

# Trocknungsprozesse

von

Prof. Dr. sc. techn. Hartmut Roth  
Köthen

Mit 118 Abbildungen und 47 Tabellen



AKADEMIE-VERLAG BERLIN  
1989

# Inhalt

<i>Symbolverzeichnis</i> . . . . .	13
1. Probleme der Einordnung bei und von Trocknungsprozessen . . . . .	21
1.1. Volkswirtschaftliche Einordnung und Bedeutung . . . . .	21
1.2. Thermodynamische Einordnung und Modellbildungsaspekte . . . . .	23
1.2.1. Thermodynamischer Charakter des Trocknungsprozesses . . . . .	23
1.2.2. Thermodynamische Aspekte der Modellbildung . . . . .	25
Gleichgewichts-Modelle . . . . .	25
Kinetik-Modelle . . . . .	27
1.3. Verfahrenstechnische Einordnung und Abgrenzung der Begriffe Trocknung und Trocknungsprozesse . . . . .	27
1.4. Verfahrenstechnische Behandlung der Trocknungsprozesse . . . . .	32
<i>Literatur- und Quellenverzeichnis</i> . . . . .	33

## Wissenschaftliche Grundlagen

2. Thermodynamische Grundlagen der Trocknung . . . . .	35
2.1. GIBBSSches Phasengesetz . . . . .	35
2.2. Zustandfunktionen feuchter Stoffe . . . . .	38
2.2.1. Allgemeine Formulierung der Zustandfunktionen . . . . .	38
2.2.2. Spezielle thermodynamische Zustandfunktionen . . . . .	41
2.2.3. Exergie . . . . .	42
2.3. Gleichgewichte feuchter Stoffe und deren Zustandfunktionen . . . . .	46
2.3.1. Allgemeine Gleichgewichtsbedingungen . . . . .	47
2.3.2. Arten der Feuchtigkeitsbindung und Bindungsenergie der Feuchte . . . . .	47
2.3.2.1. Dämpfe und Gas-Dampf-Gemische . . . . .	48
2.3.2.2. Qualitative Kategorien der Feuchtebindung in Feststoffen . . . . .	50
2.3.2.3. Bindungsenthalpie der Feuchte in Feststoffen . . . . .	53
2.3.2.4. Feuchtigkeitsbindung und Bindungsenergie in kapillarporösen festen feuchten Mischphasen . . . . .	66
2.3.2.5. Konzentrationsexergie und minimale Trennarbeit für Feuchtestoffe . . . . .	71
2.3.3. Experimentelle Möglichkeiten zur Messung von Gleichgewichtsdaten . . . . .	77
2.4. Thermodynamische Bilanzen . . . . .	85
2.4.1. Thermodynamisches System . . . . .	86

2.4.2.	Allgemeine Bilanzgleichung . . . . .	87
2.4.3.	Spezielle Bilanzgleichungen der Anlage . . . . .	90
2.4.3.1.	Massen- und Massenstrom-Bilanzen . . . . .	90
2.4.3.2.	Exergie- und Energiestrom-Bilanzen . . . . .	96
2.4.3.3.	Entropie- und Entropiestrom-Bilanzen . . . . .	100
2.4.3.4.	Exergie- und Exergiestrom-Bilanzen . . . . .	103
2.4.4.	Methodik der Bilanz-Korrektur . . . . .	109
	<i>Literatur- und Quellenverzeichnis</i> . . . . .	110
3.	Grundlagen der Trocknungskinetik . . . . .	114
3.1.	Die Einzelphänomene des Energie- und Stofftransports . . . . .	115
3.1.1.	Energietransport . . . . .	116
3.1.1.1.	Wärmeleitung . . . . .	116
3.1.1.2.	Wärmeübertragung durch Konvektion . . . . .	123
3.1.1.3.	Wärmeübertragung durch Strahlung . . . . .	134
3.1.2.	Stofftransport . . . . .	136
3.1.2.1.	Dampftransport . . . . .	136
3.1.2.2.	Flüssigkeitstransport . . . . .	144
3.2.	Experimentelle Methoden zur Ermittlung von Transportkoeffizienten und kinetischen Eigenschaften . . . . .	149
3.2.1.	Experimentelle Bestimmung des Wärmeleitkoeffizienten . . . . .	149
3.2.2.	Experimentelle Methoden zur Bestimmung des Diffusionswiderstands- faktors $\mu$ und des Feuchteleitkoeffizienten $k_F$ . . . . .	156
3.2.3.	Experimentelle Methoden zur Ermittlung von Trocknungsverlaufskurven . . . . .	160
3.2.4.	Ermittlung der thermischen Stabilität . . . . .	171
3.2.5.	Feuchtemeßverfahren . . . . .	172
3.3.	Modellierung der Stoff- und Energietransportprozesse bei der Trocknung . . . . .	182
3.3.1.	Bilanzgleichungen für die Stromdichten im Gut . . . . .	182
3.3.2.	Trocknung im 1. Trocknungsabschnitt mit konstanter Geschwindigkeit . . . . .	187
3.3.2.1.	Grundsätzliches Berechnungsmodell . . . . .	187
3.3.2.2.	Trocknung von Gütern, die mit Einstoff-Feuchten beladen sind . . . . .	189
3.3.2.3.	Bestimmung von Feuchteprofilen bei der Trocknung im 1. Trocknungs- abschnitt . . . . .	197
3.3.3.	Trocknung im Bereich fallender Trocknungsgeschwindigkeit . . . . .	202
3.3.4.	Analyse von Trocknungsverlaufskurven . . . . .	210
	<i>Literatur- und Quellenverzeichnis</i> . . . . .	214
4.	Gestalt- und Größeneinflüsse der Güter auf den Trocknungsprozeß . . . . .	220
4.1.	Formhaltige Güter definierter Gestalt . . . . .	221
4.2.	Relativ formhaltige Güter zufällig verteilter Form und Größe . . . . .	224
4.3.	Zufällig verteilte disperse Güter . . . . .	226
4.3.1.	Beispiele für zufällig verteilte disperse Güter . . . . .	226

4.3.2.	Grundbegriffe und Methoden zur Darstellung von Verteilungen . . . . .	226
4.3.3.	Experimentelle Methoden zur Ermittlung von Verteilungen . . . . .	245
	<i>Literatur- und Quellenverzeichnis</i> . . . . .	248
5.	Bewertung von Trocknungsverfahren und -anlagen . . . . .	249
5.1.	Bewertungsaspekte und deren Systematisierung . . . . .	249
5.2.	Thermodynamische Bewertung . . . . .	251
5.2.1.	Bilanzübereinkunft . . . . .	251
5.2.2.	Konventionelle thermodynamische Bewertungsgrößen . . . . .	252
5.2.3.	Exergetische Bewertung mit abgeleiteten Grenzwerten . . . . .	256
5.2.3.1.	Minimale Trennarbeit als thermodynamischer Nutzen der Trocknung und Gesamtwirkungsgrad . . . . .	257
5.2.3.2.	Verfahrensaufwand und Verfahrenswirkungsgrad . . . . .	260
5.2.3.3.	Anlagenaufwand und Anlagenwirkungsgrad . . . . .	261
5.2.4.	Probleme und Beispiele der thermodynamischen Bewertung . . . . .	262
5.2.4.1.	Bewertungsprobleme eines dampfbeheizten Gleichstrom-Zerstäubungs- Trockners . . . . .	262
5.2.4.2.	Bewertungsprobleme von Vakuum-Gefrier-Trockneranlagen . . . . .	269
5.3.	Ökonomische Bewertung . . . . .	278
5.3.1.	Ökonomische Bilanzmodelle als Bewertungsgrundlage . . . . .	279
5.3.2.	Ökonomische Bewertungsgrößen und Optimaldimensionierungen . . . . .	281
5.3.3.	Beispiel eines thermoökonomischen Variantenvergleichs und der thermo- ökonomischen Optimierung . . . . .	284
5.4.	Bewertung imponderabler Aspekte . . . . .	292
	<i>Literatur- und Quellenverzeichnis</i> . . . . .	292
6.	Systematik der Trocknungsverfahren und Trockner . . . . .	295
6.1.	Zum Stand der Systematisierung von Trocknern . . . . .	295
6.2.	Vorschlag zur Systematisierung von Trocknungsverfahren und Trocknern	
6.3.	Aspekte der Auswahl von Trocknungsverfahren . . . . .	306
	<i>Literatur- und Quellenverzeichnis</i> . . . . .	309

## Anwendungen auf Technische Trockner

7.	Vakuum-Schaufel-Trockner . . . . .	311
7.1.	Technologisches Prinzipschema . . . . .	311
7.2.	Transportmechanismus von Wärme- und Stoffströmen bei der Vakuum- Kontakt-Trocknung . . . . .	313
7.3.	Thermodynamische Bewertung . . . . .	313
7.3.1.	Ermittlung der Produkt- und Prozeß-Parameter . . . . .	313
7.3.2.	Thermodynamische Bewertung der Prozeßführung . . . . .	318
7.3.3.	Möglichkeiten zur Minimierung der thermodynamischen Verluste . . . . .	323
	<i>Literatur- und Quellenverzeichnis</i> . . . . .	324

8.	Gleichstrom-Sprüh- oder Zerstäubungstrocknung . . . . .	325
8.1.	Technologisches Prinzipschema . . . . .	326
8.2.	Sprühverteilungen . . . . .	327
8.2.1.	Einrichtungen zur Erzeugung von Sprühverteilungen . . . . .	327
8.2.2.	Ermittlung und Beschreibung von Sprühverteilungen . . . . .	330
8.2.3.	Beeinflussung von Sprühverteilungen . . . . .	330
8.3.	Trocknung von Tropfen und Sprühverteilungen . . . . .	338
8.3.1.	Problemstellung und allgemeiner Lösungsansatz . . . . .	338
8.3.2.	Trocknung monodispers verteilter Sprühpartikel . . . . .	345
8.3.3.	Grundlagen der verfahrenstechnischen Auslegung und Dimensionierung von Sprühtrocknern mit realen Sprühpartikelverteilungen . . . . .	347
8.4.	Thermodynamische Bewertung . . . . .	353
	<i>Literatur- und Quellenverzeichnis</i> . . . . .	361
Register	. . . . .	362