



Badenerstrasse 47

Postfach

8021 Zürich

www.carbura.ch

Telefon

Telefax

Postcheck

MWST-Nr.

044 217 41 11

044 217 41 10

80-21080-8

CHE-105.841.616 MWST

# Grundlagenpapier

## VOC-Emissionserklärung, revidierte Version

Stand: 07. Mai 2024

Version: 17 (Anpassung Sommerkorrektur)

Status: Definitiv

Martin B. Rahn

[martin.rahn@carbura.ch](mailto:martin.rahn@carbura.ch)

044 217 41 69

Marcello Fisler

[marcello.fisler@carbura.ch](mailto:marcello.fisler@carbura.ch)

044 217 41 67

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung .....</b>	<b>3</b>
1.1	Gesetzliche Grundlagen .....	3
1.2	Anwendung für das einzelne Tanklager .....	3
1.3	Erarbeitung des Grundrasters .....	3
1.4	Bestandteil der Kooperationsvereinbarung .....	3
<b>2</b>	<b>Aufbau des Grundrasters.....</b>	<b>4</b>
2.1	Angaben zu den Tanks.....	4
2.2	Angaben zum Gaspendelsystem und zum Produkteumschlag.....	4
<b>3</b>	<b>VOC-Emissionen von Benzintanks .....</b>	<b>5</b>
3.1	Lagertanks .....	5
3.1.1	Festdachtanks/Drucktanks mit Gaspendelung .....	5
3.1.2	Freibelüftete Festdachtanks mit innenliegender Schwimmmembrane.....	5
3.1.3	Schwimmdachtanks.....	7
3.2	Gasspeicher.....	8
3.3	VRU .....	8
3.4	Sicherheitsventil .....	8
3.5	Armaturen- und Flanschverluste .....	9
3.6	Tankreinigungen .....	9
3.6.1	Festdach- und Drucktanks mit Gaspendelung .....	10
3.6.2	Festdachtanks mit Schwimmmembrane oder Schwimmdachtanks .....	10
3.7	Ausserordentliche Ereignisse und allgemeine Bemerkungen .....	10
3.8	Zusammenfassung der VOC-Emissionen von Benzintanks .....	10
<b>4</b>	<b>VOC-Emissionen von Flugpetroltanks.....</b>	<b>11</b>
4.1	Lagertanks .....	11
4.1.1	Festdachtanks mit innenliegender Schwimmmembrane.....	11
4.1.2	Frei belüftete Festdachtanks ohne Schwimmmembrane .....	12
4.1.3	Schwimmdachtanks.....	13
4.2	Armaturen- und Flanschverluste .....	13
4.3	Tankreinigung.....	14
4.3.1	Grundlagen zur Tankreinigung bei Flugpetroltanks .....	14
4.3.2	Tanks mit innenliegender Schwimmmembrane und Schwimmdachtanks .....	14
4.3.3	Frei belüftete Tanks ohne innenliegende Schwimmmembrane .....	14
4.4	Ausserordentliche Ereignisse und allgemeine Bemerkungen .....	14
4.5	Zusammenfassung der VOC-Emissionen von Flugpetroltanks .....	14

# 1 Einleitung

## 1.1 Gesetzliche Grundlagen

Gemäss Luftreinhalte-Verordnung (LRV) muss der Anlagebetreiber seine Emissionen deklarieren. Dies geschieht in der Regel mittels einer Emissionserklärung. Einzelne Kantone haben eine jährliche Emissionserklärung in den Sanierungsverfügungen verankert. Mittels der Emissionserklärung kann dargelegt werden, dass die vorgegebenen Grenzwerte der LRV eingehalten sind.

## 1.2 Anwendung für das einzelne Tanklager

Das vorliegende Papier entspricht dem Grundraster einer Emissionserklärung und ist auf das einzelne Lager anzupassen.

## 1.3 Erarbeitung des Grundrasters

Das Grundraster wurde von der Technischen Kommission der CARBURA erarbeitet und zusätzlich mit dem Fachausschuss Luftreinhaltung der Kooperationsvereinbarung abgestimmt. Es ist zu beachten, dass das Grundraster die Emissionen von Benzin- und Flugpetroltanks berechnet, jedoch andere Emissionsquellen (wie Additiv- oder Ethanol tanks) nicht berücksichtigt. Diese müssen separat erfasst werden.

Die Emissionsberechnungen basieren, sofern nicht andere Daten vorhanden sind, auf der VDI 3479 [1]. Die VDI 3479 berechnet Jahresemissionen und keine Stundenwerte wie es die LRV verlangt. Weiter bezieht sich die VDI auf die international anerkannte Rechenmethode nach API MPMS 19 [2]. Die getroffenen Annahmen sind jeweils beschrieben.

Falls Berechnungen, basierend auf effektiven Messungen, vorliegen, sind diese in jedem Falle vorzuziehen. Das Grundraster besteht aus einem Excel-Dokument in welchem die nachfolgenden Formeln zur Emissionsberechnung hinterlegt sind.

Ein Vergleich der berechneten Emissionen mit Langzeitmessungen im Tanklager Mellingen aus dem Jahr 2015 hat gezeigt, dass die Berechnung nach VDI 3479 die Tankatmung bei den Festdachtanks mit innenliegender Schwimmemembrane in 'warmen' Sommern unterschätzt. Winterbenzin hat wegen seines höheren Dampfdruckes höhere Emissionen als Sommerbenzin. Die Verwendung eines Durchschnittsbenzins wird diesem Unterschied nicht gerecht. In der Folge wurde im revidierten Grundlagenpapier und Grundraster (Excel) die Formel für die Tankatmung ( $L_{A,a}$ ) bei diesen Tanks angepasst.

## 1.4 Bestandteil der Kooperationsvereinbarung

Die VOC-Emissionserklärung (Grundlagenpapier und Grundraster) wurde vom Lenkungskernteam der Kooperationsvereinbarung an seiner Sitzung vom 10. März 2015 genehmigt und ist somit Bestandteil der Grundlagenpapiere zur Kooperationsvereinbarung.

Die vorliegende überarbeitete Fassung wurde vom Lenkungskernteam an der Sitzung vom 20.3.2018 genehmigt und ersetzt die Fassung vom 10. März 2015.

## 2 Aufbau des Grundrasters

### 2.1 Angaben zu den Tanks

In den Tabellen sind Basisinformationen zu den Benzin- und Flugpetroltanks einzutragen:

*Tabelle 1: Angaben zu den Benzin-Lagertanks (Beispiel)*

Tank	Produkt	Nutzvolumen [m <sup>3</sup> ]	Tanktyp + LRV-System <sup>a</sup>	Durchmesser [m]	Einlagerung [m <sup>3</sup> /a]
5	Sommerbenzin	33'566	Festdachtank frei belüftet mit Membrane	44.0	15'000
9	Winterbenzin	6'649	Festdachtank geschlossen mit Gaspendingung	19.6	6'000
13	Winterbenzin	6'649	Schwimmdachtank	19.6	7'500

### 2.2 Angaben zum Gaspendingensystem und zum Produkteumschlag

Die Werte zum Druck des Gaspendingensystems und des Gasspeichers, sowie der Füllstand des Gasspeichers werden aufgezeichnet, aufbewahrt und dienen als Basis für die Emissionserklärung sowie für die Kontrolle des Gaspendingensystems.

*Tabelle 2: Parameter zur Charakterisierung des Gaspendingensystems und des Produkteumschlags*

Gasspeicher	Nutzvolumen [m <sup>3</sup> ]	
	Betriebsdruck [mbar]	
	Abblasedruck [mbar]	
VRU	Fabrikat	
	Leistung [m <sup>3</sup> /h]	
	VOC-Emission [g/m <sup>3</sup> ]	
	Benzol-Emission [mg/m <sup>3</sup> ]	
Lagertanks	Max. Überdruck [mbar]	
	Max. Unterdruck [mbar]	
Sicherheitsventil	Öffnungsdruck [mbar]	
Produkteumschlag	Einlagerungen Benzin [m <sup>3</sup> /a]	
	Auslagerungen Benzin [m <sup>3</sup> /a]	

<sup>a</sup> Einrichtung zur Emissionsminderung

### 3 VOC-Emissionen von Benzintanks

#### 3.1 Lagertanks

##### 3.1.1 Festdachtanks/Drucktanks mit Gaspendelung

Festdach- und Drucktanks mit Gaspendelung führen, regelmässige Wartung der Über- und Unterdruckventile vorausgesetzt, zu keinen Emissionen. Bei Rundgängen festgestellte Unregelmässigkeiten sind im Kapitel 3.7 „Ausserordentliche Ereignisse und allgemeine Bemerkungen“ aufzuführen.

##### 3.1.2 Freibelüftete Festdachtanks mit innenliegender Schwimmembrane

Berechnung gemäss VDI 3479 für freibelüftete Festdachtanks mit Schwimmembrane

$$L_{\text{Tank,a}} = (1 - \eta_{\text{SD}}) \times [(1 - \eta_{\text{VD}}) \times f \times L_{\text{A,a}} + L_{\text{B,a}}]$$

$\eta_{\text{SD}}$  Wirkungsgrad Schwimmembrane (mind. 0.95; für doppelte Abdichtung wird hier 0.98 eingesetzt)

$\eta_{\text{VD}}$  Wirkungsgrad Vakuum-/Druckventil (= 0, da kein Ventil vorhanden, frei belüftet)

$f$  Anstrichfaktor (für weiss: 1.0)

$L_{\text{A,a}}$  Verluste durch Auslagerung und Atmung in kg/a

$L_{\text{B,a}}$  Verluste durch Befüllen (Einlagerung) in kg/a

Ergibt eingesetzt:

$$L_{\text{Tank,a}} = 0.02 \times (L_{\text{A,a}} + L_{\text{B,a}})$$

Die **Verluste für Auslagerung und Atmung ( $L_{\text{A,a}}$ )** berechnen sich gemäss VDI wie folgt:

$$L_{\text{A,a}} = f_{\text{AS}} \times c_{\text{ns}} \times V_{\text{ns}} \times d_{\text{s}} + f_{\text{AW}} \times c_{\text{nw}} \times V_{\text{nw}} \times d_{\text{w}}$$

Als Vereinfachung wird angenommen, dass es sich nur um Lagertanks handelt. Für Umschlagstanks wären reduzierte Sättigungsgrade einzusetzen. Die Berechnung der Atmungsverluste nach VDI 3479 wurde auf Basis der Messergebnisse 2015 des Tanklagers Mellingen durch einen Korrekturterm ergänzt, der hohe Emissionen an Sommertagen (d.h. Tagen an welchen die Lufttemperatur 25°C überschreitet) berücksichtigt. Zusätzlich werden die Atmungsverluste für Sommer- und Winterbenzin getrennt berechnet.

Mit den Parametern und Variablen aus Tabelle 3 ergibt sich folgende Formel:

$$L_{\text{A,a}} = f_{\text{AS}} \times c_{\text{n}} \times V_{\text{ns}} \times d_{\text{s}} + f_{\text{AS}} \times c_{\text{n}} \times V_{\text{nsh}} \times d_{\text{sh}} + f_{\text{AW}} \times c_{\text{n}} \times V_{\text{nw}} \times d_{\text{w}}$$

1) Sommer                      2) Korrektur Sommer-  
Tage                                      3) Winter

1) Sommer

$$\begin{aligned} L_{\text{AS}} &= f_{\text{AS}} \times c_{\text{n}} \times V_{\text{ns}} \times d_{\text{s}} = f_{\text{AS}} \times d_{\text{s}} \times \frac{T_{\text{n}}}{p_{\text{n}}} \left( \frac{p}{T_{1\text{s}}} - \frac{p}{T_{2\text{s}}} \right) \times V_{\text{G}} \times c_{\text{n}} \\ &= f_{\text{AS}} \times d_{\text{s}} \times \frac{T_{\text{n}}}{p_{\text{n}}} \left( \frac{p}{T_{1\text{s}}} - \frac{p}{T_{2\text{s}}} \right) \times 10\% \times (c_{\text{nsSO}} \times V_{\text{SO}} + c_{\text{nsWI}} \times V_{\text{WI}}) \end{aligned}$$

2) Korrektur Sommertage

$$\begin{aligned} L_{\text{Ash}} &= f_{\text{AS}} \times c_{\text{n}} \times V_{\text{nsh}} \times d_{\text{sh}} = f_{\text{AS}} \times d_{\text{sh}} \times \frac{T_{\text{n}}}{p_{\text{n}}} \left( \frac{p}{T_{1\text{sh}}} - \frac{p}{T_{2\text{sh}}} \right) \times V_{\text{G}} \times c_{\text{n}} \\ &= f_{\text{AS}} \times d_{\text{sh}} \times \frac{T_{\text{n}}}{p_{\text{n}}} \left( \frac{p}{T_{1\text{sh}}} - \frac{p}{T_{2\text{sh}}} \right) \times 10\% \times F_{\text{cn}} \times (c_{\text{nsSO}} \times V_{\text{SO}} + c_{\text{nsWI}} \times V_{\text{WI}}) \end{aligned}$$

3) Winter

$$\begin{aligned} L_{\text{AW}} &= f_{\text{AW}} \times c_{\text{n}} \times V_{\text{nw}} \times d_{\text{w}} = f_{\text{AW}} \times d_{\text{w}} \times \frac{T_{\text{n}}}{p_{\text{n}}} \left( \frac{p}{T_{1\text{w}}} - \frac{p}{T_{2\text{w}}} \right) \times V_{\text{G}} \times c_{\text{n}} \\ &= f_{\text{AW}} \times d_{\text{w}} \times \frac{T_{\text{n}}}{p_{\text{n}}} \left( \frac{p}{T_{1\text{w}}} - \frac{p}{T_{2\text{w}}} \right) \times 10\% \times c_{\text{nw}} \times (V_{\text{SO}} + V_{\text{WI}}) \end{aligned}$$

In den ersten 49 Sommertagen ist der Faktor zur Berücksichtigung von heissen Tagen  $F_{\text{cn}}=1$ . Erst ab dem 49. Sommertag ist das Produkt im Tank so erwärmt, dass die Benzinverdampfung stark ansteigt.

Eingesetzt ergibt sich folgende vereinfachte Formel:

für  $dsh \leq 49$

$$L_{A,a} = (0.7903 + 0.00059 \times dsh) \times (1.07 \times V_{SO} + 1.22 \times V_{WI}) + 0.3832 \times (V_{SO} + V_{WI})$$

für  $dsh > 49$

$$L_{A,a} = (7.6935 - 0.2812 \times dsh + 0.0029 \times dsh^2) \times (1.07 \times V_{SO} + 1.22 \times V_{WI}) + 0.3832 \times (V_{SO} + V_{WI})$$

Tabelle 3: Parameter zu Berechnung der Emissionen von freibelüfteten Festdachtanks

Parameter	Beschreibung	Wert	Einheit
$f_{AS}$	Sättigungsgrad im Sommer	1	
$V_G$	Gasraumvolumen (Anteil am Nutzvolumen)	10% ( $V_{so}+V_{wi}$ )	
$F_{cn}$	Faktor zur Berücksichtigung von heißen Tagen ( $F_{cn} \geq 1$ )	$(dsh-49) \times 0.5 + 1$	
$c_{nSO}$	Sättigungskonzentration im Gasraum im Sommer (Sommerbenzin)	1.07	kg/m <sup>3</sup>
$V_{SO}$	Volumen Sommerbenzin	Variabel	m <sup>3</sup>
$c_{nWI}$	Sättigungskonzentration im Gasraum im Sommer (Winterbenzin)	1.22	kg/m <sup>3</sup>
$V_{WI}$	Volumen Winterbenzin	Variabel	m <sup>3</sup>
$T_n$	Normtemperatur	273.15	K
$p_n$	Normdruck	1013.25	hPa
$p$	Umgebungsdruck	980	hPa
$T_{1S}$	Min. Gasraumtemperatur im Sommer (13.35°C)	286.5	K
$T_{2S}$	Max. Gasraumtemperatur im Sommer (30.35°C)	303.5	K
$ds$	Anzahl durchschnittlicher Sommertage pro Jahr	153-dsh	d/a
$T_{1sh}$	Min. Gasraumtemperatur an heißen Sommertagen (20°C)	293.15	K
$T_{2sh}$	Min. Gasraumtemperatur an heißen Sommertagen (40°C)	313.15	K
$dsh$	Anzahl Sommertage > 25°C pro Jahr	Variabel	d/a
$f_{AW}$	Sättigungsgrad im Winter	1	
$c_{nw}$	Sättigungskonzentration im Gasraum im Winter (Benzin)	0.68	kg/m <sup>3</sup>
$T_{1W}$	Min. Gasraumtemperatur im Winter (4.85°C)	278	K
$T_{2W}$	Max. Gasraumtemperatur im Winter (12.85°C)	286	K
$dw$	Anzahl Wintertage pro Jahr	212	d/a

Die **Verluste durch Befüllen (Einlagerung) ( $L_{B,a}$ )** berechnen sich wie folgt:

$$L_{B,a} = f_B \times c_n \times Q$$

$f_B$  Sättigungsgrad,  $f_B = 0.85$

$c_n$  Sättigungskonzentration in kg/m<sup>3</sup> der Kohlenwasserstoffe im Gasraum über dem Flüssigkeitsspiegel:

Gewichteter Schnitt  $c_n = 0.87$  kg/m<sup>3</sup>

$Q$  Einlagerungsmenge in m<sup>3</sup>/a

Eingesetzt ergibt sich somit für das Befüllen folgende VOC-Emission:

$$L_{B,a} = 0.74 \times Q \text{ [kg/a].}$$

Zusammengefasst ergeben sich somit für frei belüftete Festdachtanks mit innenliegender Schwimmemembrane folgende jährliche VOC-Emissionen:

für  $dsh \leq 49$

$$L_{Tank,a} = 0.02 \times ((0.7903 + 0.00059 \times dsh) \times (1.07 \times V_{SO} + 1.22 \times V_{WI}) + 0.3832 \times (V_{SO} + V_{WI}) + 0.74 Q)$$

für  $dsh > 49$

$$L_{Tank,a} = 0.02 \times ((7.6935 - 0.2812 \times dsh + 0.0029 \times dsh^2) \times (1.07 \times V_{SO} + 1.22 \times V_{WI}) + 0.3832 \times (V_{SO} + V_{WI}) + 0.74 Q)$$

### 3.1.3 Schwimmdachtanks

Berechnung gemäss VDI 3479 für Schwimmdachtanks:

$$L_T = L_S + L_W$$

$L_S$  Standverluste in kg/a

$L_W$  Entnahmeverluste (Arbeitsverlust) in kg/a

#### a) Berechnung von $L_S$

$$L_S = L_R + L_F + L_P$$

$L_R$  Emissionen an der Randabdichtung

$L_F$  Emissionen an den Tankarmaturen

$L_P$  Emissionen am Tankdach, für  
Stahlschwimmdächer:  $L_P = 0$

$L_R$  und  $L_F$  lassen sich wie folgt berechnen:

$$L_R = F_R \times p^* \times M \times K_C$$

$F_R$  Randabdichtungsfaktor in kmol/a

$$L_F = F_F \times p^* \times M \times K_C$$

$F_F$  Schwimmdachausrüstungsverlustfaktor  
(Abdichtungsfaktor) in kmol/a

$p^*$  Dampfdruckfunktion (dimensionslos)

$M$  Molekulargewicht des Produktdampfs in  
kg/kmol, für Benzin = 64

$K_C$  Produktfaktor (dimensionslos), für Benzin  
1.0

$$\rightarrow L_S = (F_R + F_F) \times p^* \times M \times K_C = (F_R + F_F) \times p^* \times 64$$

Der Randabdichtungsfaktor  $F_R$  in kmol/a wird wie folgt ermittelt:

$$F_R = K_R \times D$$

$K_R$  Dichtungsverlust in kmol/(m×a) (sehr gut  
sitzende mechanische Gleitschuhdichtung  
mit randmontierter Sekundärdichtung bei  
einer Windgeschwindigkeit von 2.2 m/s =  
3.9 kmol/(m×a))

$D$  Tankdurchmesser in m

Die Dampfdruckfunktion  $p^*$  ist wie folgt definiert:

$$p^* = \frac{p}{p_A} \left( 1 + \sqrt{1 - \frac{p}{p_A}} \right)^2$$

$p$  tatsächlicher Dampfdruck in Pa,  
Jahresmittel für Sommerbenzin:  $p =$   
380 hPa, für Winterbenzin  $p = 450$  hPa

$p_A$  atmosphärischer Luftdruck ( $p_A = 1013$  hPa)

Bei der Dampfdruckfunktion wird zwischen Sommer- und Winterbenzin unterschieden. Somit ergibt die Dampfdruckfunktion für Sommerbenzin einen Wert von 0.117 und für Winterbenzin 0.146.

Der Schwimmdachausrüstungsverlustfaktor  $F_F$  wird wie folgt berechnet:

$$F_F = \sum_{i=1}^{N_F} N_{F_i} \times K_{F_i} = 41.2 \text{ kmol/a}$$

$N_F$  Anzahl Armaturen des Typs  $i$

$K_{F_i}$  Dacharmaturenverlustfaktor für  
Armaturentyp in kmol/a (bei einer  
Windgeschwindigkeit von 2.2 m/s):

1 Geschlitztes Führungsrohr mit Abstreifer 14.5<sup>b</sup>

2 Mannlöcher (abgedichtet) 1.4

1 Flüssigkeitsanzeiger 15.9

1 Peil- und Probenahmerohr 1.0

2 Be- und Entlüftungsarmaturen 8.4

Total 41.2

Somit lassen sich nun die Standverluste in Abhängigkeit des Durchmessers bestimmen:

<sup>b</sup> Für oberhalb des Schwimmdaches geschlossene Führungsrohre wird dieser Wert auf 10% reduziert. Anstatt 145.2 ist von einem Wert von 14.5 auszugehen.

$$L_s \text{ [kg/a]} = (F_R + F_F) \times p^* \times 64 = (3.9 \times D + 41.2) \times p^* \times 64 = 249.6 \times D \times p^* + 2'636.8 \times p^*$$

**b) Berechnung von  $L_W$**

Der Entnahmeverlust  $L_W$  berechnet sich wie folgt:

$$L_W = \frac{Q \times C \times W_L \times Z}{D} = 7.61 \times 10^{-3} \times \frac{Q}{D}$$

- Q Jahresdurchsatz in m<sup>3</sup>/a
- C Wandbenetzungsschicht, für Benzin bei leicht angerosteter Tankwand: 2.57×10<sup>-6</sup> m
- W<sub>L</sub> Flüssigkeitsdichte bei 15 C [kg/m<sup>3</sup>], Benzin: 740 kg/m<sup>3</sup>
- Z Umrechnungsfaktor (amerikanische Einheit in SI-Einheit; Z = 4)

**c) Emissionen pro Schwimmdachtank mit Benzin**

Die Jahresemissionen  $L_T$  [kg/a] eines Schwimmdachtanks sind abhängig vom Tankdurchmesser  $D$  [m] und vom Jahresdurchsatz  $Q$  [m<sup>3</sup>]:

$$L_T = 249.6 \times D \times p^* + 2'636.8 \times p^* + 7.61 \times 10^{-3} \times \frac{Q}{D}$$

**d) Emissionen aller Schwimmdachtanks mit Benzin**

Für alle  $N$  Schwimmdachtanks mit Benzin eines Lagerortes berechnen sich die Jahresemissionen  $L$  in Abhängigkeit der Tankdurchmesser und der Jahresdurchsätze (pro Tank) nach folgender Formel:

$$L = 249.6 \times p^* \times \sum_{i=1}^N D_i + N \times 2'636.8 \times p^* + 7.61 \times 10^{-3} \times \sum_{i=1}^N \frac{Q_i}{D_i}$$

**3.2 Gasspeicher**

Der Gasspeicher gilt als dicht, wenn der Raum über der Membrane mit einer VOC-Überwachung ausgerüstet ist. Allfällige Ereignisse werden im Kapitel 3.7 „Ausserordentliche Ereignisse“ aufgeführt.

**3.3 VRU**

Die Emissionen der VRU berechnen sich aus den Betriebsstunden, der Leistung der VRU [m<sup>3</sup>/h] und der bei der letzten Messung ermittelten VOC-Emission. Zu berücksichtigen ist zudem, dass der Volumenstrom beim Austritt aus der VRU nur ca. 2/3 des Volumenstroms beim Eintritt in die VRU beträgt. Dies ist darauf zurückzuführen, dass beim Eintritt neben der Luft auch Benzindampf im Strom ist. Dieses Benzin, rund 1 kg/m<sup>3</sup> (entspricht einem Drittel vom gesättigten Benzindampf), wird in der VRU aus der Luft entfernt, weshalb der Volumenstrom beim Austritt entsprechend kleiner ist.

Die VOC-Emissionen der VRU berechnen sich somit wie folgt:

Betriebsstunden	_____	h/a
Leistung VRU (beim Eintritt)	_____	m <sup>3</sup> /h
Gemessene VOC-Emission am _____:	_____	g/m <sup>3</sup>
VOC-Emission/Stunde [Leistung VRU x 2/3 x VOC-Emission]	_____	g/h
VOC-Emission/Jahr [VRU Betriebsstunden x Leistung VRU x 2/3 x VOC-Emission]	_____	g/a
	= _____	kg/a

**3.4 Sicherheitsventil**

Die Leckageverluste der Sicherheitsventile der Tanks werden in dieser Berechnung nicht berücksichtigt. Ihnen ist beim Betrieb und Unterhalt eine besondere Beachtung zu schenken. Die VOC-Emissionen welche beim Sicherheitsventil des Gaspendelsystems entstehen können, sind nicht in der VDI-Norm 3479 beschrieben. Aus diesem Grund werden sie nach dem einfachen Modell der idealen Gasgleichung abgeschätzt:



$$\Delta V = V_1 \times \left( 1 - \frac{p_1}{p_2} \right)$$

$V_1$  = (aktuelles) Gasvolumen des Pendelsystems  
 $p_1$  = Schliessdruck des Sicherheitsventils (1.013 bar)  
 $p_2$  = Öffnungsdruck des Sicherheitsventils (1.014 bar)  
 $\Delta V$  = Ausgetretenes Gasvolumen

Das Gasvolumen entspricht dem gesamten Volumen welches sich im Gassystem befindet (Gasspeicher, Rohrleitungen etc.) und muss vom Betreiber abgeschätzt werden. Die Anwendung dieser Formel führt bei einer Benzingasbeladung von 1 kg/m<sup>3</sup> zu folgenden Emissionen:

Tabelle 4: VOC-Emissionen bei Öffnung des Sicherheitsventils in Abhängigkeit des Gasvolumens

Gasvolumen [m <sup>3</sup> ]	VOC-Emission pro Öffnung [kg]
1'000	0.99
2'000	1.97
5'000	4.93
7'500	7.40
10'000	9.86
15'000	14.79
20'000	19.72

Die einzelnen Ereignisse sind in die entsprechende Tabelle der Emissionserklärung einzutragen.

### 3.5 Armaturen- und Flanschverluste

Massgebend für die Armaturen- und Flanschverluste ist gemäss VDI-Norm der laufende Betrieb. Es wird im Folgenden eine durchschnittliche Abschätzung der Armaturen und Flanschen einer Einlagerungsleitung DN200 (resp. einer Dichtlänge von 0.63 m) gemacht. Sollten gewisse Parameter deutlich abweichen, wäre eine individuelle Anpassung notwendig.

	Beschrieb	Anzahl	Emission/Stunde [g/h]
Absperr- und Regelorgane	Stopfbuchse mit Manschette, O-Ring	10	2.3
Pumpe	Einzel-Gleitringdichtung	1	1
Flanschverbindung	Weichstoffdichtung	40	0.9
Total VOC-Emission/h			4.2

Die Jahresemission berechnet sich wie folgt:

Einlagerungsmenge Benzin	_____	m <sup>3</sup> /a
Leistung Einlagerungspumpe	_____	m <sup>3</sup> /h
Betriebsstunden Einlagerungspumpe [Einlagerungsmenge/Leistung Pumpe]	_____	h/a
VOC-Emission [4.2 x Betriebsstunden Einlagerungspumpe]	_____	g/a
	= _____	kg/a
Auslagerungsmenge Benzin	_____	m <sup>3</sup> /a
Leistung Auslagerungspumpe	_____	m <sup>3</sup> /h
Betriebsstunden Auslagerungspumpe [Auslagerungsmenge/Leistung Pumpe]	_____	h/a
VOC-Emission [4.2 x Betriebsstunden Auslagerungspumpe]	_____	g/a
	= _____	kg/a

### 3.6 Tankreinigungen

Die Emissionen welche bei der Tankreinigung entstehen sind nicht in der VDI-Norm 3479 behandelt, weshalb von der Technischen Kommission der CARBURA auf Erfahrungswerte zurückgegriffen wurde.

Soweit möglich werden die Gase über die VRU abgearbeitet. Die entsprechenden VOC-Emissionen sind im Kapitel 3.3 enthalten. Die Abreinigung mit der VRU erfolgt bis zu ca. 15 g/m<sup>3</sup>.

### 3.6.1 Festdach- und Drucktanks mit Gaspendingelung

Das Gasvolumen eines Festdach- oder Drucktanks beträgt mit dem Kuppelvolumen ca. 110% des Nutzvolumens. Somit errechnet sich die VOC-Emission bei einer Tankreinigung wie folgt:

Gasvolumen des Tanks [1.1 x Nutzvolumen]	_____	m <sup>3</sup>
VOC-Restbelastung im Tank [15 g/m <sup>3</sup> x Gasvolumen]	_____	g
	= _____	kg

### 3.6.2 Festdachtanks mit Schwimmmembrane oder Schwimmdachtanks

Das Gasvolumen eines frei belüfteten Festdachtanks mit innenliegender Schwimmmembrane oder eines Schwimmdachtanks entspricht dem Volumen zwischen dem Boden und der Schwimmmembrane. Diese befindet sich auf einer Höhe von rund 180 cm. Somit errechnet sich die VOC-Emission bei einer Tankreinigung wie folgt:

Gasvolumen des Tanks [1.8 m x Grundfläche des Tanks]	_____	m <sup>3</sup>
VOC-Restbelastung im Tank [15 g/m <sup>3</sup> x Gasvolumen]	_____	g
	= _____	kg

## 3.7 Ausserordentliche Ereignisse und allgemeine Bemerkungen

Im Falle von ausserordentlichen Ereignissen sind diese kurz zu beschreiben und die Emissionen abzuschätzen. In diesem Abschnitt sind zum Beispiel geplante Arbeiten (z.B. Korrosionsschutzarbeiten) sowie Störungen und Zwischenfälle aufzuführen.

## 3.8 Zusammenfassung der VOC-Emissionen von Benzintanks

In einigen Fällen - insbesondere bei Anwendung der VDI-Grundlagen - werden Jahresfrachten berechnet. Deshalb ist eine Angabe von Stundenwerten, wenn überhaupt, nur schwer möglich.

Die Emissionen sind als Jahresemission darzustellen und es ist abzuschätzen, ob die LRV (bzw. die Sanierungsverfügung) eingehalten wurde.

Anschliessend ist der durchschnittliche Stundenwert zu ermitteln, um eine Beurteilung und einen Vergleich mit den Vorgaben der Luftreinhalte-Verordnung vornehmen zu können.

## 4 VOC-Emissionen von Flugpetroltanks

Normalerweise stehen in einem Lager mit Flugpetroltanks auch Benzintanks. Diese dominieren die VOC-Emissionen. Die zusätzlichen Emissionen vom Flugpetrol sind zu vernachlässigen unter der Voraussetzung, dass die Flugpetroltanks mindestens über Schwimmmembranen verfügen.

Sollten die Emissionen aus speziellen Gründen abgeschätzt werden (bspw. wenn neben dem Flugpetrol kein Benzin gelagert wird), wird der folgende pragmatische Ansatz gewählt:

Die Emissionen werden grundsätzlich wie für Benzin berechnet; allerdings ist bei den Festdachtanks mit innenliegender Schwimmmembrane zu berücksichtigen, dass beim Flugpetrol in aller Regel nicht gleich wirksame Abdichtungen eingebaut sind. Es wird ein Wirkungsgrad von 0.95 anstatt 0.98 verwendet. Zudem wird berücksichtigt, dass Flugpetroltanks nicht unbedingt einen weissen Anstrich haben. Aus diesem Grund werden dieselben Formeln wie beim Benzin verwendet, jedoch mit einem Anstrichfaktor von Alu-Silber (1.1) anstatt Weiss (1).

Somit können die VOC-Emissionen vom Flugpetrol durchaus nach dem angepassten Benzinmodell berechnet werden. Die auf der Benzinbasis berechneten VOC-Emissionen sind jeweils durch hundert zu dividieren. Dies entspricht in erster Nähe dem Verhältnis zwischen dem Dampfdruck bei 20°C des Flugpetrols (0.003 bar) und des Benzins (0.4 bar).

### 4.1 Lagertanks

#### 4.1.1 Festdachtanks mit innenliegender Schwimmmembrane

$$L_{\text{Tank,a}} = (1 - \eta_{\text{SD}}) \times [(1 - \eta_{\text{VD}}) \times f \times L_{\text{A,a}} + L_{\text{B,a}}]$$

- $\eta_{\text{SD}}$  Wirkungsgrad Schwimmdecke (mind. 0.95)
- $\eta_{\text{VD}}$  Wirkungsgrad Vakuum-/Druckventil (=0, da kein Ventil vorhanden, frei belüftet)
- $f$  Anstrichfaktor (für Alu-Silber: 1.1)
- $L_{\text{A,a}}$  Verluste durch Auslagerung und Atmung in kg/a
- $L_{\text{B,a}}$  Verluste durch Befüllen (Einlagerung) in kg/a

Eingesetzt ergibt sich damit die folgende vereinfachte Formel:

$$L_{\text{Tank,a}} = 0.055 \times L_{\text{A,a}} + 0.05 \times L_{\text{B,a}}$$

Die **Verluste für Auslagerung und Atmung ( $L_{\text{A,a}}$ )** berechnen sich wie folgt. Es wird auf die Unterscheidung von Sommer- und Winterbenzin verzichtet. Ebenfalls wird auf die Sommertage verzichtet, da dies bei den Emissionen von Flugpetrol nicht viel ausmacht. Hingegen werden Flugpetroltanks regelmässig umgeschlagen, weshalb ein Durchschnittswert von 0.8 für den Sättigungsgrad genommen wird.

$$L_{\text{A,a}} = L_{\text{A,S}} \times d_{\text{S}} + L_{\text{A,W}} \times d_{\text{W}}$$

$$L_{\text{A,a}} = f_{\text{A,S}} \times c_{\text{ns}} \times V_{\text{n,S}} \times d_{\text{S}} + f_{\text{A,W}} \times c_{\text{nw}} \times V_{\text{n,W}} \times d_{\text{W}}$$

- $L_{\text{A,S}}$  mittlerer Tagesatmungsverlust im Sommer in kg/d
- $L_{\text{A,W}}$  mittlerer Tagesatmungsverlust im Winter in kg/d
- $f_{\text{A,S}}$  Sättigungsgrad im Sommer:  
Umschlagstanks: 0.63  
Lagertanks: 1  
→ Durchschnitt: 0.8
- $f_{\text{A,W}}$  Sättigungsgrad im Winter  
Umschlagstanks: 0.57  
Lagertanks: 1  
→ Durchschnitt: 0.8
- $c_{\text{n}}$  Sättigungskonzentration in kg/m<sup>3</sup> der Kohlenwasserstoffe im Gasraum über dem Flüssigkeitsspiegel:  
Sommer  $c_{\text{ns}}$ : 1.14 kg/m<sup>3</sup>  
Winter  $c_{\text{nw}}$ : 0.68 kg/m<sup>3</sup>
- $V_{\text{n}}$  Volumenstrom (Sommer, bzw. Winter)
- $d_{\text{S}}$  Anzahl Sommertage (Mai bis Sept.): 153 d/a
- $d_{\text{W}}$  Anzahl Wintertage (Oktober bis April): 212 d/a

Somit ergibt sich folgende vereinfachte Formel (Berechnung  $V_n$  siehe unten):

$$L_{A,a} = V_{n,S} \times 140 + V_{n,W} \times 116$$

Der Volumenstrom für den Sommer bzw. für den Winter berechnet sich wie folgt:

$$V_n = \left(\frac{T_n}{p_n}\right) \times \left(\frac{p}{T_1} - \frac{p}{T_2}\right) \times V_G \times \frac{1}{t}$$

- $T_n$  Normtemperatur = 273.15 K
- $p_n$  Normdruck = 1013.25 hPa
- $p$  Umgebungsdruck in hPa
- $T_1$  mittlere Minimaltemperatur im Gasraum:  
 $T_{1,S} = 286.5$  K  
 $T_{1,W} = 278$  K
- $T_2$  mittlere Maximaltemperatur im Gasraum:  
 $T_{2,S} = 303.5$  K  
 $T_{2,W} = 286$  K
- $V_G$  Gasraumvolumen über dem Lagergut in  $m^3$   
(Annahme: 10% des Flugpetrolvolumens  $V_B$ )
- $t$  Bezugszeit ( $t = 1$  d)

Eingesetzt ergibt sich damit die folgende Formel für den Sommer bzw. für den Winter, wobei für  $p$  980 hPa eingesetzt wird:

$$V_{n,S} = 0.27 \times 0.19 \times 0.1 V_B [m^3/d] = 0.00513 V_B [m^3/d]$$

$$V_{n,W} = 0.27 \times 0.10 \times 0.1 V_B [m^3/d] = 0.0027 V_B [m^3/d]$$

Damit lässt sich nun die VOC-Jahresemission der Tanks in Abhängigkeit des Flugpetrolvolumens ( $V_B$ ) für die Auslagerung und Atmung berechnen:

$$L_{A,a} = (0.00513 [1/d] \times 140 [d/a] + 0.0027 [1/d] \times 116 [d/a]) \times V_B = \mathbf{1.0314 V_B [kg/a]}$$

Die **Verluste durch Befüllen (Einlagerung) ( $L_{B,a}$ )** berechnen sich wie folgt:

$$L_{B,a} = f_B \times c_n \times Q$$

- $f_B$  Sättigungsgrad,  $f_B = 0.85$
- $c_n$  Sättigungskonzentration in  $kg/m^3$  der Kohlenwasserstoffe im Gasraum über dem Flüssigkeitsspiegel: Gewichteter Schnitt  $c_n$ : 0.87  $kg/m^3$
- $Q$  Einlagerungsmenge in  $m^3/a$

Eingesetzt ergibt sich somit für das Befüllen folgende VOC-Emission:

$$L_{B,a} = 0.74 \times Q [kg/a].$$

Zusammengefasst und unter Berücksichtigung des Wirkungsgrades der Schwimmembrane ergeben sich somit für frei belüftete Festdachtanks mit innenliegender Schwimmembrane folgende jährlichen VOC-Emissionen:

$$L_{Tank,a} = 0.055 \times 1.0314 V_B + 0.05 \times 0.74 \times Q = 0.057 \times V_B + 0.037 \times Q$$

Flugpetrolvolumen $V_B$ (Nutzvolumen)	_____	$m^3$
Einlagerungsmenge in Tanks mit Schwimmembrane $Q$	_____	$m^3/a$
VOC-Emission/Jahr, Basis Benzin [ $L_{Tank,a} = 0.057 \times V_B + 0.037 \times Q$ ]	_____	$kg/a$
VOC-Emission/Jahr Basis Flugpetrol [Reduktion um Faktor 100]	_____	$kg/a$

#### 4.1.2 Frei belüftete Festdachtanks ohne Schwimmembrane

Wird Flugpetrol in Festdachtanks ohne Schwimmembrane gelagert, berechnet sich gemäss VDI 3479 die VOC-Emission wie in 4.1.1 ausser, dass der Wirkungsgrad der Schwimmdecke ( $\eta_{SD}$ ) auf 0 gesetzt wird.

Eingesetzt ergibt sich damit die folgende vereinfachte Formel:

$$L_{\text{Tank,a}} = 1.1 \times L_{\text{A,a}} + L_{\text{B,a}}$$

Die **Verluste für Auslagerung und Atmung ( $L_{\text{A,a}}$ )** und durch Befüllen ( $L_{\text{B,a}}$ ) sind nicht beeinflusst und können aus 4.1.1 entnommen werden.

$$L_{\text{A,a}} = 1.0314 V_B \text{ [kg/a]}$$

$$L_{\text{B,a}} = 0.74 Q \text{ [kg/a]}$$

Zusammengefasst ergeben sich somit für frei belüftete Festdach tanks ohne innenliegende Schwimmembrane folgende jährlichen VOC-Emissionen:

$$L_{\text{Tank,a}} = 1.1 \times 1.0314 V_B + 0.74 Q = 1.1345 \times V_B + 0.74 \times Q$$

Flugpetrolvolumen $V_B$ (Nutzvolumen)		m <sup>3</sup>
Einlagerungsmenge in Tanks ohne Schwimmembrane Q		m <sup>3</sup> /a
VOC-Emission/Jahr, Basis Benzin [ $L_{\text{Tank,a}} = 1.1345 \times V_B + 0.74 \times Q$ ]		kg/a
VOC-Emission/Jahr Basis Flugpetrol [Reduktion um Faktor 100]		kg/a

**4.1.3 Schwimmdach tanks**

Die Berechnung gemäss VDI 3479 für N Schwimmdach tanks mit Flugpetrol ist gegenüber der Berechnung für Benzin unverändert (s. Kapitel 3.1.3). Für  $p^*$  wird 0.125 eingesetzt, was einem Durchschnittsbenzindampfdruck von 400 hPa entspricht:

$$L = 31.2 \times \sum_{i=1}^N D + N \times 329.6 + 7.61 \times 10^{-3} \times \sum_{i=1}^N \frac{Q_i}{D_i}$$

Die Jahresemissionen L werden für Flugpetrol tanks durch 100 geteilt.

**4.2 Armaturen- und Flanschverluste**

Massgebend für die Armaturen- und Flanschverluste ist gemäss VDI der laufende Betrieb. Es wird im Folgenden eine durchschnittliche Abschätzung der Armaturen und Flanschen einer Einlagerungsleitung DN200 (resp. einer Dichtlänge von 0.63 m) gemacht. Sollten gewisse Parameter deutlich abweichen, wäre eine individuelle Anpassung notwendig.

	Beschrieb	Anzahl	Emission/Stunde [g/h]
Absperr- und Regelorgane	Stopfbuchse mit Manschette, O-Ring	10	2.3
Pumpe	Einzel-Gleitringdichtung	1	1
Flanschverbindung	Weichstoffdichtung	40	0.9
Total VOC-Emission/h			4.2

Die Jahresemission berechnet sich wie folgt:

Einlagerungsmenge Flugpetrol		m <sup>3</sup> /a
Leistung Einlagerungspumpe		m <sup>3</sup> /h
Betriebsstunden Einlagerungspumpe [Einlagerungsmenge/Leistung Pumpe]		h/a
VOC-Emission [4.2 x Betriebsstunden Einlagerungspumpe]		g/a
	=	
Auslagerungsmenge Flugpetrol		m <sup>3</sup> /a
Leistung Auslagerungspumpe		m <sup>3</sup> /h
Betriebsstunden Auslagerungspumpe [Auslagerungsmenge/Leistung Pumpe]		h/a
VOC-Emission [4.2 x Betriebsstunden Auslagerungspumpe]		g/a
	=	
Total Flugpetrol [VOC-Emission Einlagerung + VOC-Emission Auslagerung]/100		kg/a

### 4.3 Tankreinigung

#### 4.3.1 Grundlagen zur Tankreinigung bei Flugpetroltanks

Da die Flugpetrolkonzentration im Gasraum des Tanks in der Regel unterhalb der unteren Explosionsgrenze liegt, werden die Gase bei einer Reinigung nicht speziell abgereinigt oder verbrannt. Die Tanks werden ventiliert und so für den Tankreiniger begehbar gemacht.

Für die Berechnung wird angenommen, dass die Konzentration im Gasbereich bei  $10 \text{ g/m}^3$  liegt. Die so berechneten Werte entsprechen direkt der VOC-Emission und dürfen nicht zusätzlich um den Faktor 100 reduziert werden.

#### 4.3.2 Tanks mit innenliegender Schwimmembrane und Schwimmdachtanks

Das Gasvolumen eines frei belüfteten Festdachtanks mit innenliegender Schwimmembrane entspricht dem Volumen zwischen dem Boden und der Schwimmembrane. Diese befindet sich auf einer Höhe von rund 180 cm. Somit errechnet sich die VOC-Emission bei einer Tankreinigung wie folgt:

Gasvolumen des Tanks [1.8 m x Grundfläche des Tanks]		_____ $\text{m}^3$
VOC-Restbelastung im Tank [ $10 \text{ g/m}^3 \times$ Gasvolumen]		_____ g
	=	_____ kg

#### 4.3.3 Frei belüftete Tanks ohne innenliegende Schwimmembrane

Bei frei belüfteten Tanks ohne innenliegende Schwimmembrane ist für das Gasvolumen direkt das Nutzvolumen einzusetzen. Im Weiteren läuft die Berechnung analog:

Gasvolumen des Tanks [Nutzvolumen des Tanks]		_____ $\text{m}^3$
VOC-Restbelastung im Tank [ $10 \text{ g/m}^3 \times$ Gasvolumen]		_____ g
	=	_____ kg

### 4.4 Ausserordentliche Ereignisse und allgemeine Bemerkungen

Im Falle von ausserordentlichen Ereignissen sind diese kurz zu beschreiben und die Emissionen abzuschätzen.

In diesem Abschnitt sind zum Beispiel auch Korrosionsschutzarbeiten aufzuführen.

### 4.5 Zusammenfassung der VOC-Emissionen von Flugpetroltanks

In einigen Fällen - insbesondere bei Anwendung der VDI-Grundlagen - werden Jahresfrachten berechnet. Deshalb ist eine Angabe von Stundenwerten, wenn überhaupt, nur schwer möglich.

Die Emissionen sind als Jahresemission darzustellen und es ist abzuschätzen, ob die LRV (bzw. die Sanierungsverfügung) eingehalten wurde.

Anschliessend ist der durchschnittliche Stundenwert zu ermitteln, um eine Beurteilung und einen Vergleich mit den Vorgaben der Luftreinhalte-Verordnung vornehmen zu können.

Referenzen:

[1] Verein Deutscher Ingenieure (VDI), Richtlinie 3479, Emissionsminderung Raffineriefarne Mineralöltanklager, August 2010

[2] Manual of Petroleum Measurement Standard, Chapter 19: „Evaporative Loss Measurement“ API Publications 2417 and 2419 - American Petroleum Institute, April 1997