

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Planung von verfahrenstechnischen Anlagen</b>	<b>1</b>
1.1	Basic Engineering	1
1.2	Detail Engineering	3
1.3	Projektmanagement	4
1.4	Aufgabenstellung	8
1.4.1	Spezifikation für eine Fraktionierkolonne	8
1.4.2	Spezifikation für eine Rührbehälteranlage	9
1.4.3	Spezifikation für ein Tanklager	10
1.5	Erforderliche Informationen für die Planung	14
1.5.1	Allgemeine Standortinformationen	14
1.5.2	Physikalische Daten	15
1.5.3	Sicherheitstechnische und umweltrelevante Daten	15
1.5.4	Vorschriften für überwachungsbedürftige Anlagen	18
1.6	Verfahrenstechnische Auslegung mit Betriebsmittelbedarf	29
1.7	Aufstellungs- und Lageplan	33
1.8	Terminplanung – Kostenschätzung – Wirtschaftlichkeitsbetrachtung	36
1.8.1	Terminplanung	36
1.8.2	Kostenschätzung	39
1.8.3	Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen	42
1.9	Genehmigung	54
1.10	Anfragen und Anfragespezifikationen	54
1.11	Angebotsvergleich und Bestellung	57
1.12	Auftragsverfolgung und Qualitätskontrolle	67
1.13	Ingenieurmäßige Detailarbeiten	67
1.14	Anfragen für Montagearbeiten und Bestellung	68
1.15	Ablauf der Arbeiten auf der Baustelle	69
1.16	Inbetriebnahme	71
1.17	Planungsfehler	74
	Literatur	74

<b>2</b>	<b>Betriebsmittelversorgung</b> . . . . .	77
2.1	Beheizungssysteme mit Dampf oder organischen Wärmeträgern . . . .	77
2.1.1	Dampfbeheizung . . . . .	77
2.1.2	Beheizung mit flüssigen Wärmeträgern . . . . .	85
2.1.3	Vergleich zwischen Dampf- und Thermalölbeheizung . . . . .	87
2.1.4	Dampfkessel . . . . .	89
2.1.5	Wärmeträgeranlage für flüssige organische Wärmeträger (Abb. 2.17) . . . . .	97
2.2	Kühlen mit Wasser oder Luft . . . . .	103
2.2.1	Kühlwasserkreisläufe . . . . .	103
2.2.2	Offener Kühlturm (Abb. 2.23) . . . . .	108
2.2.3	Geschlossener Kühlturm . . . . .	110
2.2.4	Kühlturbilanz und Wasserbedarf . . . . .	110
2.2.5	Luftkühler . . . . .	118
2.2.6	Verdampfungskühlung durch adiabates Verdampfen im Vakuum . . . . .	125
2.2.7	Kältemittelkühlung durch verdampfendes Kältemittel . . . . .	126
2.3	Druckluftversorgung [2] . . . . .	128
2.3.1	Leistungsbedarf beim Verdichten . . . . .	130
2.3.2	Druckverluste und Leckagen . . . . .	132
2.3.3	Drucklufttrocknung . . . . .	134
2.3.4	Liefermengen-Regelung . . . . .	139
2.3.5	Wärmerückgewinnung . . . . .	141
2.4	Inertgas . . . . .	142
2.4.1	Explosionsschutz . . . . .	142
2.4.2	Inertgasversorgung . . . . .	145
2.4.3	Wie inertisiert man? . . . . .	145
2.5	Auslegung von Vakuumanlagen . . . . .	148
2.5.1	Erforderliches Saugvermögen zum Evakuieren der Anlage . . . . .	149
2.5.2	Erforderliches Saugvermögen zum Absaugen der Leckrate bei Betriebsdruck . . . . .	150
2.5.3	Erforderliches Saugvermögen zum Absaugen von Inertgasen und Dämpfen . . . . .	152
2.5.4	Ermittlung der Leckrate . . . . .	154
2.5.5	Erforderliches Saugvermögen für eine Trocknung . . . . .	156
2.5.6	Erforderliches Saugvermögen für eine Kühlung durch Vakuumverdampfung . . . . .	157
2.5.7	Erforderliches Saugvermögen für die Vakuumdesorption von Adsorbentien . . . . .	158
2.5.8	Zulässige Strömungsgeschwindigkeit in Vakuumleitungen . . . . .	159
2.5.9	Entlastung der Vakuumpumpen durch Kondensation . . . . .	161

2.5.10	Kombinationen von Vakuumpumpen . . . . .	162
2.5.11	Auswahl von Vakuumpumpen . . . . .	164
	Anlage: Explosionsschutzberechnungen in (4) . . . . .	172
	Literatur . . . . .	175
<b>3</b>	<b>Rohrleitungsplanung . . . . .</b>	<b>177</b>
3.1	Druckverlustberechnungen für Flüssigkeiten (1) . . . . .	177
3.2	Druckverlustberechnungen für Gase und Dämpfe . . . . .	183
3.3	Ermittlung der Rohrleitungskapazität . . . . .	187
3.3.1	Für Flüssigkeiten . . . . .	187
3.3.2	Für kompressible Medien (Gase) . . . . .	187
3.4	Kavitationsgefahr durch Absenken des statischen Druckes . . . . .	188
3.4.1	Berechnung der Absenkung des statischen Drucks . . . . .	188
3.4.2	Zulässige Strömungsgeschwindigkeit zur Vermeidung von Kavitation . . . . .	190
3.5	Leistungsbedarf von Pumpen, Gebläsen und Verdichtern . . . . .	192
3.5.1	Leistungsbedarf N von Pumpen . . . . .	192
3.5.2	Leistungsbedarf von Gebläsen . . . . .	192
3.5.3	Leistungsbedarf von Verdichtern . . . . .	193
3.6	Armaturen . . . . .	194
3.6.1	Armaturenauswahl . . . . .	198
3.6.2	Automatisierung von Armaturen . . . . .	199
3.6.3	Rückschlagklappen und Rückschlagventile . . . . .	202
3.6.4	Sicherheitsventile . . . . .	203
3.6.5	Sonstige Armaturen . . . . .	204
3.7	Wärmeverluste und Produktabkühlungen in Rohrleitungen . . . . .	206
3.7.1	Berechnung der Wärmeverluste . . . . .	206
3.7.2	Produktabkühlung in Rohrleitungen . . . . .	209
3.8	Begleitbeheizung von Rohrleitungen . . . . .	212
3.8.1	Wärmebedarfsermittlung für die Beheizung . . . . .	212
3.8.2	Heizleistungen verschiedener Begleitheizsysteme . . . . .	213
3.9	Vermeidung der Gasansaugung in Flüssigkeitsleitungen . . . . .	213
3.9.1	Sperrbleche und Wirbelbrecher . . . . .	213
3.9.2	Flüssigkeitsstandhöhe über dem Auslaufstutzen . . . . .	214
3.9.3	Installation von selbstentlüftenden Rohrleitungen . . . . .	219
3.10	Beschränkung des Gasdurchsatzes bei Querschnittsänderungen . . . . .	219
3.10.1	Maximale Gas- oder Dämpfekapazität im unterkritischen Bereich . . . . .	219
3.10.2	Maximaler Gasdurchsatz im überkritischen Bereich . . . . .	221
3.11	Verschiedenes . . . . .	223
3.11.1	Wehrablaufkapazitäten . . . . .	223
3.11.2	Dimensionierung einer Pumpenvorlage . . . . .	224

3.11.3	Auslegung von Ausdehnungsgefäßen für Heiz- und Kühlkreise . . . . .	225
3.11.4	Dimensionierung von Kondensatleitungen . . . . .	230
3.11.5	Flüssigkeitsausdehnung bei Erwärmung . . . . .	231
3.11.6	Druckstoßberechnungen . . . . .	232
3.11.7	Checkliste für Verrohrungen . . . . .	234
	Literatur . . . . .	235
<b>4</b>	<b>Pumpen</b> . . . . .	237
4.1	Betriebseigenschaften von Kreiselpumpen . . . . .	237
4.2	Pumpenkennlinie beim Hintereinanderschalten von 2 Kreiselpumpen . . . . .	239
4.3	Pumpenkennlinie beim Parallelschalten von 2 Kreiselpumpen . . . . .	240
4.4	Kavitation und Pumpensaughöhen . . . . .	241
4.4.1	Was bedeutet Kavitation? . . . . .	241
4.4.2	Erforderliche NPSHR-Werte und vorhandene NPSHA-Werte . . . . .	241
4.4.3	Einfluss gelöster Gase auf die Kavitation in Pumpen . . . . .	244
4.4.4	Gasvolumenanteil in der Pumpe . . . . .	246
4.4.5	Zulässige Saughöhen . . . . .	247
4.5	Regelung von Kreiselpumpen über Drosselung oder Drehzahl . . . . .	248
4.5.1	Drosselregelung (Abb. 4.8) . . . . .	248
4.5.2	Drehzahlregelung (Abb. 4.10) . . . . .	250
4.6	Entlüftung der Saugleitung . . . . .	251
4.7	Rohrleitungsdimensionierung für Kreiselpumpen . . . . .	254
4.8	Kreiselpumpen-Probleme . . . . .	260
	Literatur . . . . .	263
<b>5</b>	<b>Regelventile</b> . . . . .	265
5.1	Was ist wichtig bei der Auslegung und Auswahl eines Regelventils? . . . . .	265
5.2	Berechnungen des verfügbaren und des benötigten $\Delta P_{RV}$ . . . . .	267
5.3	Regelventilauslegung . . . . .	269
5.4	Berechnung des $k_V$ -Werts nach DIN EN 60534 . . . . .	272
5.4.1	$k_V$ -Wert-Ermittlung für flüssige Medien . . . . .	272
5.4.2	$k_V$ -Wert-Bestimmung für gasförmige Medien . . . . .	273
5.5	Ermittlung des maximal zulässigen Druckverlustes $\Delta P_{max}$ in Regelarmaturen . . . . .	274
5.5.1	Flüssigkeiten . . . . .	274
5.5.2	Gase und Dämpfe . . . . .	274
5.6	Geometriefaktor $F_P$ . . . . .	276
5.7	Expansionsfaktor $Y$ für Gase und Dämpfe . . . . .	278
5.8	Ventilkennlinien und Betriebskennlinien . . . . .	279
	Literatur . . . . .	284

<b>6</b>	<b>Rührbehälteranlagen</b> . . . . .	285
6.1	Kriterien für die Rührerauswahl . . . . .	285
6.2	Leistungsaufnahme von Rührern [1] . . . . .	292
6.3	Wärmeübergang im Rührbehälter [1, 8] . . . . .	293
6.4	Rührbehälteraußenbeheizung [9] . . . . .	298
6.5	Instationäres Heizen und Kühlen [7] . . . . .	304
	Literatur . . . . .	310
<b>7</b>	<b>Wärmetauscher für konvektives Heizen und Kühlen</b> . . . . .	311
7.1	Vorgehensweise bei der Wärmetauscherlegung . . . . .	313
7.2	Informationen zu Wärmetauschern . . . . .	321
7.2.1	Rohranordnung . . . . .	321
7.2.2	Beypass- und Leckageströmung auf der Mantelseite . . . . .	322
7.2.3	Umlenkleche . . . . .	323
7.2.4	Technische Hinweise . . . . .	324
7.2.5	Auswahl eines Rohrbündelwärmetauschers . . . . .	326
7.3	Wirksame Temperaturdifferenzen LMTD und CMTD für den Wärmeaustausch (Abb. 7.13) . . . . .	328
7.3.1	Logarithmische Temperaturdifferenz LMTD für idealen Gegenstrom . . . . .	328
7.3.2	Temperaturdifferenz CMTD für mehrgängige Wärmetauscher TEMA-Typ E . . . . .	329
7.3.3	Berechnung der korrigierten Temperaturdifferenz CMTD . . . . .	329
7.3.4	Einfluss der Beypass-Strömung auf LMTD . . . . .	332
7.3.5	Mittlere gewogene Temperaturdifferenz WMTD . . . . .	334
7.4	Berechnung der Wärmeübergangszahlen und Druckverluste . . . . .	335
7.4.1	Rohrseitige Wärmeübergangszahl . . . . .	342
7.4.2	Mantelseitige Wärmeübergangszahl . . . . .	342
7.5	Druckverlustberechnungen in Rohrbündelwärmetauschern . . . . .	347
7.5.1	Rohrseitiger Druckverlust $\Delta P_R$ . . . . .	347
7.5.2	Mantelseitiger Druckverlust . . . . .	348
7.6	Wärmedurchgangszahl und Temperaturprofil . . . . .	349
7.6.1	Berechnung der Wärmedurchgangszahl . . . . .	349
7.6.2	Berechnung des Temperaturprofils im Wärmetauscher . . . . .	355
	Literatur . . . . .	355
<b>8</b>	<b>Kondensatoren zur Verflüssigung von Dämpfen</b> . . . . .	357
8.1	Bauarten von Kondensatoren . . . . .	358
8.2	Berechnung der Wärmeübergangszahlen bei isothermer Kondensation . . . . .	363
8.3	Kondensation mit Inertgas . . . . .	370

8.4	Kondensation von Mehrstoffgemischen . . . . .	371
8.5	Differential- und Integralkondensation . . . . .	375
8.6	Verschiedenes . . . . .	375
	Literatur . . . . .	377
<b>9</b>	<b>Verdampfer</b> . . . . .	379
9.1	Verdampfungsprozess . . . . .	379
9.2	Verdampferbauarten . . . . .	380
9.2.1	Thermosiphonverdampfer . . . . .	381
9.2.2	Zwangsumlaufverdampfer (Abb. 9.3) . . . . .	383
9.2.3	Entspannungsverdampfer (Abb. 9.4) . . . . .	384
9.2.4	Rohrbündelverdampfer (Kettle-Verdampfer) . . . . .	385
9.2.5	Interne Verdampfer . . . . .	386
9.2.6	Fallfilm-Verdampfer (Abb. 9.6) . . . . .	386
9.3	Auslegung von Verdampfern für Blasensieden . . . . .	387
9.3.1	Praktische Auslegung . . . . .	389
9.3.2	Dimensionierung von Kettle-Reboilern . . . . .	390
9.4	Auslegung von Fallfilmverdampfern . . . . .	391
9.5	Auslegung von Thermosiphonverdampfern . . . . .	395
9.5.1	Erforderliche Umlaufmenge $W$ im Thermosiphonkreislauf . . . . .	395
9.5.2	Wärmeübergangszahlen . . . . .	397
9.5.3	Berechnung der Zweiphasendichte und der mittleren Dichte im Reboiler . . . . .	401
9.5.4	Erforderliche Höhe $H_1$ für den Thermosiphonumlauf (Abb. 9.14) . . . . .	402
9.5.5	Auslegung von Riser- und Downcomerdurchmesser . . . . .	404
9.5.6	Druckverluste im Thermosiphonumlauf . . . . .	405
9.5.7	Reboilerkennlinien . . . . .	407
	Literatur . . . . .	408
<b>10</b>	<b>Fraktionierung</b> . . . . .	409
10.1	Kontinuierliche Fraktionierung . . . . .	409
10.1.1	Materialbilanz . . . . .	409
10.1.2	Dampf-Flüssigkeits-Gleichgewichte . . . . .	411
10.1.3	Berechnung von Mindestbodenzahl und Mindestrücklaufverhältnis [1] . . . . .	417
10.1.4	Grafische Bodenzahlbestimmung nach McCabe-Thiele [1] . . . . .	420
10.1.5	Rechnerische Bodenzahlbestimmung nach McCabe-Thiele [1] . . . . .	422
10.1.6	Kolonnenbelastung [1] . . . . .	426

10.2	Diskontinuierliche Blasendestillation und Blasenstripper . . . . .	431
10.2.1	Blasenrektifikation [1] . . . . .	431
10.2.2	Blasenstripper . . . . .	437
	Literatur . . . . .	440
<b>11</b>	<b>Absorptions- und Desorptionskolonnen . . . . .</b>	<b>441</b>
11.1	Gleichgewichte zur Auslegung von Absorptions- und Desorptionskolonnen . . . . .	441
11.2	Physikalisches Gleichgewicht (Gl. 1) . . . . .	441
11.2.1	Gleichgewichtsberechnung mit dem Henry-Koeffizienten H für überkritische Gase . . . . .	443
11.2.2	Gleichgewichtsberechnung für ideale kondensierbare Dämpfe . . . . .	444
11.2.3	Gleichgewichtsberechnung für nicht ideale kondensierbare Dämpfe mit $\gamma \neq 1$ . . . . .	445
11.2.4	Berechnung der Gaslöslichkeit in der Flüssigkeit mit der Henry-Konstanten H: . . . . .	445
11.3	Grafische Bodenzahlbestimmung für Absorption und Desorption (Abb. 11.3) . . . . .	446
11.4	Auslegen von Wäschern und Strippern . . . . .	449
11.4.1	Absorptions-/Waschkolonnen (Abb. 11.4) . . . . .	449
11.4.2	Desorptions-/Stripperkolonnen (Abb. 11.7) . . . . .	454
11.5	Umrechnung von $NTU_{OG}$ und $NTU_{OL}$ in theoretische Böden NT . . . . .	458
11.6	Erforderliche Füllkörperhöhe $H_{Füll}$ . . . . .	458
	Literatur . . . . .	459
<b>12</b>	<b>Abluftreinigungsverfahren . . . . .</b>	<b>461</b>
12.1	Abluftströme mit geringen Lösemittelkonzentrationen $< 20 \text{ g/m}_N^3$ . . . . .	461
12.1.1	Lösemittelentsorgung . . . . .	461
12.1.2	Lösemittelrückgewinnung . . . . .	463
12.2	Abluftströme mit hohen Lösemittelkonzentrationen $> 30 \text{ g/m}_N^3$ . . . . .	468
12.2.1	Lösemittelentsorgung . . . . .	468
12.2.2	Lösemittelrückgewinnung . . . . .	468
12.3	Planungshinweise . . . . .	473
12.3.1	Allgemeine Fehler . . . . .	473
12.3.2	Kondensationsanlagen . . . . .	474
12.3.3	Absorptionsanlagen . . . . .	475
12.3.4	Membrananlagen . . . . .	476
12.3.5	Adsorberanlagen . . . . .	476
12.3.6	Thermische Abluftreinigungsverfahren . . . . .	477
	Literatur . . . . .	478

---

<b>13 Mess- und Regeltechnik</b> . . . . .	479
13.1 Messgeräte zur Kontrolle verfahrenstechnischer Anlagen . . . . .	479
13.1.1 Temperaturmessungen . . . . .	479
13.1.2 Druckmessungen . . . . .	482
13.1.3 Niveaumessungen . . . . .	484
13.1.4 Durchflussmessungen . . . . .	489
13.2 Regeln und Steuern von verfahrenstechnischen Prozessen . . . . .	495
13.2.1 Druckregelung . . . . .	495
13.2.2 Differenzdruckregelung . . . . .	497
13.2.3 Temperaturregelung . . . . .	499
13.2.4 Niveauregelung . . . . .	501
13.2.5 Durchflussmengenregelung . . . . .	503
13.2.6 Steuern von verfahrenstechnischen Prozessen . . . . .	505
Literatur . . . . .	508
<b>14 Stoffdaten</b> . . . . .	509
<b>Stichwortverzeichnis</b> . . . . .	519