



<u>Veranstaltung:</u>	B-IV
<u>Ausbildungseinheit:</u>	Brand- und Löschlehre
<u>Thema:</u>	Übungsaufgaben (Lösungen)
<u>Ausgabe:</u>	01.06.2018
<u>Zuständig:</u>	Abteilung 3
<u>Bearbeitet von:</u>	Martin Reitz Catherina Volk
<u>Literaturhinweis:</u>	Lernunterlage Brandlehre B-IV Lernunterlage Löschlehre B-IV



## Inhalt

1	Heizwert von Methanol .....	2
2	Erwärmung von Polyethylen und Blei .....	3
3	Verdunstung von 1-Butanol, Ethanol, Cyclohexan .....	4
4	Verdunstung von Methanol .....	4
5	Dampfdichte von Trichlorpenten .....	5
6	Flüssiggas-Kesselwagen - Gasvolumen .....	6
7	Oehley-Formel, Brennbarkeit, Flammpunkt, UEG .....	7
8	Spezifische Abbrandgeschwindigkeit von Dieselkraftstoff .....	8
9	Inertisieren von Methanoldämpfen .....	9
10	Flüssiggas-Kesselwagen - Ex-Bereich .....	10
11	Methanal-Verdampfung, zündwilliges Gemisch .....	12
12	Verbrennung von Magnesiumstaub in Luft .....	14
13	Wärmemenge und Brandintensität von Diethylether .....	14
14	Wärmefreisetzung bei einem Zimmerbrand .....	15
15	Verbrennung von PVC .....	16
16	Kühlleistung eines DM-Strahlrohres .....	17
17	Rauchkühlung .....	18
18	Schaumeinsatz - Löschzug .....	19
19	Brandbekämpfung mit Schaum und Kühlung .....	20
20	CO <sub>2</sub> -Löschanlage .....	22

## 1 Heizwert von Methanol

Berechnen Sie die bei der Verbrennung von Methanol freiwerdende Reaktionsenthalpie. Bildungsenthalpien kann man Nachschlagewerken entnehmen, z. B. Tafelwerk (s. Seite 63 ff). Dort findet man folgende Werte:

$$H_{B, \text{Methanol}} = - 239 \text{ kJ/mol}$$

$$H_{B, \text{Kohlendioxid}} = - 394 \text{ kJ/mol}$$

$$H_{B, \text{Wasserdampf}} = - 242 \text{ kJ/mol}$$

Für Sauerstoff ist  $H_B = 0$ , da es sich um ein Element in seiner stabilsten Form handelt. Vergleichen Sie den ermittelten Wert mit dem Heizwert von Methanol

$H_{i, \text{Methanol}} = 19,9 \text{ MJ/kg}$  (z. B. aus Hamberger: „Sicherheitstechnische Kennzahlen“).

Lösung:



Reaktionsenthalpie = Summe der Bindungsenergien der Produkte - Summe der Bindungsenergien der Edukte

$$\Delta H = \Delta H_{B, P} - \Delta H_{B, E}$$

$$= - 394 \text{ kJ/mol} + 2 \cdot (- 242) \text{ kJ/mol} - - 239 \text{ kJ/mol}$$

$$= - 639 \text{ kJ/mol}$$

mit der molaren Masse von Methanol  $M_{\text{CH}_3\text{OH}} = 32 \text{ g/mol}$ :

$$\Delta H = - 19,97 \text{ kJ/g} \quad \text{oder} \quad \Delta H = -19970 \text{ kJ/kg}$$

$$\Delta H \approx - 19,970 \text{ MJ/kg}$$

Es wird eine Reaktionsenthalpie von 19,97 MJ/kg freigesetzt.

Diese Wärmemenge, die bei der vollständigen Verbrennung von  $m = 1 \text{ kg}$  eines Stoffes freigesetzt wird, bezeichnet man als Heizwert.

Tabellenwert (z. B. Hamberger, „Sicherheitstechnische Kennzahlen“):

$$H_{i, \text{Methanol}} = 19,9 \text{ MJ/kg}$$

## 2 Erwärmung von Polyethylen und Blei

Ermitteln Sie die Endtemperatur von  $m = 251\text{ g}$  Polyethylen ( $c = 2,4\text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$ ) und der gleichen Masse Blei ( $c = 0,13\text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$ ) mit der einheitlichen Ausgangstemperatur von  $21\text{ }^{\circ}\text{C}$ , wenn beiden Stoffen eine Wärmemenge von jeweils  $10\text{ kJ}$  zugeführt wird.

Lösung:

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta\vartheta$$

Polyethylen:

$$\Delta\vartheta = \frac{Q}{m \cdot c} = \frac{10\text{ kJ}}{251\text{ g} \cdot 2,4\frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}} = \frac{10\text{ kg} \cdot \text{K}}{0,251\text{ kg} \cdot 2,4} = 16,6\text{ K}$$

Endtemperatur = Ausgangstemperatur + Temperaturänderung

$$\vartheta_{\text{End}} = 21\text{ }^{\circ}\text{C} + 16,6\text{ }^{\circ}\text{C} = 37,6\text{ }^{\circ}\text{C}$$

Blei:

$$\Delta\vartheta = \frac{Q}{m \cdot c} = \frac{10\text{ kJ}}{0,251\text{ kg} \cdot 0,13\frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}} = 306,5\text{ K}$$

$$\vartheta_{\text{End}} = 21\text{ }^{\circ}\text{C} + 306,5\text{ }^{\circ}\text{C} = 327,5\text{ }^{\circ}\text{C}$$

Die Endtemperaturen betragen  $37,6\text{ }^{\circ}\text{C}$  (Polyethylen) und  $327,5\text{ }^{\circ}\text{C}$  (Blei).

Damit wird die Schmelztemperatur von Blei erreicht und es beginnt zu schmelzen.

Bei Stoffen mit niedriger spezifischer Wärmekapazität  $c$  ist u. U. schnell die Schmelztemperatur erreicht (Blei schmilzt bei Kerzenflamme, s. Bleigießen).

Blei findet sich u. a. an Einsatzstellen mit radioaktiven Stoffen als Abschirmmaterial.

### 3 Verdunstung von 1-Butanol, Ethanol, Cyclohexanol

Wievielmals schneller bzw. langsamer verdunstet 1-Butanol (VZ = 33,0) im Vergleich zu folgenden Flüssigkeiten?

Ethanol (VZ = 8,3)

Cyclohexanol (VZ = 400,0)

Lösung:

$$\frac{400}{33} = 12 ; \text{ d. h. 1-Butanol verdunstet 12-mal schneller als Cyclohexanol.}$$

$$\frac{33}{8,3} = 4 ; \text{ d. h. 1-Butanol verdunstet 4-mal langsamer als Ethanol.}$$

### 4 Verdunstung von Methanol

Auf einer Fläche von 7,5 m<sup>2</sup> verdunsten 8,3 l Methanol bei 20 °C. Nach welcher Zeit ist die Verdunstung beendet ( $l_v = 15 \text{ g/m}^2 \cdot \text{min}$ ,  $\rho_{\text{Methanol}} = 0,79 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$ )?

Lösung:

$$l_v = \frac{m_{\text{FI}}}{A_{\text{FI}} \cdot t} \quad m_{\text{FI}} = \rho \cdot V = 0,79 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \cdot 8300 \text{ cm}^3$$

$$= 6557 \text{ g}$$

$$>> t = \frac{m_{\text{FI}}}{A_{\text{FI}} \cdot l_v} = \frac{6557 \text{ g} \cdot \text{min}}{7,5 \text{ m}^2 \cdot 15 \frac{\text{g}}{\text{m}^2}}$$

$$= 58,28 \text{ min}$$

$$= 58 \text{ min } 17 \text{ s}$$

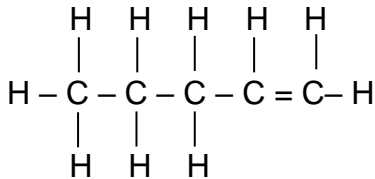
Die Verdunstung ist nach 58,28 min beendet.

## 5 Dampfdichte von Trichlorpentenen

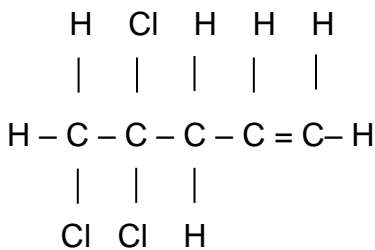
Gegeben ist die Flüssigkeit Trichlorpentenen.

- Wie groß ist die Dampfdichte?
- Wievielmals schwerer sind die Dämpfe im Vergleich zu Luft?

Lösung:



Penten  $\text{C}_5\text{H}_{10}$



Trichlorpentenen  $\text{C}_5\text{H}_7\text{Cl}_3$

a)  $\text{C}_5\text{H}_7\text{Cl}_3$   
 $M = (5 \cdot 12 + 7 \cdot 1 + 3 \cdot 35,5) \text{ g/mol} = 173,5 \text{ g/mol}$

$$\rho = \frac{173,5 \text{ g/mol}}{22,4 \text{ l/mol}} = 7,75 \text{ g/l}$$

Die Dampfdichte beträgt 7,75 g/l.

b)  $\rho_{\text{Luft}} = 1,29 \text{ g/l}$        $n = \frac{7,75 \text{ g/l}}{1,29 \text{ g/l}} = 6$

oder:  $n = \frac{173,5}{29} = 5,98$

Der Dampf von Trichlorpentenen ist ca. 6-mal schwerer als Luft.

## 6 Flüssiggas-Kesselwagen - Gasvolumen

Aus einem Flüssiggas-Kesselwagen treten 19.000 Liter Propan ( $C_3H_8$ ) aus.

Wie groß ist das Gasvolumen nach Verdampfung des Flüssiggases?

Entwickeln Sie eine Faustformel zur Abschätzung des Gasvolumens pro kg bzw. pro l verdampftem Flüssiggas.

Lösung:

$\rho_{\text{Propan}} = 2,019 \text{ g/l}$  gasförmig

$\rho_{\text{Propan}} = 0,53 \text{ kg/l}$  flüssig

Bestimmung Masse Propan:  $m = \rho_{(l)} \cdot V$

$$= 0,53 \frac{\text{kg}}{\text{l}} \cdot 19.000 \text{ l}$$

$$= 10.070 \text{ kg}$$

$C_3H_8$



$$3 \cdot 12 + 8 \cdot 1 = 44 \text{ g/mol}$$

$$44 \text{ g} \cong 22,4 \text{ l}$$

$$44 \text{ kg} \cong 22,4 \text{ m}^3$$

$$10.070 \text{ kg} \cong x$$

$$x = \frac{10.070 \text{ kg} \cdot 22,4 \text{ m}^3}{44 \text{ kg}} = 5127 \text{ m}^3$$

Es entstehen ca. 5.000 m<sup>3</sup> Propan in der Gasphase.

Faustformel:  $V_{\text{Fl}} = 19.000 \text{ l} \rightarrow m_{\text{Fl}} = 10.070 \text{ kg} \rightarrow V_{\text{g}} = 5.000 \text{ m}^3$

$$V_{\text{Fl}} = 2 \text{ l} \rightarrow m_{\text{Fl}} = 1 \text{ kg} \rightarrow V_{\text{g}} = 500 \text{ l} = 0,5 \text{ m}^3$$



## 7 Oehley-Formel, Brennbarkeit, Flammpunkt, UEG

Schätzen Sie mit Hilfe der Oehley-Formel ab, ob die folgenden Stoffe brennbar sind. Ermitteln Sie ferner die Untere Explosionsgrenze und den Flammpunkt mit den Formeln zu UEG und  $T_{FI}$  und vergleichen Sie Ihre Ergebnisse mit tatsächlichen Werten:

**Toluol  $C_6H_5CH_3 \rightarrow C_7H_8$  (Siedepunkt: 110 °C)**  
Literaturwerte: UEG = 1,2 Vol.-%;  $T_{FI}$  = 6 °C

**Aceton  $(CH_3)_2CO \rightarrow C_3H_6O$  (Siedepunkt: 56 °C)**  
Literaturwerte: UEG = 2,5 Vol.-%;  $T_{FI}$  = -19 °C

**Schwefelkohlenstoff  $\rightarrow CS_2$  (Siedepunkt: 46 °C)**  
Literaturwerte: UEG = 1,0 Vol.-%;  $T_{FI}$  < -20 °C

Lösung:

Toluol:  $C_6H_5CH_3 \rightarrow C_7H_8$  Siedepunkt: 110°C

$K = 4 \cdot 7 + 1 \cdot 8 + 4 \cdot 0 - 1 \cdot 0 - 2 \cdot 0 - 2 \cdot 0 - 3 \cdot 0 - 5 \cdot 0 = \underline{36} \rightarrow$  brennbar

UEG =  $^{44}/_{36} = \underline{1,22 \text{ Vol.-%}}$  (Literaturwert: 1,2 Vol.-%)

$T_{FI} = 110 - 18 \sqrt{36} = \underline{2^\circ C}$  (Literaturwert: 6°C)

Aceton:  $(CH_3)_2CO \rightarrow C_3H_6O$  Siedepunkt: 56°C

$K = 4 \cdot 3 + 1 \cdot 6 - 2 \cdot 1 = \underline{16} \rightarrow$  brennbar

UEG =  $^{44}/_{16} = \underline{2,75 \text{ Vol.-%}}$  (Literaturwert: 2,5 Vol.-%)

$T_{FI} = 56 - 18 \sqrt{16} = \underline{-16^\circ C}$  (Literaturwert: -19 °C)

Schwefelkohlenstoff  $CS_2$  Siedepunkt: 46°C

$K = 4 \cdot 1 + 4 \cdot 2 = \underline{12} \rightarrow$  brennbar

UEG =  $^{44}/_{12} = \underline{3,6 \text{ Vol.-%}}$  (Literaturwert: 1,0 Vol.-%)

$T_{FI} = 46 - 18 \sqrt{12} = \underline{-16^\circ C}$  (Literaturwert: <-20 °C)

## 8 Spezifische Abbrandgeschwindigkeit von Dieselkraftstoff

In einem quaderförmigen Behälter mit einer Grundfläche von 300 dm<sup>2</sup> verbrennt Dieselkraftstoff. Während einer Branddauer von 0,35 h verringert sich der Flüssigkeitsstand im Behälter auf 96 % des Ausgangswertes von 1,25 m. Die Flüssigkeitsdichte beträgt 0,87 g/ml.

Wie groß ist die spezifische Abbrandgeschwindigkeit (kg/m<sup>2</sup> · min)?

Lösung:

$$v_{ab} = \frac{m_{BS}}{A_{Brd} \cdot t_{Brd}}$$

$$\rho_{BS} = 0,87 \frac{\text{kg}}{\text{l}} = 870 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$100 \% \hat{=} 1,25 \text{ m}$$

$$96 \% \hat{=} x \text{ m}$$

$$x = \frac{96 \% \cdot 1,25 \text{ m}}{100 \%} = 1,2 \text{ m}$$

$$1 \text{ h} \hat{=} 60 \text{ min}$$

$$0,35 \text{ h} \hat{=} x \text{ min}$$

$$x = \frac{0,35 \text{ h} \cdot 60 \text{ min}}{1 \text{ h}} = 21 \text{ min}$$

$$h = 1,25 \text{ m} - 1,2 \text{ m} = 0,05 \text{ m}$$

$$m_{BS} = \rho_{BS} \cdot V = \rho_{BS} \cdot A_{Brd} \cdot h$$

$$\Rightarrow v_{ab} = \frac{\rho_{BS} \cdot A_{Brd} \cdot h}{A_{Brd} \cdot t_{Brd}} = \frac{870 \text{ kg} \cdot 0,05 \text{ m}}{\text{m}^2 \cdot 21 \text{ min}} = 2,07 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \cdot \text{min}}$$

Die spezifische Abbrandgeschwindigkeit beträgt 2,07 kg/m<sup>2</sup> · min.

## 9 Inertisieren von Methanoldämpfen

In einem Reaktionsgefäß ( $V = 5,35 \text{ m}^3$ ) befindet sich ein Methanoldampf-Luft-Gemisch mit einem Methanolgehalt von 27 Vol.-%.

Wie viel Liter bzw. kg  $\text{CO}_2$  müssen in das Gefäß geleitet werden, um die zur Inertisierung erforderliche Sauerstoffkonzentration von 12 Vol.-% zu erreichen?  
(Hinweis: Vernachlässigen Sie den durch die Inertisierung erfolgten Druckaufbau)

Lösung:

In dem Behälter befinden sich

$$100 \% \hat{=} 5,35 \text{ m}^3$$

$$27 \% \hat{=} x \text{ m}^3$$

$$x = \frac{27 \% \cdot 5,35 \text{ m}^3}{100 \%} = 1,445 \text{ m}^3 \text{ Methanoldampf} \quad \text{und } (5,35 - 1,445) \text{ m}^3 = 3,905 \text{ m}^3 \text{ Luft.}$$

Von den  $3,905 \text{ m}^3$  Luft sind 21 Vol.-% Sauerstoff:

$$100 \% \hat{=} 3,905 \text{ m}^3$$

$$21 \% \hat{=} x$$

$$x = \frac{21 \% \cdot 3,905 \text{ m}^3}{100 \%} = 0,82005 \text{ m}^3 \text{ Sauerstoff sind aktuell in dem Behälter.}$$

Auf das gesamte Behältervolumen berechnet entspricht dies:

$$5,35 \text{ m}^3 \hat{=} 100 \%$$

$$0,8205 \text{ m}^3 \hat{=} x$$

$$x = \frac{0,8205 \text{ m}^3 \cdot 100 \%}{5,35 \text{ m}^3} = 15,33 \text{ Vol.-% Sauerstoff}$$

Im Behälter sind 15,33 Vol.-% Sauerstoff enthalten. Diese Konzentration soll auf 12 Vol.-% reduziert werden.

Um 12 Vol.-% Sauerstoff zu erreichen, muss der Sauerstoffgehalt auf

$$\frac{12 \text{ Vol.-%}}{15,3 \text{ Vol.-%}} = 0,784 = 78,4 \% \text{ der ursprünglichen Konzentration gesenkt werden.}$$

Also müssen 21,6 %  $\text{CO}_2$  eingeleitet werden.

Da das  $\text{CO}_2$  aber nicht nur Sauerstoff verdrängt, müssen auf das gesamte Raumvolumen 21,6 %  $\text{CO}_2$  eingeleitet werden.

d. h.  $V = 1.160 \text{ l}$  oder  $1,16 \text{ m}^3 \text{ CO}_2$  müssen eingeleitet werden.

$$\rho_{\text{CO}_2} = \frac{44 \text{ g}}{22,4 \text{ l}} = 1,96 \text{ g/l} = 1,96 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$m = \rho \cdot V = 1,96 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 1,16 \text{ m}^3 = 2,27 \text{ kg}$$

Es müssen  $1.160 \text{ l}$  bzw.  $2,27 \text{ kg CO}_2$  eingeleitet werden.

## 10 Flüssiggas-Kesselwagen - Ex-Bereich

Aus einem Flüssiggas-Kesselwagen treten 19.000 Liter Propan ( $C_3H_8$ ) aus.

- Wie groß ist das Volumen des explosiblen Gas-Luft-Gemisches, wenn durch Luftzutritt eine Verdünnung des Propan bis auf eine Konzentration von 5 Vol.-% (ca. Mitte des Ex-Bereichs) erfolgt?
- Ergänzen Sie die bereits entwickelte Faustformel zur Abschätzung des Gasvolumens um eine Abschätzung der entstehenden Ex.-Atmosphäre pro kg bzw. pro l verdampftem Flüssiggas.
- Berechnen Sie die kreisförmige Ausdehnung (Angabe von Radius oder Durchmesser) des Ex-Bereiches um den Kesselwagen bei einer angenommenen Schichtungshöhe von  $h = 0,5 \text{ m}$ .
- Ermitteln Sie die Größe des Feuerballs nach einer Zündung des explosionsfähigen Gemisches, wenn dieses auf eine Flammentemperatur von  $\vartheta = 1.300 \text{ °C}$  erwärmt wird.

Lösung:

- Aus  $V = 19.000 \text{ l}$  flüssigem Propan entstehen  $V = 5.127 \text{ m}^3$  gasförmiges Propan. Durch Vermischung mit Luft entsteht eine explosionsfähige Atmosphäre.

$$\begin{aligned} 5 \text{ Vol.-%} &\hat{=} 5.127 \text{ m}^3 \\ 100 \text{ Vol.-%} &\hat{=} x \\ x &= \frac{100 \text{ Vol.-%} \cdot 5.127 \text{ m}^3}{5 \text{ Vol.-%}} = 102.540 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

Es entstehen  $V_{\text{Ex}} = 102.540 \text{ m}^3$  explosionsfähige Atmosphäre.

- Faustformel:  
 $V_{\text{Fl}} = 19.000 \text{ l} \rightarrow m_{\text{Fl}} = 10.070 \text{ kg} \rightarrow V_{\text{g}} = 5.127 \text{ m}^3 \rightarrow V_{\text{Ex}} = 102.540 \text{ m}^3$

$$V_{\text{Fl}} = 2 \text{ l} \rightarrow m_{\text{Fl}} = 1 \text{ kg} \rightarrow V_{\text{g}} = 500 \text{ l} = 0,5 \text{ m}^3 \rightarrow V_{\text{Ex}} = 10 \text{ m}^3$$

- $V = 102.540 \text{ m}^3$

$$V = A \cdot h = \pi \cdot r^2 \cdot h$$

$$\Rightarrow r^2 = \frac{V}{\pi \cdot h} = \frac{102.540 \text{ m}^3}{\pi \cdot 0,5 \text{ m}} = 65.278,9 \text{ m}^2$$

$$r = \sqrt{65.279 \text{ m}^2} = 255,5 \text{ m} \text{ bzw. } \varnothing = 511 \text{ m}$$

Der Radius beträgt 255,5 m.

- Volumenvergrößerung durch Temperaturerhöhung

$$\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2} \quad V_2 = \frac{V_1 \cdot T_2}{T_1} = \frac{102.540 \text{ m}^3 \cdot 1.573 \text{ K}}{273 \text{ K}} = 590.825,7 \text{ m}^3$$

$$V = \frac{4 \pi r^3}{3}$$

$$r = \sqrt[3]{\frac{3 V}{4 \pi}} = \sqrt[3]{\frac{3}{4} \cdot \frac{590.825,7 \text{ m}^3}{3,14}} = 52,05 \text{ m}$$

Der Feuerball hat einen Radius von ca. 52 m.

## 11 Methanal-Verdampfung, zündwilliges Gemisch

In einem Raum (nicht gasdicht, Volumen  $V = 375 \text{ m}^3$ ) verdunsten bei  $25 \text{ °C}$  75 Liter Methanal (UEG = 7 Vol.-%, OEG = 73 Vol.-%,  $\rho = 0,815 \text{ g/cm}^3$ ) vollständig. Die Dämpfe verteilen sich verlustlos gleichmäßig im Raum.

- Nach welcher Zeit hat sich im Raum erstmalig ein zündwilliges Dampf-Luft-Gemisch gebildet (Verdunstungsfläche =  $3,5 \text{ m}^2$ ,  $I_V = 22,5 \text{ g/m}^2 \cdot \text{min}$ )?
- Liegt nach beendeter Verdunstung ein zündwilliges Dampf-Luft-Gemisch vor?
- Welche Zeit wird für die vollständige Verdunstung benötigt?

Lösung:

- Zum Erreichen der UEG müssten 7 % von  $375 \text{ m}^3$  bei  $25 \text{ °C}$  mit Methanaldampf vorliegen.

$$7 \% \text{ von } 375 \text{ m}^3 = 26,25 \text{ m}^3 \text{ bei } 25 \text{ °C}$$

Bei  $0 \text{ °C}$  (Umsetzung auf Normbedingungen) entspräche dies:

$$V_2 = \frac{V_1 \cdot T_2}{T_1} = \frac{26,25 \text{ m}^3 \cdot 273 \text{ K}}{298 \text{ K}} = 24,05 \text{ m}^3$$

$$M_{\text{CH}_2\text{O}} = 30 \text{ g/mol} \quad \text{bei } 0 \text{ °C}$$

$$22,4 \text{ l} \hat{=} 30 \text{ g}$$

$$22,4 \text{ m}^3 \hat{=} 30 \text{ kg}$$

$$24,05 \text{ m}^3 \hat{=} x$$

$$x = \frac{24,05 \text{ m}^3 \cdot 30 \text{ kg}}{22,4 \text{ l}} = 32,21 \text{ kg mit } \rho = 0,815 \frac{\text{kg}}{\text{l}}$$

$$V = \frac{m}{\rho} = \frac{32,21 \text{ kg} \cdot \text{l}}{0,815 \text{ kg}} = 39,51 \text{ l}$$

Um  $V = 24,05 \text{ m}^3$  Methanaldämpfe zu erhalten, müssten  $m = 32,21 \text{ kg}$  oder  $V = 39,51 \text{ l}$  Methanal verdampfen:

$$I_V = \frac{m_{\text{FI}}}{A_{\text{FI}} \cdot t}$$

$$t = \frac{m_{\text{FI}}}{I_V \cdot A_{\text{FI}}} = \frac{32,21 \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{min}}{22,5 \text{ g} \cdot 3,5 \text{ m}^2} = \frac{32210 \text{ g} \cdot \text{min}}{22,5 \text{ g} \cdot 3,5} = 409 \text{ min}$$

Nach  $t = 409 \text{ min}$  liegt erstmalig ein zündfähiges Gemisch vor.

$$b) \quad m = V \cdot \rho = 75 \text{ Liter} \cdot 0,815 \frac{\text{kg}}{\text{Liter}} = 61,125 \text{ kg}$$

$$30 \text{ kg} \cong 22,4 \text{ m}^3$$

$$61,125 \text{ kg} \cong x$$

$$x = \frac{61,125 \text{ kg} \cdot 22,4 \text{ m}^3}{30 \text{ kg}} = 45,64 \text{ m}^3 \text{ bei } 0^\circ\text{C}$$

$$\text{bei } 25^\circ\text{C: } V_2 = \frac{V_1 \cdot T_2}{T_1} = \frac{45,64 \text{ m}^3 \cdot 298}{273} = 49,82 \text{ m}^3$$

$$375 \text{ m}^3 \cong 100 \text{ Vol.-%}$$

$$49,82 \text{ m}^3 \cong x$$

$$x = \frac{49,82 \text{ m}^3 \cdot 100 \text{ Vol.-%}}{375 \text{ m}^3} = 13,3 \text{ Vol.-%}$$

Nach vollständiger Verdampfung beträgt die Methanaldampfkonzentration 13,3 Vol.-%. Es liegt eine explosionsfähige Atmosphäre vor.

c) Zeit für die vollständige Verdunstung:

$$t = \frac{m_{\text{FI}}}{l_v \cdot A_{\text{FI}}} = \frac{61,125 \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{min}}{22,5 \text{ g} \cdot 3,5 \text{ m}^2} = 776,2 \text{ min}$$

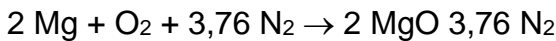
Nach 12 h 56 min ist das Methanal vollständig verdampft.

## 12 Verbrennung von Magnesiumstaub in Luft

Magnesiumstaub verbrennt in Luft beim stöchiometrischen Gemisch. Ermitteln Sie die Mg-Staub-Konzentration in  $\text{g/m}^3$ .

Lösung:

Luft enthält pro mol  $\text{O}_2$  ( $\frac{79}{21}$ ) = 3,76 mol  $\text{N}_2$ . Stickstoff ist an der Reaktion nicht beteiligt.



2 mol Magnesium reagieren mit (1 mol + 3,76 mol) = 4,76 mol Luft.

$$M_{\text{Mg}} = 24,3 \text{ g/mol}$$

$$c_{\text{Mg}} = \frac{2 \text{ mol} \cdot 24,3 \frac{\text{g}}{\text{mol}}}{4,76 \text{ mol} \cdot 22,4 \frac{\text{l}}{\text{mol}}} = 0,4558 \frac{\text{g}}{\text{l}} = 455,8 \frac{\text{g}}{\text{m}^3}$$

Die Mg-Staub-Konzentration beträgt 455,8  $\text{g/m}^3$ .

## 13 Wärmemenge und Brandintensität von Diethylether

Welche Wärmemenge wird bei der vollständigen Verbrennung von 75 l Diethylether ( $H_i = 33.830 \text{ kJ/kg}$ ,  $\rho = 0,71 \text{ g/cm}^3$ ) freigesetzt?

Wie hoch ist die Brandintensität bei einer Brandfläche von  $2,25 \text{ m}^2$  und einer Branddauer von 0,3 h (Angabe von  $I_{\text{Brd}}$  in  $\text{kJ/m}^2 \cdot \text{min}$ )?

Lösung:

$$Q = m \cdot H_i \quad m = \rho \cdot V = 0,71 \frac{\text{kg}}{\text{l}} \cdot 75 \text{ l} = 53,25 \text{ kg}$$

$$Q = 53,25 \text{ kg} \cdot 33830 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$= 1.801.447,5 \text{ kJ}$$

$$= 1.801,4 \text{ MJ}$$

Es wird eine Wärmemenge von ca. 1.801 MJ freigesetzt.

$$I_{\text{Brd}} = \frac{Q}{A_{\text{Brd}} \cdot t} = \frac{1801,4 \text{ MJ}}{2,25 \text{ m}^2 \cdot 18 \text{ min}} = 44,48 \frac{\text{MJ}}{\text{m}^2 \cdot \text{min}} = 44480 \frac{\text{kJ}}{\text{m}^2 \cdot \text{min}}$$

Die Brandintensität beträgt 44.480  $\text{kJ/m}^2 \cdot \text{min}$ .



## 14 Wärmefreisetzung bei einem Zimmerbrand

Bei einem Zimmerbrand brennen ca. 40 m<sup>2</sup> Holzoberfläche in Form von Deckenvertäfelung, Holzfußboden, Möbeln etc.

Berechnen Sie mit Hilfe der Abbrandgeschwindigkeit und des Heizwertes die zu erwartende Wärmefreisetzung.

Lösung:

Abbrandgeschwindigkeit von Holz:

$$v = \frac{0,8 \text{ kg}}{\text{m}^2 \cdot \text{min}} = \frac{48 \text{ kg}}{\text{m}^2 \cdot \text{h}}$$

Heizwert von Holz:

$$H_{i,\text{Holz}} = 15 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}} = 15.000.000 \frac{\text{Ws}}{\text{kg}} = \frac{15000000 \text{ W} \cdot \text{h}}{3600 \text{ kg}} = 4166,7 \frac{\text{Wh}}{\text{kg}} = 4,17 \frac{\text{kWh}}{\text{kg}}$$

Brandintensität:

$$I = H_i \cdot v = 48 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \cdot \text{h}} \cdot 4,17 \frac{\text{kWh}}{\text{kg}} = 200,16 \frac{\text{kW}}{\text{m}^2}$$

Wärmefreisetzung für 40 m<sup>2</sup>:

$$Q_{\text{Brd}} = I \cdot A = 200,16 \frac{\text{kW}}{\text{m}^2} \cdot 40 \text{ m}^2 = 8.006,4 \text{ kW}$$

$$\approx 8000 \text{ kW} \approx 8 \text{ MW}$$

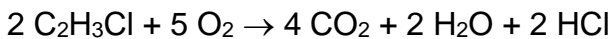
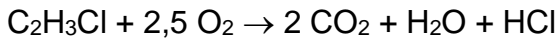
Es wird eine Wärmemenge von ca. 8 MW freigesetzt.

## 15 Verbrennung von PVC

Bei der Verbrennung von PVC ( $\text{C}_2\text{H}_3\text{Cl}$ ) entsteht Chlorwasserstoff, Wasserdampf und Kohlenstoffdioxid.

Ein Pkw enthält ca. 15 kg PVC. Wie viel Kilogramm und wie viel Liter HCl entstehen beim Verbrennen eines Autos in einem Tunnel?

Lösung:



$$124 \text{ g} \hat{=} 72 \text{ g}$$

$$15000 \text{ g} \hat{=} x$$

$$x = \frac{15000 \text{ g} \cdot 72 \text{ g}}{124 \text{ g}} = 8709,7 \text{ g}$$

$$36 \text{ g HCl} \hat{=} 22,4 \text{ l}$$

$$8709,7 \text{ g HCl} \hat{=} x \text{ l}$$

$$x = \frac{8709,6 \text{ g} \cdot 22,4 \text{ l}}{36 \text{ g}} = 5.419 \text{ Liter}$$

(wenn mit  $m_{\text{Cl}} = 35,5 \text{ g/mol}$  gerechnet wird: 5376 Liter!)

Es entstehen ca. 8,7 kg bzw. 5.419 l HCl.

## 16 Kühlleistung eines DM-Strahlrohres

Berechnen Sie die theoretische Kühlleistung eines DM-Strahlrohres ohne Mundstück. Rechnen Sie mit  $Q = 50 \text{ l/min}$ . Das Wasser hat beim Verlassen des Strahlrohres eine Temperatur von  $\vartheta = 8 \text{ °C}$ .

Lösung:

Kühlleistung 1 l Wasser

Temperaturerhöhung von  $\vartheta = 8 \text{ °C}$  auf  $\vartheta = 100 \text{ °C}$ :

$$Q_E = m \cdot c_p \cdot \Delta\vartheta = 1 \text{ kg} \cdot 4,2 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{°C}} \cdot 92 \text{ °C} = 386,4 \text{ kJ}$$

Verdampfung bei  $100 \text{ °C}$ :

$$Q_V = m \cdot c_v = 1 \text{ kg} \cdot 2257 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = 2.257 \text{ kJ}$$

Gesamtenergie:  $Q = Q_E + Q_V = 2.643,4 \text{ kJ} = 2.643,4 \text{ kWs}$

Kühlleistung von 50 l Wasser:

$$Q = 132.170 \text{ kWs}$$

Kühlleistung von 50 l Wasser pro Minute:

$$Q = \frac{132.170 \text{ kWs}}{60 \text{ s}} = 2.202,8 \text{ kW}$$

Die Kühlleistung beträgt ca. 2,2 MW bei vollständiger Verdampfung.

## 17 Rauchkühlung

Zur Rauchkühlung werden drei Sprühimpulsstöße mit einer Wasserabgabe von jeweils 0,5 Litern in eine ca. 600 °C warme Rauchsicht gegeben.

Wie viel Liter Wasserdampf entstehen bei kompletter Verdampfung des Wassers?  
(Vernachlässigen Sie Druckänderungen.)

Lösung:

$$1 \text{ mol} = 18 \text{ g}$$

$$18 \text{ g} \hat{=} 22,4 \text{ l}$$

$$1500 \text{ g} \hat{=} x$$

$$x = \frac{1500 \text{ g} \cdot 22,4 \text{ l}}{18 \text{ g}} = 1866,7 \text{ l} \quad \text{bei } 0^\circ \text{C}$$

Temperaturerhöhung:

$$p_1 = 1013 \text{ hPa}$$

$$T_1 = 0^\circ \text{C} = 273 \text{ K}$$

$$V_1 = 1866,7 \text{ l}$$

$$p_2 = 1013 \text{ hPa}$$

$$T_2 = 600^\circ \text{C} = 873 \text{ K}$$

$$V_2 = ?$$

$$\frac{p_1 \cdot V_1}{T_1} = \frac{p_2 \cdot V_2}{T_2}$$

$$\Rightarrow V_2 = \frac{V_1 \cdot T_2}{T_1} = \frac{1866,7 \text{ l} \cdot 873 \text{ K}}{273 \text{ K}} = 5969,3 \text{ l}$$

Es entstehen rund 6 m<sup>3</sup> Wasserdampf.

### 18 Schaumeinsatz - Löschzug

Ein Löschzug mit zwei Löschgruppenfahrzeugen (LF 20, LF 10) besitzt eine Schaumausrüstung, bestehend aus jeweils einem Kombinationsschaumstrahlrohr (VZ 15 und 60), einem Zumischer Z4R sowie 120 Litern Mehrbereichsschaummittel pro LF.

Es brennt Benzin auf einer Fläche von ca. 150 m<sup>2</sup>. Der Hersteller des Schaummittels gibt für Benzin eine Zumischrate von 3 % und eine Aufbringrate von 4 l/(min•m<sup>2</sup>) vor. Ist ein erfolgreicher Einsatz möglich?

Lösung:

Benötigte Schaummittelmenge: ca. 2 l/m<sup>2</sup>

Hier: 150 m<sup>2</sup> x 2 l/m<sup>2</sup> = 300 l

240 l stehen zur Verfügung!

Benötigte Durchflussmenge Wasser/Schaummittelgemisch am Schaumstrahlrohr:  
4 l/(min•m<sup>2</sup>)

Hier: 150 m<sup>2</sup> x 4 l/(min•m<sup>2</sup>) = 600 l/min

800 l/min stehen zur Verfügung!

Es ist kein erfolgreicher Einsatz möglich, da zu wenig Schaummittel zur Verfügung steht.

## 19 Brandbekämpfung mit Schaum und Kühlung

Bei Eintreffen der Feuerwehr zündet das skizzierte Warenlager durch.

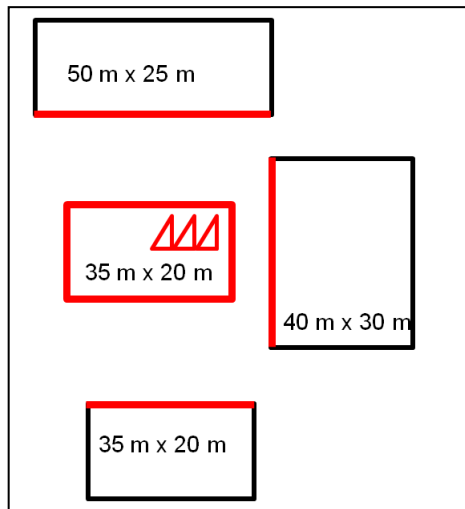


Abb. 1: Skizze Warenlager  
Quelle: eigene Darstellung

Folgende Einsatzaufträge sind abzuarbeiten:

Schutz der drei angrenzenden Hallen (jeweils mit Flachdach) und Löschangriff mit Schwerschaum (MBS 3 %) für 15 Minuten.

- Ermitteln Sie für das Warenlager den Wasser- und Schaummittelbedarf, sowie die Anzahl der Zumischer bzw. Schaumstrahlrohre zur Brandbekämpfung mit Schaum.
- Bestimmen Sie den Wasserbedarf zur Kühlung der angrenzenden Hallen.
- Ermitteln Sie den gesamten Wasserbedarf und die Anzahl der notwendigen Feuerlöschkreiselpumpen.

Rechnen Sie mit folgenden Werten:

Aufbringrate:  $I_{L\ddot{o}} = 8 \text{ l/min} \cdot \text{m}^2$

Löschdauer:  $t_{L\ddot{o}} = 15 \text{ min}$

Lösung:

- Löschangriff:

$$I_{L\ddot{o}} = 8 \text{ l/min} \cdot \text{m}^2; t_{L\ddot{o}} = 15 \text{ min}$$

Fläche Warenlager  $A_{\text{Lager}} = a \times b$

$$A_{\text{Lager}} = 35 \text{ m} \times 20 \text{ m} = 700 \text{ m}^2$$

Volumenstrom WSG zur Schwerschaumerzeugung

$$Q_{\text{SS}} = A_{\text{Lager}} \times I_{L\ddot{o}}$$

$$Q_{SS} = 700 \text{ m}^2 \times 8 \text{ l/min} \cdot \text{m}^2 = 5.600 \text{ l/min}$$

⇒ Sieben Z8 erforderlich.

Volumen des Wasser-Schaummittel-Gemisches  $V_{SS} = Q_{SS} \times t_{L\ddot{o}}$

$$V_{SS} = 5.600 \text{ l/min} \times 15 \text{ min} = 84.000 \text{ l} \text{ [Für nur 15 Minuten!]}$$

Schaummittelvolumen  $V_{SM} = V_{SS} \times Z\text{-Rate}$

$$V_{SM} = 84.000 \text{ l} \times 0,03 = 2.520 \text{ l} \text{ [Sofort Reserven bilden!]}$$

⇒ Vergleich: Wird ein 1-prozentiges Schaummittel verwendet, sind für die ersten 15 Minuten nur 840 l erforderlich.

Wasservolumen  $V_W = V_{SS} - V_{SM}$

$$V_W = 84.000 \text{ l} - 2.520 \text{ l} = 81.480 \text{ l}$$

Es werden zur Brandbekämpfung 2.520 l Schaummittel, 81.480 l Wasser, sieben Zumischer Z8 und sieben Schaumrohre S8 benötigt.

b) Kühlen:

$$I_{\text{Kühl-Dach}} = 1 \text{ l/min} \cdot \text{m}^2; I_{\text{Kühl-Fassade}} = 30 \text{ l/min} \cdot \text{m}$$

Kühlvolumenstrom für Nachbarhallenfassaden  $Q_{\text{Fassaden}} = I_{\text{Fassade}} \times I_{\text{Kühl-Fassade}}$

$$Q_{\text{Fassade-Halle (1)}} = 50 \text{ m} \times 30 \text{ l/min} = 1.500 \text{ l}$$

$$Q_{\text{Fassade-Halle (2)}} = 40 \text{ m} \times 30 \text{ l/min} = 1.200 \text{ l}$$

$$Q_{\text{Fassade-Halle (3)}} = 35 \text{ m} \times 30 \text{ l/min} = 1.050 \text{ l}$$

$$Q_{\text{Fassaden}} = 3.750 \text{ l}$$

Kühlvolumenstrom für Nachbarhallendächer  $Q_{\text{Dächer}} = A_{\text{Dächer}} \times I_{\text{Kühl-Dach}}$

$$Q_{\text{Dach-Halle(1)}} = A_{\text{Dach(1)}} \times I_{\text{Kühl-Dach}} = (50 \times 25) \text{ m}^2 \times 1 \text{ l/min} = 1.250 \text{ l}$$

$$Q_{\text{Dach-Halle(2)}} = A_{\text{Dach(2)}} \times I_{\text{Kühl-Dach}} = (40 \times 30) \text{ m}^2 \times 1 \text{ l/min} = 1.200 \text{ l}$$

$$Q_{\text{Dach-Halle(3)}} = A_{\text{Dach(3)}} \times I_{\text{Kühl-Dach}} = (35 \times 20) \text{ m}^2 \times 1 \text{ l/min} = 700 \text{ l}$$

$$Q_{\text{Dächer}} = 3.150 \text{ l}$$

Kühlvolumenstrom gesamt  $Q_{K_{\text{ges}}} = Q_{\text{Fassaden}} + Q_{\text{Dächer}}$

$$Q_{K_{\text{ges}}} = 3.750 \text{ l/min} + 3.150 \text{ l/min} = 6.900 \text{ l/min}$$

Es werden 6.900 l/min Wasser zur Kühlung benötigt.

c) Gesamtwasserbedarf:

Wasserförderstrom (bzw. Förderstrom WSG) gesamt  $Q_{W_{\text{ges}}} = Q_{K_{\text{ges}}} + Q_{SS}$

$$Q_{W_{\text{ges}}} = 6.900 \text{ l/min} + 5.600 \text{ l/min} = 12.500 \text{ l/min}$$

⇒ Vergleich: Dreizehn FP 10-1000 bzw. sieben FP 10-2000 oder acht FP 16/8.

Es werden insgesamt 12.500 l/min Wasser bzw. WSG benötigt. Dieser Volumenstrom könnte z. B. mit 13 FP 10-1000 realisiert werden.

## 20 CO<sub>2</sub>-Löschanlage

Wie viel Liter CO<sub>2</sub> (g) entstehen unter Atmosphärendruck bei 60 °C (Auslösung Wärmemelder), wenn aus einem Druckbehälter einer stationären Löschanlage 500 kg CO<sub>2</sub> (l) vollständig ausgestoßen werden?

Lösung:

1 mol  $\hat{=}$  44 g  $\hat{=}$  22,4 Liter

44 g  $\hat{=}$  22,4 l

500 000 g  $\hat{=}$  x · l

$$x = \frac{500\,000\text{ g} \cdot 22,4\text{ l}}{44\text{ g}} = 254.545\text{ l}$$

$$= 254,5\text{ m}^3\text{ CO}_2\text{ (g) bei }0\text{ °C}$$

Temperaturerhöhung:

p<sub>1</sub> = 1013 hPa

V<sub>1</sub> = 254,5 m<sup>3</sup>

T<sub>1</sub> = 0°C = 273 K

p<sub>2</sub> = 1013 hPa

V<sub>2</sub> = ?

T<sub>2</sub> = 60°C = 333 K

$$\frac{p_1 \cdot V_1}{T_1} = \frac{p_2 \cdot V_2}{T_2} \Rightarrow$$

$$V_2 = \frac{V_1 \cdot T_2}{T_1} = \frac{254,5\text{ m}^3 \cdot 333\text{ K}}{273\text{ K}} = 310,4\text{ m}^3$$

Es entstehen ca. 310,4 m<sup>3</sup> CO<sub>2</sub> (g).