

Vakuumtechnik

in der Chemischen Industrie

herausgegeben von
Wolfgang Jorisch
in Zusammenarbeit mit dem
VDI Bildungswerk



WILEY-VCH

Weinheim · New York · Chichester
Brisbane · Singapore · Toronto

Inhalt

Herausgeber und Autoren	XIII
Häufig verwendete Größen und Einheiten	XV
1 Allgemeine Grundlagen der Vakuumphysik	1
1.1 Grundlagen der Vakuumtechnik (<i>W. Jorisch</i>)	1
1.1.1 Grundlagen der Gaskinetik	3
1.1.2 Die Zustandsgleichung für ideale Gase	5
1.1.3 Strömung von Gasen durch Rohrleitungen im Vakuum	7
1.1.4 Strömung durch lange runde Rohre	10
1.1.5 Übersicht Vakuumpumpen	12
2 Vakuumerzeugung in der Chemischen Verfahrenstechnik	15
2.1 Kondensation bei der Vakuumerzeugung (<i>H. Grave</i>)	15
2.1.1 Was ist Kondensation?	15
2.1.2 Kondensation unter Vakuum	16
2.1.3 Kondensation bei Anwesenheit von Inertgasen	17
2.1.4 Gesättigte Inertgas-Dampf-Gemische	18
2.1.5 Dampf-Flüssigkeits-Gleichgewichte	19
2.1.6 Bauarten von Kondensatoren	21
2.1.7 Wärmedurchgang und Verlauf der Kondensationstemperatur in einem Oberflächenkondensator	25
2.1.8 Vakuumregelung bei Kondensatoren	29
2.1.9 Aufstellung von Kondensationsanlagen	30
2.1.10 Spezielle Ausführungsformen	31
2.2 Dampfstrahl-Vakuumpumpen (<i>H. Grave</i>)	35
2.2.1 Aufbau und Funktion einer Einzelstrahlpumpe	35
2.2.2 Der Wirkungsgrad von Strahlverdichtern	37
2.2.3 Betriebsverhalten und Kennlinien	38
2.2.4 Regelung von Strahlverdichtern	41
2.2.5 Mehrstufige Dampfstrahl-Vakuumpumpen	43
2.2.6 Vergleich von Wasserdampf, Luft und anderen Treibmedien	46
2.3 Flüssigkeitsring-Vakuumpumpen (<i>K. H. Nikutta</i>)	51
2.3.1 Die Wirkungsweise	51

2.3.1.1	Die Funktionen der Betriebsflüssigkeit	52
2.3.2	Konstruktion	53
2.3.2.1	Prinzipieller Aufbau	53
2.3.2.2	Verdichtungsverhältnis	53
2.3.2.3	Mittelkörper	56
2.3.2.4	Führung der Betriebsflüssigkeit	56
2.3.2.5	Führung des Gases	57
2.3.2.6	Werkstoffe	58
2.3.2.7	Wellendichtung	58
2.3.3	Die Betriebsflüssigkeit	60
2.3.3.1	Art der Betriebsflüssigkeit	60
2.3.3.2	Einfluß der Betriebsflüssigkeit auf das Saugvermögen	60
2.3.3.3	Enddruck-Kavitation	62
2.3.4	Berechnung und Auslegung	63
2.3.4.1	Förderung von Gasen und nichtkondensierbaren Dämpfen	63
2.3.4.2	Absaugen von Gas-Dampf-Gemischen	64
2.3.5	Betrieb der Flüssigkeitsringpumpe	66
2.3.5.1	Betriebsflüssigkeitsführung	66
2.3.5.2	Abpumpen von verschmutzten Gasen	67
2.3.5.3	Mitförderung von Flüssigkeiten	68
2.3.5.4	Kavitationsschutz	69
2.3.5.5	Saugvermögensregelung	69
2.3.6	Beachtung des Umweltschutzes	70
2.3.6.1	Emission	70
2.3.7	Kombination mit anderen Vakuumpumpen	71
2.3.7.1	Kondensatoren – Gaskühler	71
2.3.7.2	Hintereinanderschaltung von 2 Flüssigkeitsring-Vakuumpumpen	72
2.3.7.3	Gasstrahler	72
2.3.7.4	Dampfstrahler/Flüssigkeitsring-Vakuumpumpe	75
2.3.7.5	Wälzkolben-Vakuumpumpe/Flüssigkeitsringpumpe	75
2.4	Mechanische Vakuumpumpen (<i>W. Jorisch</i>)	76
2.4.1	Die verschiedenen Bauarten mechanischer Vakuumpumpen	79
2.4.2	Einsatzmöglichkeiten mechanischer Vakuumpumpen in der chemischen Verfahrenstechnik	82
2.4.2.1	Ölumlaufigeschmierte Dreh- und Sperrschieber-Vakuumpumpen	82
2.4.2.2	Frischölgeschmierte Drehschieber-Vakuumpumpen	86
2.4.2.3	Trocken- bzw. ölfrei verdichtende Vakuumpumpen	87
2.4.2.4	Wälzkolben-Vakuumpumpen (Rootspumpen)	88
2.4.2.5	Trockenlaufende Chemie-Vakuumpumpe als Schraubenverdichter	97
2.4.2.6	Trockenlaufende Chemie-Vakuumpumpe als Klauen-Vakuumpumpe	100
2.5	Anwendungsbeispiele und Auslegungen (<i>H. Grave, W. Jorisch</i>)	108
2.5.1	Diskontinuierlicher Prozeß (Vakuumentrocknung)	109
2.5.2	Der kontinuierliche Prozess am Beispiel der Destillation	113
2.5.3	Die Auslegung eines Drosselventils zur Saugvermögensregelung im Grobvakuumgebiet	115
2.5.4	Kostenvergleich von Kondensator und Vakuumpumpe	116

2.6	Sicherheitsaspekte bei Vakuumanlagen (<i>L. J. Ripper</i>)	120
2.6.1	Vorschriften, Regelwerke, Anforderungen an Vakuumanlagen	120
2.6.1.1	Das Gesetz über technische Arbeitsmittel (Gerätesicherheitsgesetz)	120
2.6.1.2	Überwachungsbedürftige Anlagen sowie weitere Verordnungen zum Gerätesicherheitsgesetz	121
2.6.1.3	EN- Norm „Kompressoren und Vakuumpumpen“ DIN EN 1012, Sicherheitanforderungen, Teil 2 Vakuumpumpen	124
2.6.1.4	Unfallverhütungsvorschrift „Verdichter“ (VBG 16)	126
2.6.2	Grundlagen und Maßnahmen des Explosionsschutzes	127
2.6.2.1	Einleitung	127
2.6.2.2	Maßnahmen des Explosionsschutzes	128
2.6.2.3	Physikalische Grundlagen	133
2.6.2.4	Mögliche Zündquellen	141
2.6.2.5	Anforderungen	145
3	Vakuummessung und -regelung sowie Lecksuche	149
3.1	Grob- und Feinvakuummeßverfahren (<i>W. Große Bley</i>)	149
3.1.1	Druckeinheiten und Vakuumbereiche	149
3.1.2	Direkt und indirekt messende Vakuummeter sowie deren Meßbereiche	150
3.1.3	Flüssigkeitsmanometer	151
3.1.4	Mechanische Vakuummeßgeräte	152
3.1.5	Elektromechanische Druckaufnehmer	155
3.1.6	Wärmeleitungsvakuummeter	156
3.1.6.1	Wärmeleitungsvakuummeter mit konstanter Heizleistung am Meßfaden	157
3.1.6.2	Wärmeleitungsvakuummeter mit konstanter Temperatur des Meßfadens	158
3.1.6.3	Umgebungs- und Prozeßeinflüsse auf Wärmeleitungsvakuummeter	158
3.1.7	Elektrische Meßgeräte in explosionsgefährdeten Bereichen	160
3.2	Lecksuchmethoden (<i>W. Große Bley</i>)	161
3.2.1	Definition von Leckageraten	161
3.2.2	Grenzleckagerate von Chemieanlagen	162
3.2.3	Lecksuchmethoden	163
3.2.4	Helium als Prüfgas	164
3.2.5	Die Lecksuche mit einem Heliumleckdetektor	164
3.2.6	Lecksuche bei Anlagendruck im Feinvakuumbereich	165
3.2.6.1	Leckdetektoranschluß am Vakuumsystem der Anlage	165
3.2.6.2	Die Nachweisgrenze von Leckageraten abhängig vom Anschlußpunkt in mehrstufigen Pumpsystemen	166
3.2.7	Lecksuche bei Anlagen im Grobvakuumbereich	166
3.2.8	Eigenschaften und Kenngrößen von Heliumleckdetektoren	170
3.3	Vakuumregelung (<i>Th. Froese</i>)	172
3.3.1	Möglichkeiten für den Stelleingriff	172
3.3.2	Wahl der Regelstrategie bei einfachen Systemen	174
3.3.3	Wahl der Regelstrategie bei vernetzten Systemen	175

4	Vakuumverfahrenstechnik	179
4.1	Verdampfen zwischen 1013 und 1 mbar (<i>F. E. Hoyer</i>)	179
4.1.1	Der Zwangsumlaufverdampfer	180
4.1.2	Der Steigrohrverdampfer	182
4.1.3	Der Fallfilmverdampfer	183
4.2	Ausgewählte Beispiele beim Eindampfen unter Vakuum (<i>U. Hochberg</i>)	185
4.2.1	Auswahl des Verdampfungsdruckes	185
4.2.2	Thermische und mechanische Brüdenverdichtung, Verschaltung mehrerer Eindampfapparate	187
4.2.3	Vakuumerzeugung und -regelung in einer Eindampfanlage	190
4.2.4	Beispiel einer Eindampfanlage	190
4.3	Vakuumtrocknung (<i>J. Oess</i>)	191
4.3.1	Grundlagen der Trocknungstechnik	191
4.3.1.1	Konvektionstrocknung	192
4.3.1.2	Kontaktstrocknung	192
4.3.1.3	Strahlungstrocknung	197
4.3.2	Trocknung im Vakuum	197
4.3.2.1	Vorteile der Vakuumtrocknung	198
4.3.2.2	Diskontinuierliche Vakuumtrocknung	200
4.3.2.3	Kontinuierliche Vakuumtrocknung	202
4.3.3	Trocknerbauarten	203
4.4	Vakuumwirbelschicht (<i>M. Tondar</i>)	207
4.4.1	Wirbelschichtverfahren	207
4.4.2	Vakuumwirbelschicht	208
4.4.2.1	Aufbau	210
4.4.2.2	Prozeßablauf	212
4.4.2.3	Wirbelschicht unter Vakuum	212
4.4.2.4	Wärmeenergietransfer unter Vakuum	213
4.4.2.5	Anwendungen	214
4.5	Pharmazeutische Gefriertrocknungsanlagen (<i>M. Heldner</i>)	214
4.5.1	Allgemeines	214
4.5.2	Verfahrensschritte eines Gefriertrocknungsprozesses	215
4.5.2.1	Einfrieren	215
4.5.2.2	Haupttrocknung/Sublimation	218
4.5.2.3	Nachtrocknung	220
4.5.2.4	Nachbehandlung	220
4.5.2.5	Prozeßkontrolle	221
4.5.3	Gefriertrocknungsanlagen im Produktionsmaßstab	222
4.5.3.1	Trockenkammer mit Stellplattensystem	223
4.5.3.2	Eiskondensator	226
4.5.3.3	Kältesystem	227
4.5.3.4	Vakuum-System	228
4.5.3.5	Reinigung der Gefriertrocknungsanlage	228
4.5.3.6	Sterilisation der produktberührten Oberflächen	229
4.5.3.7	VHP Sterilisation	230

4.5.4	Schlußbemerkung	232
4.6	Stofftrennung durch Vakuumkristallisation (<i>G. Hofmann</i>)	232
4.6.1	Theoretische Grundlagen	234
4.6.2	Bauarten von Kristallisatoren	240
4.6.3	Peripherie	246
4.6.4	Einstellung von Suspensionsdichten	248
4.6.5	Beispiel – Kristallisation von Natriumchlorid (Speisesalz)	250
4.7	Kurzweg- und Molekulardestillation (<i>D. Bethge</i>)	252
4.7.1	Prinzip	252
4.7.2	Technische Ausführung	253
4.7.3	Verdampfungsleistung	254
4.7.4	Anlagen	255
4.7.5	Trennleistung anhand zweier Beispiele	256
4.7.6	Zusammenfassung	260
4.8	Vakuumrektifikation (<i>J. Zellmer</i>)	260
4.8.1	Trennleistung der Einbauten	261
4.8.2	Strömungsbelastung und Druckverlust	264
4.8.3	Betrieb im Vakuum	264
4.8.4	Kolonneneinbauten	266
4.8.4.1	Stoffaustauschböden	266
4.8.4.2	Schüttfüllkörper	274
4.8.4.3	Strukturierte Packungen	278
4.8.4.4	Flüssigkeitsverteiler für Packungs- und Füllkörperkolonnen	282
4.8.4.5	Vergleich der Einbauten und Zusammenfassung	286
4.8.5	Formelzeichen	288
4.9	Vakuumfiltration (<i>F. Tomasko</i>)	289
4.9.1	Vakuumfiltration	289
4.9.1.1	Zur Theorie der Filtration und Bedeutung des Laborversuchs	290
4.9.1.2	Anleitungen zur Typenwahl	290
4.9.2	Aufbau einer industriellen Vakuumfilterstation	291
4.9.3	Methoden kontinuierlicher Vakuumfiltration, Ausführungsformen, Anwendungsbereiche und Anwendungsbeispiele	293
4.9.3.1	Vakuumfiltration auf einer konvex gekrümmten Ebene: das Vakuumtrommelfilter	293
4.9.3.2	Vakuumfiltration auf einer konkav gekrümmten Ebene: das Vakuuminnenfilter	295
4.9.3.3	Vakuumfiltration auf einer waagerechten Planfläche	296
4.9.3.4	Vakuumfiltration auf einer vertikalen Planfläche	300
4.10	Die Saugförderung von Schüttgütern mit Vakuum (<i>T. Ramme</i>)	301
4.10.1	Theoretische Grundlagen	303
4.10.1.1	Allgemeines	303
4.10.1.2	Arten der Vakuumförderung	304
4.10.2	Prinzipieller Aufbau eines Vakuumförderers	306
4.10.2.1	Mehrstufige, druckluftbetriebene Vakuumerzeuger	308
4.10.2.2	Abscheidebehälter	310
4.10.2.3	Filtersysteme	311

4.10.3	Kontinuierliche Vakuumförderung	313
4.10.4	Anwendungsbeispiele	314
Literatur	315
Register	323