



Inhalt

Geleitwort	.....	11
Vorwort	.....	12
Kapitel 1		
Einleitung und Übersicht	.....	14
1.1 Literatur	.....	15
Kapitel 2		
Begriffsbestimmungen und Formelzeichen	.....	16
Kapitel 3		
Einführung in die Prinzipien der Trocknungstechnik	.....	20
3.1 Allgemeine Grundlagen	.....	20
3.2 Prinzipien der konvektiven Trocknungsverfahren	.....	27
3.2.1 Enthalpie-Feuchtediagramm nach Mollier	.....	33
3.2.1.1 Luftzustandsgrößen im ungesättigten Zustandsgebiet	.....	33
3.2.1.2 Luftzustandsgrößen im übersättigten Zustand	.....	34
3.2.1.3 Konstruktion des h-y-Diagramms	.....	35
3.2.1.4 Taupunkt	.....	37
3.2.1.5 Kühlgrenztemperatur	.....	37
3.2.2 Konditionierung von Luft: Entfeuchten, Aufheizen, Mischen	.....	38

3.2.2.1	Aufheizen feuchter Luft	.....	38
3.2.2.2	Abkühlung feuchter Luft mit Kondensation	.....	40
3.2.2.3	Mischen von zwei Luftströmen	.....	42
3.2.3	Wärme- und Stoffaustausch	.....	44
3.2.4	Konvektive Wärmeübertragung	.....	45
3.2.4.1	Einzelkörper	.....	46
3.2.4.2	Haufwerke	.....	47
3.2.4.3	Festbett	.....	47
3.2.4.4	Wirbelschicht	.....	50
3.2.4.5	Wärmeübertragung in der Wirbelschicht	.....	53
3.2.4.6	Die drei Trocknungsabschnitte	.....	54
3.2.4.7	Darstellung des Trocknungsverlaufs	.....	55
3.2.4.8	Analogie des Wärme- und Stofftransports	.....	58
3.2.4.9	Beispiel: Luft- und Wärmebedarf bei der konvektiven Trocknung	.....	60
3.3	Prinzipien der Kontakt-trocknungsverfahren	.....	64
3.3.1	Kontakt-trocknung ruhender Schichten	.....	67
3.3.2	Atmosphärische Kontakt-trocknung	.....	68
3.3.3	Vakuum-Kontakt-trocknung	.....	70
3.4	Prinzipien der Gefriertrocknung	.....	72
3.4.1	Die kritischen Parameter ϑ_{fr} , ϑ_{cr} , ϑ_g , ϑ_{ew} , ϑ_m und ihre Messung	.....	76
3.4.1.1	Differenz-Thermoanalyse (DTA)	.....	77
3.4.1.2	DSC – Differential Scanning Calorimetrie (Glasübergangstemperatur, Strukturänderungen)	.....	78
3.4.1.3	Widerstandsmessung (Eutektikum-Monitor)	.....	78
3.4.1.4	Kryomikroskop	.....	79
3.4.1.5	Mini-, Labor-, Pilot-Gefriertrockner	.....	81
3.4.2	Einfrieren	.....	85
3.4.3	Gefriertrocknung	.....	87
3.4.3.1	Erster Trocknungsabschnitt	.....	88
3.4.3.2	Zweiter Trocknungsabschnitt	.....	96
3.4.4	Messung des Trocknungsverlaufs	.....	98
3.4.4.1	Messgeräte zur Verfolgung des Trocknungsverlaufs	.....	103
3.5	Prinzipien der Strahlungs- bzw. Mikrowellen-Trocknung	.....	107
3.5.1	Prinzipien der Strahlungstrocknung	.....	107
3.5.2	Wirkungsweise und Randbedingungen der Strahlungstrocknung	.....	108
3.5.3	Prinzipien der Hochfrequenz-Trocknung	.....	112
3.5.4	Mikrowellen-Trocknung	.....	113
3.5.4.1	Dielektrische Eigenschaften	.....	114
3.5.4.2	Wärme- und Stofftransporteigenschaften	.....	115
3.6	Literatur	.....	116

Kapitel 4

Trocknungsverfahren und Trocknerbauarten	.....	118
4.1 Auswahl von Trocknungsverfahren	.....	118
4.1.1 Anforderungen an die Produkteigenschaften	.....	119
4.1.2 Betriebswirtschaftliche Anforderungen	.....	120
4.1.3 Anforderungen aus dem Regelwerk des Arzneibuches (auf der Grundlage von §55 Arzneimittelgesetz)	.....	120
4.1.4 Auswahl des Trockners	.....	121
4.2 Konvektive Trockner	.....	123
4.2.1 Trockenschrank	.....	123
4.2.1.1 Umlufttrockenschrank	.....	124
4.2.1.2 Kammertrockner	.....	124
4.2.1.3 Vakuumtrockenschrank	.....	125
4.2.1.4 Hersteller	.....	126
4.2.2 Bandtrockner	.....	126
4.2.2.1 Der durchströmte Förderbandtrockner	.....	127
4.2.2.2 Welches Produkt eignet sich?	.....	128
4.2.2.3 Bandtrockner-Elemente	.....	129
4.2.2.4 Auslegung von Bandtrocknungsprozessen	.....	137
4.2.2.5 Der atmosphärisch betriebene Kontaktbandtrockner	.....	142
4.2.2.6 Der Vakuumbandtrockner	.....	142
4.2.2.7 Hersteller	.....	144
4.2.3 Trommeltrockner	.....	145
4.2.3.1 Hersteller	.....	146
4.2.4 Wirbelschichttrockner	.....	147
4.2.4.1 Allgemeines	.....	147
4.2.4.2 Welche Produkte eignen sich für Wirbelschichttrockner?	.....	147
4.2.4.3 Statische Wirbelschichttrockner	.....	151
4.2.4.3.1 Hersteller	.....	152
4.2.4.4 Vibrierte Wirbelschichttrockner	.....	152
4.2.4.5 Batch-Wirbelschichttrockner	.....	154
4.2.4.5.1 Hersteller	.....	155
4.2.4.6 Strahlschichttrockner	.....	155
4.2.4.7 Auslegung von Wirbelschichttrocknern	.....	156
4.2.5 Förderlufttrockner (Stromtrockner)	.....	158
4.2.5.1 Welche Produkte eignen sich?	.....	158
4.2.5.2 Bauarten	.....	158
4.2.5.3 Auslegung von Förderlufttrocknern	.....	163
4.2.5.4 Hersteller	.....	164
4.2.6 Zerstäubungstrockner	.....	164
4.2.6.1 Welche Produkte eignen sich?	.....	164
4.2.6.2 Zerstäuberorgane	.....	166

4.2.6.2.1	Zentrifugalzerstäuber	.....	167
4.2.6.2.2	Düsenzerstäuber	.....	169
4.2.6.3	Sprühturmbauarten und zugehörige Luftführung	.....	178
4.2.6.4	Gleichstromsprühtrockner in der pharmazeutischen Produktion	.....	179
4.2.6.5	Agglomerationssprühtrockner	.....	183
4.2.6.6	Vorgänge bei der Sprühtrocknung	.....	187
4.2.6.7	Produktcharakterisierung und Festlegung der Betriebsparameter	.....	189
4.2.6.8	Auslegung bzw. Überprüfung der Trocknungsleistung	.....	191
4.2.6.9	Bilanzierung des Sprühtrockners und Darstellung im h-y-Diagramm	.....	191
4.2.6.10	Einfluss der Tropfengrößenverteilung auf die Restfeuchte	.....	193
4.2.6.11	Hersteller	.....	197
4.2.7	Wirbelschicht-Sprühgranulator	.....	197
4.2.7.1	Prinzip der kontinuierlichen Wirbelschicht-Sprühgranulation	.....	198
4.2.7.2	Bauarten von Sprühgranulatoren	.....	203
4.2.7.3	Diskontinuierliche Granulation	.....	203
4.2.7.3.1	Hersteller	.....	209
4.2.7.4	Kontinuierliche Granulation	.....	209
4.2.7.4.1	Hersteller	.....	220
4.2.7.5	Betreiben von Sprühgranulatoren	.....	220
4.2.7.6	Auslegung von Wirbelschicht-Sprühgranulatoren	.....	222
4.3	Kontaktrockner	.....	229
4.3.1	Vakuum-Kontaktrockner	.....	231
4.3.1.1	Welche Produkte eignen sich für Vakuum-Kontaktrockner?	.....	231
4.3.1.2	Welche Kriterien sind beim Einsatz von Kontaktrocknern zu beachten?	.....	231
4.3.1.3	Taumeltrockner, Doppelkonustrockner	.....	232
4.3.1.3.1	Hersteller	.....	234
4.3.1.4	Kontaktrockner in vertikaler Bauweise	.....	234
4.3.1.4.1	Hersteller	.....	239
4.3.1.5	Kontaktrockner in horizontaler Bauweise	.....	239
4.3.1.5.1	Hersteller	.....	240
4.3.1.6	Schaufeltrockner, Tauchscheibentrockner, Knetertrockner	.....	240
4.3.1.6.1	Hersteller	.....	241
4.3.1.7	Kontinuierlich arbeitende horizontale Kontaktrockner	.....	241
4.3.1.7.1	Hersteller	.....	243
4.3.1.8	(Vakuum-)Tellerrockner	.....	244

4.3.1.9	Walzentrockner	.....	245
4.3.1.9.1	Hersteller	.....	246
4.3.1.10	Auslegung von Kontakttrocknern	.....	247
4.4	Mikrowellentrockner	.....	250
4.4.1	Klassifikation industrieller Mikrowellentrockner	.....	252
4.4.2	Kombination von Mikrowellen- und Vakuumtrockner	.....	254
4.4.3	Hersteller	.....	255
4.5	Trockner, die mehrere Verfahren kombinieren	.....	256
4.5.1	Kombination von Mischer und Trockner	.....	256
4.5.2	Mahltrockner	.....	256
4.5.2.1	Hersteller	.....	258
4.5.3	Kombination von Filter und Trockner	.....	259
4.5.3.1	Bandfiltertrockner	.....	259
4.5.3.2	Nutschrockner	.....	260
4.5.3.3	Zentrifugentrockner	.....	262
4.5.3.4	Hersteller	.....	264
4.6	Literatur	.....	264

Kapitel 5

Wechselwirkung Gasfeuchte – Produktfeuchte (Sorption)

		.....	268
5.1	Allgemeines, Begriffsbestimmungen zur sorptiven Feuchtebindung	.....	268
5.1.1	Bindungsmechanismen	.....	269
5.1.1.1	Monomolekulare und polymolekulare Oberflächenbelegung	.....	269
5.1.1.2	Kapillarität und Kapillarkondensation	.....	271
5.1.1.3	Unterschiedliche Adsorptionsisothermen-Typen	.....	272
5.1.1.4	Sorptionshysterese	.....	274
5.1.1.5	Mathematische Darstellung der Sorptionsisothermen	.....	274
5.1.1.6	Temperaturabhängigkeit der Sorptionsgleichgewichte	.....	275
5.1.2	Experimentelles zum Sorptions-Gleichgewicht (Möglichkeiten zur Messung des Gleichgewichts)	.....	278
5.2	Literatur	.....	280

Kapitel 6

Verfahren zur Luftfeuchtemessung	.....	282
6.1 Psychrometer	.....	282
6.2 Taupunktmeter	.....	284
6.3 Lithium-Chlorid-Hygrometer	.....	286
6.4 Kapazitives Hygrometer	.....	286
6.5 Widerstands-Hygrometer	.....	287
6.6 Haar-Hygrometer	.....	288
6.7 Infrarot-Spektrometer	.....	289
6.8 Literatur	.....	290

Kapitel 7

Produktfeuchte-Messverfahren	.....	291
7.1. Thermogravimetrische Methode	.....	291
7.2 Karl Fischer	.....	293
7.3 Nah-Infrarot-Reflexionsphotometrie (NIR)	.....	294
7.4 Mikrowelle	.....	294
7.5 Elektrischer Widerstand	.....	296
7.6 Nuklear-magnetische Resonanzverfahren	.....	296
7.7 Kondensationsmethode	.....	297
7.8 Literatur	.....	298

Kapitel 8

Sicherheit und Trocknung	.....	299
8.1 Literatur	.....	304

Kurzprofile der Autoren	305
--------------------------------	-------	-----