
2.1 Erfassung lösemittelhaltiger Abluft [1]

Bei der Erfassung lösemittelhaltiger Abgase sollte die abzusaugende Luftmenge minimiert werden, z. B. durch Kapselungen oder optimierte Absaugsysteme.

Große Abluftmengen erfordern große Investitionen für Rohrleitungen, Gebläse und Abluftreinigungsanlagen. Oft werden künstlich Emissionen verursacht, wenn Frischluft durch Behälter oder Reaktoren gesaugt und dabei mit Lösemitteln aufgesättigt wird.

Geschlossene Systeme Die Forderung nach einer Minimierung der kontaminierten Abluft ist am besten zu verwirklichen durch geschlossene Anlagen, aus denen nur durch thermische Ausdehnung oder beim Befüllen Luft durch ein Überdruckventil in eine Pendel- oder Abgasleitung verdrängt wird.

In Abb. 2.1 werden mögliche Ablufterfassungssysteme gezeigt.

In einem geschlossenen System dürfen nicht plötzlich Mann- oder Handlöcher, z. B. zur Feststoffzugabe in einen Rührbehälter, geöffnet werden.

Die Behälter sollten durch eine Detonationssicherung geschützt werden.

Folgende Massnahmen sind zu empfehlen:

- Geschlossene Produktionsbehälter, ausgelegt z. B. für 0,5 bar Überdruck, mit Überfüllsicherungen, Niveauanzeige und Atmungsventil für das Belüften mit Luft oder Stickstoff und das Entlüften in die Abluft- oder Pendelleitung.
- Geschlossene Rührbehälter, ausgelegt für 1–3 bar Überdruck, mit Rührwellenabdichtungen, Niveauanzeigen und Atmungsventilen für die Be- und Entlüftung.
- Geschlossene Abfüllung in Gebinde oder Container bzw. Abpumpen in andere Behälter mit Gasrückführung über eine Pendelleitung.

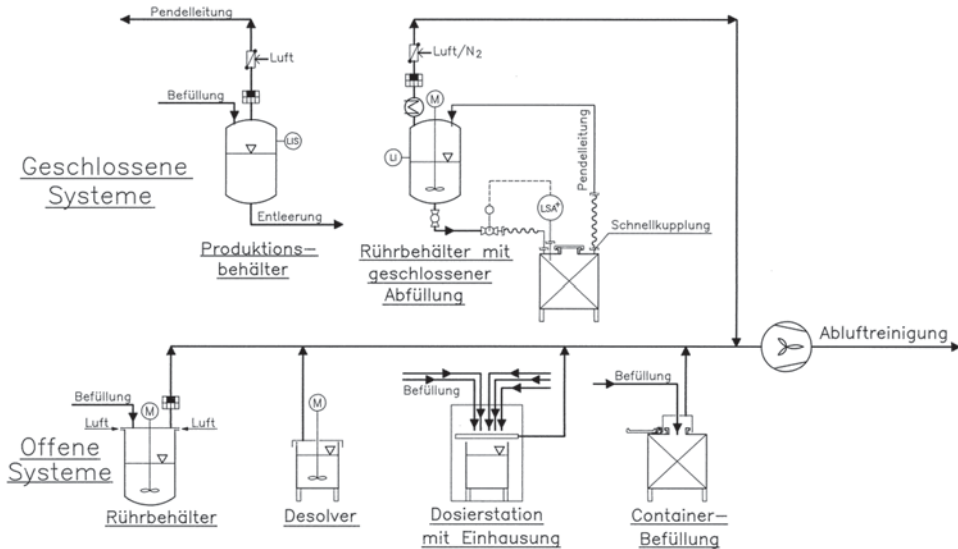


Abb. 2.1 Abluftfassung für geschlossene und offene Systeme

- Feststoffzugabe nicht durch ein geöffnetes Mannloch, sondern durch eine Schleuse oder durch direktes Einmischen mit einem Spezialrührer, der das Pulver ansaugt, oder durch Umpumpen und Feststoffeinmischung in einem Injektionsmischer (Abb. 2.2). Beim direkten Einmischen vermeidet man die Verstopfung der Detonationssicherung durch Staub
- Da keine Verdünnungsluft in das System eingesaugt wird können hohe Lösemittelkonzentrationen im System auftreten.

Es sind entsprechende Sicherheitsmassnahmen vorzusehen:

Detonationssicherung in der Abluftleitung und Inertisierung mit Stickstoff und Niveaumanzeige zur Kontrolle, dass der Rührer überflutet ist

Kapselungen Mit einer Kapselung sollen durch einen geringen Unterdruck innerhalb einer Einhausung Schadstoffaustritte in die Produktionshalle vermieden oder zumindest minimiert werden.

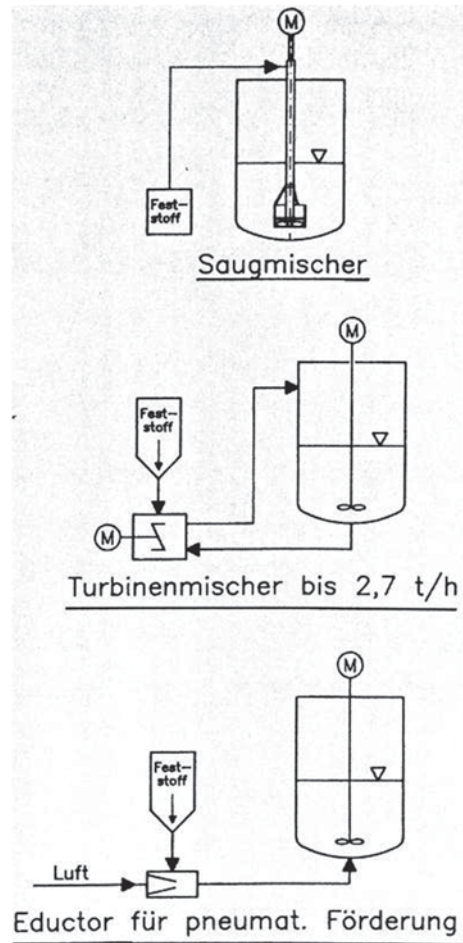
Im Gegensatz zu geschlossenen System muss abgesaugt werden, weil die Kapselung nicht luftdicht ist. Es werden nur die freien Austrittsquerschnitte verringert, damit weniger Luft abgesaugt werden muss.

Erforderliche Absaugleistung: Ca. 2000 m³/h pro m² freie Querschnittsfläche

In Abb. 2.1 werden einige offene Systeme mit Kapselung gezeigt:

- Offene Rührbehälter oder Desolver erhalten einen Schlitzdeckel zum Absaugen
- Dosierstationen oder Containerfüllstationen werden eingehaust.
- und abgesaugt.

Abb. 2.2 Staubarme
Feststoffzugabe



Die Einhausung der Waage hat eine Schiebetür oder einen Vorhang für das Einbringen der Gebinde oder Container

Schwieriger wird die Absaugung, wenn in den Dissolver bei der Produktion Feststoffe zugegeben werden müssen.

Zwei Möglichkeiten sind in Abb. 2.3 dargestellt.

- Desolverdeckel mit U-förmiger Ringabsaugung
- Desolverhaube mit Schiebetür

Bei Rührbehältern mit offener Feststoffzugabe wie in Abb. 2.1 wird der Feststoff über einen offenen Trichter durch das geöffnete Mannloch eingegeben.

Bei geschlossenem Mannloch wird nur eine geringe Luftmenge abgesaugt, z. B. $10 \text{ m}^3/\text{h}$.

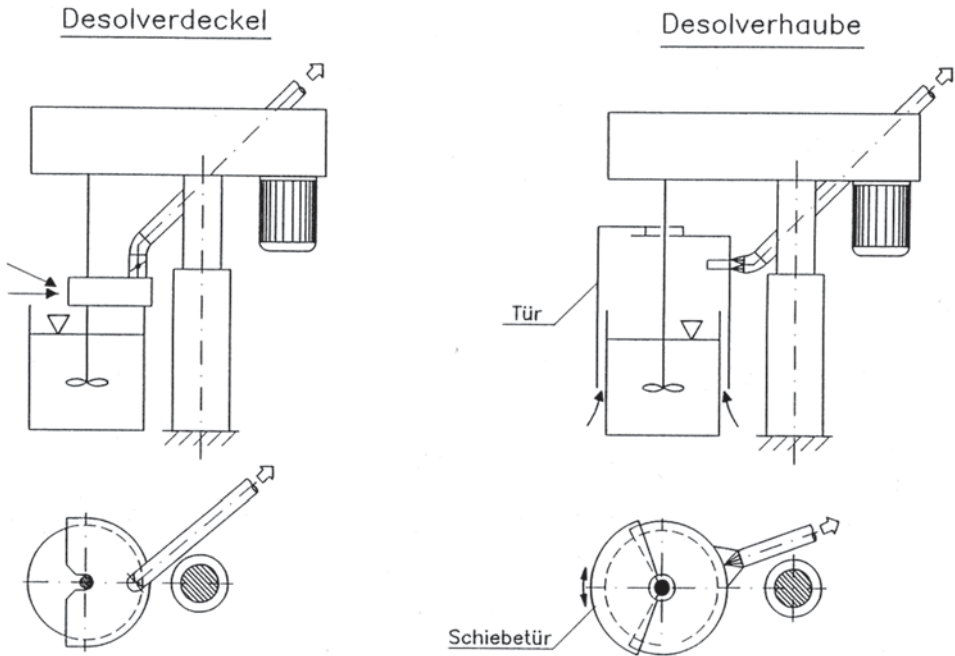


Abb. 2.3 Desolverabsaugungen

Wenn das Mannloch geöffnet wird für die Feststoffdosierung, müssen $600 \text{ m}^3/\text{h}$ abgesaugt werden aus dem Aufgabetrichter. Die abgesaugte Luft enthält Lösemittel und Staub.

Der Staub verstopft die Detonationssicherung. Es muss eine Spülvorrichtung installiert werden.

Besser ist die Absaugung aus dem Aufgabetrichter und die Staubreinigung in einem Staubfilter.

Um einen Lösemittel- und Staubaustritt in die Halle zu vermeiden, müssen ca. $1500\text{--}2000 \text{ m}^3/\text{h}$ staub- und lösemittelhaltige Luft pro m^2 offener Querschnitt abgesaugt werden.

Die Abluftleitung und die Detonationssicherung müssen entsprechend ausgelegt werden.

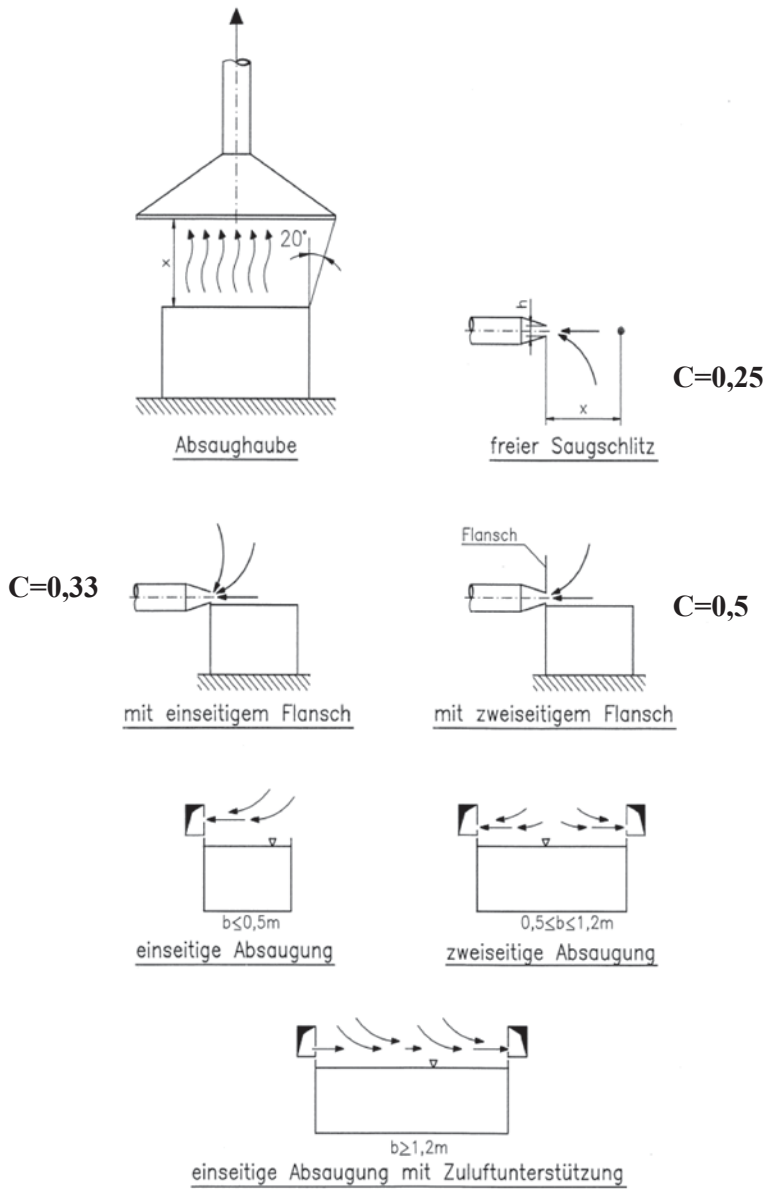
Auch die Abluftreinigungsanlage muss für die plötzliche anfallende zusätzliche Abluftmenge ausgelegt werden.

Wesentlich besser ist die staubfreie Feststoffzugabe wie sie in Abb. 2.2 gezeigt wird oder eine Feststoffzugabe über ein Schleusensystem.

Absaughauben oder -schlitze zur Abluftfassung [2–4]

In Abb. 2.4 werden einige Möglichkeiten zur besseren Abluftfassung aufgezeigt.

Der Schadstofffangungsgrad von offenen Absaugsystemen mit Absaughauben oder -schlitzen lässt sich durch folgende Massnahmen verbessern:

**Abb. 2.4** Verschiedene Absaugmöglichkeiten

- Möglichst kurze Saugweiten bzw. Abstände bis zum Saugrohr oder Saugschlitz
- Hohe Strömungsgeschwindigkeiten im Saugrohr oder Saugschlitz zur Absenkung des statischen Drucks
- Große Ansaugquerschnitte für die angesaugte Abluft

Ein kurzer Abstand ist häufig aus produktionstechnischen Gründen nicht möglich und ein grosser Ansaugquerschnitt hat zur Folge, dass große Abluftmengen abgesaugt werden, die gereinigt werden müssen.

Einen entscheidenden Einfluss auf die abzusaugende Luftmenge hat die Ausbildung und Anordnung der Saugöffnung, um die erforderliche Erfassungsgeschwindigkeit von 0,3–1 m/s zu erreichen.

Durch ein- oder beidseitige Flansche an den Saugschlitzten lässt sich die anzusaugende Luftmenge um 25–50 % reduzieren.

Ähnliches gilt, wenn man eine Plattenabsaugung statt einer Saughaube installiert.

Die Auslegung von offenen Absaugungen erfolgt so, dass für eine erforderliche Erfassungsgeschwindigkeit w_x in einem vorgegebenen Abstand x zur Saugöffnung die erforderliche Schlitzgeschwindigkeit w_s ermittelt wird.

$$w_s = \frac{w_x}{C} * \frac{x}{h} \text{ (m/s)}$$

- C Beiwert für die Ansaugöffnung
- h Schlitzhöhe (m)
- w_s Schlitzgeschwindigkeit (m/s)
- w_x Ansauggeschwindigkeit im Abstand x (m/s)
- x Entfernung zum Saugschlitz = Saugweite (m)

Beispiel 2.1.1: Berechnung der abzusaugenden Luftmengen bei verschiedenen Saugöffnungen

Daten: $w_x = 0,5 \text{ m/s}$ $x = 0,5 \text{ m}$ Schlitzhöhe $h = 40 \text{ mm}$ Schlitzlänge $L = 1 \text{ m}$

Freier Saugschlitz mit $C = 0,25$:

$$w_s = \frac{0,5}{0,25} * \frac{0,5}{0,04} = 25 \text{ m/s} \quad V = 25 * 0,04 * 3600 = 3600 \text{ m}^3/\text{h}$$

Für $x = 1 \text{ m}$ Abstand: $w_s = 50 \text{ m/s}$ $V = 7200 \text{ m}^3/\text{h}$

Beidseitiger Flansch mit $C = 0,5$:

$$w_s = \frac{0,5}{0,5} * \frac{0,5}{0,04} = 12,5 \text{ m/s} \quad V = 12,5 * 0,04 * 3600 = 1800 \text{ m}^3/\text{h}$$

Einseitiger Flansch mit $C = 0,33$:

$$w_s = \frac{0,5}{0,33} * \frac{0,5}{0,04} = 18,9 \text{ m/s} \quad V = 18,9 * 0,04 * 3600 = 2722 \text{ m}^3/\text{h}$$

Eine wirtschaftlich vertretbare Absaugung ist nur bis zu einer Saugweite von 0,5 m möglich.

Grössere Flächen werden von beiden Seiten oder mit Zuluftunterstützung abgesaugt.

2.1.1 Planung von Absaugsystemen

Für jeden einzelnen Absaugstrang wird die maximal abzusaugende Abluftmenge zur Vermeidung von Schadstoffaustritten in die Produktionshalle ermittelt.

Bei grösseren Anlagen müssen an 100–200 Absaugstellen kontinuierlich oder diskontinuierlich unterschiedliche Abluftmengen mit schwankender Lösemittelkonzentration abgesaugt werden.

In Abb. 2.5 sind einige Beispiele für die unterschiedlichen Anforderungen in verschiedenen Abluftleitungen dargestellt

Die Dimensionierung der Abluftleitung erfolgt so, dass der Druckverlust für die abzusaugende Luftmenge kleiner sein muss als die verfügbare Druckdifferenz, z. B. 5 oder 7 mbar, für den Absaugstrang.

Für jeden Strang muss der Druckverlust ΔP ermittelt werden [5].

Für geringe Druckverluste kann inkompressibel gerechnet werden.

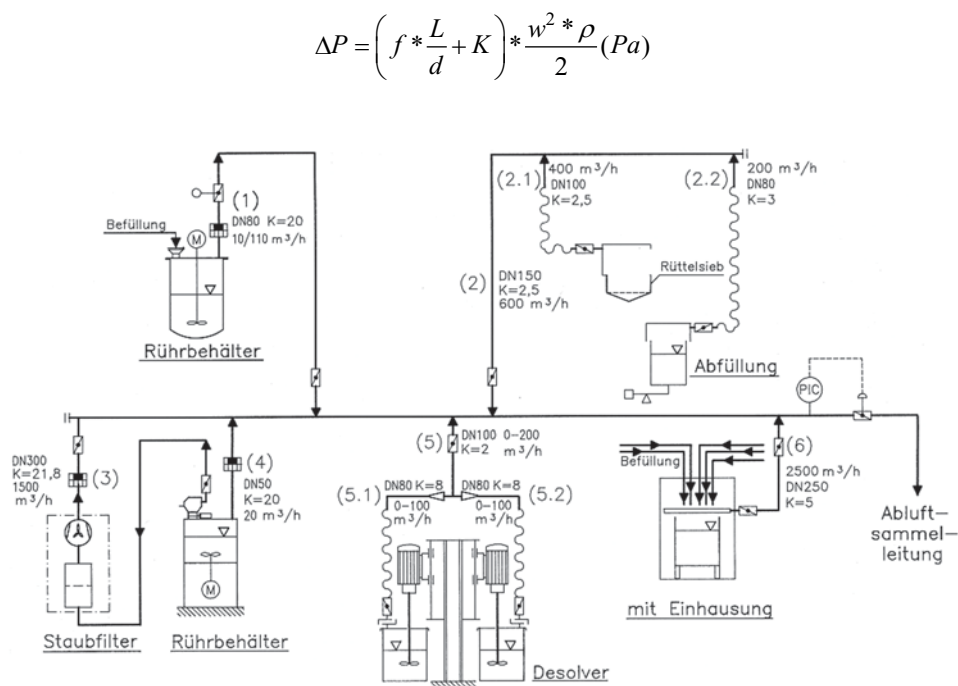


Abb. 2.5 Auslegung eines Abluftsystems

- f Reibungsbeiwert
- L Rohrleitungslänge (m)
- d Rohrdurchmesser (m)
- w Strömungsgeschwindigkeit (m/s)
- P Gasdichte (kg/m^3)
- K Summe der Widerstandsbeiwerte von Formstücken und Armaturen

Zu empfehlen ist das Erstellen von Rohrleitungskennlinien für die einzelnen Absaugleitungen, um den Einfluss der unterschiedlichen abzusaugenden Luftmengen auf den Druckverlust zu verdeutlichen.

In Abb. 2.6 sind die Rohrleitungskennlinien der Stränge 1, 3 und 6 aus Abb. 2.5 dargestellt.

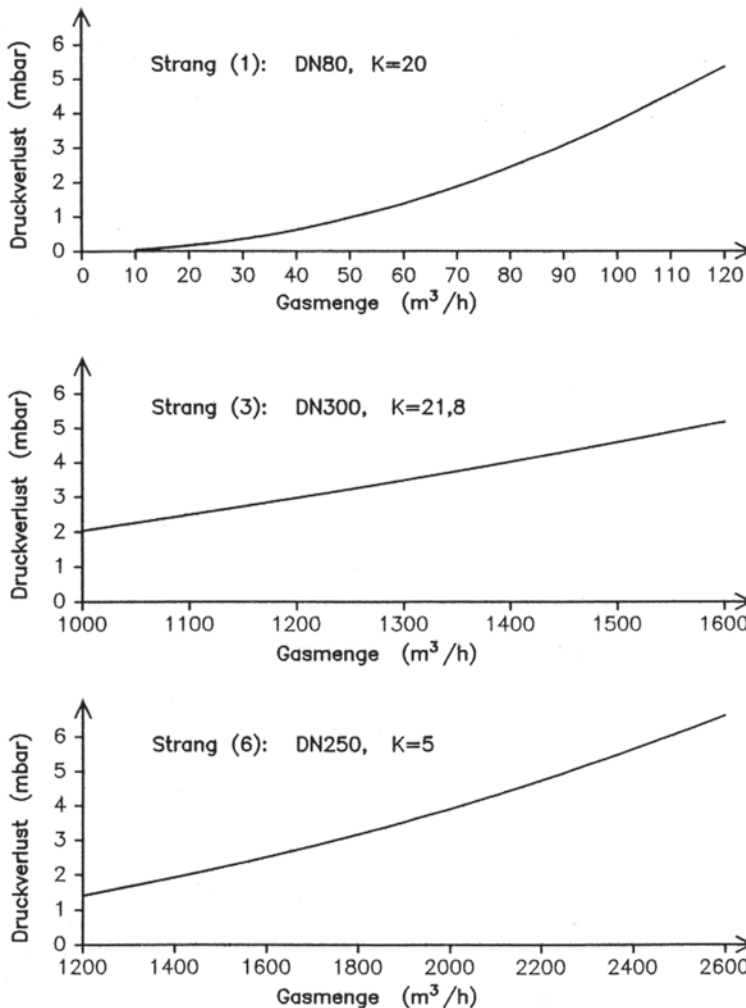


Abb. 2.6 Rohrleitungskennlinien von Absaugleitungen

Mit Drosselklappen können die Kennlinien verändert werden.

Die Auslegung wird kompliziert, wenn z. B. parallel aus 10 Behältern im Normalbetrieb je 10 m³/h abzusaugen sind, aber zeitweise – bei Öffnung eines Handlochs – aus einem Behälter 100 m³/h abgesaugt werden müssen.

Es muss vermieden werden, dass bei Öffnung eines Mannlochs die Absaugung an den anderen Behältern zusammenbricht.

Die Abluftleitungen müssen dicht sein, um Leckagen und Kondensattropfstellen zu vermeiden.

Eine Auslegung gemäß PN 10 ist ausreichend.

Zur Vermeidung von Korrosion sollte Edelstahl als Werkstoff gewählt werden.

An nicht vermeidbaren „Säcken“ in der Leitung sollte ein Ablasshahn montiert werden.

Explosionsschutz Eine Produktionshalle, in der mit Lösemitteln gearbeitet wird, ist in der Regel der Ex-Zone 1 zuzuordnen, so dass Zündquellen in der Halle auszuschliessen sind.

Die Lösemittelkonzentration in der Halle liegt unter den MAK-Werten und ist somit ungefährlich.

Aber bei der gezielten Absaugung aus Behältern, Mischern etc. kann die Lösemittelkonzentration der Abluft örtlich durchaus auf Werte oberhalb der UEG ansteigen.

In Abb. 2.5 werden die Anlagen mit explosionsfähiger Abluft durch Detonationssicherungen abgesichert.

Die Leitungen werden druckstossfest ausgeführt. Der Ventilator ist ex-geschützt.

Normalerweise wird die zeitweise explosible Abluft durch die Verdünnung mit den gering beladenen Abluftströmen von weniger geschlossenen Emissionsquellen auf Konzentrationen unterhalb von 50 % UEG abgesenkt.

Die Absaugung wird durch Strömungs- und Unterdruckwächter ständig überwacht.

Die Lösemittelkonzentration wird mit einem FID oder GC kontrolliert.

Bei einem Anstieg der Lösemittelkonzentration über 50 % UEG wird eine Stellklappe für Verdünnungsluft geöffnet.

Auf jeden Fall muss die Lösemittelkonzentration an den Ventilatoren unter 50 % UEG liegen.

In den Abb. 2.7 und 2.8 wird gezeigt, wie man das Abluftsystem mit Detonationssicherungen oder Luftverdünnung auf 50 % UEG mithilfe von Gaswarngeräten schützen kann.

In den Abb. 2.9 und 2.10 wird gezeigt, wie schnell die Lösemittel aus einem offenen Behälter oder einer Lache am Boden durch Diffusion und Konvektion in die vorbeiströmende Luft transportiert werden.

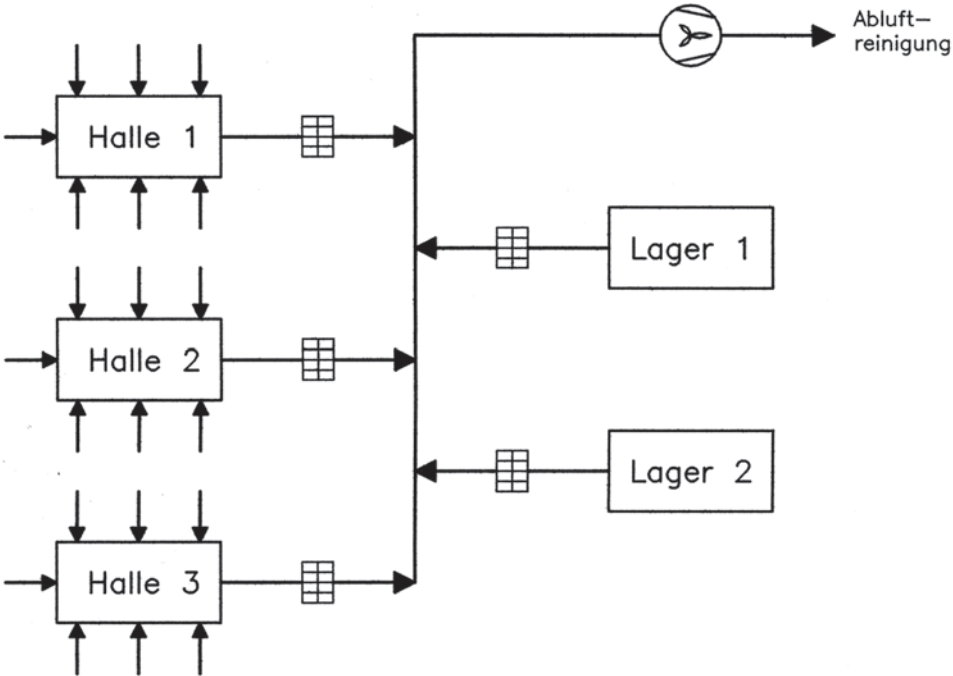


Abb. 2.7 Absicherung der Abluftfassung mit Detonationssicherungen

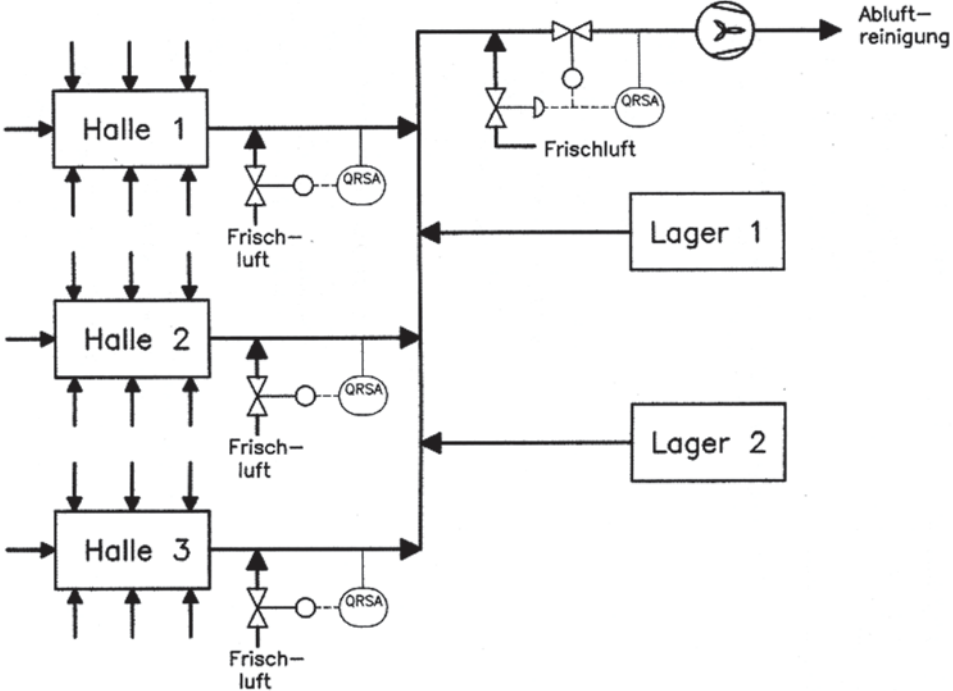
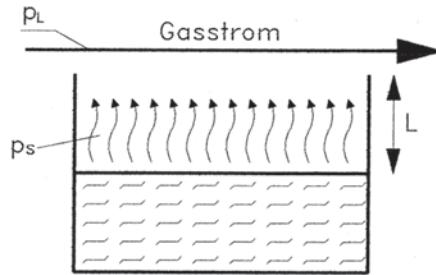


Abb. 2.8 Absicherung der Abluftabsaugung durch Messung der Lösemittel-konzentration und Ver-dünnung mit Luft auf <50% UEG

Abb. 2.9 Stofftransport der Lösemitteldämpfe durch Diffusion und Konvektion

Stofftransport der Lösemitteldämpfe

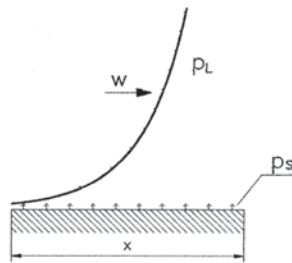


$$m = \frac{D}{L} \cdot \frac{1}{R_i \cdot T} \cdot (p_s - p_L) \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \text{h}} \right]$$

Beispiel: $L = 10 \text{ mm}$

Benzol: $t = 26^\circ \text{C}$ $m = 1,32 \text{ kg}/(\text{m}^2 \text{h})$

Pentan: $t = 18,5^\circ \text{C}$ $m = 5 \text{ kg}/(\text{m}^2 \text{h})$



$$m = \frac{h_D}{R_i \cdot T} \cdot (p_s - p_L) \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \text{h}} \right]$$

Beispiel: $x = 0,5 \text{ m}$

Benzol: $w = 1 \text{ m/s}$ $m = 3,74 \text{ kg}/(\text{m}^2 \text{h})$

$w = 0,1 \text{ m/s}$ $m = 1,18 \text{ kg}/(\text{m}^2 \text{h})$

Pentan $w = 0,1 \text{ m/s}$ $m = 4,5 \text{ kg}/(\text{m}^2 \text{h})$

Stofftransport der Lösemitteldämpfe von einer angeströmten Platte der Länge x in die vorbeiströmende Luft mit laminarer Grenzschicht

$$m = \frac{h_D}{R_i \cdot T} \cdot (p_s - p_L) \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \cdot \text{h}} \right]$$

h_D = Stoffübergangszahl [m/h]

T = Temperatur [K]

R = Gaskonstante des Lösemittels

p_s = Sättigungspartialdruck an der Platte [bar]

p_L = Sättigungspartialdruck in der Luft [bar]

Berechnung der Stoffübergangszahl h_D in Analogie zum Wärmeübergang:

$$Nu_x = \frac{\alpha \cdot x}{\lambda} = 0,664 \cdot \sqrt{Re_x} \cdot \sqrt[3]{Pr}$$

$$\frac{h_D \cdot x}{D} = 0,664 \cdot \sqrt{Re_x} \cdot \sqrt[3]{Sc}$$

α = Wärmeübergangszahl

x = Anströmlänge (m)

Re = Reynoldszahl = $w \cdot x / \nu$

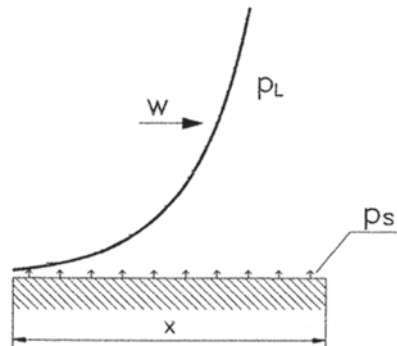
Pr = Prandlzahl

Sc = Schmidtzahl = ν / D

D = Diffusionskoeffizient

λ = Wärmeleitzahl

c_p = spez. Wärme des Gases [kcal/(m³K)]



Schmidtzahlen Sc : Diffusionskoeffizienten

Benzol:	1,76	0,0317 m ² /h
Toluol:	1,84	0,0302 m ² /h
Ethanol:	1,30	0,0428 m ² /h
Ammoniak:	0,66	0,0850 m ² /h

Beispiel 1:

Benzoldämpfe

$T = 299 \text{ K}$ $x = 0,5 \text{ m}$ $R = 0,001066 \text{ bar m}^3/(\text{kg mol K})$

$w = 1 \text{ m/s}$

$$Re_x = \frac{1 \cdot 0,5}{16 \cdot 10^{-6}} = 31250$$

$$\frac{h_D \cdot x}{D} = 0,664 \cdot \sqrt{31250} \cdot \sqrt[3]{1,76} = 141,7$$

$$h_D = \frac{141,7}{0,5} \cdot 0,0317 = 8,98 \frac{\text{m}}{\text{h}}$$

$$m = \frac{8,98}{0,001066 \cdot 299} \cdot (0,133 - 0) = 3,74 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \text{h}}$$

Abb. 2.10 Beispiel für den Stofftransport der Lösemitteldämpfe durch Konvektion

2.2 Erforderliche Auslegungsdaten und Berechnungen

2.2.1 Abluftmengen

Zunächst werden die erforderlichen abzusaugenden Abluftmengen an den einzelnen Stellen unter Berücksichtigung von MAK-Wert und Explosionsschutz bestimmt.

Beispiel

Behälter 1: 50 m³/h	Behälter 2: 100 m³/h	Füllstation 1: 2000 m³/h
Desolvent 1: 1000 m³/h	Rührbehälter: 100 m³/h	
Summe der abzusaugenden Luftmengen: 3250 m³/h		

2.2.2 Auswahl eines geeigneten Absaugsystems

Für die vorliegende Aufgabenstellung wird eines der in Abb. 2.11 dargestellten Absaugsysteme ausgewählt.

2.2.3 Rohrleitungsdimensionierung und Druckverluste in den Abluftrohren

Für die erste Übersichtsdimensionierung werden folgende Strömungsgeschwindigkeiten gewählt:

Mittelwert: 12–18 m/s

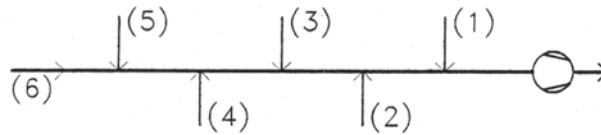
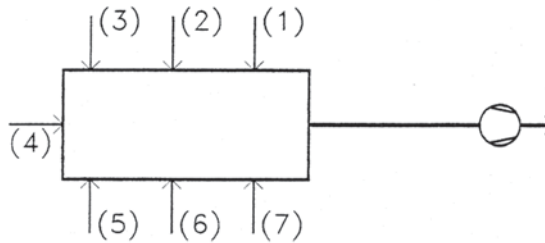
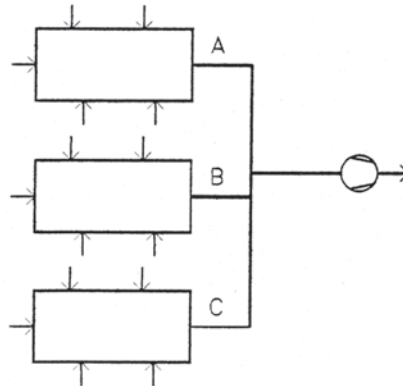
Maximalwert: 25 m/s

Minimalwert: 8 m/s

Die Druckverluste der einzelnen Stränge werden berechnet und aufgelistet.

Leitung	V (m³/h)	DN (mm)	W (m/s)	L (m)	K	Δp (mbar)
1	200	80	11,05	20	3	6,7
2	400	100	14,15	15	2	6,9
3	600	125	13,5	18	1	5,1
4	1000	125	22,6	8	1	7
5	3000	250	17	25	2	6,6
6	2000	200	17,7	20	2	7,3
etc.	5000	400	11,05	50	5	5,2

Für die einzelnen Stränge und die Sammelleitung werden die Rohrleitungskennlinien erstellt, um die zu erwartenden Druckschwankungen bei anderen Abluftmengen zu erkennen und zu berücksichtigen bei der Auswahl des Ventilators.

2.1 Stichleitung:**2.2 Ringleitung:****2.3 Stichleitung mit Ringleitungen****Abb. 2.11** Absaugsysteme

Zu empfehlen ist ein möglichst geringer Druckverlust in der Sammel- oder Ringleitung und eine Auslegung der einzelnen Stränge für einen maximal zulässigen Druckverlust, z. B. 5 mbar für die maximal abzusaugende Luftmenge.

Eine Auslegung für hohe Druckverluste in den einzelnen Zuleitungssträngen erhöht die Flexibilität des Systems und verbessert die Betriebssicherheit.

Im einzelnen muss für jeden Strang der erforderliche Unterdruck zum Absaugen der festgelegten Luftmenge ermittelt werden.

In Abb. 2.12 wird die Vorgehensweise bei der Auslegung gezeigt.

Der Unterdruck an der Einmündung in die Sammelleitung muss dem Druckverlust in dem einzelnen Strang entsprechen, z. B.

–6,3 mbar zum Ansaugen von 1275 und 408 m³/h oder

–6,4 mbar zum Ansaugen von 1683 m³/h in der Sammelleitung und 595 m³/h vom Strang oder

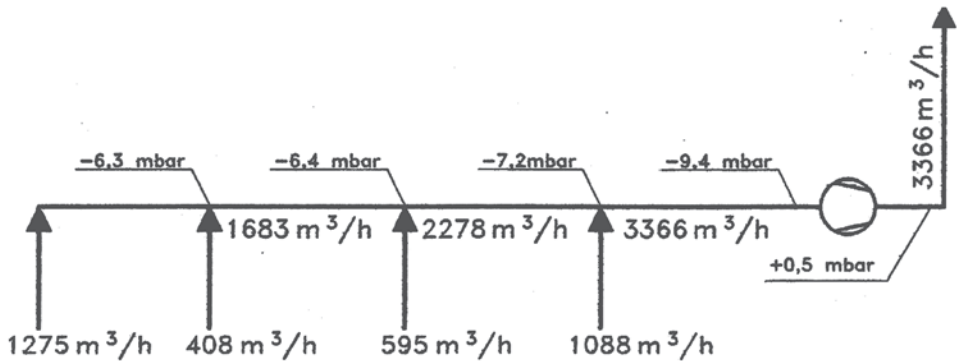


Abb. 2.12 Erforderlicher statischer Unterdruck zur Ansaugung der Abluftmengen

–7,2 mbar zum Ansaugen von 2278 m³/h in der Sammelleitung und 1088 m³/h vom Strang.

Am Ventilator muss ein Unterdruck von –9,4 mbar gehalten werden.

Erforderlicher Ventilator Den erforderlichen statischen Unterdruck des Gebläses für die in Abb 2.12 gezeigte Anforderung ermittelt man folgendermassen.

$$P_{Vent} = \Delta P_{Saug} + \Delta P_{Druck} - P_{dyn} \text{ (mbar)}$$

- ΔP_{Saug} Saugdruck auf der Saugseite (mbar)
- ΔP_{Druck} Förderdruck auf der Druckseite (mbar)
- P_{dyn} dynamischer Druck (mbar)

Beispiel 2.2.3.1: Berechnung des erforderlichen Gebläsedrucks

Erforderlicher Unterdruck $\Delta P_{Saug} = 9,4$ mbar

Erforderlicher Förderdruck $\Delta P_{Druck} = 0,5$ mbar

Strömungsgeschwindigkeit der Luft: $w = 18,29$ m/s

Dichte der Abluft: $\rho = 1,2$ kg/m³

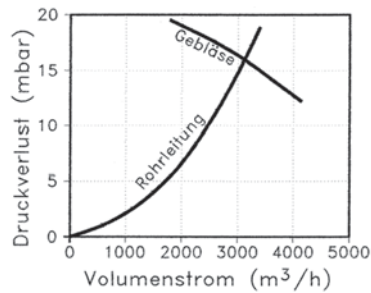
Berechnung des dynamischen Drucks:

$$P_{dyn} = \frac{w^2 \cdot \rho}{2} = \frac{18,29^2 \cdot 1,2}{2} = 200 \text{ Pa} = 2 \text{ mbar}$$

Berechnung des erforderlichen Gebläsedrucks:

$$P_{Vent} = 9,4 + 0,5 - 2 = 7,9 \text{ mbar}$$

Der Betriebspunkt des erforderlichen Ventilators ergibt sich aus dem Schnittpunkt der Gebläsekennlinie mit der Rohrleitungskennlinie.

Gebläse- und Rohrleitungskennlinie**2.3 Abluftfassungssystem für mehrere Stränge**

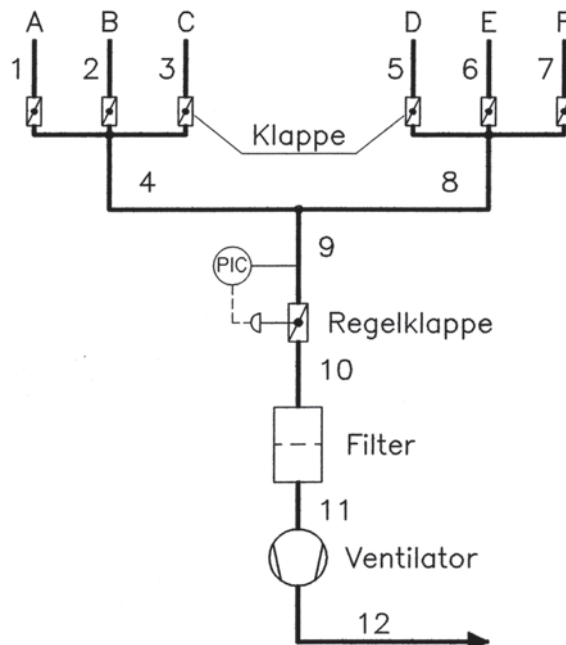
Wenn mehrere Einzelstränge in eine Sammelleitung münden, muss der Druckverlust in jedem der verschiedenen Einzelstränge gleich sein, z. B. 2 oder 4 mbar.

Die Abluftleitungen müssen entsprechend dimensioniert werden.

Zu empfehlen ist eine Absperrklappe in jedem Absaugstrang zur Einstellung des Volumenstroms und des Druckverlustes bzw. zur Anpassung der Rohrleitungskennlinie.

Die Regelklappe dient zur Dämpfung der Schwankungen im Absaugsystem und zur Regelung der Abluftmengen gemäß der Rohrleitungskennlinie, insbesondere in Schwachlastzeiten.

Die Flexibilität kann erhöht werden durch eine Drehzahlregelung des Ventilators oder durch mehrere parallel aufgestellte Gebläse, die bei Bedarf zu- oder abgeschaltet werden.



Der Gesamtdruckverlust für jeden Strang von der Ansaugstelle bis zum Ventilatoraustritt ergibt sich aus der Addition der hintereinander geschalteten Strömungswiderstände:

$$\Delta p_A = 1 + 4 + 9 + \Delta p_{\text{Regelklappe}} + 10 + \Delta p_{\text{Filter}} + 11 + 12$$

$$\Delta p_B = 2 + 4 + 9 + \Delta p_{\text{Regelklappe}} + 10 + \Delta p_{\text{Filter}} + 11 + 12$$

$$\Delta p_C = 3 + 4 + 9 + \Delta p_{\text{Regelklappe}} + 10 + \Delta p_{\text{Filter}} + 11 + 12$$

$$\Delta p_D = 5 + 8 + 9 + \Delta p_{\text{Regelklappe}} + 10 + \Delta p_{\text{Filter}} + 11 + 12$$

$$\Delta p_E = 6 + 8 + 9 + \Delta p_{\text{Regelklappe}} + 10 + \Delta p_{\text{Filter}} + 11 + 12$$

$$\Delta p_F = 7 + 8 + 9 + \Delta p_{\text{Regelklappe}} + 10 + \Delta p_{\text{Filter}} + 11 + 12$$

Der Gesamtdruckverlust für die einzelnen Stränge ist gleich.

$$\Delta P_A = \Delta P_B = \Delta P_C = \Delta P_E = \Delta P_F$$

In Abb. 2.13 wird ein Beispiel für die Auslegung eines Abluftfassungssystems bei unterschiedlichen Bedingungen gegeben.

Die Umrechnung der Volumenströme auf andere treibende Druckdifferenzen und die Berechnung des erforderlichen treibenden Druckes für andere Volumenströme kann im turbulenten Bereich wie folgt durchgeführt werden:

$$\frac{V_2}{V_1} \approx \sqrt{\frac{\Delta P_2}{\Delta P_1}} \quad \frac{\Delta P_2}{\Delta P_1} \approx \left(\frac{V_2}{V_1} \right)^2$$

V_1 Auslegungsvolumenstrom (m^3/h) bei dem ΔP_1 für die Auslegung

V_2 Volumenstrom (m^3/h) bei dem vorgegebenen Druckgefälle ΔP_2

Beispiel 2.3.1: Ermittlung des erforderlichen ΔP_2 für andere Mengenströme in Abb. 2.13

Strang	Auslegung		Betriebsfall A	
	V_1 (m^3/h)	ΔP_1 (mbar)	V_2 (m^3/h)	ΔP_2 (mbar)
1	1500	2	661	0,39
2	1000	2	441	0,39
3	0 (4000)	2	1763	0,39
4	2500	4	2865	5,25
5	500	2	485	1,88
6	1000	2	970	1,88
7	2000	2	1939	1,88
8	3500	4	3394	3,76
9	6000	4	6259	4,35
		$\Delta p_{\text{ges}} = 10 \text{ mbar}$		$\Delta p_{\text{ges}} = 10 \text{ mbar}$

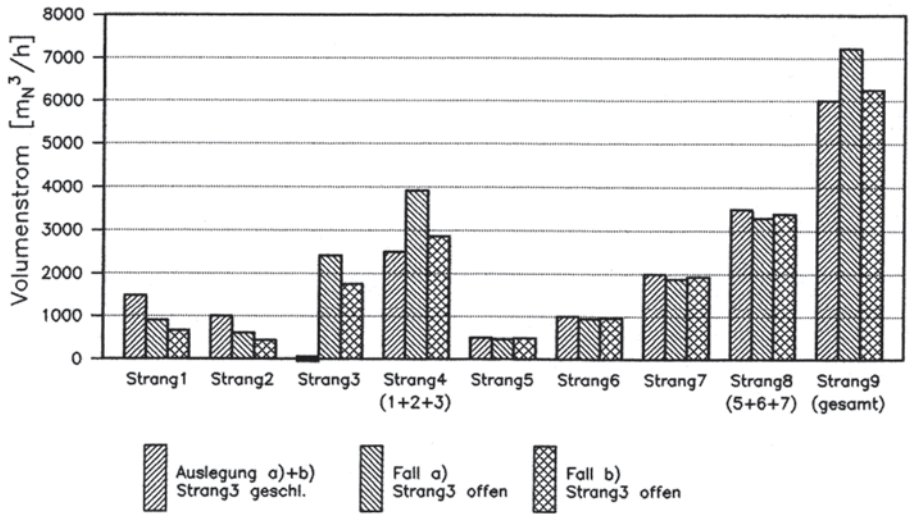
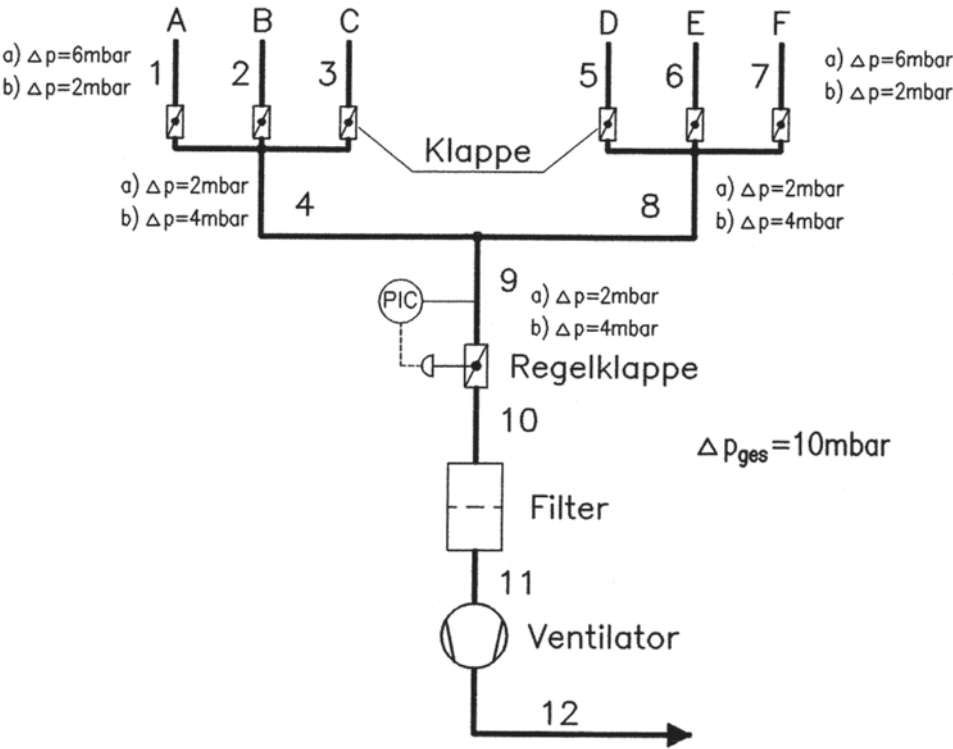


Abb. 2.13 Beispiel für ein Ablufterfassungssystem

Berechnung für Strang 4:

$$\frac{\Delta P_2}{\Delta P_1} = \left(\frac{2865}{2500} \right)^2 * 4 = 5,25 \text{ mbar}$$

Durch Strang 3 strömt normalerweise nichts, aber zeitweise strömen maximal 4000 m³/h.

2.4 Abluftfassung aus Lagertanks und Lagerbehältern [6, 7]

Die Abluftemissionen setzen sich zusammen aus der bei der täglichen **Atmung** des Tanks austretenden Atmungsgasmenge und der bei der **Befüllung** der Tanks verdrängten löse-mittel-beladenen Abluftmenge.

Wegen des geringen Druckarbeitsbereichs der Lagertanks nach DIN 4119 von +20 mbar Überdruck bis –10 mbar Unterdruck ist die Erfassung der verdrängten Abluft nicht einfach.

2.4.1 Atmungsemissionen

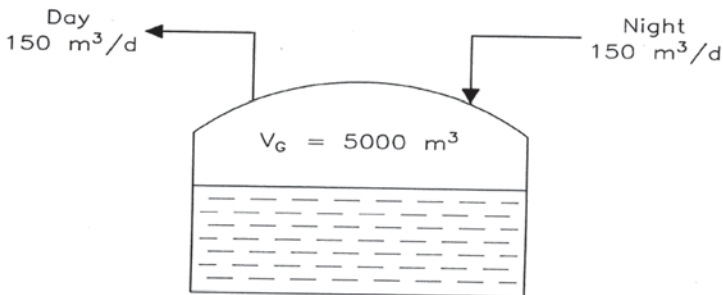
In Abb. 2.14 ist der Tankatmungsvorgang schematisch dargestellt.

Nachts kühlt sich die Luft im Tank ab. Es entsteht ein Unterdruck und Luft wird ein-gesogen.

Am Tage erwärmt sich das Gas und dehnt sich aus. Es entsteht ein leichter Überdruck und das Gas wird aus dem Tank verdrängt.

Durch die Installation von Über- und Unterdruckatmungsventilen kann die emittierte Gasmenge verringert werden.

Für die Ermittlung der Emissionen rechnet man in der BRD mit folgenden maximalen und minimalen Temperaturen im Sommer und im Winter.



$$\Delta V = 0,03 * V_G = 0,03 * 5000 = 150 \text{ m}^3/\text{d}$$

Abb. 2.14 Atmungsemissionen aus einem Lagertank

Sommer:	153 Tage	$T_{\max} = 303,5^\circ\text{K}$	$T_{\min} = 286,5^\circ\text{K}$
Winter:	212 Tage	$T_{\max} = 286^\circ\text{K}$	$T_{\min} = 278^\circ\text{K}$

Ohne Berücksichtigung des Dampfdrucks des im Tank gelagerten Produkts kann man die tägliche Atmungsgasmenge ΔV_A wie folgt bestimmen:

$$\Delta V_A = 0,269 * \left(\frac{P_{\min}}{P_{\min}} - \frac{P_{\max}}{T_{\max}} \right) * V_G (m_N^3/d)$$

$$P_{\max} = P_A + P_{\bar{U}} \quad P_{\min} = P_A - P_U \quad V_G = \text{Gasvolumen im Tank (m}^3\text{)}$$

P_A Atmosphärendruck = 1000 mbar

$P_{\bar{U}}$ Ansprechdruck des Überdruckentspannungsventils (mbar)

P_U Ansprechdruck des Unterdruckventils (mbar)

Beispiel 2.4.1.1: Ermittlung der Atmungsemissionen aus einem Tank

Für $P_{\bar{U}} = +10$ mbar und $P_U = -5$ mbar und $P_A = 1013$ mbar ergeben sich folgende Atmungsgasmenngen für ein Gasvolumen von $V_G = 1000$ m³ im Tanklager:

$$P_{\max} = 1013 + 10 = 1023 \text{ mbar} \quad P_{\min} = 1013 - 5 = 1008 \text{ mbar}$$

Sommer: $\Delta V_A = 0,04 * V_G (m_N^3/d) = 0,04 * 1000 = 40$ m³/d = 6120 m³/a (153 Tage)

Winter: $\Delta V_A = 0,013 * V_G (m_N^3/d) = 0,013 * 1000 = 13$ m³/d = 2756 m³/a (212 Tage)

Jährliche Atmungsgasmenge = 6120 + 2756 = 8876 m³/a

Ohne Atmungsventile werden die emittierten Gasmengen wesentlich grösser.

$$\Delta V_A = 0,269 * \left(\frac{1013}{286,5} - \frac{1013}{303,5} \right) * 1000 = 53,3 \text{ m}^3/d \text{ im Sommer} = 8155 \text{ m}^3/a$$

$$\Delta V_A = 0,269 * \left(\frac{1013}{278} - \frac{1013}{286} \right) * 1000 = 27,4 \text{ m}^3/d \text{ im Winter} = 5809 \text{ m}^3/a$$

Jährliche Gesamtemission durch Atmung: 13.964 m³/a

Unter Berücksichtigung des Dampfdrucks P_V des in den Tank eingelagerten Produkts verringern sich die Atmungsemissionen, weil der Dampfdruck nur von der Flüssigkeitstemperatur abhängt, nicht von der Gastemperatur über der Flüssigkeit.

Das Verhältnis der Gasmengen V_2 nach der Erwärmung auf $T_{\max}$ bezogen auf die Gasmenge V_1 vor der Erwärmung bei $T_{\min}$ berechnet man wie folgt:

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{P_A + P_U - P_V}{P_A + P_{\bar{U}} - P_V} * \frac{T_{\max}}{T_{\min}} \quad P_V = \text{Produktdampfdruck (mbar)}$$

Beispiel 2.4.1.2: Ermittlung des austretenden Atmungsgasvolumens unter Berücksichtigung des Dampfdrucks

$$P_A = 1000 \text{ mbar} \quad P_{\ddot{U}} = 18 \text{ mbar} \quad P_U = 9 \text{ mbar} \quad P_V = 200 \text{ mbar}$$

$$T_{\max} = 303,5^\circ\text{K} \quad T_{\min} = 286,5^\circ\text{K} \quad V_1 = 300 \text{ m}^3$$

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{1000 - 9 - 200}{1000 + 18 - 200} \cdot \frac{303,5}{286,5} = 1,024$$

$$V_2 = 1,024 \cdot 300 = 307,2 \text{ m}^3 \quad \Delta V = 307,2 - 300 = 7,2 \text{ m}^3/\text{d}$$

In Abb. 2.15 ist das Verhältnis V_2/V_1 für $T_{\max} = 303,5^\circ\text{K}$ und $T_{\min} = 286,5^\circ\text{K}$ in Abhängigkeit vom Dampfdruck des eingelagerten Produkts dargestellt.

Die eingetragenen Werte gelten für folgende Daten:

$$P_A = 1000 \text{ mbar} \quad P_U = -9 \text{ mbar} \quad P_{\ddot{U}} = +18 \text{ mbar}$$

Durch einen höheren Öffnungsdruck $P_{\ddot{U}}$ des Überdruckentlastungsventils werden die Atmungsemissionen verringert.

Zu empfehlen sind daher Überdruckentlastungsventile mit 10% Öffnungscharakteristik, die erst bei 18 mbar Überdruck öffnen und somit die emittierte Gasmengen verringern.

Den erforderlichen Überdruck $P_{\ddot{U}}$ des Atmungsventils zur Vermeidung von Atmungsemissionen berechnet man wie folgt:

$$P_{\ddot{U}\text{erf}} = \frac{T_{\max}}{T_{\min}} \cdot (P_A + P_U - P_V) - (P_A - P_V) \text{ (mbar)}$$

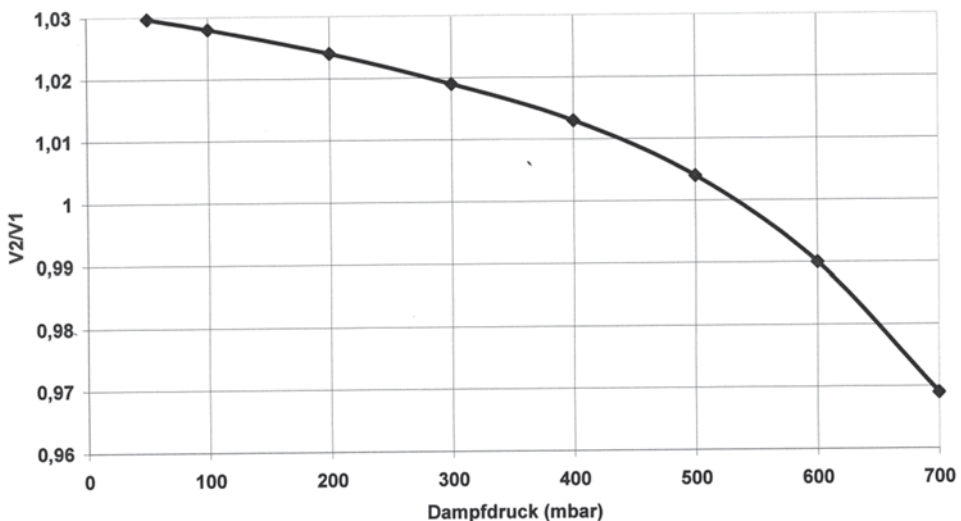


Abb. 2.15 Atmungsemission V_2/V_1 für $T_{\max}/T_{\min}$ bei verschiedenen Dampfdrücken

Beispiel 2.4.1.3: Erforderlicher Überdruck zur Vermeidung von Atmungsemissionen

$P_A = 1013 \text{ mbar}$ $P_U = -5 \text{ mbar}$ Dampfdruck $P_V = 100 \text{ mbar}$

$$P_{\text{üerf}} = \frac{303,5}{286,5} * (1013 - 5 - 100) - (1013 - 100) = 18,9 \text{ mbar}$$

Ein so hoher Druck ist für Tanks nach DIN 4119 bzw. EN 14015 nicht zulässig, aber Lagerbehälter können als Druckbehälter, z. B. für 2 bar Überdruck, ausgelegt werden, um die Atmungsemissionen zu vermeiden.

2.4.2 Befüllemissionen

In Abb. 2.16 wird gezeigt, wie die Füllemissionen entstehen.

Beim Befüllen von Tanks mit flüssigen Produkten, z. B. Benzin aus Kesselwagen oder aus der Raffinerie, wird das Gas aus den Tanks verdrängt.

Durch ein auf dem Tank installiertes Überdruckentlastungsventil können die beim Befüllen emittierten Gasmengen etwas reduziert werden, weil das Gas vor dem Austritt in die Abgasleitung auf den Ansprechdruck des Überdruckventils verdichtet wird.

$$V_{\text{Füll}} = f_{\text{Füll}} * V_{\text{Fl}} = \frac{P_A + P_u - P_V}{P_A + P_{\text{ü}} - P_V} * V_{\text{Fl}} \left(m^3 \text{ Gas} \right)$$

- $f_{\text{Füll}}$ Korrekturfaktor für das beim Füllen verdrängte Gas
- P_A Umgebungsdruck in der Atmosphäre (mbar)
- $P_{\text{ü}}$ Ansprechdruck des Druckentlastungsventils (mbar)
- P_U Ansprechdruck des Unterdruckventils (mbar)
- P_V Dampfdruck des Produkts im Tank (mbar)
- $V_{\text{Füll}}$ Beim Füllen aus dem Tank verdrängte Gasmenge (m^3)
- V_{Fl} Eingefüllte Flüssigkeitsmenge (m^3)

Beispiel 2.4.2.1: Berechnung der emittierten Gasmenge beim Befüllen von 10000 m^3/a

$P_A = 1013 \text{ mbar}$ $P_{\text{ü}} = 15 \text{ mbar}$ $P_U = -5 \text{ mbar}$ $P_V = 100 \text{ mbar}$ $V_{\text{Fl}} = 10000 \text{ m}^3/a$

$$V_{\text{Füll}} = \frac{P_A + P_u - P_V}{P_A + P_{\text{ü}} - P_V} * V_{\text{Fl}} = \frac{1013 - 5 - 100}{1013 + 15 - 100} * 10000 = 9784 \text{ m}^3/a$$

Durch die Verdichtung des Gases im Tank auf 1028 mbar werden die Füllemmissionen verkleinert.

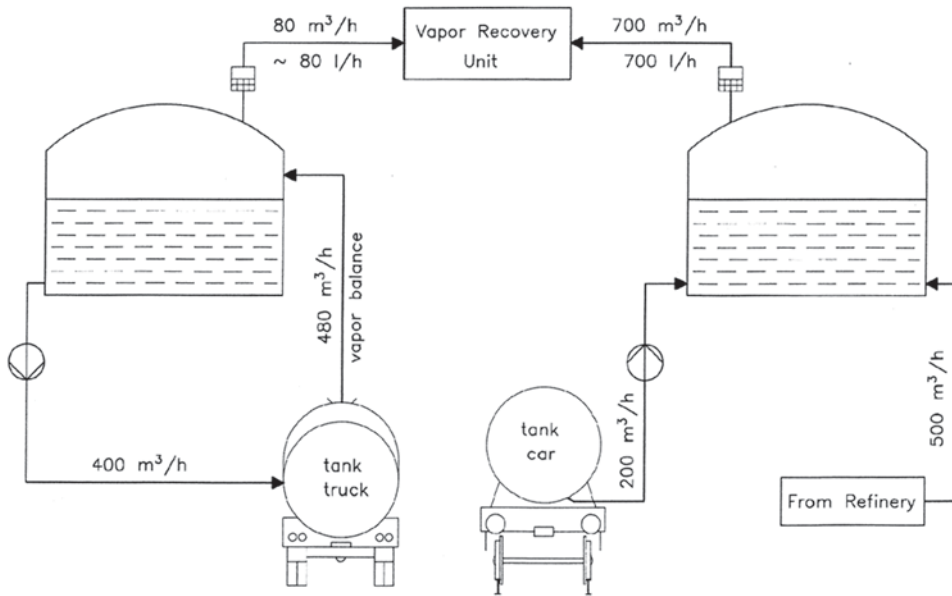


Abb. 2.16 Emissionen beim Befüllen von Tankwagen und Lagertanks

Vergrößerung der Abluftmenge durch Aufsättigung

Beim Befüllen von Tank- oder Kesselwagen mit Oberspiegelfüllung, also von oben, ist die emittierte Gasmenge grösser als die eingefüllte Produktmenge, weil die aus dem Tank- oder Kesselwagen verdrängte Luft bis zur Sättigungsbeladung mit Produktdämpfen beladen wird.

Die verdampften Produktdämpfe vergrössern die verdrängte Abgasmenge.

In Abb. 2.16 werden z. B. 400 m³/h Benzin in Tankwagen gepumpt.

Die aus den Tankwagen verdrängten 400 m³ Luft sättigen sich mit Benzin und enthalten beim Austritt aus den Tankwagen 20 Vol% Benzindämpfen.

Dadurch vergrössert sich die Abgasmenge auf 480 m³.

$$V_{\text{Abgas}} = V_{\text{Fl}} + y \cdot V_{\text{Fl}} \quad (\text{m}^3)$$

$$y = \frac{S \left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \text{ Gesamtgas} \right)}{\rho_D \left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right)} \quad (\text{Volumenfraktion})$$

Beispiel 2.4.2.2: Volumenvergrößerung durch Aufsättigung bei der Benzinverladung in TKW

$$M = 60 \quad P_A = 1013 \text{ mbar} \quad T = 293 \text{ °K} \quad \rho_D = 2,5 \text{ kg/m}^3 \quad V_{\text{fl}} = 400 \text{ m}^3$$

$$S = 0,5 \text{ kg/m}^3 \quad y = \frac{0,5}{2,5} = 0,2 \quad V_{\text{Abgas}} = 400 + 0,2 * 400 = 480 \text{ m}^3$$

$$S = 1 \text{ kg/m}^3 \quad y = \frac{1}{2,5} = 0,4 \quad V_{\text{Abgas}} = 400 + 0,4 * 400 = 560 \text{ m}^3$$

2.4.3 Erfassung der Abluft aus Lagertanks und bei der Befüllung

Das besondere Problem beim Absaugen der verdrängten Abgase aus Lagertanks ist der geringe Druckarbeitsbereich derartiger Tanks nach DIN 4119 oder EN 14015.

Die Lagertanks sind ausgelegt für einen maximalen Unterdruck von -10 mbar und einen maximalen Überdruck von $+20 \text{ mbar}$.

Der geringe Druckarbeitsbereich erfordert eine genaue Regelung des Drucks in den Abluftfassungsrohren

In Abb. 2.17 und 2.18 sind einige Möglichkeiten zur Abluftfassung aus einem Tanklager dargestellt. Die gemeinsame Notbelüftung in der Sammelleitung ist zulässig, wenn die Tanks zu Gruppen zusammengefasst sind.

In den meisten Fällen wird auf jedem Tank eine Notbelüftung installiert (Abb. 2.20).

Die Druckregelung für den geringen zulässigen Druckbereich im Tank ist nicht einfach.

Bei einer Stickstoffüberlagerung der Tanks wird es noch schwieriger (siehe Kap. 4.4).

In Abb. 2.19 werden einige Möglichkeiten zur Druckregelung beim Ansaugen von Benzindampf-Luft-Gemischen gezeigt

Wesentlich einfacher wird die Abluftfassung aus einem Tanklager und von Befüllstationen für TKW und KWG, wenn man mit Gaspendingelung und einem Gasometer zur Zwischenspeicherung der dämpfebeladenen Luft arbeitet.

Durch die Gaspendingelung vermeidet man die Spitzenbelastung bei der Befüllung mehrerer TKW oder KWG parallel.

Die Dämpferückgewinnungsanlage muss nicht für maximale Pumpleistung der Verladepumpen beim Befüllen von TKW und KWG parallel ausgelegt werden, z. B. für $1000 \text{ m}^3/\text{h}$ sondern nur für das zusätzliche Gasvolumen durch die Aufsättigung der Abluft, z. B. $200 \text{ m}^3/\text{h}$.

Auch die Atmungsemissionen entfallen weitgehend, wenn der Gasometer für das tägliche Atmungsvolumen ausgelegt ist.

Die Abluftreinigungs- oder Dämpferückgewinnungsanlage VRU kann wesentlich kleiner ausgelegt werden. Die Belastung der VRU wird vergleichmässigt.

Auch die Emissionen beim Befüllen der Tanks aus einem Schiff oder einem KWG – Zug können minimiert werden, wenn das Schiff oder die Kesselwagen an die Gaspendingelung angeschlossen werden.

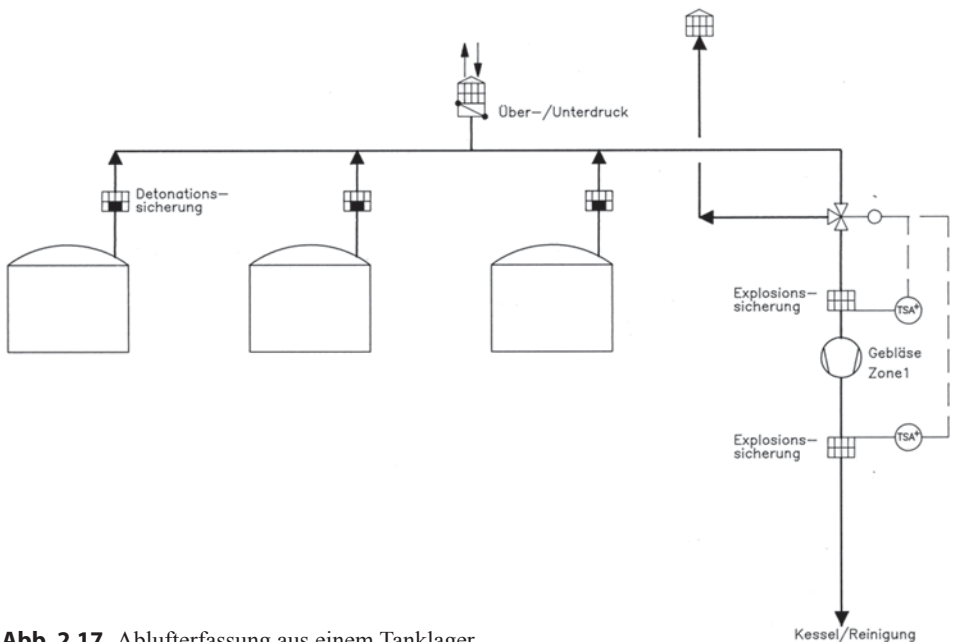


Abb. 2.17 Abluftfassung aus einem Tanklager

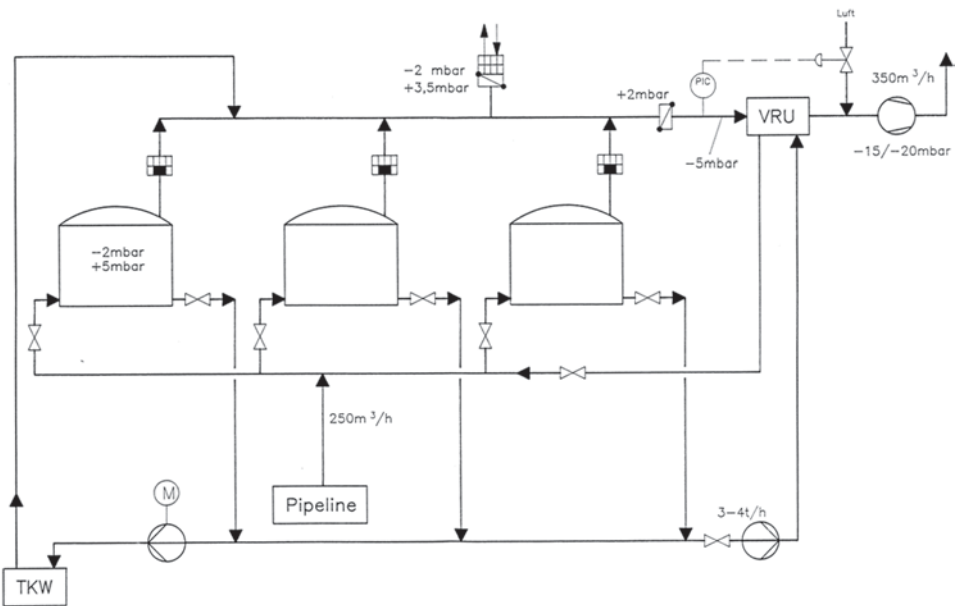
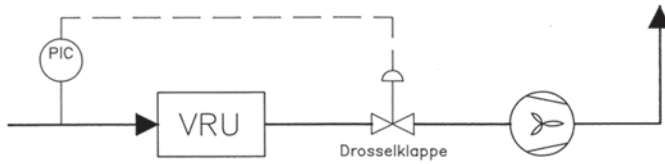


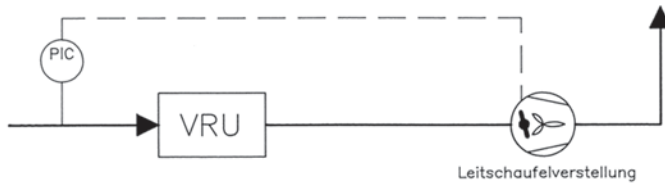
Abb. 2.18 Abluftansaugung aus Tanks und von der TKW-Befüllung zu einer Dämpferückgewinnungsanlage VRU

Ventilator – Regelung

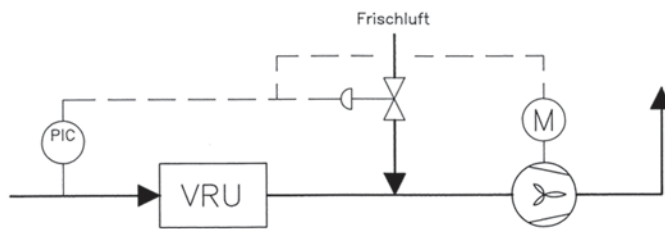
1. Regelung mit Drosselklappe



2. Regelung mit Leitschaufelverstellung



3. Regelung durch Frischluftzufuhr/Drehzahl



4. Regelung durch Gasrückführung

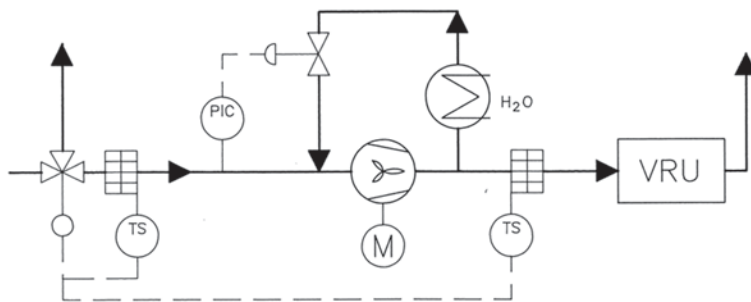


Abb. 2.19 Druckgeregelte Ansaugung von explosionsfähigen Benzin – Luft – Gemischen

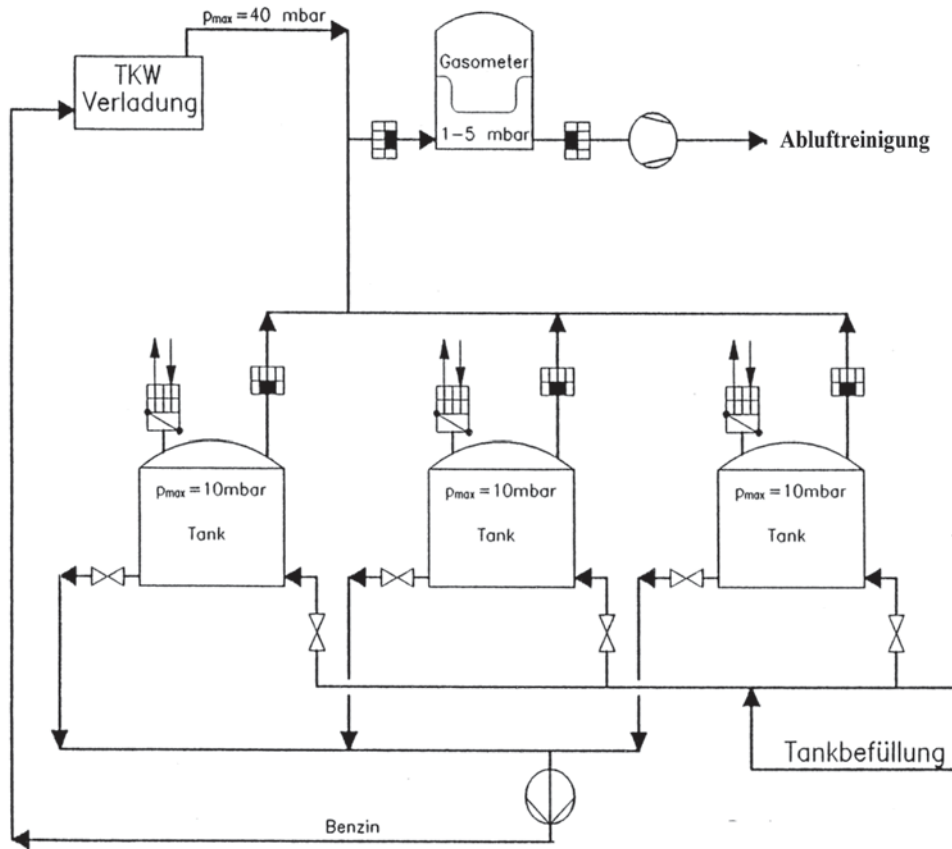


Abb. 2.20 Gaspendelung mit einem Gasometer

Literatur

1. Nitsche, M., Müller H.: „Lösemittelhaltige Abluft in Industriehallen“, Chemie-Umwelt-Technik, S. 28 ff. Hüthig GmbH, Heidelberg (1994)
2. VDI-Koordinierungsstelle Umwelttechnik: „Reinhaltung der Luft in Industriehallen“, VDI-Berichte 1069, VDI-Verlag Düsseldorf (1993)
3. Recknagel, H., Sprenger, E., Hönnmann, W., Schramek, E-R.: „Taschenbuch für Heizung und Klimatechnik“. Oldenbourg Verlag München, München (1993)
4. Weber, E., Brocke W.: „Apparate und Verfahren der industriellen Gasreinigung“, Kap. 8. Oldenbourg Verlag München, Wien (1973)
5. Nitsche, M.: „Rohrleitungs-Fibel“. Vulkan-Verlag, Essen (2011)
6. Halstrick V.: „Über- und Unterdruckventile im Rahmen emissionsreduzierender Massnahmen“, Seminarreihe „Ertüchtigung von Flachbodentanks“. Seminarhandbuch vom Haus der Technik, HdT Essen (2013)
7. Wichert M.: „Technische Anforderungen an Lagertanks – Massnahmen zur Emissionsminderung Seminarreihe „Ertüchtigung von Flachbodentanks. Seminarhandbuch vom Haus der Technik, HdT Essen (2013)

Abluft-Fibel

Reinigung lösemittelhaltiger Abgase

Nitsche, M.

2015, XII, 332 S. 190 Abb., Hardcover

ISBN: 978-3-662-45309-4