

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	V
Autorenverzeichnis.....	VII
Formelzeichen.....	XIX
Firmenverzeichnis	XXIII

1 Grundlagen der Trocknungstechnik	1
1.1 Beteiligte Phasen und nasser Stoff.....	1
1.2 Zustandsänderungen in feuchter Luft	3
1.2.1 Entwicklung des Enthalpie-Feuchte-Diagramms nach MOLLIER	4
1.2.2 Konditionieren von Luft – mit Übungsbeispielen.....	10
1.2.2.1 Aufheizen feuchter Luft.....	10
1.2.2.2 Abkühlung feuchter Luft mit Kondensation	13
1.2.2.3 Mischen von zwei Luftströmen.....	14
1.3 Luftfeuchtemessung.....	16
1.3.1 Psychrometer.....	17
1.3.2 Taupunktmeter	19
1.3.3 Lithiumchlorid-Hygrometer.....	20
1.3.4 Kapazitives Hygrometer.....	21
1.3.5 Widerstands-Hygrometer	22
1.3.6 Haar-Hygrometer	22
1.3.7 Infrarot-Spektrometer	23
1.4 Produktfeuchte-Messverfahren	25
1.4.1 Thermogravimetrische Methode	25
1.4.2 Karl Fischer Titration	27
1.4.3 Nah-Infrarot-Reflexionsphotometrie (NIR)	27
1.4.4 Mikrowelle	28
1.4.5 Elektrischer Widerstand	30
1.4.6 NMR	30
1.4.7 Kondensationsmethode	30

1.5	Wechselwirkung Gasfeuchte / Produktfeuchte:	
	Hygrokopizität	32
1.5.1	Allgemeines, Begriffsbestimmungen	32
1.5.2	Bindungsmechanismen	33
1.5.2.1	Monomolekulare und polymolekulare Oberflächenbelegung	33
1.5.2.2	Kapillarität und Kapillarkondensation	35
1.5.2.3	Unterschiedliche Adsorptionsisothermen Typen	37
1.5.2.4	Sorptionshysterese	38
1.5.2.5	Darstellung der Sorptionsisothermen	39
1.5.2.6	Die Temperaturabhängigkeit der Sorptionsgleichgewichte	40
1.5.3	Experimentelles zum Sorptions-Gleichgewicht (Möglichkeiten zur Messung des Gleichgewichts)	42
1.6	Transportvorgänge: Wärme- und Stoffübertragung	45
1.6.1	Mechanismen der Wärmeübertragung	45
1.6.2	Konvektion	46
1.6.2.1	Einzelkörper	47
1.6.2.2	Haufwerke	48
1.6.2.3	Festbett:	49
1.6.2.4	Wirbelschicht	50
1.6.2.5	Wärmeübertragung in der Wirbelschicht	53
1.6.3	Charakteristische Trocknungsverläufe	54
1.6.3.1	1. Trocknungsabschnitt	55
1.6.3.2	2. Trocknungsabschnitt	55
1.6.3.3	3. Trocknungsabschnitt	56
1.6.3.4	Analogie des Wärme- und Stofftransports	59
1.6.4	Luft- und Wärmebedarf	61
1.7	Konduktion / Kontakttrocknung	66
1.7.1	Kontakttrocknung ruhender Schichten	66
1.7.1.1	Atmosphärische Kontakttrocknung	68
1.7.1.2	Vakuum-Kontakttrocknung	70
1.7.2	Transportmechanismen im körnigen Haufwerk	72
1.8	Strahlungstrocknung	80
1.8.1	Wirkungsweise und Randbedingungen der Strahlungstrocknung	81
1.9	Hochfrequenz	85
1.9.1	Wirkungsweise und Randbedingungen	85
1.9.2	Beispiele	87

1.10	Mikrowellen-Trocknung	87
1.10.1	Wirkungsweise und Randbedingungen	88
1.10.1.1	Dielektrische Eigenschaften.....	89
1.10.1.2	Wärme- und Stofftransporteigenschaften.....	94
1.10.1.3	Modellierung	95
2	Trocknungsverfahren und Trocknerbauarten: Merkmale und ihre Bedeutung in der Lebens- mittelindustrie	97
2.1	Auswahl von Trocknungsverfahren	97
2.2	Trockenschrank	104
2.2.1	Hordentrockner	104
2.2.2	Umlufttrockenschrank	105
2.2.3	Kamertrockner	105
2.2.4	Vakuumtrockenschrank.....	107
2.3	Bandtrockner	110
2.3.1	Allgemeines	110
2.3.2	Der durchströmte Förderbandtrockner.....	110
2.3.3	Welches Produkt eignet sich für den Einsatz von durchströmten Förderbandtrocknern?	113
2.3.4	Die Bandtrockner Elemente und ihr Einfluss auf den Trocknungsverlauf und die Produktqualität.....	114
2.3.4.1	Der Mehrbandtrockner	121
2.3.5	Auslegung von Bandtrocknungsprozessen.....	122
2.3.6	Der atmosphärisch betriebene Kontaktbandtrockner.....	132
2.3.7	Der Vakuumbandtrockner	133
2.4	Trommeltrockner	135
2.5	Wirbelschichttrockner	136
2.5.1	Allgemeines	136
2.5.2	Welche Produkte eignen sich für Wirbelschichttrockner?	138
2.5.3	Statische Wirbelschichttrockner	143
2.5.4	Vibrierte Wirbelschichttrockner	145
2.5.4.1	Batch Wirbelschichttrockner	148
2.5.5	Strahlschichttrockner.....	149
2.5.6	Auslegung von Wirbelschichttrocknern	151

Inhaltsverzeichnis

2.6	Förderlufttrockner	154
2.6.1	Welche Produkte eignen sich für Stromtrockner?	154
2.6.2	Bauarten von Stromtrocknern.....	155
2.6.3	Auslegung von Förderlufttrocknern	163
2.7	Zerstäubungstrockner	164
2.7.1	Welche Produkte eignen sich für Zerstäubungstrockner?	164
2.7.2	Elemente des Sprühtröckners	166
2.7.2.1	Zerstäuberorgane.....	166
2.7.2.2	Sprühturmabarten und zugehörige Luftführung.....	184
2.7.2.3	Gleichstromsprühtröckner	186
2.7.2.4	Sprühtröckner mit Einbauten und gemischter Luftzuführung	192
2.7.3	Vorgänge bei der Sprühtröcknung.....	196
2.7.4	Betreiben der Sprühtröckner	198
2.7.4.1	Produktcharakterisierung und Festlegung der Betriebsparameter	198
2.7.4.2	Auslegung / Überprüfung der Trocknungsleistung	200
2.7.4.3	Einfluss der Tropfengrößenverteilung auf die Restfeuchte	203
2.8	Wirbelschicht-Sprühgranulatoren	208
2.8.1	Allgemeines über den Einsatz von Wirbelschicht-Sprühgranulatoren (WSG).....	208
2.8.2	Prinzip der Wirbelschicht-Sprühgranulation	209
2.8.3	Bauarten von Sprühgranulatoren	214
2.8.3.1	Diskontinuierliche Granulation.....	215
2.8.3.2	Kontinuierliche Granulation	222
2.8.4	Betreiben von Sprühgranulatoren.....	235
2.8.4.1	Produkteigenschaften.....	235
2.8.4.2	Auswahl der Verfahrensvariante	236
2.8.4.3	Anwendungen der Wirbelschicht-Sprühgranulation	236
2.8.5	Auslegung von Wirbelschicht-Sprühgranulatoren	236
2.9	Kontakttrockner.....	244
2.9.1	Allgemeines	244
2.9.2	Vakuumkontakttrockner	247
2.9.2.1	Taumeltrockner, Doppelkonustrockner	250
2.9.2.2	Kontakttrockner in vertikaler Bauweise	252
2.9.2.3	Kontakttrockner in horizontaler Bauweise	258
2.9.3	Kontinuierlich arbeitende Kontakttrockner.....	264
2.9.3.1	(Vakuum-) Tellertrockner	264

2.9.3.2	Walzentrockner	265
2.9.4	Auslegung von Kontakttrocknern	268
2.10	Gefriertrockner.....	281
2.10.1	Das Einfrieren	284
2.10.1.1	Der Wärmetransport während des Einfrierens.....	296
2.10.2	Die Gefriertrocknung.....	298
2.10.2.1	Der erste Trocknungsabschnitt	300
2.10.2.2	Der zweite Trocknungsabschnitt.....	308
2.10.3	Messung des Trocknungsverlaufs	310
2.10.3.1	Messgeräte zur Verfolgung des Trocknungsverlaufs	316
2.10.4	Gefrieranlagen, Gefriertrocknerbauarten	321
2.10.4.1	Einteilung	321
2.10.4.2	Gefrieren in Kaltluftstrom	322
2.10.4.3	Kontaktgefrierverfahren	324
2.10.4.4	Cryogene Anlagen	325
2.10.5	Gefriertrocknerbauarten.....	328
2.10.5.1	Batchprozesse in Trockenkammern.....	328
2.10.5.2	Batchprozesse in Rührgefriertrocknern	328
2.10.5.3	Kontinuierliche Gefriertrockner	330
2.10.6	Atmosphärische Gefriertrocknung	332
2.11	Strahlungstrockner	333
2.12	Mikrowellentrockner	334
2.12.1	Besondere Vor- und Nachteile	334
2.12.2	Beispiele anhand einer Klassifikation industrieller Mikrowellentrockner	335
2.12.3	Ausführungen von Mikrowellentrocknern.....	339
2.13	Heißdampftrockner	343
2.14	Kombinationen von Trocknern	345
2.14.1	Schaummmattentrockner.....	345
2.14.2	Mischertrockner	347
2.14.3	Mahltrockner	347
2.14.4	Filtertrockner	351
2.14.4.1	Bandfiltertrockner.....	351
2.14.4.2	Nutschtrockner.....	353
2.14.4.3	Zentrifugentrockner	354

Inhaltsverzeichnis

2.15	Luft-Konditionierung	356
2.15.1	Konditionierung durch Kondensationsanlagen	356
2.15.2	Konditionierung durch Absorption in Wäschern mit Li-Cl-Lösung	357
2.15.3	Der Sorptionsregenerator	359
2.15.3.1	Der Sorptionsregenerator nach dem Absorptionsprinzip	359
2.15.3.2	Der Sorptionsregenerator nach dem Adsorptionsprinzip	363
2.16	Sicherheit und Trocknung	364
2.17	Energieverbrauch und Trocknung	370
2.18	Kosten der Trocknung	375
2.18.1	Allgemeines	375
2.18.2	Apparatekosten	376
2.18.3	Fixkosten	377
2.18.4	Variable Kosten	377
2.18.5	Energiekosten als Funktion des Energieträgers	377
2.18.6	Energiekosteneinsparung durch Wärmerückgewinnung	379
3	Qualität und Trocknung, Trocknungsverfahren und Produkteigenschaften	381
3.1	Stabilität und Trocknung	381
3.1.1	Mikrobiologische Stabilität von Lebensmitteln	381
3.1.1.1	Mikroorganismen – Wachstum und Abtötung	381
3.1.1.2	Prinzipielle Einsatzgebiete	382
3.1.1.3	Inaktivierungskinetik	383
3.1.1.4	Inaktivierungskinetik 1. Ordnung	383
3.1.1.5	Auslegung kontinuierlicher Prozesse mit bekannter Verweilzeitverteilung	388
3.1.1.6	Prozessoptimierung unter Berücksichtigung des Zeit- Temperaturverhaltens bei gleichen Effekten	389
3.1.1.7	Weitere Einflussfaktoren auf die Hitzeresistenz von Mikroorganismen	390
3.1.1.8	Alternative Modelle zur Beschreibung der Inaktivierungskinetik	391
3.1.1.9	Prozessauslegung bei örtlich und zeitlich veränderlichen Temperaturen unter Berücksichtigung beliebiger Inaktivierungskinetiken	393
3.1.2	Wasseraktivität	395

3.1.3	Einfluss von Zustandsänderungen 1. Ordnung (Sieden, Gefrieren, Schmelzen).....	398
3.1.3.1	Übersicht.....	398
3.1.3.2	Gefrieren.....	398
3.1.3.3	Abschnitte des Gefrierprozesses	401
3.1.3.4	Gefrierzeit	402
3.1.3.5	Gefriergeschwindigkeit.....	403
3.1.3.6	Schmelzen	404
3.1.3.7	Sieden.....	405
3.1.4	Einfluss von Zustandsänderungen 2. Ordnung (Glasübergang, Verbackungen).....	406
3.1.5	Maillard-Reaktion	411
3.1.6	Veränderung ernährungsphysiologischer Werte.....	412
3.1.6.1	Übersicht.....	412
3.1.6.2	Protein-Denaturierung.....	412
3.1.6.3	Vitamin-Abbau und Oxidation	413
3.1.7	Aromaretention	413
3.2	Produkt-Design durch Trocknung.....	414
3.2.1	Instaneigenschaften	414
3.2.1.1	Übersicht.....	414
3.2.1.2	Definition	415
3.2.1.3	Befeuchtung einer Schüttung.....	416
3.2.1.4	Untersinkvermögen.....	417
3.2.1.5	Dispergierbarkeit und Löslichkeit	417
3.2.2	Produktform	422
3.2.3	Schüttguteigenschaften	424
3.2.3.1	Schüttdichte	424
3.2.4	Coating.....	425
3.2.5	Matrix-Systeme	426
4	Spezielle Verfahren	429
4.1	Löslicher Kaffee und kaffeehaltige lösliche Pulver	429
4.1.1	Löslicher Kaffee	429
4.1.2	Entkoffeinerter Kaffee.....	430
4.1.3	Kaffeehaltige Getränke	431
4.1.4	Kaffee-Ersatz	432
4.1.5	Trocknen von löslichem Kaffee	432
4.1.5.1	Kontinuierliches und semikontinuierliches Gefriertrocknen	432

Inhaltsverzeichnis

4.1.5.2	Sprühtrocknen	436
4.1.5.3	Kombinierte Systeme für Sprühtrocknung und Agglomeration....	439
4.2	Löslicher Tee und teehaltige Getränke	440
4.2.1	Allgemeines.....	440
4.2.2	Behandeln der Rohware.....	441
4.2.3	Herstellen von löslichem Tee (pulverförmiger Tee-Extrakt)	441
4.2.4	Aromaretention bei Tee und tee haltigen Getränken.....	442
4.2.5	Sprühtrocknen	443
4.2.6	Gefriertrocknen.....	444
4.2.7	Verpackung und Stabilität.....	447
4.3	Zucker.....	447
4.3.1	Allgemeines.....	447
4.3.2	Trocknen von Kristallzucker	447
4.3.3	Trocknen anderer Zuckersorten	450
4.4	Milch und Milchprodukte	451
4.4.1	Allgemeines.....	451
4.4.2	Magermilch.....	455
4.4.3	Vollmilch	458
4.4.4	Molke.....	459
4.4.5	Laktose.....	460
4.4.6	Sahne	462
4.4.7	Kasein	462
4.4.8	Kaffeeweißer, Cappuccino Pulver	463
4.4.9	Hydrolysiertes Milchpulver	463
4.4.10	Joghurt	464
4.4.10.1	Übersicht	464
4.4.10.2	Gefriertrocknen von Joghurt	464
4.4.10.3	Sprühtrocknen von Joghurt	465
4.4.10.4	Rekonstitution und Inkubation von Joghurt Pulver	466
4.4.10.5	Pulverförmige Kindernahrungsmittel	466
4.4.11	Dessert Pulver.....	467
4.4.12	Zeitverfestigung (caking)	467
4.5	Gemüse, Kartoffeln und Obst	468
4.5.1	Allgemeines	468
4.5.2	Übersicht Trockenprodukte	469
4.5.3	Mikrobiologische Beschaffenheit von getrocknetem Obst und Gemüse	473

4.5.3.1	Keimzahl vor der Trocknung	473
4.5.3.2	Thermische Resistenz der Mikroorganismen bei der Trocknung	474
4.5.3.3	Maßnahmen zum Reduzieren der Anfangskeimzahl bei getrocknetem Obst und Gewürzen	474
4.5.4	Trocknen von Obst und Gemüse	475
4.5.5	Trocknen von Obst- und Gemüsesäften	477
4.5.6	Herstellen von getrockneten Kartoffelerzeugnissen	478
4.5.6.1	Trockenkartoffel	479
4.5.6.2	Kartoffelpüree	481
4.5.6.3	Kartoffelflocken-Verfahren	481
4.5.6.4	Add-back-Verfahren	482
4.6	Fisch, Fleisch und Wurstwaren	484
4.6.1	Allgemeines	484
4.6.2	Die Haltbarkeit von getrocknetem Fisch und Fleisch	484
4.6.3	Einfluss des pH-Wertes auf die Trocknung	486
4.6.4	Gefriertrocknen	487
4.6.5	Vakuumtrocknen	490
4.6.6	Sprühtrocknen	490
4.6.7	Trocknung bei Umgebungsdruck und kontrollierter Luftfeuchte (Klimakammer)	490
4.7	Teigwaren	494
4.7.1	Allgemeines	494
4.7.2	Trocknen von Teigwaren	495
4.8	Instant-Lebensmittel (Eipulver, Tomatenpulver, Hefeextrakt)	497
4.8.1	Tomatenpulver	497
4.8.2	Trocknen von Eipulver und Hefeextrakt	498
4.9	Stärke	499
4.9.1	Allgemeines	499
4.9.2	Gewinnung von Mais- und Kartoffelstärke	500
4.9.3	Pneumatisches Trocknen nativer Stärke	502
4.9.4	Walzentrocknen von Quellstärke	504
4.9.5	Sicherheitsaspekte bei der Stärketrocknung	505
5	Anhang	507
5.1	Analyse eines Bandtrocknerversuchs	507
5.1.1	Ermittlung der Versuchsdaten	507

Inhaltsverzeichnis

5.1.2	Der Batch-Versuch	509
5.1.3	Berechnung der Wärmeübergangszahl nach VDI-Wärmeatlas ..	509
5.1.4	Die normierte Trocknungsverlaufskurve.....	511
5.1.5	Die Berechnungsgleichungen zur Vorausberechnung des Trocknungsverlaufs	512
5.2	Analyse eines Wirbelschichttrocknungsprozesses.....	516
5.2.1	Die normierte Trocknungsverlaufskurve.....	517
5.2.2	Der Zustand und Existenzbereich der Wirbelschicht.....	518
5.2.3	Die Berechnung der Wärmeübergangszahl zwischen Fluidisierungsluft und den Partikeln	520
5.3	Auslegung eines Förderlufttrockners	521
5.3.1	Grobauslegung. Bestimmung der Luftmengen.....	521
5.3.2	Bestimmung der Länge eines Stromtrockners	526
5.3.3	Gebläseleistung.....	528
5.4	Auslegung eines Sprühtrockners	536
5.5	Analyse und Auslegung eines Kontakttrockners.....	542
5.5.1	Ermittlung der Daten eines Batchprozesses	542
5.5.2	Ermittlung der normierten Trocknungsverlaufskurve.....	543
6	Tabellen, Grafiken, Stoffwerte	549
6.1	Dampfdruck von Flüssigkeiten	549
6.2	Spezifische Dichte.....	550
6.3	Wärmekapazität	551
6.4	Kinematische Viskosität der Luft.....	552
6.5	Diffusionskoeffizient Wasserdampf in Luft.....	552
6.6	Dampfdrücke über gesättigten Salzlösungen	553
	Literaturverzeichnis	555
	Stichwortverzeichnis.....	575
	Inserentenverzeichnis	583