



Albert Heindl

Praxisbuch Bandtrocknung

Grundlagen · Anwendung · Berechnung



Praxisbuch Bandtrocknung

Albert Heindl

Praxisbuch Bandtrocknung

Grundlagen, Anwendung, Berechnung

Albert Heindl
Deining
Deutschland

ISBN 978-3-642-53904-6 ISBN 978-3-642-53905-3 (eBook)
DOI 10.1007/978-3-642-53905-3

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Springer Vieweg

© Springer Berlin Heidelberg 2016

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften. Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen.

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier

Springer Berlin Heidelberg ist Teil der Fachverlagsgruppe Springer Science+Business Media (www.springer.com)

*Meiner Frau Iryna Heindl, geb. Pawlowa, in
herzlicher Dankbarkeit für Ihr Verständnis und
Ihre Geduld gewidmet.*

*In Gedenken an meinen verstorbenen Vater
Albert Johann Heindl, der mich schon in jungen
Jahren mit der Trocknungstechnik vertraut machte
und mir auf den Weg mitgab, dass „Trocknung
Turbulenz braucht“.*

*Allen Firmen, die dieses Werk durch Beistellung
von Unterlagen und Bildern unterstützt haben,
möchte ich meinen herzlichen Dank aussprechen.
Insbesondere danke ich meinem Arbeitgeber,
der HUBER SE, für die Genehmigung dieser
Arbeit und die Überlassung umfangreicher
Informationen und Bilder zur Bandtrocknung
von Klärschlamm.*

Vorwort

Dieses Buch soll dem in der Praxis stehenden Techniker, Ingenieur oder Betriebsleiter einen Überblick über die Grundlagen und Anwendungen der Bandtrocknung geben. Studenten der Agrar- und Lebensmitteltechnik, der Fördertechnik sowie der thermischen Verfahrenstechnik mögen interessante Informationen zur praxisorientierten Anwendung des Lehrstoffes und Hinweise zur Lösung von trocknungstechnischen Aufgaben finden. Forschern an Hochschulinstituten kann das Buch Anregungen für zukünftige Forschungsarbeiten geben. Auf einen theoretischen Unterbau wird Wert gelegt, da die Theorie bei der Lösung von Aufgaben und Problemen in der Praxis sehr hilfreich sein kann.

Der Leser erhält Hinweise über die verfahrenstechnische und konstruktive Auslegung von Bandtrocknern in Theorie und Praxis. Es werden Probleme im praktischen Betrieb und deren Lösung aufgezeigt. Neben neuerer und älterer Literatur sowie Patentschriften werden auch eigene praktische Erfahrungen für dieses Buch herangezogen. Für Berechnungen stehen Stoffwerte von industriellen Trocknungsgütern und von Trocknungsgasen in größerem Umfang im Anhang zur Verfügung. Der Leser ist dadurch nicht mehr gezwungen, Stoffdaten in verschiedenen Werken nachzuschlagen, sondern kann in vielen Fällen eine erste grobe Berechnung seines trocknungstechnischen Problems mit Hilfe dieses Buches durchführen. Vielfach sind auch Zahlenwertgleichungen für Rechnerprogrammierungen angegeben. Die computerunterstützte Berechnung wird ebenso wie die Simulation der Strömung in Bandtrocknern behandelt.

Die grundlegende Berechnungen und Gestaltungshinweise sind auch auf andere Trocknungsanlagen anwendbar. Besonderer Wert wird auf die anschauliche Darstellung des Einsatzes von Bandtrocknern in den verschiedenen Industriebereichen gelegt und es werden die Möglichkeiten der Energieeinsparung sowie Biomasse- und Abwärmenutzung hervorgehoben. Auch werden wichtige Gesichtspunkte wie Arbeitssicherheit und Umweltschutz angesprochen. Abgerundet wird die Darstellung durch Praxisbeispiele von ausgeführten Anlagen in verschiedenen Industriebereichen wie Lebensmittelindustrie, Holzverarbeitungsindustrie, Entsorgungsindustrie, Landwirtschaft und in der chemischen sowie pharmazeutischen Industrie.

Über zwei Jahrzehnte hat der Verfasser Datenmaterial gesammelt und wurde dabei auch von Praktikern, Instituten und Industriefirmen in dankenswerter Weise unterstützt.

Das Werk wurde nach bestem Wissen und Kenntnissen zusammengestellt. Weder der Verfasser, noch der Verlag können jedoch eine Haftung für Schäden oder Folgeschäden, die aus der Anwendung von Informationen aus diesem Buch entstehen könnten, übernehmen. Die Erwähnung einzelner Firmen in diesem Buch stellt keine Wertung durch den Verfasser dar, es mögen auch von anderen Firmen Trocknungsanlagen und Ausrüstungen in vergleichbarer Qualität hergestellt werden.

Der Leser wird gebeten, die patentrechtliche Situation von konstruktiven und verfahrenstechnischen Einzelheiten vor einer wirtschaftlichen Nutzung abzuklären.

Der Verfasser ist jedem Leser für Hinweise zur Verbesserung und Ergänzung des Buches dankbar und bittet um Kontakt unter albert.heindl@gmx.net.

Deining, Juli 2015

Albert Heindl

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Einleitung	1
1.2	Anwendungsbereiche der Bandtrocknung	2
1.3	Einteilung der Bandtrockner	5
1.4	Zusammenfassung	15
	Literatur	16
2	Grundlagen der Trocknung	17
2.1	Massenbilanz bei kontinuierlichen Bandtrocknern	17
2.2	Grundlagen der Konvektionstrocknung	21
2.2.1	Trocknungsverlauf und -abschnitte der Konvektionstrocknung	24
2.2.2	Wärme- und Stoffübergang	27
2.2.3	Darstellung im Mollier-Diagramm für feuchte Luft	35
2.2.4	Einfluss von Trocknungsparametern und Guteigenschaften auf die Trocknungsgeschwindigkeit	58
2.2.5	Arten der Luftführung	59
2.2.6	Allgemeine Gleichung zur Ermittlung der Trocknungszeit für die Warmlufttrocknung nach Fabricius	85
2.2.7	Einflussfaktoren auf die Gleichmäßigkeit der Warmlufttrocknung	87
2.2.8	Widerstand von Produktschüttungen bei der Durchströmungstrocknung	92
2.3	Grundlagen der Kontakttrocknung unter Atmosphärendruck	97
2.4	Grundlagen der Trocknung unter Vakuum	101
2.4.1	Vakuumkontakttrocknung	101
2.4.2	Vakuumkonvektionstrocknung	107
2.5	Grundlagen der Strahlungstrocknung	107
2.5.1	Grundlagen der Hochfrequenz- und Mikrowellenerwärmung	110
2.5.2	Infrarottrocknung	120

2.6	Grundlagen der Heißdampftrocknung	123
2.6.1	Druckbereiche	124
2.6.2	Temperaturverlauf	125
2.6.3	Darstellung von Heißdampftrocknungsprozessen im Vits-Diagramm	128
2.6.4	Praktische Daten der Heißdampftrocknung und Anwendungsbeispiel	129
2.6.5	Vor- und Nachteile der Heißdampftrocknung	131
2.7	Energiebilanz am Beispiel eines Warmluft-Bandrockners	133
2.8	Strömungstechnische Gestaltung von Warmluftbandrocknern	149
2.8.1	Anordnung von Heizregistern und Ventilatoren	149
2.8.2	Einbauverluste	149
2.8.3	Verteil- und Glättungsgitter zur Strömungsverbesserung	154
2.8.4	Strömungswiderstandsberechnungen an einem Siebenbandrockner	156
2.9	CFD – Computational Fluid Dynamics (Ansys 2007)	162
2.9.1	Fünfbandrockner für Gewürzkräuter	163
2.9.2	Vierbandrockner für Klärschlamm	165
2.10	Mathematische Modellierung der Warmluftbandrocknung	168
2.10.1	Mehrstufiger Einbandrockner mit sektionaler Kreuz-Umluftführung	169
2.10.2	Einbandrockner mit stufenförmiger Kreuz-Gegenstrom-Luftführung	173
2.11	Zusammenfassung	178
	Literatur	179
3	Praxis der Bandrocknung	185
3.1	Bänder von Bandrocknern	185
3.1.1	Bandarten	186
3.2	Aufbau von Bandrocknungsanlagen für Warmlufttrocknung	208
3.2.1	Produktaufgabevorrichtungen	208
3.2.2	Warmlufterzeuger	221
3.2.3	Ventilatoren für Bandrockner	248
3.3	Aufbau von Bandrocknungsanlagen für Vakuumkontakttrocknung	255
3.4	Aufbau von Bandrocknungsanlagen für Mikrowellen- und Hochfrequenzrocknung	257
3.4.1	Bandrockner mit Hochfrequenzgeneratoren und Komponenten zur HF-Einspeisung sowie Abschirmung	257
3.4.2	Bandrockner mit Mikrowellengeneratoren und Komponenten zur Mikrowellen-Einspeisung sowie Abschirmung	262
3.4.3	Aufbau und Berechnung eines Mikrowellenvakuumbandrockners inklusive Vakuumsystem	281

3.5	Förderung und Lagerung von Trockengut	288
3.6	Messtechnik an Bandtrocknungsanlagen	290
3.6.1	Gas-Temperaturmessung	291
3.6.2	Oberflächentemperaturmessung am Trocknungsgut mittels Pyrometer	294
3.6.3	Gasgeschwindigkeits- und Volumenstrommessung	295
3.6.4	Gasfeuchtemessung	297
3.6.5	Materialfeuchtemessung	297
3.6.6	Druckmessung	301
3.6.7	Messsensoreinbau bei Mikrowellentrocknern	303
3.7	Praxisorientierte Themen der Bandtrocknung	304
3.7.1	Möglichkeiten der Einsparung an thermischer Energie bei Warmluftbandtrocknern	304
3.7.2	Luftentfeuchtung für temperaturempfindliche Produkte	328
3.7.3	Reinigung von Bandtrocknern	331
3.8	Möglichkeiten der Automatisierung	334
3.8.1	Störgrößen des Trocknungsprozesses	335
3.8.2	Regelung über Produktfeuchtemessung	336
3.8.3	Regelung über Abluftfeuchtemessung	339
3.9	An- und Abfahren von Bandtrocknern	340
3.10	Möglichkeiten der Durchsatzsteigerung bei Warmluft-Bandtrocknern	342
3.11	Versuchsanlagen zur Simulation der industriellen Bandtrocknung	346
	Literatur	350
4	Industrielle Bandtrockner in verschiedenen Industriebereichen und ihre Integration in komplette Trocknungslinien	357
4.1	Historische Entwicklung von industriellen Ein- und Mehrbandtrocknern	357
4.2	Bandtrockner in der Lebensmittelindustrie	360
4.2.1	Bandtrockner für Gemüse, Kartoffeln, Zwiebeln und sowie Arznei- und Gewürzpflanzen	360
4.2.2	Bandtrockner für Pasta-Kurzwaren	381
4.2.3	Bandtrockner für Gelatine	383
4.3	Bandtrockner in der chemischen und pharmazeutischen Industrie	385
4.3.1	Mikrowellen-Vakuumbandtrockner für pankreatisches Enzymgemisch	385
4.3.2	Mikrowellenvakuumtrockner für Pflanzenextrakte	388
4.3.3	Atmosphärischer Kontakteinbandtrockner für Lackschlämme	389
4.3.4	Vakuumbandkontaktbandtrockner für Arzneipflanzenextrakte	391
4.4	Bandtrockner in der Holzindustrie	393
4.4.1	Ein- und Mehrbandtrockner für Holzfuhrnere	394
4.4.2	Mehrbandtrockner für Sägespäne	396

4.4.3	Einbandtrockner für Sägespäne	399
4.5	Bandtrockner für Klärschlamm	410
4.5.1	Mehrbandtrockner	410
4.5.2	Bandtrockner mit Trockengutrückführung	415
4.5.3	Einbandtrockner in Verbund mit der Zementherstellung	417
4.6	Bandtrockner in der Landwirtschaft	420
4.6.1	Hopfenbandtrockner	420
4.6.2	Grasbandtrockner	429
4.7	Bandtrockner zur Biogasabwärmenutzung	433
4.7.1	Bandtrockner zur Gärresttrocknung	433
4.8	Bandtrockner in der Zuckerindustrie	437
4.8.1	Heißdampfbandtrockner für Zuckerrübenpressschnitzel	437
4.9	Bandtrockner in der Verpackungs- und Grundstoffindustrie	440
4.9.1	Schleifenbandtrockner für Pappen, Kartonagen und Lederfasern	440
4.9.2	Bandtrockner für Bauplatten	441
4.10	Bandtrockner in der Textilindustrie	443
4.10.1	Hochfrequenz-Bandtrockner für Garnspulen	443
4.11	Bandtrockner in der Tierfutterindustrie	446
4.12	Zusammenfassung	447
	Literatur	448
5	Kombinierte Trocknungsverfahren unter Einbindung der Bandtrocknung	453
5.1	Rillenwalzentrocknung von Pasten und Kaolin	453
5.1.1	Pasten	453
5.1.2	Kaolin	456
5.2	Sprühbandtrocknung von Arzneimittelextrakten	457
5.3	Gras- und Zuckerrübenschnitzeltrocknung	459
5.3.1	Grastrocknung als Kombination von Band- und Trommeltrockner	459
5.3.2	Trocknung von Zuckerrübenpressschnitzeln als Kombination von Band- und Trommeltrockner	463
5.4	Zusammenfassung	471
	Literatur	471
6	Wirtschaftliche Abwärme- und Solarenergienutzung in der Bandtrocknung	473
6.1	Abwärmenutzung	473
6.2	Nutzung von Solarenergie	486
6.3	Zusammenfassung	490
	Literatur	490

7 Wirtschaftlichkeit in der Herstellung und im Einsatz	
von Bandtrocknern	493
7.1 Modulbauweise für wirtschaftliche Herstellung von Bandtrocknern	493
7.2 Durchsatz, Investitionskosten und jährliche Betriebszeit	495
7.3 Wirtschaftlichkeitsberechnungen	496
7.3.1 Allgemeine Berechnungen	496
7.3.2 Wirtschaftlichkeitsberechnung einer Bandtrocknungsanlage in einer Produktionslinie für Holzpellets	497
7.3.3 Wirtschaftlichkeitsberechnung einer Wärmerückgewinnungsanlage für einen Bandtrockner zur Trocknung von Gewürzpflanzen	501
7.3.4 Berechnung der spezifischen Kosten einer Klärschlammbandtrocknung	504
7.4 Energetisch-wirtschaftlicher Vergleich von Vakuumbandtrocknern mit anderen Trocknungsverfahren im Bereich der Lebensmittelindustrie	507
7.5 Zusammenfassung	508
Literatur	509
8 Sicherheit bei Bandtrocknungsanlagen	511
8.1 Brand- und Explosionsschutz (ATEX)	511
8.1.1 Feuchtgutlagerung vor der Trocknung	512
8.1.2 Brand- und Explosionsgefahr bei der Bandtrocknung	515
8.1.3 Trockengutförderung und -lagerung	527
8.1.4 Brand- und Explosionsschutz für Anlagen zur Herstellung von Holzpellets	533
8.1.5 HAZOP	534
8.2 Berühr- und Temperaturschutz sowie Unterdruckbetrieb	535
8.2.1 Berühr- und Temperaturschutz	535
8.2.2 Unterdruckbetrieb	536
8.3 Sicherheit und Strahlungsschutz bei Mikrowellen- und Hochfrequenztrocknern	536
8.4 Zusammenfassung	537
Literatur	538
9 Rechtliche Grundlagen für das Betreiben einer Bandtrocknungsanlage – Arbeitsschutz und Emissionen	539
9.1 Betriebssicherheitsverordnung	539
9.1.1 ATEX 137	539
9.1.2 Lärmemission von Bandtrocknungsanlagen (Aufstellung in der Halle und im Freien)	548

9.2	Bundesimmissionschutzverordnung BImSchV	550
9.3	Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft TA Luft	551
9.3.1	Schadstoffe in der Abluft von Trocknern	551
9.3.2	Abscheidung von Staub	553
9.3.3	Abscheidung von gasförmigen Schad- und Geruchsstoffen	558
9.4	Zusammenfassung	566
	Literatur	567
10	Abnahme von Bandtrocknern	569
10.1	Grundlagen und Voraussetzungen für einen Abnahmeversuch	569
10.2	Bestimmung des Anfangs- und Endfeuchtegehaltes	571
	Literatur	572
11	Trocknung und Qualität	573
11.1	Gemüsetrocknung	578
11.2	Trocknung von Pasta-Kurzwaren	585
11.3	Holzfuernertrocknung	586
11.4	Trocknung von Gips- und Zementfaserplatten	589
11.5	Trocknung von Wickelpappen	590
11.6	Qualitätseinfluss von Aufbereitungsverfahren in der Lebensmittelindustrie	591
11.6.1	Obst und Gemüse	591
11.6.2	Arznei- und Gewürzpflanzen	594
11.7	Schnellkochende Hülsenfrüchte	599
11.8	Zusammenfassung	600
	Literatur	601
12	Forschungs- und Entwicklungsfelder der Zukunft	603
12.1	Minimierung des Energieverbrauchs der energieintensiven Bandtrocknung	603
12.2	Vereinfachung des Bandtrocknerbetriebes	604
12.3	Erhöhung der Sicherheit des Bandtrocknerbetriebes	605
12.4	Verbesserung des Umweltschutzes	605
12.5	Verbesserung der Produktqualität	606
	Anhang	607
	Formelzeichen	683
	Sachwortverzeichnis	687

1.1 Einleitung

Durch den Trocknungsvorgang – d. h. durch den thermischen Entzug von Wasser oder anderen Flüssigkeiten – werden Trocknungsgüter erst haltbar, mischbar, mahlbar oder auf andere Weise weiter verarbeitbar gemacht. Vielfach ist die Trocknung auch Voraussetzung für den Einsatz von Materialien als Brennstoff oder Dünger. Die Trocknung stellt deshalb einen wichtigen Verfahrensschritt in der industriellen Verarbeitung von Produkten dar. Bandtrockner zählen zu den kontinuierlichen Trocknungsanlagen und haben aufgrund ihres hohen Automatisierungsgrades, der produkt schonenden Trocknung und des kleinen Personalbedarfs einen hohen Verbreitungsgrad in allen Bereichen der Industrie und in der Landwirtschaft gefunden. Das Trocknungsgut wird auf einem oder mehreren Bändern durch den Trocknungsraum gefördert und unterliegt keiner oder nur kleiner mechanischer Belastung durch Wende- oder Bandübergabevorgänge. Dabei kann Energie in Form von Konvektion (z. B. über Warmluft), Kontakt (z. B. über Heizplatten) oder Strahlung (z. B. über elektromagnetische Wellen) dem Trocknungsgut zugeführt, das Wasser oder die Feuchtigkeit verdunstet oder verdampft und der (Wasser-) Dampf über ein Trägermedium wie z. B. der warmen Luft abgeführt werden.

Auf den ersten Blick mag es sich bei einem Bandtrockner um einen einfachen Apparat der thermischen Verfahrenstechnik handeln. Einen Bandtrockner richtig auszulegen, zu konstruieren und zu betreiben zwingt aber zu Lösungen in einer Vielzahl von Aufgabenbereichen wie Stahlbau, Korrosionsschutz, Fördertechnik, Thermodynamik, mechanischer Verfahrenstechnik, z. T. Vakuumtechnik und Hochfrequenztechnik, Strömungstechnik, Umwelttechnik, Lagertechnik für das Feuchtgut und das Trockengut und zuletzt in der produktspezifischen, qualitätsorientierten Verfahrenstechnik.

1.2 Anwendungsbereiche der Bandtrocknung

Die Bandtrocknung findet weite Verbreitung in der Trocknung unterschiedlichster Güter. Die Durchsätze an zugeführtem Trockengut reichen dabei von 40 kg/h bei Kleinstbandtrocknern für Grassamen bis 40.000 kg/h bei den größten Industrieanlagen für Sägespäne. Bei der Warmluftbandtrocknung liegt die Korngröße des Trocknungsgutes allgemein zwischen 3 und 30 mm. In Ausnahmefällen können bei Verwendung von sehr fein gewebten Kunststoffgurten auch Partikel unter 1 mm getrocknet werden. Beispielhaft ist hier die Nachtrocknung von gemahlenem schwarzen Tee, welche sich an die Koffein-Extraktion anschließt, zu nennen. Abbildung 1.1 zeigt das Korngrößenspektrum verschiedener Warmlufttrockner in Abhängigkeit von der Trocknungszeit (Sattler 1988). Aufgetragen ist die Trocknungszeit t in Sekunden oder Minuten über der Partikelgröße d_p in mm.

Deutlich ist zu erkennen, dass sich die Anwendungsbereiche von Band-, Trommel- und Wirbelschichttrockner hinsichtlich der Korngröße überlappen. So stehen für die erwähnte Nachtrocknung von entkoffeiniertem Teegranulat auch Wirbelschichttrockner im Einsatz. Abbildung 1.1 weist darauf hin, dass Bandtrockner zu den sogenannten Langzeittrocknern zählen, wobei in der Praxis die Trocknungszeiten von rund 10 min beispielsweise bei der Hochtemperaturtrocknung von pelletierten Metalloxiden bis rund 10 h bei der Niedertemperaturtrocknung von Arzneipflanzen variieren können. Stromtrockner arbeiten dagegen mit sehr kurzen Trocknungszeiten von 5 bis 10 s.

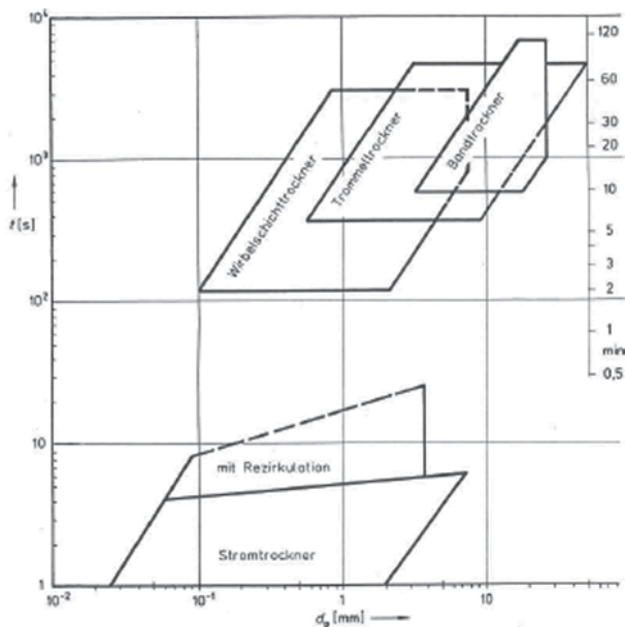


Abb. 1.1 Trocknungszeit- und Kornspektrumsbereiche verschiedener Warmlufttrockner. (Sattler 1988)