



# 1 Einleitung

Die Wirbelschichttrocknung ist eine Technologie, die häufig in der chemischen Industrie für die Trocknung von körnigen Feststoffen eingesetzt wird.

Abhängig von der Partikelgröße und der Art der Zuführung sind die bevorzugten Trocknungsverfahren in der Industrie häufig entweder Sprühtrocknung (Partikelgröße 100–500  $\mu\text{m}$ ), Flash-Trocknung (Partikelgröße 0–3000  $\mu\text{m}$ ) oder Wirbelschichttrocknung (Partikelgröße 50–5000  $\mu\text{m}$ ) (Chandran et al. 1990). Während beim Sprühtrockner bzw. Flash-Trockner flüssiges Gut zugeführt werden kann, wird dem Wirbelschichttrockner feuchter Feststoff zugeführt.

Die Wirbelschichttrocknung kann chargenweise oder kontinuierlich erfolgen. Der chargenweise Wirbelschichttrockner ist insbesondere für kleinere Mengen und für wärmeempfindliche Materialien geeignet. Das Produkt hat in dem chargenweisen Betrieb eine gleichmäßige Qualität aufgrund der Homogenität des Bettes. Im kontinuierlichen Wirbelschichttrockner entspricht das Produkt am Austritt des Trockners wegen der starken Feststoffvermischung dem Produkt innerhalb des Trockners.

Einer der wichtigsten Vorteile der Wirbelschichten ergibt sich aus der Tatsache, dass durch die intensive Bewegung im Bett ein hoher Wärme- und Stofftransport sowie eine gute Durchmischung der Feststoffe innerhalb des Bettes gewährleistet werden. Ein anderer wichtiger Vorteil ist die mit der guten Vermischung einhergehende gute Temperaturkontrolle, die eine energetisch effiziente Trocknung von wärmeempfindlichen Materialien, wie zum Beispiel Lebensmitteln oder pharmazeutischen Produkten, ermöglicht. Ein Nachteil der guten Feststoffdurchmischung in der Wirbelschicht ist die breite Verweilzeitverteilung des Feststoffes, d. h., einige Partikel verlassen den Trockner bereits kurze Zeit nach dem Eintritt, während andere Partikel sehr lange Zeit im Trockner bleiben. Deshalb enthält das Produkt Partikel, die auf unterschiedliche Feuchtegehalte getrocknet wurden, wie bereits von Kettner et al. (2006) und Peglow et al. (2007) experimentell gezeigt wurde.

In der Agrar- und Lebensmittelindustrie ist das Hauptziel der Trocknung die Verminderung des Feuchtegehalts des Produkts und damit der Wasseraktivität  $w_a$ , welche unmittelbar von dem Feuchtegehalt des Gutes abhängt, um die Lagerung bei Raumtemperatur und die Haltbarkeit zu verbessern. Zusätzlich zur Beeinflussung des mikrobiellen Verderbens kann die Wasseraktivität eine bedeutende Rolle bei der Aktivität von Enzymen und bei der Beständigkeit von



Vitaminen in Lebensmitteln spielen, welche einen großen Einfluss auf Farbe, Geschmack und Aroma haben können. Sie kann auch eine signifikante Auswirkung auf die Wirksamkeit und Konsistenz von Arzneimitteln haben. Die Anwesenheit einer Produktfeuchteverteilung in der kontinuierlichen Wirbelschichttrocknung kann nicht vollständig vermieden werden. Für bestimmte Produkte ist es aber sehr wichtig, die Feuchteverteilung innerhalb sicherer Grenzen zu halten.

Weitere Faktoren, die die Verteilung der Gutsfeuchte am Trockneraustritt maßgeblich beeinflussen, sind die Korngrößenverteilung und die Feuchteverteilung des Aufgabegutes. Feine Partikel werden im Mittel am Trockneraustritt trockener sein als gröbere Partikel (Kozanoglu et al. 2011), (Paláncz 1983), (Zahed et al. 1995). Ebenso werden auch die Partikel mit niedrigem Eintrittsfeuchtegehalt am Austritt trockener sein als die mit höherer Anfangsfeuchte (Garnavi et al. 2006).

Für die Einhaltung enger Produktspezifikationen bezüglich der zulässigen Feuchte in den Partikeln wird daher häufig das Gut im Mittel höher getrocknet als notwendig. Um eine genauere Auslegung von kontinuierlich arbeitenden Wirbelschichttrocknern zu ermöglichen, ist die Modellierung des Trocknungsvorganges unter Berücksichtigung des Einflusses von Verweilzeitverteilung, Korngrößenverteilung sowie Feuchteverteilung des Aufgabegutes erforderlich.

Trocknungsvorgänge können heutzutage mit Hilfe von Rechnern und numerischen Methoden simuliert werden. Solche Simulationen von Strömungs-, Wärme- und Stoffaustauschvorgängen im Trockner erlauben die Vorausberechnung der einzustellenden Trocknungsbedingungen.

Das Trocknungsverfahren ist normalerweise kein eigenständiger Prozess, sondern eine Endbearbeitung in einer Reihe von Verfahrensschritten. Die Implementierung eines Trocknermodells als Apparatemodul für das Fließschema-Simulationsprogramm SolidSim ermöglicht nicht nur die Vorausberechnung der isolierten Trocknung, sondern auch die Optimierung der gesamten Verfahrenskette.

In der vorliegenden Arbeit wird ein Trocknermodell vorgestellt, das die Feuchteverteilung des Produktes Korngrößen- und anfangsfeuchteabhängig unter Annahme einer idealen Vermischung des Feststoffes berechnet. Um die Verweilzeitverteilung einzuengen, werden häufig längliche, rinnenförmige Wirbelschichten eingesetzt. Um den Einfluss des konvektiven Feststofftransportes durch den Trockner auf die Verweilzeitverteilung zu berücksichtigen, werden



hier in einem ersten einfachen Modell solche Trockner über eine Rührkesselkaskade modelliert.

Das Trocknermodell wurde als Apparatemodul für das Fließschema-Simulationsprogramm SolidSim implementiert und durch Messungen in einem kontinuierlichen Wirbelschichttrockner validiert.

Abschließend werden anhand von Variantenrechnungen die Einflüsse von verschiedenen Betriebsparametern wie Korngrößenverteilung, Apparategeometrie, Gastemperatur, -feuchte und Verweilzeit bzw. Durchsatz auf das Trocknungsergebnis, insbesondere die Feuchteverteilung im Produkt, aufgezeigt.





## 2 Stand des Wissens

### 2.1 Beschreibung des Trocknungsvorganges

Trocknung von Feststoffen ist ganz allgemein das Abtrennen von Flüssigkeit aus feuchten Gütern. Diese Abtrennung kann entweder mechanisch oder thermisch erfolgen.

Die mechanische Trocknung findet ohne Phasenänderung der Feuchte durch Filtrieren, Zentrifugieren oder Abpressen statt. Bei der thermischen Trocknung wird dagegen die fluide Phase durch Zufuhr thermischer Energie und/oder durch eine Druckabsenkung in die Dampfphase überführt. Die thermische Trocknung läuft in zwei Schritten ab. Zuerst wird Wärme durch Leitung, Konvektion oder Strahlung von außen an das Gut herangeführt oder im Gutsinnern erzeugt. Diese Wärme wird benutzt, um die Feuchte aus dem Gut zu verdampfen. Danach erfolgt eine Trennung von Gutsphase und Feuchtedampf. Der Feuchtedampf wird vom Gut weggeführt. Bei der thermischen Trocknung werden Wärme und Stoff gleichzeitig übertragen.

#### 2.1.1 Kinetik der Trocknung, Trocknungsverlaufskurven

Unter der Kinetik der Trocknung ist die Veränderung der mittleren Gutsfeuchte und der mittleren Gutstemperatur in Abhängigkeit von der Trocknungszeit zu verstehen.

Die Auswertung der Trocknungsversuche ergibt den Zusammenhang zwischen der Gutsfeuchte und der Trocknungszeit. Die Darstellung dieser Daten als Gutsfeuchte  $X$  über der Trocknungszeit  $t$  (Abbildung 2.1. a) wird Trocknungsverlauf genannt.

Dieser Trocknungsverlauf wird durch die Art des Feuchtguts und seine Feuchtebindung, durch das gewählte Trocknungsverfahren und die eingestellten Betriebsbedingungen bestimmt.

Damit die Abhängigkeit der Trocknungskinetik von der Gutsfeuchte bzw. der Zeit besser dargestellt werden kann, wird der Trocknungsverlauf differenziert und als Trocknungsgeschwindigkeit  $\frac{dX}{dt}$  über der Feuchtebelastung des Guts aufgetragen (Abbildung 2.1. c). Diese Auftragung dient zur Verdeutlichung der Übergänge zwischen verschiedenen Trocknungsmechanismen bzw. zwischen den Trocknungsabschnitten. Außerdem ist diese Auftragung besonders zweckmäßig, um die erforderliche Trocknungsdauer zu ermitteln.



Allgemein verläuft die Trocknung wie folgt:

Der Beginn der Trocknung ist durch Erwärmung oder Abkühlung (abhängig von der anfänglichen Gutstemperatur) des Guts auf einen Gleichgewichtszustand gekennzeichnet (AB), wobei in dieser Vorwärmperiode nur wenig Feuchte verdunstet. Danach folgt der so genannte erste Trocknungsabschnitt; in diesem Abschnitt nimmt die Feuchte linear ab, die Trocknungsgeschwindigkeit bleibt konstant (BC). Der erste Trocknungsabschnitt dauert bis zum Erreichen der kritischen Gutsfeuchte (Knickpunkt C). In diesem Abschnitt hängt die Trocknungsgeschwindigkeit nur vom Wärme- und Stoffübergang ab (äußere Wärme- und Stoffübergangsbedingungen).

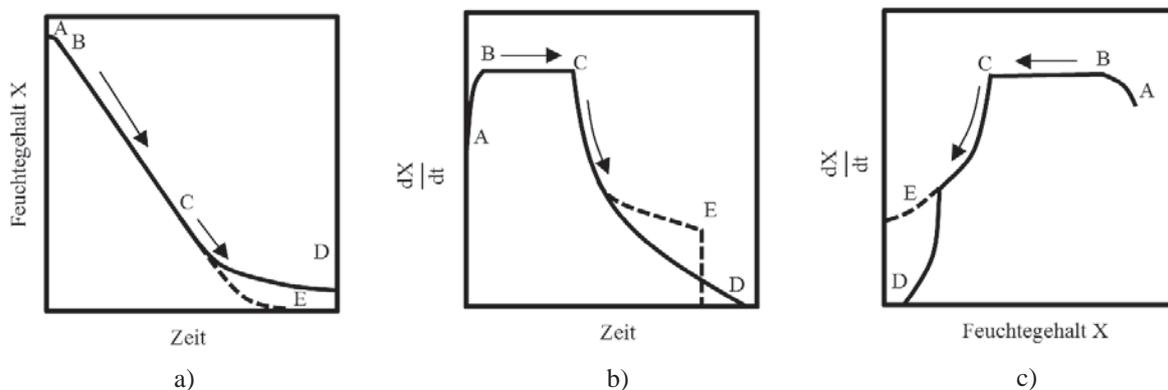


Abbildung 2.1. Typische Auftragungen für Trocknungsverlaufskurven.

Bei Unterschreiten der kritischen Gutsfeuchte reicht der Feuchtetransport im Gutsinnern nicht aus, um die von der Guts Oberfläche verdunstete Feuchte nachzuführen. So beginnt die Trocknungsgeschwindigkeit abzunehmen (CD/CE). In diesem Fall hängt die Trocknungsgeschwindigkeit hauptsächlich von dem Wärme- und Feuchtetransport im Gutsinnern ab. Der zweite Trocknungsabschnitt endet bei nicht hygroskopischen Materialien mit vollständiger Trocknung und bei hygroskopischen Materialien mit der hygroskopischen Gleichgewichtsfeuchte (Punkt D).

### 2.1.2 Hygroskopizität

Die Hygroskopizität ist das Vermögen eines Gutes, auf den Feuchtigkeitsgehalt der Luft durch Wasserdampfaufnahme (Adsorption) oder -abgabe (Desorption) zu reagieren. Die Hygroskopizität ist bestimmt durch die als Sorption bezeichnete Anlagerung von Wasser aus der umgebenden feuchten Luft an einen Stoff bis zum Erreichen eines Gleichgewichtszustandes. Diese



Art der Wasseraufnahme kann als Funktion der relativen Luftfeuchte bei konstanter Temperatur dargestellt werden und wird als Sorptionsisotherme bezeichnet (Krus 1995). Die Sorptionsisotherme zeigt oft für hygroskopisches poröses Material einen Hystereseeffekt zwischen Feuchtaufnahme und -abgabe (Adsorption und Desorption) (Klopfer 1974). Die typischen Eigenschaften einer Sorptionsisotherme für hygroskopische Materialien sind in Abbildung 2.2 zusammengestellt.

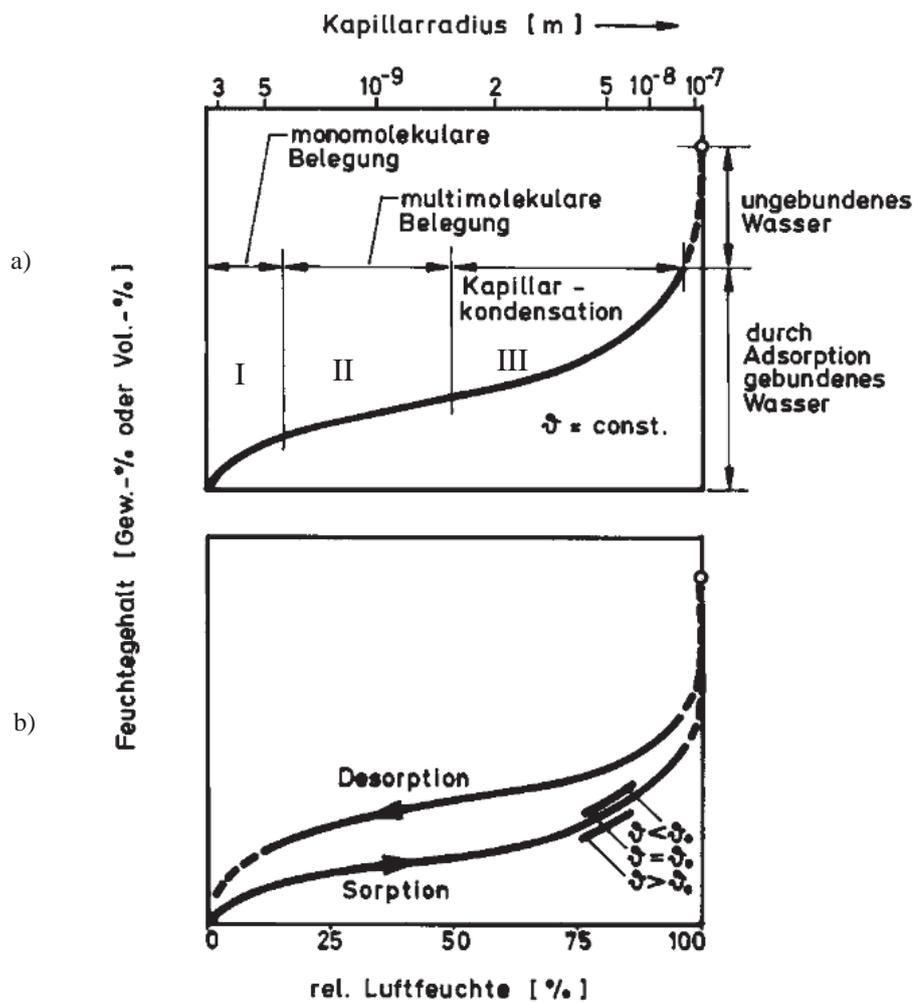


Abbildung 2.2. Schematische Darstellung einer typischen Sorptionsisotherme für hygroskopisches poröses Material (Kießl 1983);

a: Bereiche der Feuchtaufnahme mit Angabe der ungefähren Porenradien,

b: Temperatureinfluss und Hystereseeffekt zwischen Ad- und Desorption.

Der untere Bereich ist bestimmt durch eine monomolekulare Belegung der Feststoffoberfläche (Langmuir-Theorie) und geht dann über in einen linear ansteigenden Bereich multimolekularer Belegung (BET-Theorie).



Für diese zwei Bereiche unterscheidet man zwischen zwei verschiedenen Bindungsarten. Physisorption und Chemisorption. Die Physisorption beruht auf zwischenmolekularen Kräften inerte Atome und Moleküle, den so genannten van-der-Waals-Kräften. Diese Bindungen sind weitreichend aber schwach und daher leicht wieder zu trennen. In diesem Fall bleiben die geometrische Struktur und die elektrischen Eigenschaften beider Phasen erhalten. Aufgrund der hohen Reichweite dieser Bindungsart können stoffabhängig mehrere Molekülschichten übereinander auf Feststoffoberflächen adsorbieren (Fieback 2008) (Bereich II in Abbildung 2.2).

Die Chemisorption beruht auf tatsächlichen chemischen Bindungen, wenn Elektronen ausgetauscht oder gemeinsame Elektronenpaare gebildet werden. Diese Bindung ist wesentlich stärker als die van-der-Waals-Kräfte, benötigt deshalb eine höhere Trennungenergie, und es kommt ausschließlich zur Anlagerung einer Molekülschicht auf der Oberfläche, einer so genannten Monoschicht (Bereich I in Abbildung 2.2). Das Wasser in diesem Abschnitt ist stark an dem Feststoff gebunden und steht normalerweise zur Reaktion nicht zur Verfügung (Mujumdar et al. 2004).

Der progressiv ansteigende Bereich wird der Kapillarkondensation zugeordnet. Dies kann darauf zurückgeführt werden, dass in Poren kleinen Durchmessers der Dampfdruck des Wassers erniedrigt ist, so dass es auch bei relativen Luftfeuchten unter 100 % zur Kondensation kommt. Als einfache Beziehung zwischen der relativen Luftfeuchte und dem Porendurchmesser gilt die Kelvin-Beziehung (Kießl 1983). Sie gibt den Zusammenhang zwischen relativer Luftfeuchte und Kapillarradius an, bis die Zylinderporen durch Kapillarkondensation gefüllt sind:

$$\varphi = \exp\left(-\frac{2 \cdot \sigma \cdot \cos\theta}{r \cdot \rho_w \cdot R_D \cdot T}\right), \quad (2.1)$$

mit:

$\varphi$  Relative Luftfeuchte [-],

$\sigma$  Oberflächenspannung des Wassers [N/m<sup>2</sup>],

$\theta$  Randwinkel [grd],

$r$  Kapillarradius [m],

$R_D$  Gaskonstante für Wasserdampf [J/(kgK)],

$T$  absolute Temperatur [K],



$\rho_w$  Dichte des Wassers [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ].

Abbildung 2.3 zeigt den Kurvenverlauf von Gleichung 2.1 unter Voraussetzung vollständiger Benetzung. Es ist zu erkennen, dass der Gleichgewichtsdampfdruck bei kleinen Poren niedriger ist.

Bei nicht-hyroskopischem Material entspricht der Gleichgewichtsdampfdruck demjenigen über einem freien Wassertropfen und kann damit nach der Antoine-Gleichung berechnet werden, welches nicht der Fall bei hyroskopischen Materialien ist, weil der Gleichgewichtsdampfdruck aufgrund der sorptiven Bindungskräfte niedriger ist und dabei von dem Materialfeuchtegehalt und dessen Temperatur abhängt.

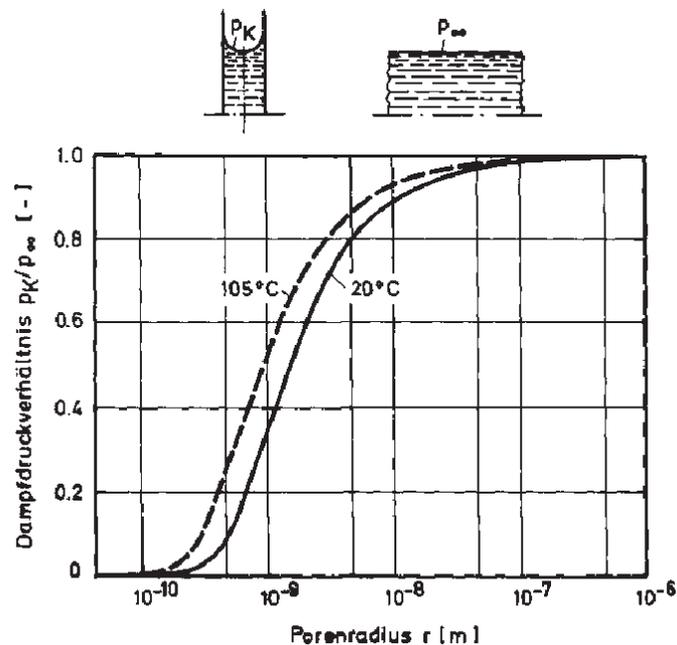


Abbildung 2.3. Verhältnis des Sättigungsdampfdruckes über einer gekrümmten Wasseroberfläche in Abhängigkeit vom Kapillarradius (Kießl 1983);

$p_k$ : Dampfdruck über einem Meniskus mit dem Krümmungsradius  $r_k$ ,  
 $p_\infty$ : Dampfdruck über einer flachen Wasseroberfläche  $r_k \rightarrow \infty$ .



## 2.2 Modellierung von Wirbelschichttrocknern

Als Ursprung der Wirbelschichttechnologie kann das Jahr 1922 gesehen werden, in dem ein Verfahren zur Kohlevergasung von Winkler (1926) patentiert wurde, welches eine Schüttung von Feststoffpartikeln durch einen aufwärts gerichteten Fluidstrom in einen flüssigkeitsähnlichen Zustand versetzt, sobald die auf den freien Gefäßquerschnitt bezogene Fluidgeschwindigkeit  $u$  einen Grenzwert  $u_{mf}$  erreicht (Werther 1982). Die Wirbelschichttechnik hat sich bis zur heutigen Zeit in einem breiten Anwendungsgebiet mit sehr verschiedenen Apparaten etabliert. Einen Überblick über deren Gestaltungsmöglichkeiten geben z. B. Beránek et al. (1975) und Uhlemann und Mörl (2000). Die Trocknung sämtlicher fluidisierfähiger Güter ist ein wesentliches Beispiel, welches in der Chemie-, Pharmazie- oder Lebensmittelindustrie Anwendung findet. In der Literatur finden sich zahlreiche mathematische Modelle sowohl für den Batchbetrieb als auch für kontinuierlich betriebene Wirbelschichttrockner.

Basierend auf der Drei-Phasen-Theorie (Kunii und Levenspiel 1969) schlug Paláncz (1983) ein mathematisches, mechanistisches Modell für den kontinuierlich betriebenen Wirbelschichttrockner vor, in dem sowohl das Gas als auch der Feststoff in der Suspension als ideal durchmischt angenommen wurde. Die Blasenphase bewegt sich durch den Wirbelschichtapparat als Kolbenströmung. Die Blasen sind feststofffrei und haben eine gleichförmige Größe. Der Wärme- und Stoffaustausch findet zwischen der Blasenphase und der Suspension statt (aktiver Bypass), die Stoff- und Wärmekoeffizienten werden nach Kunii und Levenspiel (1969) berechnet.

Das Modell berücksichtigt das sorptive Verhalten des Feststoffs und auch die Transportwiderstände im zweiten Trocknungsabschnitt, jedoch werden alle Transportphänomene im Gutsinneren zu einem einzigen kinetischen Ansatz (Lumped Model) zusammengefasst:

$$Y_{eq} = \Phi_1(T_P) \cdot \Phi_2(X_P) \quad (2.2)$$

mit

$$\Phi_1 = 0,622 \cdot \frac{P_D}{760 - P_D} \quad (2.3)$$

und

$$\log_{10} P_D = 0,622 + \frac{7,5 \cdot T_P}{238 + T_P}, \quad (2.4)$$