

2.1 Massenbilanz bei kontinuierlichen Bandtrocknern

Jeder Trocknungsvorgang kann durch Massen- und Energiebilanzen beschrieben werden. Wendet man sich zunächst der Massenbilanz – welche grundsätzlich für alle kontinuierlichen Bandtrockner gilt – zu, so ergeben sich folgende Grundgleichungen für die Massendurchsätze \dot{M} jeweils in kg/s oder kg/h:

$$\dot{M}_1 = \dot{M}_D + \dot{M}_2 \quad (2.1)$$

$$\dot{M}_S = (1 - W_1) * \dot{M}_1 = (1 - W_2) * \dot{M}_2 = X_1 * \dot{M}_1 = X_2 * \dot{M}_2 \quad (2.2)$$

wobei die Indices 1 und 2 den Trocknereingang und -ausgang kennzeichnen und der Index D die während des Trocknungsvorganges in Form von Dampf abgehende Feuchtemenge und FS den absolut trockenen Feststoff angibt. W kennzeichnet den Feuchtegehalt bezogen auf die Gesamtmasse, X heißt Feuchtegrad und gibt den Feuchtegehalt bezogen auf die absolut trockene Masse an. Die Massenströme lassen sich jeweils ineinander umrechnen (Kröll 1959):

$$\dot{M}_D = \dot{M}_{FS} * (X_1 - X_2) = \dot{M}_1 * \frac{W_1 - W_2}{1 - W_2} = \dot{M}_2 * \frac{W_1 - W_2}{1 - W_1} \quad (2.3)$$

$$\dot{M}_1 = \dot{M}_{FS} * (1 + X_1) = \dot{M}_2 * \left(\frac{1 - W_2}{1 - W_1} \right) \quad (2.4)$$

$$\dot{M}_2 = \dot{M}_{FS} * (1 + X_2) = \dot{M}_1 * \left(\frac{1 - W_1}{1 - W_2} \right) \quad (2.5)$$

Ineinander rechnet man den Feuchtegehalt W in den Feuchtegrad X und umgekehrt gemäß nachfolgenden Formeln um:

$$W = \frac{X}{1+X} \quad (2.6)$$

$$X = \frac{W}{1-W} \quad (2.7)$$

Berechnungsbeispiel 2.1 Anhand der Praxis der Graströcknung soll der Einfluss des Anfangsfeuchtegehaltes auf die zu verdunstende Wassermenge verdeutlicht werden. Junges, taufeuchtes Gras hat einen Feuchtegehalt von $W_1=90\%$ ($X_1=9,0$ kg/kg), reifes Gras besitzt einen Feuchtegehalt von $W_1=80\%$ ($X_1=4,0$ kg/kg) und an einem sonnigen Tag auf dem Feld geschnittenes und anschließend angewelktes Gras einen Feuchtegehalt von $W_1=70\%$ ($X_1=2,33$ kg/kg). In der Darstellung bezogen auf die unveränderliche Trockensubstanz wird der deutlich geringere Wassergehalt des gewelkten Grases sichtbar. Rechnet man für einen Aufgabemassenstrom von $\dot{M}_1=1000$ kg/h für die unterschiedlichen Anfangsfeuchtegehalte die zu verdunstende Wassermenge \dot{M}_D aus, um einen Endfeuchtegehalt von $W_2=10\%$ ($X_2=0,11$ kg/kg) ein zu stellen, so ergeben sich große Unterschiede:

Junges, taufeuchtes Gras:	$\dot{M}_D=888,9$ kg/h,
Reifes Gras:	$\dot{M}_D=777,8$ kg/h,
Reifes, vorgewelktes Gras:	$\dot{M}_D=666,7$ kg/h.

Dies hat zur Folge, dass ein Bandtrockner, der für eine bestimmte Verdunstungsleistung bei reifem Gras ausgelegt wird, als Trocknungsgutaufgabemenge \dot{M}_1 im Fall des taufeuchten Grases nur rund 875 kg/h und im Fall des vorgewelkten Grases deutlich mehr, nämlich rund 1.166 kg/h trocknen kann.

Für die trocknungstechnische Praxis ist das Eintrocknungsverhältnis ETV wichtig, welches angibt, wieviel kg feuchte Ware pro kg getrocknete Ware bei bestimmtem Anfangsfeuchtegehalt W_1 und Endfeuchtegehalte W_2 eingesetzt werden muss. Das ETV berechnet sich zu:

$$ETV = \frac{1-W_2}{1-W_1} \quad (2.8)$$

Berechnungsbeispiel 2.2 Für junges taufeuchtes Gras mit $W_1=90\%$ beträgt das ETV 9,00, für vorgewelktes, reifes Gras mit $W_1=70\%$ erhält man ein Eintrocknungsverhältnis von 3,00. Im ersten Fall müssen also 9 kg Frischgut, im zweiten Fall nur 3 kg Frischgut im Bandtrockner getrocknet werden, um 1 kg getrocknetes Gras mit $W_2=10\%$ zu erhalten.

Tabelle 2.1 führt übliche Anfangs- und Endfeuchtegehalte unterschiedlichster Trocknungsgüter auf. Im Fall von Lebensmitteln ist noch zu berücksichtigen, dass sich das *ETV*, d. h. die notwendige Masse in kg an Feuchtgut um 1 kg Trockengut zu erhalten, durch Wasch-, Schäl-, Blanchier-, Schneide- oder Putzverluste erhöht. Diese Verluste können 5 bis 30% des Rohwareneinsatzes vor den Aufbereitungsprozessen betragen. Das *ETV* erhöht sich dadurch um rund 5 bis 42%.

Tabelle 2.1 demonstriert die weiten Bereiche von Anfangs- und Endfeuchtegehalten von Trocknungsgütern, die auf Bandtrocknern getrocknet werden. Außerdem wird durch das Eintrocknungsverhältnis *ETV* verdeutlicht, dass ein hoher Anfangsfeuchtegehalt zu einem sehr großen Rohwareneinsatz führt, um 1 kg an getrockneter Ware zu produzieren.

Der notwendige Endfeuchtegehalt wird beispielhaft für Lebensmittel bestimmt durch die Forderung nach Haltbarkeit, die eine Herabsetzung des Feuchtegehaltes unterhalb mikrobiologischer Aktivität voraussetzt. Andere Trocknungsgüter werden erst durch ausreichende Trocknung siebbar, mahlbar, mischbar oder wie im Fall von Sägespänen pelletierbar. Ferner erfolgt durch die Trocknung eine Erhöhung des Heizwertes, was für Ersatzbrennstoffe von Bedeutung ist.

Das erste Band eines Bandtrockners ist bestimmend für den Durchsatz, wobei folgende Formel angewendet wird:

$$\dot{M}_1 = \rho_{Sch1} * \dot{V}_1 = \rho_{Sch1} * b * h_1 * v = \rho_{Sch1} * b * h_1 * \frac{l}{t} \quad (2.9)$$

Hierbei gilt, dass b die effektive Bandbreite, h_1 die Schütthöhe des Trocknungsgutes am Trocknereingang, ρ_{Sch1} die Schüttdichte am Trocknereingang, l die effektive (Trocknungszonen-) Länge des ersten Bandes und t die Trocknungsdauer bzw. Verweilzeit des Trocknungsgutes auf dem ersten Band sind. Da die Schütthöhe aus baulichen Gründen in einem Bandtrockner stark begrenzt ist und am Ende des ersten Bandes ein gewisser Feuchtegehalt nach einer bestimmten Trocknungszeit erreicht sein muss, fällt der Schüttdichte des Trocknungsgutes eine wichtige Rolle für die Durchsatzbestimmung des Bandtrockners zu. Werte der Schüttdichte ρ_{Sch1} für unterschiedliche Schüttgüter werden im Anhang A2.1 angegeben.

Praxisbezug Gemeinhin nimmt die Schütthöhe des Trocknungsgutes bis zum Ende des ersten Bandes ab, da sich ein Schrumpfen des Gutes durch den Feuchteverlust einstellt. Eine Ausnahme stellen hier jedoch geschnittene und windgesichtete Artischockenblätter dar, da sich hier Härchen an der Blattoberseite mit fortschreitender Trocknung stark aufstellen, die Blätter sich gegenseitig verspreizen und das Trocknungsgut im Volumen deutlich zunimmt. Für die Trocknung von Schüttgütern in Warmluftbandtrocknern mit mehreren Bändern, die über- oder hintereinander angeordnet sind, werden in Tab. 2.2 Richtwerte für den Übergabefeuchtegehalt vom Band 1 auf die nachfolgenden Bänder aufgeführt.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Wasserverdunstung auf dem ersten Band für die angegebenen Trocknungsgüter im Bereich von rund 70–80% der Gesamtverdunstung

Tab. 2.1 Anfangs- und Enfeuchtegehalte sowie Anfangs- und Endfeuchtegrade unterschiedlichster Trocknungsgüter (Williams-Gardner 1971; Kollmann 1962; Hoyer 1973) sowie das Eintrocknungsverhältnis ETV

Trocknungsgut Aufbereitung	Anfangsfeuchtegehalt W_1 in %	Endfeuchtegehalt W_2 in %	ETV
	Anfangsfeuchtegrad X_1 in kg/kg	Endfeuchtegrad X_2 in kg/kg	
<i>Lebensmittelindustrie</i>			
Tomate Scheiben 8 mm Warmluftgetrocknet	92	5	11,87
	11,88	0,05	
Erdbeeren Gefriergetrocknet	90	3	9,70
	9,00	0,03	
Kartoffel Würfel $10 \times 10 \times 10$ mm, blanchiert, warmluftgetrocknet	78	8	4,18
	3,55	0,09	
Gelatineblätter	70	10	3,00
	2,33	0,11	
Arzneipflanzenextrakt vakuumkontaktgetrocknet	30	2	1,40
	0,43	0,02	
<i>Chemische Industrie</i>			
Kalziumkarbonat extrudiert	60	0,5	2,49
	1,50	0,005	
Lackschlämme	60	4	2,4
	1,5	0,05	
Titandioxid extrudiert	50	0,5	2,38
	1,00	0,005	
Schwefel extrudiert	45	1,0	1,98
	0,82	0,01	
Aluminiumhydrat, vorgetrocknet im Rillenwalzentrockner	38	0,2	1,61
	0,61	0,002	
Kaolin	32	11	1,31
	0,47	0,12	
<i>Entsorgungsindustrie</i>			
Kommunaler Klärschlamm Extrudiert 10 mm, warmluftgetrocknet	75	10	3,6
	3,00	0,11	
<i>Holz- und Papierindustrie</i>			
Wickelpappe	55	8	2,04
	1,22	0,09	
Holzspäne Warmluftgetrocknet	45	10	1,64
	0,82	0,11	
Buchenholz-Furnier	40	10	1,50
	0,67	0,11	

Tab. 2.2 Übergabefeuchtegehalte W und Feuchtegrade X am Ende des ersten Bandes von Warmluftbandtrocknern und anteilige Verdunstung auf dem ersten Band bezogen auf die gesamte Feuchteverdunstung

Trocknungsgut	W	X	% der gesamten Feuchteverdunstung
	%	kg/kg	
Zwiebelscheiben 3 mm ($W_1=83\% \Rightarrow W_2=7\%$)	56	1,27	75
Roter Gemüsepaprika 10 mm Quadratschnitt ($W_1=91\% \Rightarrow W_2=9\%$)	56	1,27	88
Karottenwürfel $10 \times 10 \times 10$ mm ($W_1=87\% \Rightarrow W_2=7\%$)	56	1,27	82
Kartoffelwürfel $10 \times 10 \times 10$ mm ($W_1=78,5\% \Rightarrow W_2=6,5\%$)	46	0,85	78
Karottenwürfel $10 \times 10 \times 10$ mm ($W_1=87\% \Rightarrow W_2=7\%$)	56	1,27	82
Hopfendolden ($W_1=80\% \Rightarrow W_2=10\%$) (Heindl 1997)	52–55	1,08–1,22	71–75
Klärschlamm kommunal (pelletiert, $W_1=75\% \Rightarrow W_2=10\%$)	50–55	1,00–1,22	61–69
Thixotroper pastenartiger Farbgrundstoff (Granulatdurchmesser 6 mm, $W_1=50\% \Rightarrow W_2=0,5\%$) (ELA 2012)	37,5	0,60	40

liegt. Einzig im Fall des pastenartigen Farbgrundstoffes mit niedrigerem Anfangsfeuchtegehalt weicht der anteilige Wert der Wasserverdunstung ab. Der Grund liegt einerseits in den hohen Trocknungstemperaturen und Luftgeschwindigkeiten, die in der ersten Phase der Trocknung zur Anwendung kommen können, ohne dass es zu einer thermischen Überbelastung des Trocknungsgutes kommt. Andererseits muss im Fall von granuliertem oder pelletiertem Trocknungsgut die Granulatschicht im Bereich der Übergabe stabil genug sein, um nach der Umschüttung weiterhin ein stabiles, luftdurchlässiges Haufwerk bilden zu können.

2.2 Grundlagen der Konvektionstrocknung

Das Grundprinzip der konvektiven Trocknung beruht darauf, dass ein erwärmtes Gas – zumeist Luft – Energie auf das Trocknungsgut überträgt und gleichzeitig die aus dem Trocknungsgut verdampfende oder verdunstende Flüssigkeit – zumeist Wasser – aufnimmt und abtransportiert. Es handelt sich hierbei um eine kombinierte Wärme- und Stoffübertragung.

Als Wärme übertragende Gase kommen z. B. Luft, Rauchgas-Luft-Gemische, überhitzter Wasserdampf sowie die Inertgase Stickstoff N_2 oder Kohlendioxid CO_2 in Frage. Während Luft und Stickstoff nahezu gleiche thermodynamische Eigenschaften besitzen,

Tab. 2.3 Wichtige physikalische Eigenschaften der Trocknungsgase Luft, Stickstoff und Kohlendioxid. (VDI 2010)

Eigenschaft bei 25 °C und 101325 Pa	Luft	Stickstoff N ₂	Kohlendioxid CO ₂
Dichte	1,182 kg/m ³	1,145 kg/m ³	1,805 kg/m ³
Wärmeleitfähigkeit	0,026 W/(m * K)	0,026 W/(m * K)	0,016 W/(m * K)
Spezifische Wärmekapazität	1,005 kJ/(kg * K)	1,038 kJ/(kg * K)	0,846 kJ/(kg * K)
Dynamische Viskosität	2,07 * 10 ⁻⁵ Pa * s	1,78 * 10 ⁻⁵ Pa * s	1,49 * 10 ⁻⁵ Pa * s
Kinematische Viskosität	1,751 * 10 ⁻⁵ $\frac{m^2}{s}$	1,555 * 10 ⁻⁵ $\frac{m^2}{s}$	0,825 * 10 ⁻⁵ $\frac{m^2}{s}$
Diffusionskoeffizient Wasserdampf – Gas	24,2 * 10 ⁻⁶ $\frac{m^2}{s}$	24,0 * 10 ⁻⁶ $\frac{m^2}{s}$	19,0 * 10 ⁻⁶ $\frac{m^2}{s}$
Lewis-Zahl $Le = \frac{\lambda_G}{c_{pG} * \rho_G * D}$	0,904	0,911	0,551
Relativer Wärmeübergangskoeffizient $\frac{\alpha_G}{\alpha_L}$ Merkel (1927)	1	≈ 1	≈ 1,12

zeigt Kohlendioxid als Trocknungsgas abweichende Merkmale (VDI 2010). Dies wirkt sich auch auf den Trocknungsprozess aus. In Tab. 2.3 werden wichtige physikalische Eigenschaften unterschiedlicher Trocknungsgase aufgeführt.

Die deutlich höhere Dichte von CO₂ bewirkt bei gleicher Strömungsgeschwindigkeit einen höheren Druckverlust. Im Vergleich zu Luft oder Stickstoff liegt bei Kohlendioxid die Lewis-Zahl, d. h. das Verhältnis der Geschwindigkeiten von Wärme- und Stoffaustausch auf niedrigerem Niveau. Der Wärmeübergang hinkt demgemäß dem Stoffübergang nach. Jedoch ist der Wärmeübergangskoeffizient bei Kohlendioxid im Vergleich zu Luft um rund 12 % größer (Merkel 1927).

Stickstoff und Kohlendioxid werden vor allem angewendet, wenn eine Oxidation wertgebender Inhaltsstoffe des Trocknungsgutes während des Trocknungsvorganges vermieden werden soll. Außerdem wirken diese Inertgase bakteriostatisch. Im Bereich der Trocknung von Lebensmitteln wirken sich diese Eigenschaften qualitätsfördernd aus.

Andererseits will man durch den Einsatz eines Inertgases verhindern, dass eventuell aus dem Trocknungsgut ausgasende, explosive Gase zur Zündung gelangen könnten. So können pharmazeutische Produkte auch alkoholische Lösungsmittel wie Ethanol, Methanol oder Aceton enthalten, wenn schwerlösliche oder hydrolyseempfindliche Wirkstoffe verarbeitet werden. In Tab. 2.4 werden die temperaturabhängigen Verdampfungsenthalpien von Lösungsmitteln im Vergleich zu Wasser aufgeführt (Pawlow 1972).

Deutlich ist zu erkennen, dass im Vergleich zu Wasser alle anderen Lösungsmittel kleinere Verdampfungsenthalpien aufweisen und der spezifische Energiebedarf pro kg Feuchtigkeit geringer ausfällt. Der Anteil der Feststofferwärmung am Gesamtwärmebedarf ist deshalb bei der Trocknung von lösungsmittelfeuchten Produkten im Vergleich zu Wasser

Tab. 2.4 Lösungsmittel die temperaturabhängigen Verdampfungsenthalpien (kJ/kg) bei Umgebungsdruck von 101325 Pa auf. (Pawlow 1972)

Lösungsmittel Verdampfungsenthalpie in kJ/kg	Verdampfungstemperatur bei 101325 Pa (°C)	0 °C	20 °C	60 °C	100 °C	140 °C
Aceton	56,5	565	553	519	473	–
Ethylenglykol	197	–	1092	–	–	–
Ethanol	78	921	913	879	812	712
Hexan	69	385	368	339	–	–
Methanol	63	1197	1172	1109	1013	892
Wasser	100	2491	2445	2424	2256	2147
Toluol	110	414	407	388	368	344

deutlich höher und darf für die energetische Berechnung keinesfalls vernachlässigt werden (Roeder 1973).

Berechnungsbeispiel 2.3 1.000 kg/h eines pharmazeutisches Produktes in Tablettenform soll von $W_1=25\%$ Feuchtegehalt auf $W_2=0,5\%$ Feuchtegehalt getrocknet werden. Im ersten Fall werde bei einer Temperatur von 20 °C Wasser entfernt, im zweiten Fall soll Ethanol verdunstet werden. Die notwendige Verdampfungsenthalpie errechnet sich allgemein zu:

$$\dot{Q}_V = \left(\dot{M}_1 - \dot{M}_1 * \left(\frac{1-W_1}{1-W_2} \right) \right) * \Delta h_V \quad (2.10)$$

Für das wasserfeuchte Gut gilt:

$$\dot{Q}_V = \left(1.000 \frac{\text{kg}}{\text{h}} - 1.000 \frac{\text{kg}}{\text{h}} * \left(\frac{1-0,25}{1-0,005} \right) \right) * 2.445 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = 602.035 \frac{\text{kJ}}{\text{h}} = 167,2 \text{ kW}$$

Für das ethanolfeuchte Gut gilt:

$$\dot{Q}_V = \left(1.000 \frac{\text{kg}}{\text{h}} - 1.000 \frac{\text{kg}}{\text{h}} * \left(\frac{1-0,25}{1-0,005} \right) \right) * 913 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = 224.809 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = 62,4 \text{ kW}$$

Der stündliche Energiebedarf für das wasserfeuchte Produkt ist 2,68-fach höher als derjenige für das ethanolfeuchte Gut.

Praxisbezug Der tatsächliche stündliche Wärmebedarf eines industriellen Trockners liegt höher, da bei obiger Berechnung Wärmeverluste, Abluftverluste, zusätzliche Bindungsenthalpie der Feuchte im niedrigen Feuchtegehaltsbereich und der Wärmebedarf für die Anwärmung des Gutes und der Luft auf Ablufttemperaturniveau unberücksichtigt bleiben.

Im Anhang A2.2 werden Tabellen und Berechnungsvorschriften der für die konvektive Trocknung wichtigen Eigenschaften der unterschiedlichen Trocknungsgase wie Luft, Wasserdampf und Rauchgase sowie einiger aus dem Trocknungsgut zu entfernenden Flüssigkeiten aufgelistet. Für Computerberechnungen werden auch Zahlenwertgleichungen angegeben.

2.2.1 Trocknungsverlauf und -abschnitte der Konvektionstrocknung

Im Fall der Konvektionstrocknung wird vom Trocknungsgas Energie an das Trocknungsgut übertragen, wobei vor allem die Temperaturdifferenz zwischen dem Gas und der Oberfläche des Gutes von Bedeutung ist. Streicht Luft über eine feuchte Oberfläche, so stellt sich in Abhängigkeit von den Parametern der Luft bzw. des Gases – Druck, Temperatur und relative Feuchtigkeit – eine konstante Oberflächentemperatur ein. Andererseits nimmt das Gas den Dampf auf und sorgt für dessen Abtransport. Die Intensität des Dampftransportes hängt von der Dampfpartialdruckdifferenz zwischen dem Trocknungsgas und der Gutoberfläche ab.

Bei der Konvektionstrocknung von hygroskopischen Trocknungsgütern unterscheidet man zwischen drei Trocknungsabschnitten. Abbildung 2.1 zeigt in drei Bildern den Trock-

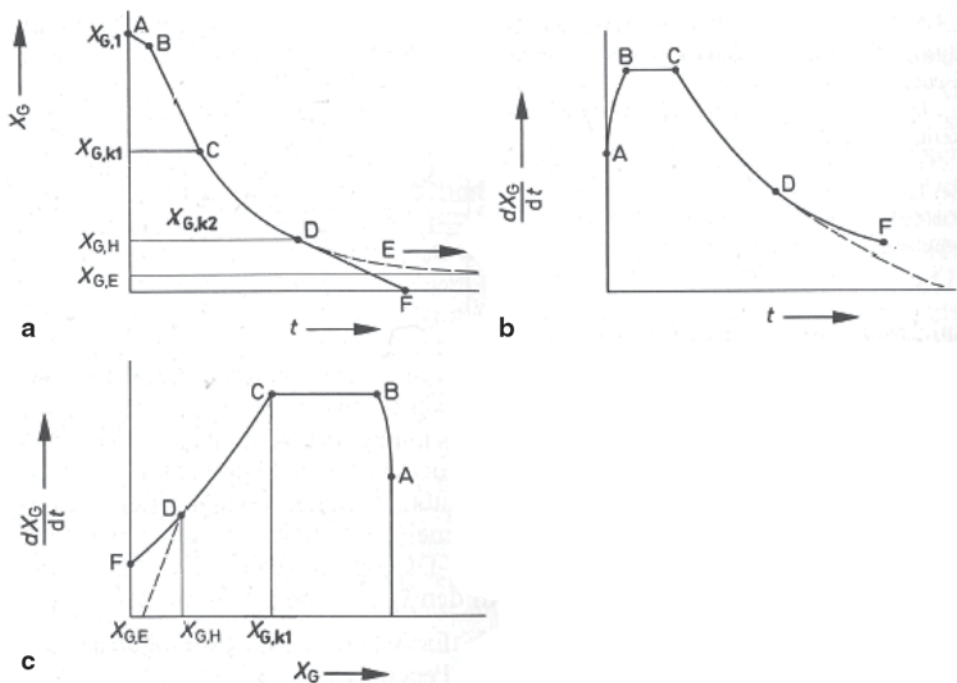


Abb. 2.1 a–c Trocknungsverlauf eines kapillar-porösen Gutes mit der Anwärmphase und den drei Trocknungsabschnitten. (Sattler 1988)

nungsverlauf eines kapillar-porösen Festgutes, wobei in a) der Feuchtegrad X über der Zeit t , in b) die Trocknungsgeschwindigkeit dX/dt über der Zeit t und in c) die Trocknungsgeschwindigkeit dX/dt über dem Feuchtegrad X aufgetragen sind.

Zwischen Punkt A und B wird das Trocknungsgut in der Anwärmphase auf die Verdunstungstemperatur bzw. die dem Zustand der Trocknungsluft entsprechende Oberflächentemperatur erwärmt. Der erste Trocknungsabschnitt im Bereich der Punkte B bis C ist gekennzeichnet durch eine gleichbleibende Verdunstungsgeschwindigkeit und eine konstante Oberflächentemperatur. Die Trocknungsgeschwindigkeit hängt in dieser Phase ausschließlich vom Zustand des Trocknungsgases und dem Wärme- bzw. Stoffübergang ab. Im Punkt C hat das Gut den ersten Knickpunkt $X_{G,K1}$ erreicht. Trocknungsgüter mit sehr kleinen Querschnitten, z. B. dünne Messerfurniere mit Dicken von kleiner 1 mm trocknen praktisch ausschließlich im ersten Trocknungsabschnitt. Trocknungsgüter mit größeren Querschnittsabmessungen hingegen weisen auch noch einen zweiten und eventuell dritten Trocknungsabschnitt auf. Im zweiten Trocknungsabschnitt von C nach D kann nicht mehr ausreichend Feuchtigkeit über kapillare Leitung oder Diffusion an die Oberfläche transportiert werden, so dass diese austrocknet und der sogenannte Trocknungsspiegel, d. h. die Grenze zwischen austrocknenden und noch feuchten Gutbereichen nach innen wandert. Die Trocknungsgeschwindigkeit verringert sich und hängt in dieser Phase von der Wärmeleitung durch die bereits ausgetrockneten Gutschichten, von der über die Kapillaren aus dem Gutinneren an den Trocknungsspiegel geleitete Feuchte, von der Dampfdiffusion der Feuchte vom Trocknungsspiegel an die Gutoberfläche und durch den Stoffübergang des Dampfes in das Trocknungsgas ab (Sattler 1988). Die Gutoberflächentemperatur beginnt an zu steigen, zeitverzögert nimmt auch die Temperatur im Gutinneren zu. Bei nicht-hygroskopischen Trocknungsgütern endet die Trocknung im Punkt F, wobei die Feuchte vollständig entfernt werden kann. Viele Trocknungsgüter zeigen jedoch hygroskopisches Verhalten, die gebundene Feuchte weist in diesem Fall einen niedrigeren Dampfdruck als die Flüssigkeitsfeuchte bei gleicher Bezugstemperatur auf (Sattler 1988). Wird an allen Stellen des Trocknungsgutes der größtmögliche hygroskopische Feuchtegrad $X_{G,K2}$ erreicht, verringert sich die Trocknungsgeschwindigkeit erneut und die Phase des dritten Trocknungsabschnittes stellt sich ein. Das Gut trocknet bis sich ein Sorptionsgleichgewicht zwischen ihm und der umgebenden Trocknungsluft einstellt. Hier ist anzumerken, dass der Sättigung des Trocknungsgases allein durch den gewünschten Endfeuchtegehalt für eine bestimmte Guttemperatur eine Grenze gesetzt ist und deshalb die Sättigung – wie es aus energetischen Gründen angebracht erscheint – nicht zu hoch getrieben werden darf. Im dritten Trocknungsabschnitt geht die Trocknungsgeschwindigkeit gegen Null und es wird ein minimaler Feuchtegrad $X_{G,E}$ erreicht. Die Guttemperatur nähert sich asymptotisch der Gastemperatur. Aus diesem Grund muss bei temperaturempfindlichen Trocknungsgütern die Gastemperatur bereits im zweiten Trocknungsabschnitt abgesenkt werden und darf im dritten Trocknungsabschnitt nicht mehr über der maximal zulässigen Guttemperatur liegen. Tabelle 2.5 führt maximal zulässige Guttemperaturen vor allem für temperaturempfindliche Lebensmittel auf.

Tab. 2.5 Maximale Guttemperaturen verschiedener Trocknungsgüter mit Schwerpunkt im Bereich Lebensmittel und Arznei- und Gewürzpflanzen. (Heindl und Müller 2010) (Werte aus der industriellen Praxis)

Trocknungsgut	Max. Guttemperatur in °C	Trocknungsgut	Max. Guttemperatur in °C
Bucheckern	25 ^a	Kartoffel	65–70
Baldrianwurzel	35	Pfefferminzblatt	45–50
Zwiebel	55–60	Artischockenblatt, Melissenblatt	42–45
Karotte	63–68	Gelatine	30 ^b /60 ^c
Hagebuttenfrucht	60	Hopfendolde	60–65
Petersilienblatt, Schnittlauchröhrchen	70–75	Johanniskraut	60
Ginkgoblatt	70–80	Färberresede	100
Buchen- und Eichenholz furnier	95	Wickelpappe	100–120

^a Trocknung nur mit entfeuchteter Luft möglich

^b Im mittleren Trocknungsabschnitt

^c gegen Ende der Trocknung

Praxisbezug Die Abstufung der Trocknungsgastemperatur und die Anpassung an den Trocknungsverlauf des Gutes sind in Bandtrocknern mit mehreren Wärmetauschern zur Gaserwärmung leicht zu realisieren. Falls nur ein Wärmetauscher beige stellt wird, kann über einen Warmluftabzweig aus dem Hauptvolumenstrom das Temperaturniveau für die Endtrocknungszone durch Zumischen von Frischluft abgesenkt werden.

In der in Abb. 2.2 dargestellten Desorptionsisotherme wird der Gleichgewichtszustand zwischen der relativen Luftfeuchte φ des Trocknungsgases und dem Gutfeuchtegrad X_G dargestellt (Sattler 1988). Deutlich sind die einzelnen Bereiche der gebundenen Feuchte, der freien Feuchte sowie der, beim jeweiligen Zustand des Trocknungsgases entfernbaren und nicht entfernbaren Feuchte dargestellt. Eine Zuordnung der Bindung der Feuchte im Gut in Form von Kapillarkondensation (Thompson), Mehrschichtadsorption (BET) und Einschichtadsorption (Langmuir) in Abhängigkeit vom relativen Dampfdruckverhältnis erfolgt ebenfalls. Eingezeichnet ist auch der erreichbare Endfeuchtegrad $X_{G,E}$, wobei die relative Luftfeuchtigkeit φ (relatives Dampfdruckverhältnis) in diesem Fall 20 % beträgt. Die Sorptionskurven verdeutlichen ferner, dass mit steigender Temperatur ϑ (Guttemperatur = Lufttemperatur) bei gleichem relativen Dampfdruckverhältnis ein kleinerer Endfeuchtegrad erreicht werden kann oder dass die für die gewünschte Endfeuchtegrad die relative Luftfeuchte höher sein darf. Man muss jedoch berücksichtigen, dass diese Kurven einen Gleichgewichtszustand darstellen, der sich erst nach sehr langer Zeit einstellt. Will man deshalb bei industriellen Trocknern in annehmbarer Zeit einen gewünschten Endfeuchtegrad erreichen, so muss eine genügend große Differenz der Dampfdruckverhältnisse angelegt werden, d. h. die relative Feuchte des Trocknungsgases muss deutlich unterhalb der relativen Gleichgewichtsfeuchte liegen.

Praxisbuch Bandtrocknung

Grundlagen, Anwendung, Berechnung

Heindl, A.

2016, XIV, 699 S. 17 Abb. in Farbe., Hardcover

ISBN: 978-3-642-53904-6