

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:	
	Hygroskopizität	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 Sorptionsisothermen Typen	36
1.5.2.4	Sorptionshysterese.....	38
1.5.2.5	Mathematische Darstellung der Sorptionsisothermen.....	39
1.5.2.6	Die Temperaturabhängigkeit der Sorptionsisotherme	40
1.5.3	Messung von Sorptionsisothermen	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 / Kontakt Trocknung	66
1.7.1	Kontakt Trocknung ruhender Schichten	67
1.7.1.1	Atmosphärische Kontakt Trocknung.....	68
1.7.1.2	Vakuum-Kontakt Trocknung	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 Trocknung.....	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 Lebensmittelindustrie	97
2.1	Auswahl von Trocknungsverfahren	97
2.2	Trockenschrank	104
2.2.1	Hordentrockner	104
2.2.2	Umlufttrockenschrank	105
2.2.3	Kammertrockner	105
2.2.4	Vakuumtrockenschrank	107
2.3	Bandrockner	110
2.3.1	Allgemeines	110
2.3.2	Der durchströmte Förderbandrockner	110
2.3.3	Welches Produkt eignet sich für den Einsatz von durchströmten Förderbandrocknern?	113
2.3.4	Die Bandrockner-Elemente und ihr Einfluss auf den Trocknungsverlauf und die Produktqualität	114
2.3.4.1	Der Mehrbandrockner	121
2.3.5	Auslegung von Bandtrocknungsprozessen	122
2.3.6	Der atmosphärisch betriebene Kontaktbandrockner	132
2.3.7	Der Vakuumbandrockner	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	142
2.5.4	Vibrierte Wirbelschichttrockner	144
2.5.4.1	Batch-Wirbelschichttrockner	147
2.5.5	Strahlschichttrockner	148
2.5.6	Auslegung von Wirbelschichttrocknern	150

2.6	Förderlufttrockner, Stromtrockner.....	153
2.6.1	Welche Produkte eignen sich für Stromtrockner?	153
2.6.2	Bauarten von Stromtrocknern.....	154
2.6.3	Auslegung von Förderlufttrocknern	161
2.7	Zerstäubungstrockner, Sprühtrockner.....	162
2.7.1	Welche Produkte eignen sich für Zerstäubungstrockner?	162
2.7.2	Elemente des Sprühtrockners	164
2.7.2.1	Zerstäuberorgane.....	164
2.7.2.2	Sprühturmbauarten und zugehörige Luftführung.....	181
2.7.2.3	Gleichstromsprühtrockner	183
2.7.2.4	Sprühtrockner mit Einbauten und gemischter Luftzuführung	188
2.7.3	Vorgänge bei der Sprühtrocknung.....	193
2.7.4	Betreiben der Sprühtrockner	195
2.7.4.1	Produktcharakterisierung und Festlegung der Betriebsparameter	195
2.7.4.2	Auslegung/Überprüfung der Trocknungsleistung	196
2.7.4.3	Einfluss der Tropfengrößenverteilung auf die Restfeuchte	200
2.8	Wirbelschicht-Sprühgranulatoren	204
2.8.1	Allgemeines über den Einsatz von Wirbelschicht-Sprühgranulatoren (WSG).....	204
2.8.2	Prinzip der Wirbelschicht-Sprühgranulation	205
2.8.3	Bauarten von Wirbelschicht-Sprühgranulatoren.....	209
2.8.3.1.1	Diskontinuierliche Granulation.....	210
2.8.3.2	Kontinuierliche Granulation	216
2.8.4	Betreiben von Wirbelschicht-Sprühgranulatoren	229
2.8.4.1	Produkteigenschaften.....	229
2.8.4.2	Auswahl der Verfahrensvariante	230
2.8.4.3	Anwendungen der Wirbelschicht-Sprühgranulation	230
2.8.5	Auslegung von Wirbelschicht-Sprühgranulatoren	230
2.9	Kontaktttrockner.....	238
2.9.1	Allgemeines.....	238
2.9.2	Vakuumkontaktttrockner	240
2.9.2.1	Taumeltrockner, Doppelkonustrockner	242
2.9.2.2	Kontaktttrockner in vertikaler Bauweise	244
2.9.2.3	Kontaktttrockner in horizontaler Bauweise	250
2.9.3	Kontinuierlich arbeitende Kontaktttrockner.....	256
2.9.3.1.1	(Vakuum-) Tellertrockner	256

2.9.3.1.2	Walzentrockner	257
2.9.4	Auslegung von Kontaktrocknern	260
2.10	Gefriertrockner	271
2.10.1	Das Einfrieren	276
2.10.1.1	Der Wärmetransport während des Einfrierprozesses	288
2.10.2	Die Gefriertrocknung	290
2.10.2.1	Der erste Trocknungsabschnitt	292
2.10.2.2	Der zweite Trocknungsabschnitt	300
2.10.3	Messung des Trocknungsverlaufs	302
2.10.3.1	Messgeräte zur Verfolgung des Trocknungsverlaufs	308
2.10.4	Gefrieranlagen, Gefriertrocknerbauarten	313
2.10.4.1	Einteilung	313
2.10.4.2	Gefrieren in Kaltluftstrom	314
2.10.4.3	Kontaktgefrierverfahren	316
2.10.4.4	Cryogene Anlagen	317
2.10.5	Gefriertrocknerbauarten	320
2.10.5.1	Batchprozesse in Trockenkammern	320
2.10.5.2	Batchprozesse in Rührgefriertrocknern	320
2.10.5.3	Kontinuierliche Gefriertrockner	322
2.10.6	Atmosphärische Gefriertrocknung	324
2.11	Strahlungstrockner	325
2.12	Mikrowellentrockner	326
2.12.1	Besondere Vor- und Nachteile	326
2.12.2	Beispiele anhand einer Klassifikation industrieller Mikrowellentrockner	327
2.12.3	Ausführungen von Mikrowellentrocknern	330
2.13	Heißdampftrockner	335
2.14	Kombinationen von Trocknern	337
2.14.1	Schaummattentrockner	337
2.14.2	Mischerrockner	339
2.14.3	Mahlrockner	339
2.14.4	Filterrockner	343
2.14.4.1	Bandfilterrockner	343
2.14.4.2	Nutschrockner	345
2.14.4.3	Zentrifugentrockner	346

2.15	Luft-Konditionierung.....	348
2.15.1	Konditionierung durch Kondensationsanlagen.....	348
2.15.2	Konditionierung durch Absorption in Wäschern mit Li-Cl-Lösung	349
2.15.3	Der Sorptionsregenerator.....	351
2.15.3.1	Der Sorptionsregenerator nach dem Absorptionsprinzip.....	351
2.15.3.2	Der Sorptionsregenerator nach dem Adsorptionsprinzip.....	355
2.16	Sicherheit und Trocknung	356
2.17	Energieverbrauch und Trocknung.....	362
2.18	Kosten der Trocknung	367
2.18.1	Allgemeines.....	367
2.18.2	Apparatekosten	368
2.18.3	Fixkosten	369
2.18.4	Variable Kosten	369
2.18.5	Energiekosten als Funktion des Energieträgers.....	369
2.18.6	Energiekosteneinsparung durch Wärmerückgewinnung.....	371
3	Qualität und Trocknung, Trocknungsverfahren und Produkteigenschaften	373
3.1	Stabilität und Trocknung	373
3.1.1	Mikrobiologische Stabilität von Lebensmitteln	373
3.1.1.1	Mikroorganismen – Wachstum und Abtötung	373
3.1.1.2	Prinzipielle Einsatzgebiete	374
3.1.1.3	Inaktivierungskinetik	375
3.1.1.4	Inaktivierungskinetik 1. Ordnung.....	375
3.1.1.5	Auslegung kontinuierlicher Prozesse mit bekannter Verweilzeitverteilung.....	380
3.1.1.6	Prozessoptimierung unter Berücksichtigung des Zeit- Temperaturverhaltens bei gleichen Effekten	381
3.1.1.7	Weitere Einflussfaktoren auf die Hitze- resistenz von Mikroorganismen.....	382
3.1.1.8	Alternative Modelle zur Beschreibung der Inaktivierungskinetik.....	383
3.1.1.9	Prozessauslegung bei örtlich und zeitlich veränderlichen Temperaturen unter Berück- sichtigung beliebiger Inaktivierungskinetiken	385
3.1.2	Wasseraktivität	387

3.1.3	Einfluss von Zustandsänderungen 1. Ordnung (Sieden, Gefrieren, Schmelzen).....	390
3.1.3.1	Übersicht	390
3.1.3.2	Gefrieren (s. a. Kap. 2.10.2)	390
3.1.3.3	Abschnitte des Gefrierprozesses	393
3.1.3.4	Gefrierzeit	394
3.1.3.5	Gefriergeschwindigkeit.....	395
3.1.3.6	Schmelzen	396
3.1.3.7	Sieden.....	397
3.1.4	Einfluss von Zustandsänderungen 2. Ordnung (Glasübergang, Verbackungen).....	398
3.1.5	Maillard-Reaktion	403
3.1.6	Veränderung ernährungsphysiologischer Werte	404
3.1.6.1	Übersicht	404
3.1.6.2	Protein-Denaturierung.....	404
3.1.6.3	Vitamin-Abbau und Oxidation	405
3.1.7	Aromaretention	405
3.2	Produkt-Design durch Trocknung.....	406
3.2.1	Instanteigenschaften	406
3.2.1.1	Übersicht	406
3.2.1.2	Definition	407
3.2.1.3	Befeuchtung einer Schüttung.....	408
3.2.1.4	Untersinkvermögen	409
3.2.1.5	Dispergierbarkeit und Löslichkeit	409
3.2.2	Produktform	414
3.2.3	Schüttguteigenschaften	416
3.2.3.1	Schüttdichte	416
3.2.4	Coating.....	417
3.2.5	Matrix-Systeme	418
4	Spezielle Verfahren	421
4.1	Löslicher Kaffee und kaffeehaltige lösliche Pulver	421
4.1.1	Löslicher Kaffee	421
4.1.2	Entkoffeinierter Kaffee.....	422
4.1.3	Kaffeehaltige Getränke	423
4.1.4	Kaffee-Ersatz	424
4.1.5	Trocknen von löslichem Kaffee	424
4.1.5.1	Kontinuierliches und semikontinuierliches Gefriertrocknen	424

4.1.5.2	Sprühtrocknen	428
4.1.5.3	Kombinierte Systeme für Sprühtrocknung und Agglomeration	431
4.2	Löslicher Tee und teehaltige Getränke	432
4.2.1	Allgemeines	432
4.2.2	Behandeln der Rohware	433
4.2.3	Herstellen von löslichem Tee (pulverförmiger Tee-Extrakt)	433
4.2.4	Aromaretention bei Tee und teehaltigen Getränken	434
4.2.5	Sprühtrocknen	435
4.2.6	Gefriertrocknen	436
4.2.7	Verpackung und Stabilität	439
4.3	Zucker	439
4.3.1	Allgemeines	439
4.3.2	Trocknen von Kristallzucker	439
4.3.3	Trocknen anderer Zuckersorten	442
4.4	Milch und Milchprodukte	443
4.4.1	Allgemeines	443
4.4.2	Magermilch	447
4.4.3	Vollmilch	450
4.4.4	Molke	451
4.4.5	Laktose	452
4.4.6	Sahne	454
4.4.7	Kasein	454
4.4.8	Kaffeeweißer, Cappuccino Pulver	455
4.4.9	Hydrolysiertes Milchpulver	455
4.4.10	Joghurt	456
4.4.10.1	Übersicht	456
4.4.10.2	Gefriertrocknen von Joghurt	456
4.4.10.3	Sprühtrocknen von Joghurt	457
4.4.10.4	Rekonstitution und Inkubation von Joghurt-Pulver	458
4.4.10.5	Pulverförmige Kindernahrungsmittel	458
4.4.11	Dessert-Pulver	459
4.4.12	Zeitverfestigung (caking)	459
4.5	Gemüse, Kartoffeln und Obst	460
4.5.1	Allgemeines	460
4.5.2	Übersicht Trockenprodukte	461
4.5.3	Mikrobiologische Beschaffenheit von getrocknetem Obst und Gemüse	465

4.5.3.1	Keimzahl vor der Trocknung	465
4.5.3.2	Thermische Resistenz der Mikroorganismen bei der Trocknung ...	466
4.5.3.3	Maßnahmen zum Reduzieren der Anfangskeimzahl bei getrocknetem Obst und Gewürzen	466
4.5.4	Trocknen von Obst und Gemüse	467
4.5.5	Trocknen von Obst- und Gemüsesäften	469
4.5.6	Herstellen von getrockneten Kartoffelerzeugnissen	470
4.5.6.1	Trockenkartoffel	471
4.5.6.2	Kartoffelpüree	473
4.5.6.3	Kartoffelflocken-Verfahren	473
4.5.6.4	Add-back-Verfahren	474
4.6	Fisch, Fleisch und Wurstwaren	476
4.6.1	Allgemeines	476
4.6.2	Die Haltbarkeit von getrocknetem Fisch und Fleisch	476
4.6.3	Einfluss des pH-Wertes auf die Trocknung	478
4.6.4	Gefriertrocknen	479
4.6.5	Vakuumtrocknen	482
4.6.6	Sprühtrocknen	482
4.6.7	Trocknung bei Umgebungsdruck und kontrollierter Luftfeuchte (Klimakammer)	482
4.7	Teigwaren	486
4.7.1	Allgemeines	486
4.7.2	Trocknen von Teigwaren	487
4.8	Instant-Lebensmittel (Eipulver, Tomatenpulver, Hefeextrakt)	489
4.8.1	Tomatenpulver	489
4.8.2	Trocknen von Eipulver und Hefeextrakt	490
4.9	Stärke	491
4.9.1	Allgemeines	491
4.9.2	Gewinnung von Mais- und Kartoffelstärke	492
4.9.3	Pneumatisches Trocknen nativer Stärke	494
4.9.4	Walzentrocknen von Quellstärke	496
4.9.5	Sicherheitsaspekte bei der Stärketrocknung	497
5	Anhang	499
5.1	Analyse eines Bandtrocknerversuchs	499
5.1.1	Ermittlung der Versuchsdaten	499

Inhaltsverzeichnis

5.1.2	Der Batch-Versuch	501
5.1.3	Berechnung der Wärmeübergangszahl nach VDI-Wärmeatlas ..	501
5.1.4	Die normierte Trocknungsverlaufskurve	503
5.1.5	Die Berechnungsgleichungen zur Voraus-berechnung des Trocknungsverlaufs	504
5.2	Analyse eines Wirbelschichttrocknungsprozesses.....	508
5.2.1	Die normierte Trocknungsverlaufskurve	509
5.2.2	Der Zustand und Existenzbereich der Wirbelschicht.....	510
5.2.3	Die Berechnung der Wärmeübergangszahl zwischen Fluidisierungsluft und den Partikeln	512
5.3	Auslegung eines Förderlufttrockners	513
5.3.1	Grobauslegung. Bestimmung der Luftmengen.....	513
5.3.2	Bestimmung der Länge eines Stromtrockners	518
5.3.3	Gebläseleistung.....	520
5.4	Auslegung eines Sprühtrockners.....	528
5.5	Analyse und Auslegung eines Kontaktrockners.....	534
5.5.1	Ermittlung der Daten eines Batchprozesses	534
5.5.2	Ermittlung der normierten Trocknungsverlaufskurve.....	535
6	Tabellen, Grafiken, Stoffwerte	541
6.1	Dampfdruck von Flüssigkeiten	541
6.2	Spezifische Dichte.....	542
6.3	Wärmekapazität	543
6.4	Kinematische Viskosität der Luft.....	544
6.5	Diffusionskoeffizient Wasserdampf in Luft.....	544
6.6	Dampfdrücke über gesättigten Salzlösungen	545
	Literaturverzeichnis	547
	Stichwortverzeichnis.....	567
	Inserentenverzeichnis.....	575