

Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Siegel

Pneumatische Förderung

Grundlagen, Auslegung, Anlagenbau, Betrieb

Vogel Buchverlag

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	5
1 Einleitung	13
1.1 Grundlagen der Fördertechnik	13
1.1.1 Aufgaben der Fördertechnik	13
1.1.2 Pneumatische und mechanische Stetigförderung	14
1.2 Geschichtliche Entwicklung	15
1.2.1 Überblick über die Literatur zur pneumatischen Förderung	15
1.2.2 Entwicklung in der Praxis	15
2 Grundlagen der pneumatischen Förderung	17
2.1 Grundlagen der Strömungslehre	17
2.1.1 Dynamischer Druck	17
2.1.2 Druckverlust bei reiner Luftströmung	18
2.1.3 Einzelkorn in der Rohrströmung	21
2.1.4 Schwebegeschwindigkeit des Einzelkorns	23
2.1.5 Druckverlust im Schüttgutbett	24
2.1.6 Fließbett	26
2.2 Zustandsdiagramm der pneumatischen Förderung	27
2.2.1 Zur Frage der Allgemeingültigkeit	27
2.2.2 Grenzkurven	28
2.2.3 Flugförderung	29
2.2.4 Strahlenförderung	30
2.2.5 Pfropfenförderung	31
2.2.6 Instabiler Bereich	32
2.2.7 Fließförderung	33
2.3 Fördergut in der Förderanlage	34
2.3.1 Gutbeschleunigung	35
2.3.1.1 Gutbeschleunigung bei Flugförderung	35
2.3.1.2 Gutbeschleunigung bei Pfropfenförderung	37
2.3.2 Beharrungszustand	38
2.3.2.1 Beharrungszustand bei waagerechter Förderung	38
2.3.2.2 Beharrungszustand bei lotrechter Förderung	40
2.3.3 Gutumlenkung im Rohrkrümmer	40
2.3.3.1 Krümmerströmung	40
2.3.3.2 Krümmer- und Gutverschleiß	41
2.3.3.3 Krümmergeometrie	42
2.3.3.4 Druckverlust im Rohrkrümmer	43
2.3.4 Druckverlauf längs der Förderleitung	43
2.4 Saug- und Druckanlage	44
2.5 Betriebspunkt einer pneumatischen Förderanlage	48
2.5.1 Betriebspunkt bei Flugförderung	48
2.5.2 Betriebspunkt bei Pfropfenförderung	50

3	Fördergut und Fördermittel	53
3.1	Fördergut als Schüttgut	53
3.1.1	Schüttgutverarbeitende Industrie	53
3.1.2	Schüttgüter der pneumatischen Fördertechnik	54
3.2	Schüttguteigenschaften	55
3.2.1	Allgemeine Schüttguteigenschaften	55
3.2.2	Wesentliche Schüttguteigenschaften für die pneumatische Förderung	56
3.3	Messung, Registrierung und Beispiele von Schüttguteigenschaften	58
3.3.1	Gewicht des Schüttguts	58
3.3.2	Maße des Schüttguts	59
3.3.3	Fließverhalten der Schüttung	61
3.3.3.1	Innere Reibung und Kohäsion	61
3.3.3.2	Wandreibung und Adhäsion	63
3.3.3.3	Schüttwinkel	64
3.3.4	Kornhärte und Verschleiß	64
3.3.5	Strömungstechnische Eigenschaften des Förderguts	67
3.3.5.1	Schwebeschwindigkeit und Widerstandsbeiwert der Kornumströmung	67
3.3.5.2	Druckverlustbeiwert und Luftgeschwindigkeit bei Flugförderung	69
3.3.5.3	Fluidisierbarkeit und Lufthaltevermögen	69
3.3.6	Guteigenschaften mit Auswirkung auf Gutqualität und Umwelt	70
3.3.6.1	Einfluß auf die Gutqualität	70
3.3.6.2	Umweltbelastung	70
3.4	Fördermittel	71
3.4.1	Folgerungen aus dem Gasgesetz	71
3.4.2	Verwendete Fördermittel und ihre Eigenschaften	71
3.4.3	Dichte des Fördermittels Luft	73
3.4.3.1	Einfluß von Temperatur und Luftfeuchte	73
3.4.3.2	Einfluß des Barometerstandes	73
3.4.3.3	Einfluß der geodätischen Höhe	75
3.4.4	Kondensatausfall bei feuchter Luft	76
4	Berechnung von pneumatischen Förderanlagen	79
4.1	Allgemeines	79
4.1.1	Ziele des Berechnungsverfahrens	79
4.1.2	Andere Berechnungsverfahren	81
4.1.3	Grundlagen der Berechnung von pneumatischen Förderanlagen	83
4.1.3.1	Druckverlustbeiwert bei Gutförderung	83
4.1.3.2	Auf den Rohrdurchmesser bezogener Druckverlustbeiwert	87
4.1.3.3	Grundgleichungen zum Zustand in der Förderleitung	89
4.2	Berechnung von pneumatischen Förderanlagen ohne Berücksichtigung der Kompressibilität der Luft	91
4.2.1	Allgemeines	91
4.2.2	Luftgeschwindigkeit	91
4.2.3	Druckverlust	93
4.2.3.1	Luftreibungsverlust	94
4.2.3.2	Lufteinzelwiderstände	94
4.2.3.3	Gutreibungsverlust	95
4.2.3.4	Hubverlust	95
4.2.3.5	Beschleunigungsverlust	96
4.2.3.6	Krümmerverlust	97
4.2.3.7	Gesamtdruckverlust	97
4.2.4	Auslegung einer pneumatischen Förderanlage bei Vernachlässigung der Kompressibilität der Luft	98

4.2.4.1	Rohrdurchmesser	98
4.2.4.2	Luftvolumenstrom	99
4.2.4.3	Leistungsbedarf	99
4.3	Pneumatische Druckförderung unter Berücksichtigung der Kompressibilität der Luft	100
4.3.1	Allgemeines	100
4.3.2	Luftgeschwindigkeit	100
4.3.3	Druckverlust	102
4.3.3.1	Druckverlust bei kompressibler Luftströmung	102
4.3.3.2	Druckverlust bei kompressibler Gut-Luft-Strömung	103
4.3.4	Auslegung einer pneumatischen Druckförderanlage unter Berücksichtigung der Kompressibilität der Luft	103
4.3.4.1	Druckförderanlage ohne Abstufung des Rohrdurchmessers	103
4.3.4.2	Druckförderanlage mit mehrfacher Abstufung des Rohrdurchmessers	108
4.4	Pneumatische Saugförderung mit Berücksichtigung der Kompressibilität der Luft	110
4.4.1	Allgemeines	110
4.4.2	Luftgeschwindigkeit	110
4.4.3	Druckverlust	111
4.4.3.1	Integration des Druckverlusts in der Sauganlage	111
4.4.3.2	Grenzen des Druckverlusts in der Sauganlage	112
4.4.4	Auslegung einer pneumatischen Saugförderanlage unter Berücksichtigung der Kompressibilität der Luft	113
4.5	Berechnungsbeispiele	115
4.5.1	Allgemeines	115
4.5.2	Beispiel einer pneumatischen Druckförderanlage	115
4.5.3	Beispiel einer pneumatischen Hochdruck-Förderanlage	118
4.5.4	Beispiel einer pneumatischen Saugförderanlage	119
5	Verfahren der pneumatischen Förderung	121
5.1	Entwicklungsziele	121
5.1.1	Betriebssicherheit	121
5.1.2	Schwachstellen oder Gestaltungszonen	122
5.2	Extreme Fördergüter der Flugförderung	123
5.3	Sonderlösungen der Pflropfen- und Dichtstromförderung	125
5.3.1	Pumpförderung	125
5.3.2	Kombinierte pneumatisch-mechanische Förderung	126
5.4	Schonende Förderung von Granulaten	126
5.4.1	Voraussetzungen und Daten zur Pflropfenförderung	126
5.4.2	Vergleich der Pflropfenförderung mit und ohne Taktung	127
5.4.3	Verfahren der Pflropfenförderung	132
5.5	Verfahren der pneumatischen Fließförderung	133
5.5.1	Fließbettförderung	133
5.5.2	Ausgeführte Fließförderverfahren	133
5.5.3	Sonderverfahren der Fließförderung	134
5.6	Verfahren zur Förderung kohäsiver und adhäsiver Schüttgüter	135
5.6.1	Einfluß von Kohäsion und Adhäsion auf das Förderverfahren	135
5.6.2	Förderverfahren für kohäsive Schüttgüter	137
5.6.3	Förderverfahren für adhäsive Schüttgüter	142
6	Luftversorgung	145
6.1	Thermodynamische Grundlagen	145
6.1.1	Volumenstrom und Druckerhöhung	145

6.1.2	Temperaturerhöhung	147
6.2	Ventilator	149
6.2.1	Funktion	149
6.2.2	Bauarten und Kennlinien	150
6.2.2.1	Ventilator Kennlinie	150
6.2.2.2	Laufrad	152
6.2.2.3	Ähnlichkeitsgesetze	153
6.2.3	Steuerung und Regelung von Ventilatoren	153
6.2.4	Der Ventilator in der Anlage	155
6.2.4.1	Reihenschaltung von Widerständen	156
6.2.4.2	Parallelschaltung von Widerständen	157
6.2.4.3	Reihenschaltung von Ventilatoren	159
6.2.4.4	Parallelschaltung von Ventilatoren	159
6.2.5	Transportventilator	159
6.2.5.1	Staub im Luftstrom	159
6.2.5.2	Ventilator als Schleuse bei der Späneabsaugung	160
6.3	Seitenkanalgebläse	161
6.3.1	Funktion und Ausführung	161
6.3.2	Kennlinien	163
6.3.3	Einsatz	163
6.4	Drehkolbengebläse	163
6.4.1	Funktion und Ausführung	163
6.4.2	Kennlinien	165
6.4.3	Lärmentwicklung	168
6.4.3.1	Absorptionsschalldämpfer	169
6.4.3.2	Resonanzschalldämpfer	171
6.4.3.3	Schallhaube	171
6.5	Schraubenverdichter	172
6.5.1	Funktion	172
6.5.2	Druckerhöhung	174
6.5.2.1	Druckverhältnis p_2/p_1	174
6.5.2.2	Das reale Druck-Volumen-Diagramm	174
6.5.3	Kennlinien	175
6.5.4	Lärmentwicklung	177
6.6	Luftversorgung für pneumatische Förderanlagen	177
6.6.1	Dezentrale und zentrale Luftversorgung	177
6.6.2	Druckluftaufbereitung	179
6.6.3	Luftvolumenstromregelung	180
6.6.4	Luftmengenregelung mit Lavaldüse	181
6.6.4.1	Theoretische Grundlagen	181
6.6.4.2	Messungen an Lavaldüsen	183
6.6.4.3	Ausführung	184
7	Einschleusung in pneumatische Förderanlagen	187
7.1	Aufgabe der Einschleusung	187
7.1.1	Schleusenfunktion	187
7.1.2	Dosierfunktion	188
7.2	Saugdüse	190
7.2.1	Funktion und Bedienung	190
7.2.2	Bauarten von Saugdüsen	191
7.3	Transportventilator	193
7.3.1	Funktion	193
7.3.2	Einsatzkriterien	194

7.4	Injektorschleuse	195
7.4.1	Funktion	195
7.4.2	Druckumsatz	197
7.4.3	Bauformen	201
7.4.4	Einsatzkriterien	202
7.5	Zellenradschleuse	203
7.5.1	Funktion und Bauformen	203
7.5.1.1	Austragschleuse	203
7.5.1.2	Durchblasschleuse	204
7.5.1.3	Schleusennormen	204
7.5.1.4	Schleusenwerkstoffe	206
7.5.2	Zellenradausführungen und Gutmassenstrom	207
7.5.2.1	Gutmassenstrom und Füllungsgrad	207
7.5.2.2	Schleuseneinlauf	207
7.5.2.3	Zellenradform	209
7.5.3	Spalte, Druckdifferenzen und Schleusenleckluft	211
7.5.3.1	Spalte der Zellenradschleuse	211
7.5.3.2	Leckluftströmung	211
7.5.3.3	Leckluftabführung	213
7.5.3.4	Abgedichtetes Zellenrad	214
7.5.4	Einfluß des Förderguts	215
7.5.4.1	Schleusenverschleiß	215
7.5.4.2	Granulatabscherung	216
7.5.5	Einsatzkriterien	219
7.6	Druckgefäß	219
7.6.1	Funktion	219
7.6.1.1	Funktionsablauf	220
7.6.1.2	Betriebsdrücke	221
7.6.1.3	Zeitlicher Druckverlauf	221
7.6.2	Einfluß des Förderguts auf die Bauform	222
7.6.2.1	Druckgefäß für rieselfähige Granulate	223
7.6.2.2	Druckgefäß für fluidisierbare Pulver	224
7.6.2.3	Druckgefäß für kohäsive Schüttgüter	225
7.6.3	Strömung der Luft und des Förderguts	226
7.6.3.1	Luftmengensteuerung	226
7.6.3.2	Gutzulauf	226
7.6.3.3	Gutauslauf	228
7.6.4	Druckgefäßanordnung für kontinuierlichen Betrieb	228
7.6.5	Einsatzkriterien	229
7.7	Fließbettschleuse	230
7.7.1	Funktion	230
7.7.2	Einsatzbeispiele	231
7.8	Schneckenschleuse	232
7.8.1	Funktion	232
7.8.2	Ausführung	233
8	Förderleitung	235
8.1	Ausführung	235
8.1.1	Rohrdurchmesser	235
8.1.2	Rohrwerkstoff	236
8.1.3	Flanschverbindung	237
8.1.4	Schläuche	238

8.2	Rohrführung	241
8.2.1	Rohrkrümmer	241
8.2.2	Rohrweiche	241
8.2.3	Rohrbahnhof	242
9	Gutabscheidung	243
9.1	Vorabscheidung nach der pneumatischen Förderung	243
9.2	Feinabscheidung im Zyklon	245
9.2.1	Funktion und Gestaltung	245
9.2.2	Theoretisches Grenzkorn	247
9.2.3	Abscheidegrad	248
9.2.4	Druckverlust im Zyklon	249
9.2.5	Einsatzkriterien	250
9.3	Feinabscheidung im Filter	250
9.3.1	Theorie der Filterabscheidung	251
9.3.2	Reststaubgehalt	252
9.3.3	Filterbelastung	253
9.3.4	Filterausführungen	254
9.3.4.1	Filtermedium	254
9.3.4.2	Filterelement	256
9.3.4.3	Filterabreinigung	256
9.3.5	Einsatzkriterien	258
10	Pneumatische Förderanlage	259
10.1	Planung und Bau	259
10.2	Beispiel einer pneumatischen Druckförderanlage	261
10.3	Beispiel einer pneumatischen Saugförderanlage	262
	Formelverzeichnis	267
	Literaturverzeichnis	271
	Stichwortverzeichnis	281