

## 6.2 Inertisierung

### Ziel:

- Reduzierung des Sauerstoffvolumenanteils auf einen Wert unterhalb der Sauerstoffgrenzkonzentration

### Methode:

- Substitution des Sauerstoffs durch nicht mit der brennbaren Komponente reagierendes Gas
- übliche Inertgase: N<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O (dampfförmig), Edelgase (He, Ar)

### Verfahren der Inertisierung:

- Druckwechsel-Verfahren
- Teilvakuierung
- Vakuum-Druckwechsel-Verfahren
- Durchflussverfahren
- Verdrängungsverfahren
- Permanent inerte Atmosphäre

Achtung: Bei Biogasanlagen wird der Begriff „Inertisierung“ gelegentlich falsch verwendet (Reduzierung des Brennstoff-Volumenanteils durch erhöhte Luftzufuhr) !!!

## Höchstzulässige Sauerstoffkonzentration bei inertisierten Prozessen

$$\varphi_{O_2, zul.} = LOC - \Delta S$$

$\Delta S$  – Sicherheitsabstand

$\Delta S \geq 1 \%$  Volumenanteil

Partielle Inertisierung:

- Inertisierung bis unter LOC (+ Sicherheitsabstand) → bei Luftzufuhr wird Gemisch wieder explosionsfähig

Totale Inertisierung:

- Reduzierung des Volumenanteils von O<sub>2</sub> so weit, dass auch nach erneuter Zufuhr von Luft LOC nicht überschritten wird

Sauerstoff-Volumenanteil muss kontinuierlich messtechnisch überwacht werden.

# LOC abhängig vom Inertgas

Brennbarer Stoff	Temperatur in °C	Partielles Inertisieren				Totales Inertisieren (Werte nur zur Orientierung)	
		Sauerstoffkonzentration im Gesamtgemisch brennbarer Stoff/ Inertgas/Luft beim Inertisieren mit:		Mindestwert des Verhältnisses der Molanteile von Inertgas (N <sub>2</sub> oder CO <sub>2</sub> ) und Luft (L) zum Inertisieren bei beliebiger Zugabe von brennbarem Stoff		Mindestwert des Verhältnisses der Molanteile von Inertgas (N <sub>2</sub> oder CO <sub>2</sub> ) und brennbarem Stoff (B) zum Inertisieren bei beliebiger Zugabe von Luft	
		N <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	N <sub>2</sub> /L	CO <sub>2</sub> /L	N <sub>2</sub> /B	CO <sub>2</sub> /B
		C <sub>maxO<sub>2</sub></sub> in mol%	C <sub>maxO<sub>2</sub></sub> in mol%				
Benzol	100 <sup>7)</sup>	8,5	11,8	1,4	0,7	42	22
n-Butan	20	9,6	~ 12	1,1	-	27	-
i-Butan	20	10,3	13,1	1,0	0,5	28	13
Cyclopropan	20	9,0	~ 12	-	-	-	-
Ethan	20	8,8	11,7	1,3	0,7	21	11
Ethylen	20	7,6	10,5	1,7	0,9	24	13
Ethylenoxid	20	wegen Zerfallsfähigkeit von Ethylenoxid existieren diese Werte nicht				17	15
Hexan	20	9,3	11,6 <sup>7)</sup> (100 °C)	1,3	0,8 <sup>7)</sup> (100 °C)	42	32 <sup>7)</sup> (100 °C)
Kohlenmonoxid	20	4,3	4,6	3,1	1,7	6	3
Methan	20	9,9	13,7	1,0	0,4	11	5
Pentan	20	9,3	~ 1,3	-	-	~ 42	-
Propan	20	9,8	12,6	1,1	0,6	26	13
Propylen	20	9,3	12,6	1,2	0,6	23	12
Vergaserkraftstoff	20	~ 9,3	-	~ 1,3	-	~ 42	-
Wasserstoff	20	4,3	5,2	3,4	1,8	17	12
Heptan	100	-	10,9	-	0,9	-	35
Toluol	100	9,6	12,9	1,1	0,6	42	21
Xylol	100	9,7	13,1	1,1	0,6	42	21
Methylethylketon	20	9,5	-	1,2	-	26	-
Ethanol	20	8,5	-	1,4	-	17	-

## LOC abhängig vom Inertgas (Fortsetz.)

Brennbarer Stoff	Temperatur in °C	Partielles Inertisieren				Totales Inertisieren (Werte nur zur Orientierung)	
		Sauerstoffgrenz- konzentration im Gesamtgemisch brennbarer Stoff/ Inertgas/Luft beim Inertisieren mit:		Mindestwert des Verhältnisses der Molanteile von Inertgas (N <sub>2</sub> oder CO <sub>2</sub> ) und Luft (L) zum Inertisieren bei beliebiger Zu- gabe von brenn- barem Stoff		Mindestwert des Verhältnisses der Molanteile von Inertgas (N <sub>2</sub> oder CO <sub>2</sub> ) und brenn- barem Stoff (B) zum Inertisieren bei beliebiger Zu- gabe von Luft	
		N <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	N <sub>2</sub> /L	CO <sub>2</sub> /L	N <sub>2</sub> /B	CO <sub>2</sub> /B
		C <sub>max,O<sub>2</sub></sub> in mol %	C <sub>max,O<sub>2</sub></sub> in mol %				
Methanol	20	8,1	–	~ 1,4	–	~ 7	–
Propanol-1	20	9,3	–	1,3	–	19	–
Propanol-2	20	8,7	–	1,4	–	25	–
Ethylacetat	20	9,8	–	1,1	–	23	–
Propylformiat	20	9,8	–	1,1	–	21	–

Alle mit ~ gekennzeichneten Werte sind abgeschätzt

† Konzentration bei 20 °C nicht erreichbar

## Druckwechselverfahren (für druckbelastete Behälter):

- Aufladung des Behälters mit Inertgas bis zum zulässigen Druck,
- Entspannung des Behälters auf Umgebungsdruck
- Wiederholung des Zyklus bis  $\varphi_{O_2, zul.}$  erreicht ist.

## Volumenanteil des Sauerstoffs nach n Zyklen

- bei isothermer Druckänderung

$$C_n = C_i + (C_0 - C_i) \left( \frac{P_1}{P_2} \right)^n$$

$C_0$  – anfänglicher Sauerstoff-Volumenanteil  
 $C_i$  - Sauerstoff-Volumenanteil im Inertgas  
 $C_n$  - Sauerstoff-Volumenanteil nach n Zyklen  
 n – Anzahl der Zyklen

- bei adiabater Druckänderung

$$C_n = C_i + (C_0 - C_i) \left( \frac{P_1}{P_2} \right)^{\frac{n}{k}}$$

$P_1$  – untere Druckgrenze  
 $P_2$  – obere Druckgrenze  
 k - Adiabatenexponent

Bei gegebener zulässiger Sauerstoffkonzentration und gegebenem Druckverhältnis ergibt sich die Anzahl der mindestens notwendigen Zyklen.

isotherm

$$n = \frac{\log \left( \frac{C_n - C_i}{C_0 - C_i} \right)}{\log \left( \frac{P_1}{P_2} \right)}$$

adiabat

$$n = k \left( \frac{\log \left( \frac{C_n - C_i}{C_0 - C_i} \right)}{\log \left( \frac{P_1}{P_2} \right)} \right)$$

## Teilevakuierung

- Für Explosionen von Kohlenwasserstoff/Luft-Gemischen gilt  $p_{\text{ex}} \approx 8 \dots 10 p_i$
- Soll  $p_{\text{ex}} \approx p_U$  sein, muss der Behälter auf etwa  $1/10 p_U$  evakuiert werden, d.h. auf 100 mbar.
- Neben der dadurch verminderten Sauerstoffmenge erhöht sich mit kleinerem Druck auch die Mindestzündenergie.

## Vakuum-Druckwechsel-Verfahren

- Wird angewendet, wenn die zu inertisierende Apparatur Überdrücken nicht standhält, aber für Unterdruck geeignet ist, z.B. Glasapparaturen oder –behälter.
- Die gleichen Gleichungen wie für das Druckwechselverfahren können verwendet werden.
- Leckageströme müssen beachtet werden.

### Anwendungsverfahren:

1. Evakuierung des Apparates bis zum geringsten erreichbaren Druck
2. Entkoppeln des evakuierten Apparates (Schließen aller Ventile)
3. Messen des zeitlichen Druckanstieges (mögliche Undichtigkeiten)
4. Brechen des Vakuums mit Inertgas



## Durchflussverfahren

Wird angewendet, wenn

- Inertgas und Luft etwa gleiche Dichten haben,
- Strömungseinlass und –auslass möglichst an gegenüberliegenden Seiten angeordnet sind,
- keine Verzweigungen, Blindstutzen etc. vorhanden sind,
- von vollständiger Durchmischung von Inertgas und (Rest-)Sauerstoff ausgegangen werden kann.

Notwendige Durchströmungszeit

$$t = F \frac{V}{Q} \ln \left( \frac{C_i - C_o}{C_i - C_f} \right)$$

$C_f$  – Sauerstoffkonzentration nach der Zeit  $t$

$V$  – Apparatvolumen

$Q$  – Volumenstrom des Inertgases

$F$  - Sicherheitsfaktor

## Sicherheitsfaktor F

### Empfehlung nach CEN/TR 15281:2006

- unverzweigte Rohrleitungen:  $F = 1$
- Behälter mit diametral gegenüberliegendem Ein- und Auslass:  $F = 2$
- alle anderen Anordnungen:  $F = 5$

Sauerstoffvolumenanteil bei gegebenem Inertgasvolumenstrom und gegebener Durchströmungszeit

$$C_f = C_i + \frac{(C_o - C_i)}{\exp\left(F \frac{Q \times t}{V}\right)}$$

Inertgasvolumenstrom für gegebenen Sauerstoffvolumenanteil und gegebene Durchströmungszeit

$$Q = -F \frac{V}{t} \ln\left(\frac{(C_i - C_o)}{(C_i - C_f)}\right)$$