

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 / Kontakt Trocknung	66
1.7.1	Kontakt Trocknung ruhender Schichten	66
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	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	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	Trommelrockner.....	135
2.5	Wirbelschichtrockner.....	136
2.5.1	Allgemeines	136
2.5.2	Welche Produkte eignen sich für Wirbelschichtrockner?	138
2.5.3	Statische Wirbelschichtrockner	143
2.5.4	Vibrierte Wirbelschichtrockner	145
2.5.4.1	Batch Wirbelschichtrockner	148
2.5.5	Strahlschichtrockner.....	149
2.5.6	Auslegung von Wirbelschichtrocknern.....	151

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 Sprühtrockners	166
2.7.2.1	Zerstäuberorgane.....	166
2.7.2.2	Sprühturmbauarten und zugehörige Luftführung.....	184
2.7.2.3	Gleichstromsprühtrockner	186
2.7.2.4	Sprühtrockner mit Einbauten und gemischter Luftzuführung	192
2.7.3	Vorgänge bei der Sprühtrocknung.....	196
2.7.4	Betreiben der Sprühtrockner	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	Kontaktrockner	244
2.9.1	Allgemeines	244
2.9.2	Vakuumkontaktrockner	247
2.9.2.1	Taumeltrockner, Doppelkonustrockner	250
2.9.2.2	Kontaktrockner in vertikaler Bauweise	252
2.9.2.3	Kontaktrockner in horizontaler Bauweise	258
2.9.3	Kontinuierlich arbeitende Kontaktrockner.....	264
2.9.3.1	(Vakuum-) Tellerrockner	264

2.9.3.2	Walzentrockner	265
2.9.4	Auslegung von Kontakt Trocknern	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	Schaummattentrockner	345
2.14.2	Mischertrockner	347
2.14.3	Mahlrockner	347
2.14.4	Filterrockner	351
2.14.4.1	Bandfilterrockner	351
2.14.4.2	Nutschrockner	353
2.14.4.3	Zentrifugentrockner	354

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	Instanteigenschaften.....	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	Entkoffeinierter 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

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 teehaltigen 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	Hydrolisiertes 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	Gebälseleistung	528
5.4	Auslegung eines Sprühtrockners	536
5.5	Analyse und Auslegung eines Kontaktrockners	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