
Inhaltsverzeichnis

1	Auswahlkriterien für Abluftreinigungsverfahren und Planungshinweise . . .	1
1.1	Abluftströme mit geringen Lösemittelkonzentrationen $< 20 \text{ g/m}_N^3$	2
1.1.1	Lösemittelentsorgung	2
1.1.2	Lösemittelrückgewinnung	3
1.1.2.1	Absorption	3
1.1.2.2	Adsorption	5
1.2	Abluftströme mit hohen Lösemittelkonzentrationen $> 30 \text{ g/m}_N^3$	6
1.2.1	Lösemittelentsorgung	6
1.2.2	Lösemittelrückgewinnung	6
1.2.2.1	Kondensation	6
1.2.2.2	Membrananreicherung und Kondensation	8
1.3	Planungshinweise	9
1.3.1	Allgemeine Fehler	9
1.3.2	Kondensationsanlagen	10
1.3.3	Absorptionsanlagen	11
1.3.4	Membrananlagen	11
1.3.5	Adsorberanlagen	12
1.3.6	Thermische Abluftreinigungsverfahren	13
	Literatur	14
2	Ablufterfassung aus Produktionsanlagen und Lagerbehältern	15
2.1	Erfassung lösemittelhaltiger Abluft	15
2.1.1	Planung von Absaugsystemen	21
2.2	Erforderliche Auslegungsdaten und Berechnungen	27
2.2.1	Abluftmengen	27
2.2.2	Auswahl eines geeigneten Absaugsystems	27
2.2.3	Rohrleitungsdimensionierung und Druckverluste in den Abluftrohren	27
2.3	Ablufterfassungssystem für mehrere Stränge	30
2.4	Ablufterfassung aus Lagertanks und Lagerbehältern	33

2.4.1	Atmungsemissionen	33
2.4.2	Befüllemissionen	36
2.4.3	Erfassung der Abluft aus Lagertanks und bei der Befüllung	38
Literatur	41
3	Berechnung der Sättigungsbeladung von Lösemitteln in Inertgas	43
3.1	Sättigungsbeladungen von Einzelkomponenten	43
3.1.1	Dampfdruckberechnung	43
3.1.2	Berechnung der Sättigungskonzentration einer Einzelkomponente	44
3.1.2.1	Gesamtgasbeladung S_N bei Normbedingungen (g/m_N^3 Gesamtgas)	44
3.1.2.2	Gesamtgasbeladung S_B bei Betriebsbedingungen (g/m_B^3 Gesamtgas)	46
3.1.2.3	Lösemittelbeladung S_G pro kg Gesamtgas (kg/kg Gesamtgas)	47
3.1.2.4	Molare Beladung (kmol/kmol Inertgas)	48
3.1.2.5	Ermittlung der Gesamtgasmenge von Lösemitteln und Inertgas (m_N^3/h)	48
3.1.2.6	Berechnung des Partialdrucks aus der Beladung S_B	49
3.1.2.7	Umrechnung der Abgasbeladung von mg/m^3 in Volumen – ppm	50
3.2	Sättigungsbeladung von idealen Lösemittelgemischen	50
3.2.1	Sättigungskonzentration der verschiedenen Lösemittel im Inertgas	50
3.2.1.1	Berechnung der Sättigungsbeladungen S_N bei Normbedingungen (g/m_N^3)	51
3.2.1.2	Berechnung der Sättigungsbeladung bei Betriebsbedingungen (g/m_B^3)	53
3.2.1.3	Molare Sättigungsbeladung (kmol/kmol Inertgas)	54
3.3	Sättigungsbeladungen von nicht idealen Lösemittelgemischen	57
3.3.1	Partialdruckberechnung mit Aktivitätskoeffizient	57
4	Explosionsgefahr und Inertisierung	63
4.1	Was sind die Kriterien für die Explosionsfähigkeit bzw. Brennbarkeit? ...	63
4.2	Inertisierung	66
4.3	Wie inertisiert man?	68
4.3.1	Verdrängungsinertisierung	69
4.3.2	Verdünnungs- oder Spülinertisierung	70
4.3.3	Druckgas-Spülung	72
4.3.4	Vakuum – Spülung	73
4.3.5	Inertisierung von Lagertanks	73

4.4	Explosionsschutz – Berechnungen	80
4.4.1	Verbreiterung der Explosionsgrenzen mit zunehmender Temperatur	80
4.4.2	Ermittlung der Explosionsgrenzen von Gemischen nach Le Chatelier	81
4.4.3	Berechnung der prozentualen UEG für Einzelkomponenten	82
4.4.4	Berechnung der prozentualen UEG für Gemische	83
4.4.5	Berechnung des Temperatureinflusses auf den prozentualen UEG-Wert	83
4.4.6	Bestimmung des Mindest – N_2 – Gehalts zur Inertisierung	84
4.4.7	Ermittlung des O_2 – Bedarfs g für die stöchiometrische Verbrennung von 1 kMol Brennstoff	85
4.4.8	Heizwertberechnung für die Massenzusammensetzung	86
4.4.9	Berechnung der adiabaten Flammentemperatur	88
	Literatur	91
5	Indirekte und direkte Kondensation	93
5.1	Indirekte Kondensation	93
5.1.1	Schlechter Wärmetübergang	95
5.1.2	Nebelbildung	97
5.1.3	Eisbildung	103
5.1.4	Taupunkterniedrigung bei Mehrkomponentengemischen	103
5.1.5	Verschlechterung der Kondensation in einem Differentialkondensator	103
5.2	Direkte Kondensation	107
5.3	Einflussgrößen auf die Kondensation	113
5.4	Berechnungen für die indirekte Kondensation in Wärmetauschern	115
5.4.1	Taupunktberechnung inertgashaltiger Dämpfe	116
5.4.2	Berechnung der Kondensationskurve für Lösemittel – Inertgas – Gemische	119
5.5	Berechnungen für die direkte Kondensation in Kolonnen	128
5.5.1	Wärmetechnische Auslegung der Kolonne für die Kühlung	129
5.5.1.1	Berechnung mit der volumetrischen Wärmetübergangszahl	129
5.5.1.2	Berechnung der erforderlichen Wärmetübergangseinheiten NTU_w in einer Füllkörperkolonne	132
5.5.1.3	Berechnung der erforderliche theoretische Böden n_w für den Wärmeaustausch	134
5.5.2	Erforderliche theoretische Böden NT_M für den Stoffübergang	136
5.6	Anwendungsbeispiele für Kondensationsanlagen	142
	Literatur	145

6	Membrananlagen	147
6.1	Funktionsbeschreibung	147
6.2	Einflussgrößen auf die Membrananreicherung	152
6.3	Beispiel für eine Membrananlage zur Benzindampfückgewinnung	152
	Literatur	157
7	Absorptions- und Desorptionsanlagen	159
7.1	Funktionsbeschreibung	159
7.2	Einflussgrößen auf die Ab- und Desorption	163
7.2.1	Absorption	163
7.2.2	Desorption	164
7.3	Erforderliche Trennstufen für die Absorption und Desorption	167
7.3.1	Ermittlung der erforderlichen Trennstufen für Absorptionsanlagen mit geradlinigen Gleichgewichts- und Bilanzlinien	167
7.3.2	Ermittlung der erforderlichen Trennstufen für Desorptionsanlagen mit geradlinigen Gleichgewichts- und Bilanzlinien	176
7.4	Konzentrationstransformation durch eine kombinierte Absorption-Desorption	180
7.5	Ermittlung der erforderlichen Füllkörperhöhe oder der benötigten praktischen Böden	189
7.5.1	Benötigte Füllkörperhöhen	189
7.5.2	Erforderliche praktische Bodenzahl	190
7.6	Berechnung des Dampf-Flüssigkeitsgleichgewichts	190
7.6.1	Dampfdruckermittlung	192
7.6.2	Berechnung der Aktivitätskoeffizienten	193
	Literatur	195
8	Adsorption	197
8.1	Adsorptionsgleichgewicht und Adsorptionspotential	197
8.2	Adsorptionskinetik	204
8.3	Adsorptionskinetische Berechnungen	208
8.3.1	Berechnung der Servicezeit t mit den Aktivkohlebeladungen B_1 und B_2	209
8.3.2	Ermittlung der Durchbruchzeit t nach Wheeler	209
8.3.3	Durchbruchzeit mit der volumetrischen Adsorberkapazität und $MTZ = 10\text{ cm}$	211
8.3.4	Wandergeschwindigkeit w_c der Konzentrationsfront	211
8.3.5	Wandergeschwindigkeit u der MTZ nach Kovach	213
8.3.6	Berechnung der Länge L_{MTZ} der MTZ nach der Klotzgleichung	215
8.3.7	Berechnung der Länge L_{bel} der beladenen Zone im Adsorber ohne MTZ	215

8.3.8	Wandergeschwindigkeit w_T der Temperaturfront	216
8.4	Desorption von Adsorbieren	218
8.4.1	Wasserdampfdesorption	222
8.4.2	Inertgasdesorption	229
8.4.3	Vakuumdesorption	232
8.4.4	Probleme bei der Inertgas- und Vakuumdesorption	238
8.5	Adsorption von Mehrkomponentengemischen	240
8.6	Adsorberauslegungsberechnungen	248
8.6.1	Erforderlicher Strömungsquerschnitt F für einen Abgasvolumenstrom V	248
8.6.2	Adsorberdurchmesser D	248
8.6.3	Aktivkohlemenge G_A	249
8.6.4	-Erwärmung beim Adsorbieren	249
8.6.5	Erforderliche Strippgasmenge zum Ausstrippen der Lösemittel aus der A-Kohle	250
8.6.6	Wärmezufuhr Q_{zu} zum Adsorber durch Dampf oder Stickstoff	251
8.6.7	Erforderliche Wärme Q_{heiz} zum Aufheizen des Adsorbers	252
8.6.8	Trocknung und Kühlung der Aktivkohle	254
8.6.9	Erforderliche Wärmemenge Q_{sr} für das Desorbieren der Lösemittel	257
8.6.10	Druckverlust im Adsorber ΔP	258
8.7	Adsorber für die Benzindampfdruckgewinnung mit adiabater Vakuumdesorption	259
8.7.1	Verfahrensbeschreibung	259
8.7.2	Hinweise zur Auslegung derartiger Adsorber	261
8.7.2.1	Aktivkohlemenge und Zykluszeit	261
8.7.2.2	Vakuumpumpen	262
8.7.2.3	Strippluft	263
8.7.2.4	Kondensationskolonne	265
8.7.3	Auslegung eines Adsorbers mit adiabater Vakuumdesorption	265
8.7.3.1	Auslegung für Benzindampf als Pseudokomponente	266
8.7.3.2	Adsorberauslegung auf Basis der Einzelkomponenten ...	272
8.7.4	Berechnungen	279
8.7.4.1	Erforderliche Aktivkohlemenge G_K	279
8.7.4.2	Saugvermögen der Vakuumpumpe	280
8.7.4.3	Dimensionierung des Adsorbers	282
8.7.4.4	Ermittlung des Druckverlustes im Adsorber	283
8.7.4.5	Kontrollberechnung der beladenen Adsorberlänge L	283
8.7.4.6	Kontrollberechnung der Wandergeschwindigkeit w_c der Konzentrationsfront und der Zeit t_c bis zum Durchbruch der Konzentration	284

8.7.4.7	Erforderliche Zonenhöhen für die einzelnen Komponenten	286
8.7.4.8	Erwärmung der Aktivkohle beim Adsorbieren	287
Literatur	288
9	Benzindampfrückgewinnungsverfahren	291
9.1	DIKOAD-Verfahren mit kalter Wäsche und Adsorption	292
9.2	Indirekte Kondensation in Rohrbündelapparaten mit Nachreinigung	296
9.3	Benzindampfrückgewinnung mit Membranen	299
9.4	AD – Verfahren mit Druckwechseladsorbern	303
10	Thermische und katalytische Abluftreinigung	307
10.1	Thermische Nachverbrennung	307
10.2	Katalytische Nachverbrennung	315
10.3	Regenerative thermische Oxidation	317
10.4	Berechnungen	319
10.4.1	Autotherme Beladung	319
10.4.2	Berechnung der erforderlichen Brennstoffmenge m_B	321
10.4.3	Erforderliche Zusatzluftmenge zur Kühlung der Brennkammer	321
10.4.4	Rauchgasmenge aus der Verbrennung des Hilfsbrennstoffs	322
10.4.5	Dimensionierung der Brennkammer	325
10.4.6	Kühlluftmenge zur Abkühlung der Rauchgase und Kamindurchmesser	326
Literatur	327
11	Biologische Abluftreinigung	329
11.1	Biofilter	329
11.2	Biowäscher	330
Literatur	332