stäuben als windgehender Staub wieder in die Atmosphäre gelangen.

Der verbleibende Anteil kann im Boden deponiert werden bzw. chemisch oder biologisch abgebaut oder umgewandelt werden.

Auf diese Weise können durch die Niederschläge allmählich Gefahrstoffe ins Grundwasser gelangen und sich mit dem Grundwasser ausbreiten.

Insgesamt verlaufen diese Prozesse relativ langsam ab. Beispielsweise fließt das Grundwasser pro Tag höchstens einige Meter.

In der Regel steht daher Zeit zu Messungen und gegebenenfalls zu begrenzenden Maßnahmen zur Verfügung.

Im Rahmen der Gefahrenabwehrplanung sollten erforderlichenfalls vorab zu folgenden Punkten Informationen zusammengestellt werden:

- Chemisches und biologisches Verhalten der Gefahrstoffe im Boden und im Grundwasser
- Maximale Belastung und Vorbelastung des Bodens (Milligramm pro m²)
- Fließgeschwindigkeit und Richtung des Grundwassers (Meter pro Tag)
- Organisation von Messungen
- Organisation von Sanierungsarbeiten

2.2 Ausbreitung von Gefahrstoffen in Oberflächengewässern

2.2.1 Ausbreitung von Gefahrstoffen in stehenden Oberflächengewässern

Durch Störfälle können Gefahrstoffe einerseits in Form von luftgetragenen Aerosolen und Stäuben über große Wasserflächen verteilt werden (siehe auch Abschnitt 2.4.3 “Dichteneutrale Ausbreitung von Gefahrstoffen“) oder andererseits direkt in das Gewässer gelangen.

Die Gefahrstoffe können in stehenden Oberflächengewässern teilweise chemisch oder biologisch abgebaut oder unzersetzt deponiert werden.

Wasserlösliche Gefahrstoffe würden zu entsprechenden Gefahrstoffkonzentrationen im Wasser führen. In diesem Fall müsste man mit einer relativ langsamen Diffusion in die gesamte Wassermenge rechnen.

Falls die Gefahrstoffe nicht wasserlöslich sind, wird zunächst nur die Wasseroberfläche kontaminiert. Durch den Wind können sie sich relativ schnell auf der Oberfläche ausbreiten.

Insbesondere im letzten Fall sind unverzügliche Gegenmaßnahmen durch geeignete Sperren u. a. erforderlich.

Ein Teil der Gefahrstoffe kann aber auch im Wasser versinken und dann langsam den Gewässerboden verunreinigen. In diesem Fall ist die Situation mit der im vorigen Abschnitt vergleichbar.

Im Rahmen der Gefahrenabwehrplanung sollten erforderlichenfalls vorab zu folgenden Punkten Informationen zusammengestellt werden:

- Chemisches und biologisches Verhalten der Gefahrstoffe im Wasser und auf dem Gewässerboden
- Maximale Belastung der Wasseroberfläche (Masse pro m²)
- Organisation von schnell einsetzenden Gegenmaßnahmen

2.2.2 Ausbreitung von Gefahrstoffen in Fließgewässern

Durch Störfälle können Gefahrstoffe einerseits in Form von luftgetragenen Aerosolen und Stäuben über große Wasserflächen verteilt werden (siehe auch Abschnitt 2.4.3 "Dichteneutrale Ausbreitung von Gefahrstoffen") oder häufiger direkt in das Fließgewässer gelangen. Es wird auf den Abschnitt 4.7 im Band II dieses Leitfadens „Berechnungsmethoden, aktuelle Modelle und Modellgleichungen zum Erarbeiten von Störfallablaufszszenarien“ verwiesen.

Für die folgenden Ausführungen wird angenommen, daß sich ein bestimmter Massenstrom \dot{m}_{Ein} über eine Zeitdauer von t_e in ein Fließgewässer ergießt. Es soll abgeschätzt werden, welche Konzentration in einer Entfernung x flußabwärts zu erwarten ist.

Benötigte Angaben

Massenstrom an Gefahrstoff:	\dot{m}_{Ein}	in	kg/s
Zeitdauer der Freisetzung:	t_e	in	s
Wasserführung am Einleitungsort:	\dot{V}_{Was}	in	m ³ /s
Hydrolytische Halbwertszeit:	t_H	in	h
Mittlere Fließgeschwindigkeit:	u_F	in	m/s
Entfernung flußabwärts:	x_{Was}	in	km
Vervielfachung der Wasserführung bis x_{Was} :	η		

Vom Ort der Einleitung an flußabwärts würde die Gefahrstoffkonzentration abnehmen, weil immer mehr Wasser eingemischt werden würde.

Die Konzentration an der Einleitungsstelle bei vollständiger Vermischung kann abgeschätzt werden:

$$C_{\text{Was0}} = 1000 \cdot \frac{\dot{m}_{\text{Ein}}}{\dot{V}_{\text{Was}}} \quad \text{in} \quad \text{mg/l} \quad (1)$$

Tatsächlich ist die vollständige gleichmäßige Vermischung unwahrscheinlich. Der Grad der Vermischung wird insbesondere durch Wirbel im Wasser bestimmt. Man muß damit rechnen, daß sich Volumina mit relativ hohen Konzentrationen bei geringer Verwirbelung längere Zeit halten.

Im weiteren Verlauf des Fließgewässers würde sich die Konzentration allmählich verringern, weil sich immer mehr Wasser einmischt und die natürliche Reinigungskraft wirksam wird.

Die Strecke x_{Was} wird bei einer mittleren Fließgeschwindigkeit von u_F in folgender Zeit t_x zurückgelegt:

$$t_x = \frac{x_{Was}}{3,6 \cdot u_F} \quad \text{in h} \quad (2)$$

Für die Abnahme der Konzentration infolge verschiedener Prozesse wird eine Exponentialfunktion angesetzt:

$$C(t) = C_{Was0} \cdot e^{-\ln 2 \cdot \frac{t}{t_H}} \quad (3)$$

Wenn man zusätzlich berücksichtigt, daß sich der Durchfluß am Ort x_{Was} um den Faktor η verändert, ergibt sich die mittlere Konzentration am Ort x_{Was} zu:

$$C_{xWas} = 1000 \cdot \frac{\dot{m}_{Ein}}{\eta \cdot \dot{V}_{Was}} \cdot e^{-\ln 2 \cdot \frac{t_x}{t_H}} \quad \text{in mg/m}^3 \quad (4)$$

Infolge verschiedener Zufallsprozesse wird sich der Zeitverlauf der Konzentration verschleifen. Nach einer gewissen Zeit kann man den Zeitverlauf als Normalverteilung um t_{xWas} betrachten.

$$C(t) \cong C_{xWas} \cdot e^{-\frac{(t-t_{xWas})^2}{2 \cdot \sigma^2}} \quad (5)$$

Das folgende uneigentliche Integral ist bekannt.

$$\text{Aus } \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-\frac{x^2}{2 \cdot \sigma^2}} dx = \sqrt{2\pi} \cdot \sigma = 1 \quad \text{findet man:}$$

$$\sigma = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \quad (6)$$

Wenn man als Dauer des verschliffenen Impulses näherungsweise gleich 5σ ansetzt, kann die Dauer erhöhter Konzentration grob abgeschätzt werden:

$$t_c \cong \frac{5}{\sqrt{2\pi}} \cdot t_e \cong 2 \cdot t_e \quad (7)$$

2.3 Ausbreitung von Gefahrstoffen in umbauten Räumen

2.3.1 Lüftung

Bei der **natürlichen Lüftung** von Räumen in Häusern kann man Luftwechselraten von $n_{\text{Luft}} = 0,4/\text{h}$ für Kellerräume bis $n_{\text{Luft}} = 2$ für andere Räume annehmen. Bei der **technischen Lüftung** werden erheblich höhere Luftwechselraten erreicht.

Eine Luftwechselrate von $n_{\text{Luft}} = 1/\text{h}$ bedeutet, daß innerhalb einer Stunde das Luftvolumen einmal ausgetauscht wird.

Wenn man im einfachsten Fall die Freisetzung eines zeitlich konstanten, dichteneutralen Massenstromes \dot{m} und die vollständige Vermischung mit der im Raumvolumen V_{Raum} enthaltenen Luft annimmt, kann die Konzentration C im Raum überschläglich bestimmt werden.

Benötigte Angaben

Massenstrom (innerhalb des Raumes freigesetzt):	\dot{m}	in	kg/s
Luftwechselrate:	n_{Luft}	in	1/h
Raumtemperatur:	ϑ_{Raum}	in	° C
Raumvolumen:	V_{Raum}	in	m ³
Molmasse des freigesetzten Stoffes:	M_{mol}	in	g/mol

$$C = \frac{3,6 \cdot 10^9 \cdot \dot{m}}{n_{\text{Luft}} \cdot V_{\text{Raum}}} \quad \text{in} \quad \text{mg/m}^3 \quad (8)$$

$$C = \frac{8,064 \cdot 10^{10} \cdot \dot{m}}{n_{\text{Luft}} \cdot V_{\text{Raum}} \cdot M_{\text{mol}}} \cdot \left(1 + \frac{\vartheta_{\text{Raum}}}{273,15} \right) \quad \text{in} \quad \text{ppm} \quad (9)$$

$$C = \frac{8,064 \cdot 10^6 \cdot \dot{m}}{n_{\text{Luft}} \cdot V_{\text{Raum}} \cdot M_{\text{mol}}} \cdot \left(1 + \frac{\vartheta_{\text{Raum}}}{273,15} \right) \quad \text{in} \quad \text{Vol.-%} \quad (10)$$

2.3.2 Schwergas- und Auftriebseffekte

Wenn gegenüber der Luft deutlich schwereres Gas oder deutlich schwererer Dampf in ausreichender Menge frei werden, kann es zur Bildung von Schwergaswolken¹ am Boden kommen.

Die Schwergaswolken enthalten bei brennbaren Stoffen mit Explosionsgrenzen Bereiche mit explosionsfähiger Atmosphäre. Deshalb besteht in diesen Fällen Explosionsgefahr.

Die Schwergaswolken können sich unter geeigneten Umständen, von der Schwerkraft angetrieben, in Richtung des Gefälles ausbreiten und über Treppen, Schächte oder Ab-

¹ vgl. VDI 3783 Blatt 2

läufe auch andere Räume bzw. Versorgungs- und Entsorgungskanäle erreichen und auch dort zu einer Explosionsgefahr führen.

Wenn gegenüber der Luft deutlich leichteres Gas frei wird, kann es durch den Auftrieb in der schwereren Luft zur Ansammlung, zum Beispiel unter der Raumdecke, kommen. Bei brennbaren Stoffen mit Explosionsgrenzen können sich Bereiche mit explosionsfähiger Atmosphäre bilden. Deshalb besteht in diesen Fällen Explosionsgefahr.

Das Leichtgas kann sich unter geeigneten Bedingungen, von den Auftriebskräften angetrieben, nach oben ausbreiten und über Treppen, Schächte andere Räume, Versorgungs- und Entsorgungskanäle erreichen und auch dort zu einer Explosionsgefahr führen.

2.4 Ausbreitung von Gefahrstoffen im Freien

2.4.1 Ausbreitung von gasförmigen Gefahrstoffen als Freistrahle (Turbulent free jet)

Beim stationären Auströmen von brennbaren Gasen bildet sich häufig wegen der hohen Anfangsgeschwindigkeit ein sich mit der Umgebungsluft verwirbelnder Gasstrahl, in dem sich Bereiche mit explosionsfähiger Atmosphäre befinden können. Insbesondere der mögliche Abstand solcher Bereiche zur Quelle und die Menge an brennbarem Gas zwischen den Explosionsgrenzen wird zur Abschätzung der Explosionswirkungen benötigt.

Die Konsequenzen auf die weitere Ausbreitung (Konfiguration der Quelle für die dichteneutrale Ausbreitung, Schwergaswolke, Auftrieb, Abtrieb) werden hier wegen der Vielfalt der Einflußfaktoren nicht näher behandelt. Es wird empfohlen, diesen Gesichtspunkt mit konservativen Annahmen bei der Festlegung der Quellterme und des Quellortes zu berücksichtigen.

Stark vereinfachend wird hier ein waagerechter Strahl aus einer kreisrunden Öffnung mit der Temperatur der Umgebungsluft zugrunde gelegt. Zur Abschätzung des Massenstromes \dot{m} wird auf die Abschnitte 1.1.1.3, 1.1.2.4 und 1.1.3.2 im Anhang 1 verwiesen.

Die folgenden Berechnungsgleichungen basieren auf den im "Yellow Book" angegebenen².

Benötigte Angaben

Massenstrom:	\dot{m}	in	kg/s
Untere Explosionsgrenze:	U_{EG}	in	Vol.-%
Obere Explosionsgrenze:	O_{EG}	in	Vol.-%
Behälterinnendruck:	p_i	in	bar
Isentropenexponent:	κ		
Leckdurchmesser:	D	in	mm
Molmasse des Gases:	M_{mol}	in	g/mol

² Committee for the Prevention of Disasters: Methods for the calculation of physical effects. Second edition 1992, Chapter 3, Turbulent free jet

Temperatur der Umgebungsluft: ϑ_u in $^{\circ}\text{C}$
 Molvolumen idealer Gase bei 0°C : $0,0224 \text{ m}^3/\text{mol}$
 Mittlere Molmasse der Luft: $M_{\text{mol,air}} = 28,9 \text{ g/mol}$

Für die Abschätzung der Entfernung x_C vom Leck, bei der sich eine Konzentration C in Vol. % auf der Strahlachse einstellt, gilt:

Im Fall $p \geq p_k$

$$x_C = 0,01025 \cdot \left(\frac{1 + \frac{b_2}{b_1}}{0,01 \cdot C} + \frac{M_{\text{mol}}}{28,9} - 1 \right) \cdot \frac{D}{\sqrt{M_{\text{mol}}}} \cdot \sqrt{1 + \frac{p_i - p_k}{1,0134}} \quad \text{in m} \quad (11)$$

Im Fall $p < p_k$

$$x_C = 0,01025 \cdot \left(\frac{1 + \frac{b_2}{b_1}}{0,01 \cdot C} + \frac{M_{\text{mol}}}{28,9} - 1 \right) \cdot \frac{D}{\sqrt{M_{\text{mol}}}} \quad \text{in m} \quad (12)$$

Für die dimensionslosen Parameter b_1 und b_2 gilt:

$$b_1 = 50,5 + 1,67 \cdot M_{\text{mol}} - 0,0119 \cdot M_{\text{mol}}^2; \quad b_2 = 23 + 1,42 \cdot M_{\text{mol}} \quad (13)$$

Der kritische Druck kann berechnet werden:

$$p_k = 1,0134 \cdot \left(\frac{\kappa + 1}{2} \right)^{\frac{\kappa}{\kappa - 1}} \quad \text{in bar} \quad (14)$$

Wenn man beispielsweise für C die Explosionsgrenzen einsetzt, findet man deren Entfernung auf der Strahlachse.

Die Masse zwischen den Explosionsgrenzen $m_{\text{EXfreejet}}$ kann man unter Nutzung der folgenden Abkürzungen abschätzen.

Abkürzungen

Im Fall $p < p_k$:

$$\alpha = 5,03 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{D^3}{b_2 \cdot \sqrt{M_{\text{mol}}}} \cdot \frac{1}{1 + \frac{\vartheta_u}{273,15}} \quad \text{in kg} \quad (15)$$

Im Fall $p \geq p_k$:

$$\alpha = 5,03 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{D^3}{b_2 \cdot \sqrt{M_{\text{mol}}}} \cdot \frac{\sqrt{1 + \frac{p_i - p_k}{1,0134}}^3}{1 + \frac{\vartheta_u}{273,15}} \quad \text{in} \quad \text{kg} \quad (16)$$

Beide Fälle:

$$\beta = 1 + \frac{b_2}{b_1}; \quad \gamma = 1 - \frac{M_{\text{mol}}}{28,9} \quad (17)$$

$$\frac{m_{\text{Exfreejet}}}{\alpha} = \frac{\beta^3}{2} \cdot \left(\frac{100^2}{U_{\text{EG}}^2} - \frac{100^2}{O_{\text{EG}}^2} \right) - 3 \cdot \beta^2 \cdot \gamma \cdot \left(\frac{100}{U_{\text{EG}}} - \frac{100}{O_{\text{EG}}} \right) + 3 \cdot \beta \cdot \gamma^2 \cdot \ln \frac{O_{\text{EG}}}{U_{\text{EG}}} - \gamma^3 \cdot \left(\frac{O_{\text{EG}}}{100} - \frac{U_{\text{EG}}}{100} \right) \quad (18)$$

2.4.2 Ausbreitung von gasförmigen Gefahrstoffen als Schwergas

2.4.2.1 Allgemeines zur Schwergasausbreitung

Das folgende Schema zeigt die Einordnung der Abschätzungen zur Schwergasausbreitung.

Bei der Ausbreitung von Gefahrstoffen spielt gegebenenfalls die Phase der Schwergasausbreitung, der die Phase der dichteneutralen Ausbreitung folgt, im Hinblick auf die Gefahrenabschätzung eine wichtige Rolle. In ca. 80 % der Freisetzungsfälle tritt diese Schwergasphase auf.

Während der Ausbreitung in der Schwergasphase spielen meteorologische Bedingungen eine eher geringe Rolle. Die Schwergaswolke breitet sich hauptsächlich von der Schwerkraft angetrieben aus. Sie fließt gegebenenfalls in Gefällrichtung und wird durch engmaschige Zäune und Mauern aufgehalten.

Neben einer möglichen Explosionsgefahr bewirkt die Bildung einer Schwergaswolke eine relativ schnelle räumliche Ausdehnung der Quelle der dichteneutralen Ausbreitung und den schnellen Transport von Gefahrstoffen nach einem eigenen Mechanismus.

Außerdem kommt es zu einer Zwischenspeicherung der Gefahrstoffe in der Schwergaswolke. Das hat einen zeitlich verzögerten Anstieg der Konzentrationswerte und erhöhte Konzentrationswerte bei der dichteneutralen Ausbreitung zur Folge.

Im Falle des Auftretens einer Schwergasphase muß außerdem ein plausibler Übergang vom Modell der Schwergasausbreitung zum Modell der dichteneutralen Ausbreitung realisiert werden.

Weitere allgemeine Informationen können der VDI 3783 Blatt 2 entnommen werden³.

³ Ein auf VDI 3783 Blatt 2 beruhendes Rechenprogramm kann vom VDI bezogen werden.

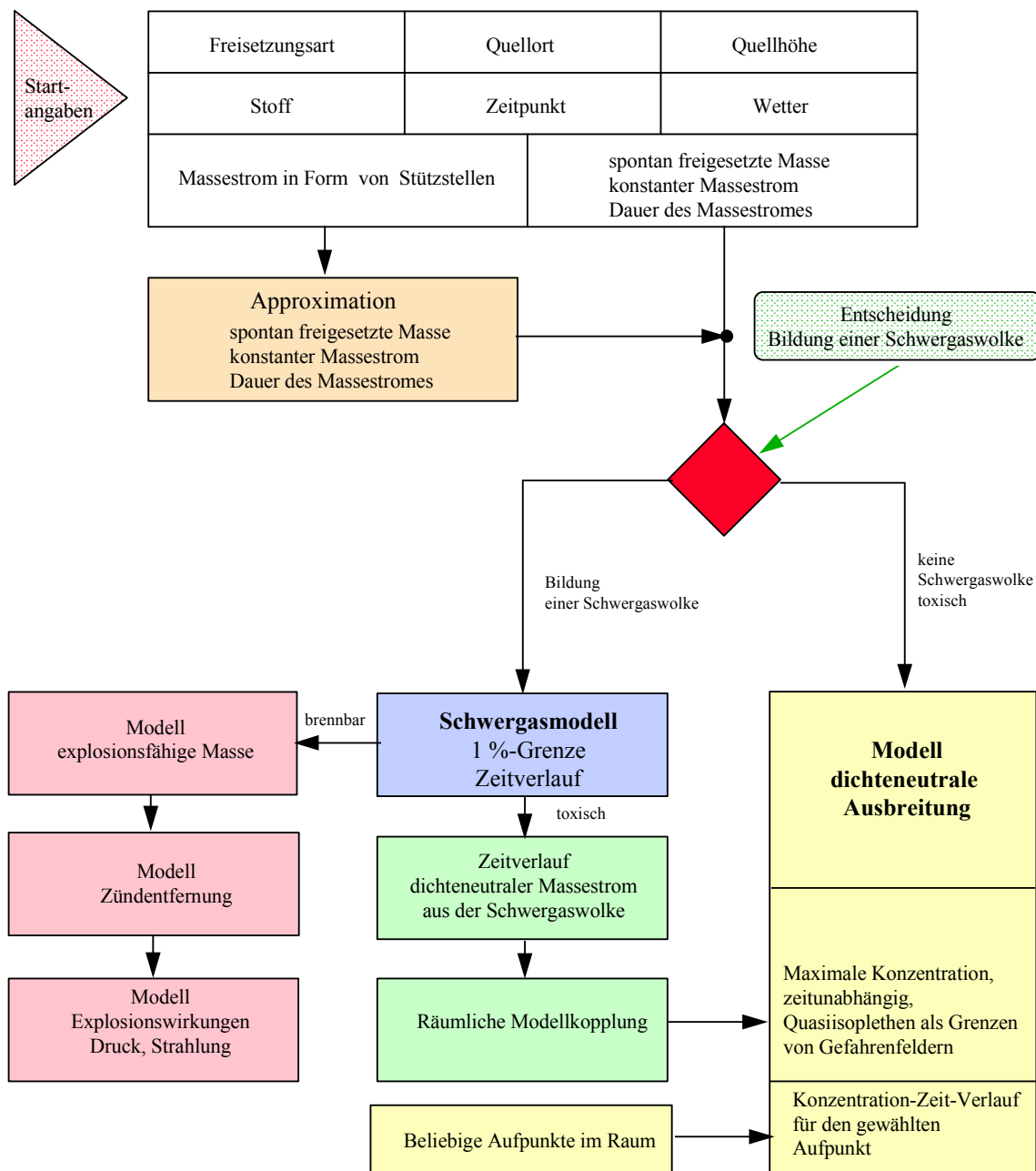


Abbildung 1: Schema zur Gefahrstoffausbreitung in der Luft

2.4.2.2 Entscheidung zur Bildung einer Schwergaswolke

Für die Ausbildung einer Schwergaswolke sind zuerst ein bestimmter Minstdichteunterschied zwischen dem freigesetzten Gefahrstoff und der Umgebungsluft und eine Mindestmenge an freigesetztem Stoff erforderlich. Das wird in der Regel von den Rechenprogrammen geprüft.

Darüber hinaus gibt es aber einige Gesichtspunkte, die für eine Entscheidung, ob bei der Ausbreitung des freigesetzten Gefahrstoffes eine Phase der Schwergasausbreitung angenommen werden muß, berücksichtigt werden sollen.

Gegen die Ausbildung einer Schwergaswolke sprechen beispielsweise folgende Gegebenheiten:

- Die Quelle befindet sich nicht am Erdboden.
- Es handelt sich um ein Luft-Dampfgemisch mit geringem Dampfanteil.
- Es handelt sich um die Verdunstung einer nicht siedenden Lache; insbesondere liegt die Lachentemperatur weit unter der Siedetemperatur.
- Der Gefahrstoff wird mit erheblicher Geschwindigkeit als Strahl frei und trifft nicht auf Hindernisse oder den Boden, insbesondere ist er nach oben gerichtet.

In Zweifelsfällen soll mit der Bildung einer Schwergaswolke gerechnet werden, weil dadurch in der Regel größere Gefahren als bei der Ausbreitung ohne die Schwergasphase auftreten.

2.4.2.3 Untere Explosionsgrenzen und Zündentfernungen

Bei brennbaren Gasen ist für ein explosionsartige Verbrennung eine stoffabhängige Mindestkonzentration des Stoffes in der Luft, die als untere Explosionsgrenze U_{EG} bezeichnet wird, erforderlich.

Innerhalb der Schwergaswolken sinkt die Stoffkonzentration mit der Entfernung zum Quellort. Die Entfernung, bei der die untere Explosionsgrenze erreicht wird, wird als Zündentfernung bezeichnet. Das heißt, wenn sich innerhalb dieser Entfernung eine ausreichend starke Zündquelle befinden würde, käme es zur Explosion.

Die Zündentfernungen können nach VDI 3783 Blatt 2 für unterschiedliche Stoffe und Ausbreitungsgebiete bestimmt werden⁴. Die potentiell entflammbaren Massen eines brennbaren Gases in der Schwergaswolke können mit Hilfe der Angaben in dem Ergänzungsblatt zur VDI-Richtlinie 3783 Blatt 2 abgeschätzt werden.

2.4.2.4 Explosionsfähige Stoffmenge in der Schwergaswolke

Für die Abschätzung der Explosionswirkungen im Falle einer Explosion ist die Kenntnis der in der Schwergaswolke enthaltenen explosionsfähigen Stoffmasse m_{ExUVCE} erforderlich (Quellterm).

Benötigte Angaben

Stoffbezeichnung

Molmasse des Stoffes:

M_{mol} in g/mol

⁴ Ein auf VDI 3783 Blatt 2 beruhendes Rechenprogramm kann vom VDI bezogen werden.

Gesamte freigesetzte Masse bei spontaner Freisetzung:

Massenstrom bei stationärer Freisetzung:

Untere Explosionsgrenze:

Obere Explosionsgrenze:

Freisetzungstemperatur:

Temperatur der Umgebungsluft:

m_{spontan}	in	kg
$\dot{m}_{\text{stationär}}$	in	kg/s
U_{EG}	in	Vol.-%
O_{EG}	in	Vol.-%
ϑ_0	in	° C
ϑ_u	in	° C

Das **Programm nach VDI 3783 Blatt 2** liefert unterschieden nach den Fällen spontane Freisetzung und stationäre Freisetzung Angaben zur potentiell zündfähigen Stoffmasse in der Schwergaswolke für die mittlere Situation. m_W ist die gesamte Schwergasmasse in der Wolke.

- Spontane Freisetzung: $m_{\text{ExUVCE}} = m_{\text{spontan}}$ (19)
- Stationäre Freisetzung für den Fall ebenes Gelände ohne Hindernisse (ohne Ammoniak):

$$\frac{m_{\text{ExUVCE}}}{m_W} \cong \frac{1}{U_{\text{EG}}^{0,57 \dots 0,83}} - \frac{1}{O_{\text{EG}}^{0,57 \dots 0,83}} \text{ mit}$$

$$m_W = \frac{61 \cdot \dot{m}_{\text{stationär}}^{1,2}}{\left(\frac{12,19 \cdot M_{\text{mol}}}{273,15 + \vartheta_u} \right)^{0,2} \cdot \left(\frac{10,16 \cdot M_{\text{mol}}}{273,15 + \vartheta_0} - 1 \right)^{0,6}} \quad \text{in kg} \quad (20)$$

Im **Programm DISMA^{®5}** werden in Anlehnung an VDI 2383 Blatt 2 unter den gleichen Voraussetzungen kleinere explosionsfähige Massen bestimmt. m_W ist die gesamte Schwergasmasse in der Wolke.

$$\text{Spontane Freisetzung: } m_{\text{ExUVCE}} = 0,4724 \cdot m_{\text{spontan}} \cdot \left(\frac{1}{U_{\text{EG}}} - \frac{1}{O_{\text{EG}}} \right) \quad (21)$$

Stationäre Freisetzung für den Fall ebenes Gelände ohne Hindernisse (ohne Ammoniak):

$$\frac{m_{\text{ExUVCE}}}{m_W} \cong \frac{1}{U_{\text{EG}}} - \frac{1}{O_{\text{EG}}} \quad \text{in kg} \quad (22)$$

⁵ Programm DISMA des TÜV Rheinland/Berlin-Brandenburg

$$\text{mit } m_w = \frac{15,7 \cdot \dot{m}_{\text{stationär}}^{1,2}}{\left(\frac{12,19 \cdot M_{\text{mol}}}{273,15 + \vartheta_0} \right)^{0,2} \cdot \left(\frac{M_{\text{mol}}}{28,9} \cdot \frac{273,15 + \vartheta_u}{273,15 + \vartheta_0} - 1 \right)^{0,6}}$$

2.4.2.5 Schwergaswolke als Quelle für die dichteneutrale Ausbreitung

Da die Schwergaswolke die Quelle für die dichteneutrale Ausbreitung bildet, wäre eine Abschätzung des zeitlichen Verlaufes ihrer Ausdehnung und des aus ihr freigesetzten dichteneutralen Massenstromes erforderlich, um eine plausible Kopplung mit dem Modell für die dichteneutrale Ausbreitung zu ermöglichen.

Nach **VDI 3783 Blatt 2** wird vereinfachend folgendermaßen verfahren:

- Bei der spontanen Freisetzung wird die Schwergaswolke durch eine Punktquelle ersetzt, die um einen bestimmten Abstand Δx vom ursprünglichen Quellort in Windrichtung verschoben ist und um eine bestimmte Zeitdifferenz Δt später als die ursprüngliche Quelle aktiv wird.
- Bei der stationären Freisetzung wird die Schwergaswolke durch eine Punktquelle ersetzt, die um einen bestimmten Abstand Δx in Windrichtung vom ursprünglichen Quellort verschoben ist.

Im **Programm DISMA[®]** wird modellmäßig angenommen, daß sich die Schwergaswolke in Form einer flachen zylindrischen Scheibe bis zu einem maximalen Radius ausbreitet und diesen Radius bis zu ihrem Verschwinden beibehält. Nach dem Versiegen der Quelle wird der dichteneutrale Massenstrom durch die Verringerung der Konzentration in der Wolke gespeist.

- Ähnlich wie in der VDI 3783 Blatt 2 wird als Quelle der dichteneutralen Ausbreitung eine Punktquelle als Ersatzquelle für die gesamte Schwergaswolke verwendet. Deren Ort wird in Abhängigkeit von der Lage des Aufpunktes so festgelegt, daß sich auch in der Nähe des 'Randes' der Schwergaswolke plausible Konzentrationswerte ergeben.
- In Abhängigkeit von der mittleren Windgeschwindigkeit wird eine Verschiebung des Mittelpunktes in Windrichtung angenommen. Dabei wird gesichert, daß sich die punktförmige Quelle am Boden innerhalb der Wolke befindet.

Das **DEGADIS⁶-Modell** legt eine kreisförmige Lache am Boden zugrunde, aus der Schwergas in die Atmosphäre abgegeben wird. Die Ausbreitung wird in drei Phasen beschrieben:

- Auseinanderfließen infolge des Dichteunterschiedes

⁶ Das Programm DEGADIS ist öffentlich verfügbar kann aus den USA bezogen werden.

- Stabil geschichteter Scherungsstrom
- Dichteneutrale Ausbreitung

In der allgemeinen Literatur sind weitere Modelle beschrieben. Auf den Abschnitt 4.6 im Band II dieses Leitfadens „Berechnungsmethoden, aktuelle Modelle und Modellgleichungen zum Erarbeiten von Störfallablaufszenarien“ wird verwiesen.

2.4.3 Dichteneutrale Ausbreitung von Gefahrstoffen

Zur Abschätzung der dichteneutralen Ausbreitung luftgetragener Gefahrstoffe werden sehr unterschiedliche Modelle verwendet. Sie unterscheiden sich nach dem prinzipiellen Ansatz und den von ihnen berücksichtigten Eingangsparametern.

Die in diesem Abschnitt angegebenen Gleichungen sind für einzelne Berechnungen zu aufwendig. Sie werden hier nur zur Information angeführt.

Für die Ausführung der Berechnungen kann man auf fertige Programme zurückgreifen⁷.

Lagrange-Modelle

In den Lagrange-Modellen wird der Weg der aus der Quelle freigesetzten Gefahrstoffe und ihr Aufenthaltsort im Verlauf der Zeit berechnet. Dazu muß zuvor das Windfeld im Ausbreitungsgebiet bekannt sein. Die Berechnung und Speicherung der Windfelder erfordert einen erheblichen Aufwand.

Die Gefahrstoffe werden dann passiv wie Partikel vom Windfeld transportiert (Partikelmodell). Der Vorteil dieser Modellrechnungen besteht darin, daß topographische Besonderheiten, Bewuchs und Bebauung direkt berücksichtigt werden können, wenn eine entsprechende Datenbasis zur Verfügung steht⁸.

Gauß-Modelle

Die Gauß-Modelle werden in der überwiegenden Zahl der Fälle verwendet. Sie sind in VDI 3945 Blatt 1 beschrieben.

Puff-Modell im unbegrenzten Raum

⁷ Beispielhaft werden hier die öffentlich verfügbaren Programme Stoer2 nach VDI 3783 Blatt 1, das Programm EFFECTS der TNO und das Programm DISMA[®] des TÜV Rheinland/Berlin-Brandenburg genannt.

⁸ Vgl. auch Abschlußbericht zum Forschungsauftrag des Bundesministeriums für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie, Analyse von Freisetzungsvorgängen bei Störfällen im komplexen Gelände, Februar 1997, Meteorologisches Institut der TH Darmstadt, Universität des Landes Hessen.
Als Beispiel für die Nutzung eines Partikelmodells wird hier das Programm Compas des Ingenieurbüros Brenk Systemplanung genannt.

Als Basisvorstellung wird die dichteneutrale Ausbreitung einer spontan freigesetzten endlichen Masse aus einer Punktquelle herangezogen.

Die sich mit dem Wind bewegende und sich ständig ausdehnende „Wolke“ mit erhöhter Konzentration des freigesetzten Stoffes ist der Puff.

Statistische Überlegungen führen für den unbegrenzten Raum ohne Wind und mit konstanten Diffusionsbedingungen bei der Konzentration C_{sp} auf folgende Abhängigkeit vom Abstand r für ein bestimmtes Alter τ der Wolke, wenn m_{puff} die spontan freigesetzte Masse ist:

$$C_{sp} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}^3} \cdot \frac{m_{puff}}{\sigma^3(\tau)} \cdot e^{-\frac{r^2}{2\sigma^2(\tau)}} \quad (23)$$

In diesem Sinne spricht man von Gauß-Verteilung und von Gauß-Modellen.

Aus der Diffusionsgleichung erhält man eine ganz ähnliche Lösung. Die Diffusionsgleichung fordert, daß die Abnahme des Massenstromes in einem Volumenelement gleich der zeitlichen Änderung der Konzentration in diesem Volumenelement ist. Sie ist eine partielle Differentialgleichung und muß im Prinzip unter bestimmten Anfangs- und Randbedingungen gelöst werden. Zur Vereinfachung und unter Einschränkungen kann die Berücksichtigung der Randbedingungen auf die Behandlung „virtueller“ Quellen verlagert werden. Von dieser Möglichkeit soll später Gebrauch gemacht werden. Vorläufig wird aber der unbegrenzte Raum zugrunde gelegt.

Für den Puff lautet die Lösung mit zeitabhängigen Funktion ϑ ganz ähnlich wie Gleichung (23):

$$C_{sp} = \frac{m_{puff}}{\pi^{1,5} \cdot (4 \cdot \vartheta)^{1,5}} \cdot e^{-\frac{r^2}{4 \cdot \vartheta}} \quad (24)$$

Plume-Modell im unbegrenzten Raum

Für die kontinuierliche Freisetzung nimmt man an, daß eine Folge von Puffs mit unterschiedlichem Alter freigesetzt wird und die Gesamtkonzentration durch Superposition der Einzelkonzentrationen bestimmt werden kann. Das führt auf ein uneigentliches Integral. Wenn der Massenstrom \dot{m}_{st} konstant ist, handelt es sich um eine stationäre Freisetzung. Das ist unter anderem bei den Rauchfahnen aus Schornsteinen der Fall, woraus sich die Bezeichnung des Modells („Plume“) ableitet:

$$C_{st} = \frac{\dot{m}_{st}}{\sqrt{2\pi}^3} \cdot \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-\frac{(x_A - u_a \cdot \tau)^2}{2\sigma_x^2(\tau)} - \frac{y_A^2}{2\sigma_y^2(\tau)} - \frac{z_A^2}{2\sigma_z^2(\tau)}} \cdot \frac{d\tau}{\sigma_x(\tau) \cdot \sigma_y(\tau) \cdot \sigma_z(\tau)} \quad (25)$$

Mit bestimmten Näherungen kann dieses Integral ausgewertet werden. Das bietet grundsätzlich die Möglichkeit, die richtungsabhängigen Streuungen anhand von Messungen zu bestimmen und das Modell zu kalibrieren.

Damit ergibt sich die Modellgleichung für das Plume-Modell:

$$C_{st} \cong \frac{\dot{m}_{st}}{2\pi} \cdot \frac{e^{-\frac{y_A^2}{2\sigma_y^2(x_A)} - \frac{z_A^2}{2\sigma_z^2(x_A)}}}{u_H \cdot \bar{\sigma}_y(x_A) \cdot \bar{\sigma}_z(x_A)} \quad (26)$$

Modellgleichungen im durch die Bodenebene begrenzten Raum

Wenn sich die Quelle am Boden befindet, steht nur noch der halbe Raum zur Ausbreitung zur Verfügung. Wenn sich am Boden kein Stoff absetzt, muß mit der doppelten Konzentration gerechnet werden.

Wenn sich die Quelle in der Höhe H über dem Boden befindet, steht nur noch ein Teil des Raumes zur Ausbreitung zur Verfügung.

Das wird durch die Einführung einer virtuellen Quelle bei H berücksichtigt. Die Gesamtkonzentration ist dann die Summe der Konzentrationen, die von der realen und von der virtuellen Quelle verursacht werden.

Daraus ergeben sich die Modellgleichungen im durch die Bodenebene begrenzten Raum.

$$\text{Plume-Modell:} \quad C_{st} \cong \frac{\dot{m}_{st}}{2\pi} \cdot \frac{e^{-\frac{y_A^2}{2\sigma_y^2(x_\tau)}}}{u_H \cdot \bar{\sigma}_y(x_\tau) \cdot \bar{\sigma}_z(x_\tau)} \cdot \left[e^{-\frac{(z_A-H)^2}{2\sigma_z^2(x_\tau)}} + e^{-\frac{(z_A+H)^2}{2\sigma_z^2(x_\tau)}} \right] \quad (27)$$

Die Streuung in x-Richtung tritt in der Näherungsgleichung (27) nicht mehr auf. Sie kann deshalb bei der Auswertung von Experimenten mit der Gleichung (27) nicht bestimmt werden.

$$\text{Puff-Modell:} \quad C_{sp} = \frac{m_{Puff}}{\sqrt{2\pi}^3} \cdot \frac{e^{-\frac{(x_A-u_a\tau)^2}{2\sigma_x^2(\tau)} - \frac{y_A^2}{2\sigma_y^2(\tau)}}}{\sigma_x(\tau) \cdot \sigma_y(\tau) \cdot \sigma_z(\tau)} \cdot \left[e^{-\frac{(z_A-H)^2}{2\sigma_z^2(\tau)}} + e^{-\frac{(z_A+H)^2}{2\sigma_z^2(\tau)}} \right] \quad (28)$$

Kontinuierliche Freisetzung mit zeitlich veränderlichen Massenströmen

Für die kontinuierliche Freisetzung nimmt man wieder an, daß eine Folge von Puffs unterschiedlicher Stärke mit unterschiedlichem Alter freigesetzt wird und die Gesamtkonzentration durch Superposition der Einzelkonzentrationen bestimmt werden kann. Das führt auf ein Faltungsintegral.

Quellüberhöhung - Effektive Quellhöhe

Bei der Freisetzung von heißen Gasströmen kann ein Auftrieb in der dichteren Luft entstehen. Das wird durch die Verwendung einer im Vergleich zur realen Quellhöhe vergrößerten Quellhöhe berücksichtigt.

Zu weiteren in diesem Zusammenhang verwendeten Begriffen, wie

- Ausbreitungs- und Stabilitätsklasse
- Sperschichten
- Berücksichtigung der Topographie
- Ausbreitung in Straßen
- Räumlich ausgedehnte Quellen
- Chemische und physikalische Umsetzungen
- Auswascheffekte durch Regen
- Deposition von Stäuben und Aerosolen

wird auf die allgemeine Literatur und die VDI Richtlinien VDI 3782, VDI 3783 Blatt 1 und VDI 3945 Blatt 1 verwiesen.

Nomogramme und Schablonen

Nomogramme und Schablonen zur schnellen Abschätzung der dichteneutralen Ausbreitung luftgetragener Gefahrstoffe werden vorzugsweise im Falle akuter Stofffreisetzungen verwendet. Hier sollen als Beispiele das schweizerische MET und die Aktivitäten des VCI genannt werden⁹.

2.5 Ausbreitung von bei Explosionen gebildeten Fragmenten

2.5.1 Sprengstücke und Splitter

Sprengstücke und Splitter treten nur bei der Detonation von Gegenständen, die mit Sprengstoff gefüllt sind und feste Hüllen haben, auf. Die Sprengstücke und Splitter sind meist relativ klein und haben sehr hohe Anfangsgeschwindigkeiten.

⁹ Gefahrenabschätzung und –abwehr bei Stoffaustritt aus Chemieanlagen in die Atmosphäre, Arbeitskreis “Stoffaustritt in die Atmosphäre“ im Ausschuss Immissionsschutz des Verbandes der Chemischen Industrie e.V., Dezember 1986

Halpaap, Werner: Ausbreitung, Messung und Bewertung von Gaswolken – Stand der Erkenntnisse und Folgerungen für die Gefahrenabwehr. Drägerheft 352 (September 1992)

Knopf, Peter: Normierte Auswirkungsbetrachtungen. Vortrag am 24.03.98 im HDT, Essen

Bützer, P., Naef, H.: Modell für Effekte mit toxischen Gasen (MET). SWISS CHEM 14 (1992) Nr. 1, Seiten 7 - 20

Für speziellere rechnerische Abschätzungen wird auf die Literatur¹⁰ verwiesen. In Anlehnung an die angegebenen Literaturstellen wird hier nur ein einfacher Fall behandelt.

Modellmäßig wird ein zylindrischer Sprengstoffkörper, der von einem Stahlmantel umgeben ist, angenommen. Es soll geprüft werden, ob ein Stahlblech ausreichenden Schutz bietet.

Benötigte Angaben

Sprengstoffmasse als TNT-Äquivalent:	m_{TNT}	in	kg
Metallmasse des zylindrische Mantels:	m_{Met}	in	kg
Wanddicke des zylindrische Mantels:	h_{zm}	in	mm
Innendurchmesser des zylindrische Mantels:	D_i	in	mm
Dicke des Rezeptorstahlbleches:	h_d	in	mm
Abstand des Auftreffortes zum Detonationsort	R_{Det}	in	m
Winkel zwischen Flugbahn und der Normalen der Auftrefffläche:	φ	in	Grad

Es bedeuten:

Parameter Splitterverteilung	M_A		
Normalkomponente der Auftreffgeschwindigkeit	u_n	in	m/s
Dimensionslose Vergleichsgeschwindigkeit	u'		
Anfangsgeschwindigkeit	u_0	in	m/s
Auftreffgeschwindigkeit	u_T	in	m/s
Masse des größten Sprengstückes	m_{spr}	in	g
Zulässige Sprengstückmasse	m_{zul}	in	g

Für die Anfangsgeschwindigkeit gilt:

$$u_0 = \frac{2115}{\sqrt{\frac{m_{\text{Met}}}{m_{\text{TNT}}} + \frac{1}{2}}} \quad \text{in} \quad \text{m/s} \quad (29)$$

Für den Verteilungsparameter M_A gilt:

$$M_A = \left(1 + \frac{h_{\text{zm}}}{D_i}\right) \cdot h_{\text{zm}}^{\frac{5}{6}} \cdot D_i^{\frac{1}{3}} \quad (30)$$

Damit wird die Masse des größten Sprengstückes (Splitters) m_{spr} berechnet.

¹⁰ NN: Manual for the prediction of blast and fragment loadings on structures. Rep. No. DOE/TIC-11268, Aug. 1981, US Dep. of Energy, Albuquerque Operation Office, Amarillo Area Office, Amarillo, Tex.
Ayvazyan, H.; Dede, M.; Dobbs, N.; Whitney, M.; Bowles, P.; Baker, W.; Caltagirone, J. P.: Structures to resist accidental explosions. Vol. II "Blastfragment and shock loadings", Spezial Publication ARCDL-SP-84001, Dez. 1986, US Army Armament, Research, Development and Engineering Center, Armament Engineering Directorate, Dover, N. J.

$$m_{\text{spr}} = 2,36 \cdot \sqrt{M_A \cdot \ln\left(\frac{17,6 \cdot m_{\text{Met}}}{M_A^2}\right)} \quad \text{in g} \quad (31)$$

Die Geschwindigkeit eines unregelmäßigen Körpers nimmt nach der kurzen Beschleunigungsphase beim Durchgang der Stoßwelle im Laufe der Flugzeit und Entfernung relativ schnell ab. Für die Abschätzung der Auftreffgeschwindigkeit wird folgende Beziehung verwendet:

$$u_T = u_0 \cdot e^{-\frac{0,04 \cdot R}{\sqrt[3]{m_{\text{spr}}}}} \quad \text{in m/s} \quad (32)$$

Für die Normalkomponente der Auftreffgeschwindigkeit gilt:

$$u_n = u_T \cdot \cos\left(\pi \cdot \frac{\varphi}{180}\right) \quad \text{in m/s} \quad (33)$$

$$m_{\text{zul}} = 1,84 \cdot 10^6 \cdot \left(\frac{h_d}{u_n}\right)^3 \quad \text{in g} \quad (34)$$

Falls die zulässige Masse kleiner als die größte Splittermasse ist, muß mit dem Durchschlagen des Bleches gerechnet werden.

Wenn das unzulässig wäre, müßte die Blechdicke vergrößert werden.

2.5.2 Trümmer und Wurfstücke

Bei **Detonationen von Sprengstoff** in Räumen von Gebäuden muß man mit gefährlichen Wurfstücken aus dem Baukörper rechnen.

Sie können aus dem Beton des Fußbodens, aus den Stahlbetonelementen der Wände, aus stählernen Befestigungselementen des Daches, aus den Stahlbetonträgern der Deckenkonstruktion, aus den stählernen Halterungen für die Stahltüren, aus der Tür selbst, aus Werkzeugen, aus Maschinenteilen oder aus den Metallteilen der Blitzschutzanlage entstehen. Für speziellere rechnerische Abschätzungen wird auf die Literatur¹¹ verwiesen.

In Anlehnung an die angegebenen Literaturstellen wird hier nur ein einfacher Fall behandelt. Dazu wird angenommen, daß ein unbefestigtes, zylindrisches, quer zur Ladung liegendes Stahlteil durch die Stoßwelle der Explosion in der Nähe einer kugelförmigen TNT-Ladung beschleunigt wird.

¹¹ NN: Manual for the prediction of blast and fragment loadings on structures. Rep. No. DOE/TIC-11268, Aug. 1981, US Dep. of Energy, Albuquerque Operation Office, Amarillo Area Office, Amarillo, Tex.
Ayvazyan, H.; Dede, M.; Dobbs, N.; Whitney, M.; Bowles, P.; Baker, W.; Caltagirone, J. P.: Structures to resist accidental explosions. Vol. II "Blastfragment and shock loadings", Spezial Publication ARCDL-SP-84001, Dez. 1986, US Army Armament, Research, Development and Engineering Center, Armament Engineering Directorate, Dover, N. J.

Benötigte Angaben

Masse der kugelförmigen TNT-Ladung:	m_{TNT}	in	kg
Masse des zylindrischen Stahlteiles:	m_{Zyl}	in	kg
Verhältnis Länge zu Durchmesser des Stahlteiles:	λ		
Anfangsabstand des Stahlteiles zum Mittelpunkt der kugelförmigen Ladung:	R_{Zyl}	in	m
Abstand des Auftreffortes zum Detonationsort:	R_{Det}	in	m

Für die Anfangsgeschwindigkeit u_0 des Stahlteiles gilt:

$$u_0 = 1,51 \cdot \left(\frac{\lambda}{M_{\text{St}}} \right)^{0,281} \cdot \frac{m_{\text{TNT}}^{0,473}}{R_{\text{Zyl}}^{1,4}} \quad \text{in} \quad \text{m/s} \quad (35)$$

Der Gültigkeitsbereich der Formel ist auf geringe Abstände eingeschränkt:

$$R_{\text{Zyl}} \leq 0,262 \cdot \sqrt[3]{m_{\text{TNT}}} \quad \text{in} \quad \text{m} \quad (36)$$

Die Geschwindigkeit eines unregelmäßigen Körpers nimmt nach der kurzen Beschleunigungsphase beim Durchgang der Stoßwelle im Laufe der Flugzeit und Entfernung relativ schnell ab. Für die Abschätzung wird folgende Beziehung verwendet:

$$u_{\text{Zyl}} = u_0 \cdot e^{-\frac{R_{\text{Det}} - R_{\text{Zyl}}}{19,2} \cdot \sqrt[3]{\frac{\lambda}{m_{\text{Zyl}}}}} \quad \text{in} \quad \text{m/s} \quad (37)$$

Zur Abschätzung der Reichweite R_w des Stahlteiles wird zunächst die normierte Geschwindigkeit \bar{u} berechnet.

$$\bar{u} = \frac{1}{2255} \cdot \sqrt[3]{\frac{\lambda}{m_{\text{St}}}} \cdot u_0^2 \quad (38)$$

Aus den folgenden Gleichungen kann die normierte Entfernung \bar{R} abgeschätzt werden.

Für den Bereich $0,004 \leq \bar{u} \leq 0,30$ gilt:

$$\ln \bar{R} \cong -0,1852 + 0,9650 \cdot \ln \bar{u} \quad (39)$$

Für den Bereich $0,30 \leq \bar{u} \leq 1000$ gilt:

$$\ln \bar{R} \cong -0,3567 + 0,7162 \cdot \ln \bar{u} - 0,08173 \cdot (\ln \bar{u})^2 + 0,003873 \cdot (\ln \bar{u})^3 \quad (40)$$

Daraus wird die Reichweite R_w bestimmt.

$$R_w = 230 \cdot \sqrt[3]{\frac{m_{\text{St}}}{\lambda}} \cdot \bar{R} \quad \text{in} \quad \text{m} \quad (41)$$

Beim **Bersten von Behältern oder von Räumen von Bauwerken** können auch Behältertrümmer oder Gebäudetrümmer erheblich beschleunigt werden und nennenswerte Flugstrecken zuzücklegen. Es wird ein als kreisscheibenförmiges Fragment zugrunde gelegt.

Benötigte Angaben

Berstdruck des Behälters/Raumes:	p_{berst}	in	bar
Masse des Fragmentes:	m_{Frag}	in	kg
Durchmesser des Fragmentes:	D_{Frag}	in	m

Die Anfangsgeschwindigkeit u_0 kann nach der folgenden Gleichung abgeschätzt werden¹².

$$u_0 = 396 \cdot \sqrt{\frac{\left(\frac{p_{\text{berst}}}{1,01325} - 1\right) \cdot D_{\text{Frag}}^3}{m_{\text{Frag}}}} \quad \text{in m/s} \quad (42)$$

Zur Abschätzung der Reichweite R_W des Stahlteiles wird zunächst die normierte Geschwindigkeit \bar{u} berechnet.

$$\bar{u} = 0,1143 \cdot \frac{D_{\text{Frag}}^2}{m_{\text{Frag}}} \cdot u_0^2 \quad (43)$$

Aus den folgenden Gleichungen kann die normierte Entfernung \bar{R} abgeschätzt werden.

Für den Bereich $0,004 \leq \bar{u} \leq 0,30$ gilt:

$$\ln \bar{R} \cong -0,1852 + 0,9650 \cdot \ln \bar{u} \quad (44)$$

Für den Bereich $0,30 \leq \bar{u} \leq 1000$ gilt:

$$\ln \bar{R} \cong -0,3567 + 0,7162 \cdot \ln \bar{u} - 0,08173 \cdot (\ln \bar{u})^2 + 0,003873 \cdot (\ln \bar{u})^3 \quad (45)$$

Daraus wird die Reichweite R_W bestimmt.

$$R_W = 0,892 \cdot \frac{m_{\text{Frag}}}{D_{\text{Frag}}^2} \cdot \bar{R} \quad \text{in m} \quad (46)$$

¹² Center for chemical process safety of the American Institute of chemical engineers: Guidelines for Chemical Process Quantitative Risk Analysis. 345 EAST 47 th Street, New York, NY 10017

Nach Experimenten¹³ der Bundesanstalt für Materialprüfung (BAM), bei denen zu 50 % mit Propan gefüllte, 4,85 m³-Behälter durch Unterfeuerung zur Explosion gebrachte wurden (**BLEVE**), fand man noch in folgenden Entfernungen Behältertrümmer:

Entnahmerohr für Flüssigphase	370 m Entfernung
2 Teile des Behältermantels, 15 kg	400 m Entfernung

Bei **Staubexplosionen** in Gebäuden¹⁴ bis zu 30 m Höhe aus normalem Mauerwerk kann man annehmen, daß zwei Drittel der Trümmer im Abstand bis 20 m und ein Drittel zwischen 20 und 50 m zu finden wären.

Auf den Abschnitt 6.3.3 im Band II dieses Leitfadens „Berechnungsmethoden, aktuelle Modelle und Modellgleichungen zum Erarbeiten von Störfallablaufszenarien“ wird verwiesen.

2.6 Ausbreitung der Wärmestrahlung

2.6.1 Anteil der Wärmestrahlung an der Gesamtleistung bei Explosionen

Die mittlere Gesamtleistung bei der Explosion P_{ges} verteilt sich grob auf drei Anteile:

- Anteil der Wärmestrahlung: $P_{\text{Str}} = \eta_{\text{Str}} \cdot P_{\text{ges}}$ (47)
- Anteil für Druckwirkungen
- Anteil zur Erwärmung der Schwaden

Der Anteil der Strahlung ist um so höher, je höher die Feuerballtemperatur ist. Für Flüssigkeitsbrände sind Angaben für den Anteil der Wärmestrahlung¹⁵ bekannt.

Bei explosionsgefährlichen Stoffen kann ein Wert von $\eta_{\text{Str}} = 0,75$ als konservativ (überschätzend) angesehen werden.

Bei Gaswolkenexplosionen kann ein Wert von $\eta_{\text{Str}} = 0,5$ als konservativ angesehen werden.

2.6.2 Anteil der Wärmestrahlung an der Gesamtleistung bei Flüssigkeitsbränden

Die mittlere Gesamtleistung des Brandes verteilt sich grob auf drei Anteile:

¹³ BAM Bericht Nr. 1.53-01/84: Instrumentierte Brandversuche mit Flüssiggaslagertanks. Berlin 1984

¹⁴ siehe auch TAA-GS13 Leitfaden Explosionsfähige Staub/Luft-Gemische und Störfallverordnung-Teil 2: Störfallvorsorge und Anhang, Stand Oktober 1995

¹⁵ siehe auch: Committee for the Prevention of Disasters,; Methods for the calculation of physical effects. Second edition 1992, Chapter 6, Heat radiation

- Anteil der Wärmestrahlung: $P_{\text{Str}} = \eta_{\text{Str}} \cdot P_{\text{ges}}$ (48)

- Anteil für zur Erwärmung und Verdampfung des Brandgutes

- Anteil zur Erwärmung der Brandgase

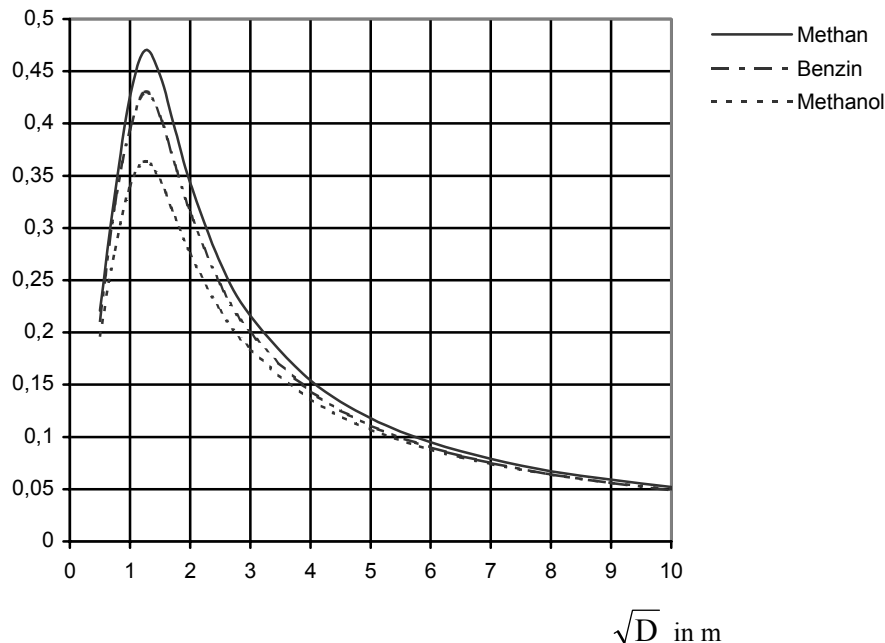
Der Anteil der Strahlung ist um so höher, je höher die Flammentemperatur ist. Für Flüssigkeitsbrände sind Angaben für den Anteil der Wärmestrahlung¹⁶ bekannt.

$$\eta_{\text{Str}} = 0,13 \text{ bis } 0,40$$

Ein Wert von $\eta_{\text{Str}} = 0,40$ kann als konservativ (überschätzend) angesehen werden.

Neuere Versuche¹⁷ mit größeren Brandflächen haben gezeigt, daß eine starke Abhängigkeit des Strahlungsanteils von der Größe der Brandfläche besteht. Von sehr kleinen Abmessungen beginnend steigt der Anteil (das Feuer wird heißer), erreicht ein Maximum und sinkt danach in Richtung eines konstanten kleinen Wertes für sehr große Brandflächen. Die Stoffeigenschaften der verschiedenen brennbaren Flüssigkeiten haben einen verhältnismäßig geringen Einfluß auf den Strahlungsanteil. Die Abbildung 2 zeigt den Zusammenhang zwischen dem Anteil η und der Quadratwurzel des Durchmessers der Brandfläche D . Dieser Zusammenhang beruht auf Modellrechnungen und wird als Hilfsmittel zur Wahl von η empfohlen.

Anteil der Strahlungsleistung η



¹⁶ siehe auch: Committee for the Prevention of Disasters: Methods for the calculation of physical effects. Second edition 1992, Chapter 6, Heat radiation

¹⁷ Committee for the Prevention of Disasters: Methods for the calculation of physical effects, Chapter 6.5.4.4 "Calculation of the Surface Emission Power". Third edition 1997

Abbildung 2: Graphische Darstellung des Zusammenhang zwischen Durchmesser der Brandfläche und dem Anteil der Strahlungsleistung η für drei Stoffe

2.6.3 Anteil der Wärmestrahlung an der Gesamtleistung bei Feststoffbränden

Die mittlere Gesamtleistung des Brandes verteilt sich grob auf drei Anteile:

- Anteil der Wärmestrahlung: $P_{\text{Str}} = \eta_{\text{Str}} \cdot P_{\text{ges}}$
- Anteil für zur Erwärmung und Verdampfung des Brandgutes
- Anteil zur Erwärmung der Brandgase

Der Anteil der Strahlung ist um so höher, je höher die Flammentemperatur ist. Für Flüssigkeitsbrände sind Angaben für den Anteil der Wärmestrahlung¹⁸ bekannt. Unter der Voraussetzung, daß die Flammentemperatur bei Flüssigkeitsbränden höher als bei Feststoffbränden ist, kann ein Wert von $\eta_{\text{Str}} = 0,35$ kann als konservativ (überschätzend) angesehen werden.

2.6.4 Punktquelle für Wärmestrahlung

Die gesamte Strahlungsleistung eines Punktstrahlers wird durch konzentrische Kugelflächen um den Punktstrahler gleichmäßig verteilt abgestrahlt.

Wenn der Abstand der Kugelfläche r ist, muß für die flächenspezifische Wärmeleistung durch die Kugelfläche gelten:

$$P''_{\text{Str}} = \frac{P_{\text{Str}}}{4\pi \cdot r^2} \quad (49)$$

Der Abstand r muß plausibel angenommen werden. Bei Explosionen von explosionsgefährlichen Stoffen oder von explosionsfähiger Atmosphäre in Räumen und Behältern kann die Punktquelle beispielsweise in der geometrischen Mitte der „Ladung“ plaziert werden.

Bei Explosionen im Freien sind Überlegungen gesondert erforderlich. Vergleiche auch die Beispiele im Anhang 5, Abschnitt 7.

Das Modell eignet sich besonders für den Fall eines Feuerballs bei Explosionen. Es kann aber auch bei Bränden, bei denen sich die Flammen durch die Form einer Kugel näherungsweise beschreiben lassen, angewendet werden.

¹⁸ siehe auch: Committee for the Prevention of Disasters: Methods for the calculation of physical effects. Second edition 1992, Chapter 6, Heat radiation

In Entfernungen, die gegenüber den Abmessungen eines geometrisch beliebig geformten Strahlers groß sind, kann der Punktstrahler stets als gute Näherung verwendet werden.

2.6.4.1 Halbkugelförmiger Strahler

Flüssigkeiten und Feststoffe brennen häufig auf Flächen am Boden. Die Anordnung der strahlenden Flammen am Boden ist durch die Form der Brandfläche gegeben.

In der Regel schlagen die Flammen bei voll entwickelten Bränden mindestens einige Meter hoch.

Wenn die strahlenden Flammen annähernd durch eine Halbkugel beschrieben werden können, kann die flächenspezifische Strahlungsleistung im Minimum (in der Halbebene am Boden) näherungsweise als die Hälfte der Strahlung des kugelförmigen Strahlers angenommen werden. Bei realen Bränden wird sich daher in Abhängigkeit von der Form der strahlenden Flammen und von der Höhe der bestrahlten Fläche eine um einen Faktor ζ reduzierte flächenspezifische Strahlungsleistung einstellen.

$$P''_{\text{Str,red}} = \zeta \cdot \frac{P_{\text{Str}}}{4\pi \cdot r^2} \quad \text{mit} \quad \zeta = 0,5 \text{ bis } 1 \quad (50)$$

2.6.5 Absorption der Wärmestrahlung in der Atmosphäre

Ein Teil der Wärmestrahlung wird in der Atmosphäre auf dem Weg der Strahlung absorbiert. Als absorbierende Anteile der Atmosphäre werden insbesondere Wasserdampf und Kohlendioxid genannt.

Die Reduzierung wird durch einen weiteren Faktor τ_a (atmospheric transmissivity) in Abhängigkeit von der Entfernung und den Konzentrationen der absorbierenden Stoffe in der Atmosphäre berücksichtigt.

$$P''_{\text{Str,red,red}} = \tau_a \cdot \zeta \cdot \frac{P_{\text{Str}}}{4\pi \cdot r^2} \quad \text{mit} \quad \tau_a = 0,5 \text{ bis } 1 \quad (51)$$

2.6.6 Weiterführende Modelle

Die bisherigen Ausführungen in diesem Abschnitt „Ausbreitung der Wärmestrahlung“ sind gegenüber der Wirklichkeit und den bekannten Modellen auf einige wesentliche Aspekte begrenzt worden.

Zu weiterführenden Modellen wird auf die Literatur verwiesen¹⁹. Insbesondere wird auf den Abschnitt 5.1 im Band II dieses Leitfadens „Berechnungsmethoden, aktuelle Modelle und Modellgleichungen zum Erarbeiten von Störfallablaufszszenarien“ verwiesen.

¹⁹ beispielsweise: Committee for the Prevention of Disasters: Methods for the calculation of physical effects. Second edition 1992, Chapter 6, Heat radiation
VDI Wärmeatlas, 8. überarbeitete und erweiterte Auflage, A 33 bis A 35

Es zeigt sich aber, daß eine Vielzahl von Eingangsinformationen zu berücksichtigen sind und die benötigten Eingangsinformationen häufig nur für die speziellen Szenarien unter bestimmten Gesichtspunkten gemachte Annahmen sind.

Deshalb ist es hier zweckmäßig, mit den Punktmodellen eine einfache, konservative Abschätzung vorzunehmen.

2.7 Ausbreitung von Druckwellen

2.7.1 Detonationen von explosionsgefährlichen Stoffen

Bei der Detonation von explosionsgefährlichen Stoffen kommt es in der Nähe der explodierenden Ladung zu einem extrem schnellen und hohen Druckanstieg. Dadurch wird eine Schockwelle, die sich zunächst mit Überschallgeschwindigkeit ausbreitet, ausgelöst. In der Nähe der Ladung kann die Detonation durch die Schockwelle auf andere wenig geschützte oder frei liegende Ladungen übertragen werden (sympathetische Detonation).

Übertragungsabstand

Der Übertragungsabstand R_{symp} kann abgeschätzt werden. Wenn m_{TNT} die zu TNT äquivalente Masse des Sprengstoffes ist, gilt als Abschätzung:

$$R_{\text{symp}} < 0,6 \cdot \sqrt[3]{m_{\text{TNT}}} \quad \text{in} \quad \text{m} \quad (52)$$

Die Masse ist in kg einzugeben.

Spitzenüberdruck

In größerer Entfernung breitet sich eine gewöhnliche Stoßwelle mit Schallgeschwindigkeit aus. Hier wird diese gewöhnliche Stoßwelle in größerer Entfernung R_{Ladung} von der Ladung betrachtet. Die folgenden Gleichungen stützen sich auf Graphiken in einem Forschungsbericht²⁰ des Umweltbundesamtes (UBA).

Es wird die folgende Abkürzung verwendet. R ist die Entfernung zur Ladung.

$$k = \frac{R_{\text{Ladung}}}{\sqrt[3]{m_{\text{TNT}}}} \quad \text{in} \quad \frac{\text{m}}{\sqrt[3]{\text{kg}}} \quad (53)$$

²⁰ BAM: "Mustersicherheitsanalyse nach Störfall-Verordnung für ein Sprengstofffabrik" UBA-FB 92-026 Forschungsbericht 104 09 211, 1992

Für eine **halbkugelförmige Ladung am Boden** im Freien gilt näherungsweise für den Spitzenüberdruck Δp in Ausbreitungsrichtung:

$$\Delta p = e^{2,526 - 2,477 \cdot \ln k + 0,2599 \cdot (\ln k)^2 - 0,01304 \cdot (\ln k)^3} \quad \text{in} \quad \text{bar} \quad (54)$$

Für ein quadratisches Gebäude mit einer Ausblasewand kann man den Überdruck richtungsabhängig abschätzen.

Richtung Ausblasewand bei schwerer Dachausführung:

$$\Delta p = e^{3,76 - 2,45 \cdot \ln k + 0,143 \cdot (\ln k)^2} \quad \text{in} \quad \text{bar} \quad (55)$$

Richtung Ausblasewand ohne schwere Dachausführung:

$$\Delta p = e^{3,25 - 2,40 \cdot \ln k + 0,163 \cdot (\ln k)^2} \quad \text{in} \quad \text{bar} \quad (56)$$

Richtung Rückwand bei schwerer Dachausführung:

$$\Delta p = e^{1,63 - 1,69 \cdot \ln k - 0,041 \cdot (\ln k)^2} \quad \text{in} \quad \text{bar} \quad (57)$$

Richtung Rückwand ohne schwere Dachausführung:

$$\Delta p = e^{1,83 - 1,77 \cdot \ln k + 0,0471 \cdot (\ln k)^2} \quad \text{in} \quad \text{bar} \quad (58)$$

Richtung Seitenwände bei schwerer Dachausführung:

$$\Delta p = e^{2,29 - 2,04 \cdot \ln k + 0,106 \cdot (\ln k)^2} \quad \text{in} \quad \text{bar} \quad (59)$$

Richtung Seitenwände ohne schwere Dachausführung:

$$\Delta p = e^{2,30 - 1,97 \cdot \ln k + 0,100 \cdot (\ln k)^2} \quad \text{in} \quad \text{bar} \quad (60)$$

2.7.2 Explosionsfähige Atmosphäre in Behältern und Räumen

In den Abschnitten 1.2.3 und 1.2.6 im Anhang 1 ist angegeben, wie eine äquivalente TNT-Masse m_{TNT} abgeschätzt werden kann.

In nicht zu kleinen Entfernungen können die Abschätzungen des vorigen Abschnittes grobe Werte für den Spitzenüberdruck in Abhängigkeit von der Entfernung liefern.

2.7.3 Explosionsfähige Atmosphäre im Freien (Freistrah, UVCE)

In Anlehnung an das Schockwellenmodell der TNO²¹ werden zur Abschätzung der Überdruckes Δp in Abhängigkeit von der Entfernung ΔR vom Wolkenrand (Untere Explosionsgrenze) folgende Formeln verwendet. Auf die Abschnitte 13 und 14 im Anhang 4 wird verwiesen.

Benötigte Angaben

Stoffbezeichnung		
Stoffeigenschaft Reactivity:	Hoch oder Mittel oder Niedrig	
Spezifische Verbrennungswärme:	h_c	in MJ/kg
Gas/Dampfmenge zwischen den Explosionsgrenzen:	m_{ExUVCE}	in kg
Abstand zur Zündentfernung, die durch die untere Zündgrenze bestimmt ist:	ΔR	in m
Maximaler Spitzenüberdruck an der Wolkengrenze:	$\Delta p_{\text{max}} = 0,5 \text{ bar}$	

Reactivity Hoch:
$$\frac{1}{\Delta p} = 2 + \frac{\Delta R}{0,15 \cdot \sqrt[3]{10 \cdot h_c \cdot m_{\text{ExUVCE}}}} \quad \text{in bar}^{-1} \quad (61)$$

Reactivity Mittel:
$$\frac{1}{\Delta p} = 2 + \frac{\Delta R}{\eta \cdot \sqrt[3]{10 \cdot h_c \cdot m_{\text{ExUVCE}}}} \quad \text{in bar}^{-1} \quad (62)$$

Falls $h_c \cdot m_{\text{ExUVCE}} > 800$ gilt, ist $\eta = 0,06$ zu verwenden.

Andernfalls werden die korrigierte Flammengeschwindigkeit und daraus η berechnet.

$$u_f = 80 \cdot \sqrt[6]{\frac{h_c \cdot m_{\text{ExUVCE}}}{800}} \quad \text{in m/s} \quad (63)$$

$$\eta = 10^{-4} \cdot u_f \cdot (1,458 + 0,1016 \cdot u_f - 0,0003255 \cdot u_f^2) \quad (64)$$

Reactivity Niedrig:
$$\frac{1}{\Delta p} = 2 + \frac{\Delta R}{\eta \cdot \sqrt[3]{10 \cdot h_c \cdot m_{\text{ExUVCE}}}} \quad \text{in 1/bar} \quad (65)$$

Falls $h_c \cdot m_{\text{ExUVCE}} > 800$ gilt, ist $\eta = 0,02$ zu verwenden.

Andernfalls werden die korrigierte Flammengeschwindigkeit und daraus η nach Gleichung (64) berechnet.

$$u_f = 40 \cdot \sqrt[6]{\frac{h_c \cdot m_{\text{ExUVCE}}}{800}} \quad \text{in m/s} \quad (66)$$

²¹ Vgl. Committee for the Prevention of Disasters: Methods for the calculation of physical effects. Second edition 1992, Chapter 8, Vapour cloud explosion

2.7.4 Unterfeuerte Flüssiggasbehälter im Freien (BLEVE)

In Anlehnung an das Schockwellenmodell der TNO mit adiabatischer Expansion²² wird zur Abschätzung des Überdruckes Δp in Abhängigkeit von der Entfernung R_{BLEVE} von der Behältermitte folgende Formel verwendet:

Benötigte Angaben

Stoffbezeichnung

Spezifische Verbrennungswärme:

Menge an Flüssigphase im Behälter vor dem Bersten:

Spitzenüberdruck:

h_c in MJ/kg

m_{BLEVE} in kg

Δp in bar

$$R_{\text{BLEVE}} \leq \frac{\sqrt[3]{h_c \cdot m_{\text{BLEVE}}}}{3,084} \cdot e^{-\left(\frac{\ln(\Delta p)}{1,519} + \frac{\ln^2(\Delta p)}{114}\right)} \quad \text{in m} \quad (67)$$

Auf den Abschnitt 15 im Anhang 4 wird verwiesen.

²² Vgl. Committee for the Prevention of Disasters: Methods for the calculation of physical effects. Second edition 1992, Chapter 9, Rupture of vessels