

# 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. Zustandsfunktionen feuchter Stoffe . . . . .	38
2.2.1. Allgemeine Formulierung der Zustandsfunktionen . . . . .	38
2.2.2. Spezielle thermodynamische Zustandsfunktionen . . . . .	41
2.2.3. Exergie . . . . .	42
2.3. Gleichgewichte feuchter Stoffe und deren Zustandsfunktionen . . . . .	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 Feuchtstoffe . . . . .	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 Energiestrom-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 Diffusionswiderstandsfaktors $\mu$ 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. Trocknungsabschnitt . . . . .	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 thermoökonomischen 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