

Technische Universität München

Department Chemie

**Praktikum
"Grundoperationen
technisch-chemischer Prozesse"**

Versuch B2:
Versuchsanleitung

Trocknung

Stand: SS 2012

Einleitung

Die (thermische) Trocknung feuchter Güter spielt in der Technik eine ganz bedeutende Rolle. Man schätzt, dass etwa 10% des gesamten in der Verfahrenstechnik aufgewendeten Energieverbrauchs auf diesen Prozessschritt entfallen. Um die mengenmäßige Dimension dieses Schrittes der thermischen Verfahrenstechnik deutlich zu machen, sei hier nur an die Ziegel- und Keramikindustrie erinnert, in der große Mengen an feuchten Formkörpern vor dem eigentlichen Brennvorgang getrocknet werden müssen. Als weitere Beispiele mögen die kontrollierte Trocknung von Holz (u. a. für die Möbelindustrie), die Landwirtschaft (Trocknung von Getreide, Konditionierung von Rückständen vor der Weiterverwendung etc.) und insbesondere auch der Lebensmittelbereich dienen.

Wenn von thermischer Trocknung gesprochen wird, ist vorausgesetzt, dass dem zu trocknenden Gut so weit wie vertretbar mit Methoden der mechanischen Verfahrenstechnik anhaftendes Wasser („Abtropfwasser“) entzogen wurde, also z. B. durch Filterpressen und Schleudern/Zentrifugation.

In der weit überwiegenden Zahl der Fälle handelt es sich um Wasser, das durch Trocknung auf einen vordefinierten, gewünschten Restgehalt entfernt werden muss. Dieser Umstand bedingt auch den hohen Energiebedarf, der mit der Trocknung verbunden ist.

Als Trocknungsgüter mit nichtwässeriger Feuchte können mit Lackschichten versehene Formteile oder Flächen angesehen werden, wenn organische Solventien verwendet werden.

Bedingt durch den hohen Energieaufwand, aber selbstverständlich nicht nur seinetwegen, ist das Bestreben groß, den Trocknungsvorgang in seiner Gesamtheit möglichst quantitativ beschreiben zu können und damit theoretisch vorausberechenbar zu machen. Die damit für ein vorgegebenes Trocknungsproblem durchzuführende Dimensionierung und Modellierung einer Trocknungsstrecke (also „die Trocknungsanlage“) muss schon allein aus Gründen der Energieeffizienz möglichst umfassend und tiefgreifend erfolgen. Im Idealfall wären dazu keine experimentellen, begleitenden Untersuchungen notwendig.

Einführung in die theoretischen Grundlagen

Systematik und Grundbegriffe

Es ist üblich, die Trocknung über die Art der an das Trockengut erfolgenden Wärmezufuhr zu systematisieren. Es wird im wesentlichen unterschieden nach

- Konvektionstrocknung (Antransport der Wärme durch Wärmeübergang vom Trocknungsmittel, z. B. Luft, an die Gutoberfläche)
- Kontaktstrocknung (Antransport durch Kontakt des Gutes mit beheizten Flächen, damit Wärmeleitung durch das Gut)
- Strahlungstrocknung (Transport ohne ein Wärmeträgermedium durch Wärmestrahlung von heißen Flächen oder Heizelementen)

Zusätzlich kann auch über die Art der Abführung des Feuchtedampfes eine Unterscheidung vorgenommen werden.

Für die Behandlung der Trocknung sollen im folgenden zunächst einige wichtige Grundbegriffe definiert und vorgestellt werden.

Gutfeuchtigkeit

Die mittlere Gutfeuchtigkeit (Feuchtebelastung) ist definiert durch

$$\chi = \frac{m_f - m_{tr}}{m_{tr}}. \quad \text{Glg. 1}$$

Mit m_f als Masse des feuchten Gutes und m_{tr} als Masse des trockenen Gutes.

Relative Luftfeuchte

Für eine gegebene Temperatur ist die relative Luftfeuchte gegeben durch

$$\varphi_L = \frac{p_{D,L}}{p_s} \cdot 100 [\%]. \quad \text{Glg. 2}$$

Mit $p_{D,L}$ als Wasserdampfpartialdruck in der Luft und p_s als Sättigungsdruck des Wassers in Luft für die gegebene Temperatur.

Feuchte kann durch unterschiedliche Mechanismen in einem Gut gehalten werden.

Zunächst wird unterschieden, ob das gebundene Wasser sich von Wasser an einer hinreichend großen, freien Wasseroberfläche unterscheidet. Für Abtropfwasser, Haftwasser (durch unspezifische Benetzung als Film auf Oberflächen) und Grobkapillarwasser ist dies nicht der Fall.

Bei Wasser in Kapillaren ab Radien $< \text{ca. } 10^{-6} - 10^{-7} \text{ m}$ machen sich Dampfdruckerniedrigungen des Wassers bemerkbar. Ist eine Gutoberfläche durch die kondensierte Feuchte benetzbar (für viele Oberflächen, insbesondere anorganische als Hochenergieflächen, ist dies für die stark polare Phase Wasser der Fall) ist über der stark gekrümmten Wasseroberfläche der Sättigungsdampfdruck im Vergleich zu einer freien, nicht gekrümmten Oberfläche erniedrigt. Dringt feuchte Luft in eine genügend enge Kapillare ein, wird daher Kondensation eintreten („Kapillarkondensation“).

Wasser kann auch durch stets stattfindende Physisorption gebunden werden, insbesondere auf Hochenergieflächen kann davon ausgegangen werden. Chemisorption und Absorption (z. B. in quellfähigen Polymermaterialien) stellen weitere Möglichkeiten für die Feuchtebindung dar.

Porosität und Hygroskopizität

Eine wichtige Unterscheidung von Trockengütern erfolgt über die Porosität des Systems. Die Einzelkörner eines dispersen Feststoffes (z. B. nach Fällung oder auch nach Nassmahlung) spannen nach den vorgelagerten mechanischen Verfahrensschritten als Agglomerat mit dem Zwischenkornvolumen ein mehr oder weniger kompliziertes Porensystem auf. Die Verteilung dieses Systems auf Grob- bzw. Feinkapillaren hängt von der realen Form und der Packung der Partikeln ab. Weiterhin ist wesentlich, ob das Einzelkorn selbst porös ist, also u. U. eine hohe innere Oberfläche besitzt. Diese Eigenschaft zusammen mit dem äußeren Kapillarsystem entscheidet mit Physisorptions- und Chemisorptionseffekten über die Hygroskopizität des Trockengutes. Ist der Anteil an Fein- und Feinstkapillaren genügend hoch, wird solange Wasserdampf in das Gut einkondensieren, bis die Kapillaren mit dem über den gegebenen Wasserdampfpartialdruck kritischen Kapillarradius gefüllt sind. Dies führt zu einer deutlichen Feuchtezunahme des Gutes. Diese Zusammenhänge müssen für eine reales Gut in der Regel experimentell ermittelt werden und werden in einer *Sorptionsisotherme* dargestellt (siehe Abb. Gnielinski et.

Al. S. 188). Hygroskopische Güter weisen also Effekte wie Kapillarkondensation, Chemisorption und (bei entsprechend großen Flächen) nennenswert Physisorption auf. Solche Güter können nur soweit getrocknet werden, wie die Feuchtebelastung der Sorptionsisotherme für die eingesetzte relative Feuchte der Trockenluft vorgibt.

Nichthygroskopische Güter weisen nur Abtropf-, Haft- und Grobkapillarwasser auf. Dampfdruckvermindernde Effekte fehlen also. Die Oberfläche ist zu klein, als dass die Beiträge der Physisorption, gemessen an der Trockenmasse des Gutes, nennenswerte Feuchtwerte liefern könnten. Diese Güter können also auch mit sehr feuchter Luft grundsätzlich vollständig getrocknet werden.

Hygroskopizität und vor allem die Art und das Ausmaß der Porosität üben einen ganz entscheidenden Einfluss auf den Trocknungsverlauf aus.

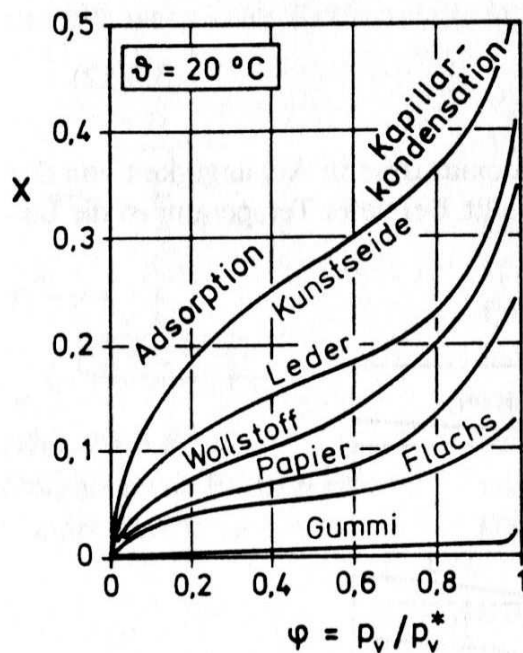


Abb. 1
Sorptionsisothermen verschiedener, realer Trocknungsgüter
 p_v Wasserdampfpartialdruck, Index * = Sättigungsdruck
Quelle: [1]

Quantitative Behandlung der Konvektionstrocknung - Trocknungskinetik

Es sei vorab bemerkt, dass die Behandlung der Trocknung sich üblicherweise auf die Betrachtung der Enthalpie h des Trocknungssystems als Funktion der Feuchtebelastung Y der Trocknungsluft stützt. Es werden daher mittels des so genannten Mollier'schen h/Y -Diagramms für feuchte Luft Zustandsänderungen des Systems unter Verwendung der kennzeichnenden Parameter Temperatur und Luftfeuchte beschrieben. Differentielle Bilanzen bei adiabaten Vorgängen, Mischungen von Luftmassen unterschiedlicher Zustände, Definition von Taupunkten und Kühlgrenztemperaturen können auf dieser Basis sehr effektiv vorgenommen werden.

Für den hier durchzuführenden Versuch kann auf diese wichtige und einem Ingenieur vertraute Sichtweise verzichtet und auf die Literaturhinweise am Ende verwiesen werden. Die Trocknung wird hier auf die Größen im Zusammenhang mit dem klassischen kinetischen Experiment zur Trocknung, bei dem sich während der Trocknung der Zustand der Luft nicht ändert, reduziert.

Für die Behandlung der Trocknungskinetik wird die Größe *Trocknungsgeschwindigkeit* definiert:

$$\dot{m} = \frac{dm}{dt} \approx \frac{\Delta m}{\Delta t} . \quad \text{Glg. 3}$$

Die Auftragung der Trocknungsgeschwindigkeit über der Zeit liefert die Trocknungskurve. Beispielhaft ist ein typischer Verlauf für ein poröses und nichthygroskopisches Gut in Abb. 2 wiedergegeben. In der Trocknungstechnik ist es jedoch verbreiteter, die Trocknungsgeschwindigkeit über der Gutfeuchte χ aufzutragen.

Bei einem porösen Gut ergibt sich (nach einem hier nicht näher berücksichtigten instationären Aufheizvorgang) ein mehr oder weniger weiter Abschnitt konstanter Trocknungsgeschwindigkeit, ab einem Knickpunkt bis schließlich zum Trocknungsende dann gefolgt von stetig sinkender Trocknungsgeschwindigkeit.

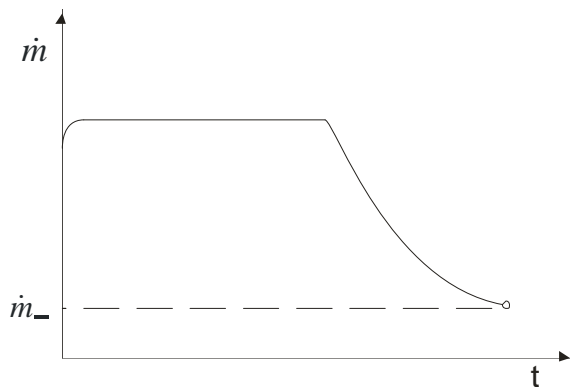


Abb. 2
Trocknungskurve eines porösen, nichthygroskopischen Gutes bei der Konvektionstrocknung, prinzipieller Verlauf

Ist das trockene Gut durch Wasser benetzbar, kann in guter Näherung zumindest für den Beginn der Trocknung von einem geschlossenen Wasserfilm auf der Gutoberfläche ausgegangen werden. Die Trocknung wird dann dadurch behandelt, als fände Verdunstung an einer freien Wasseroberfläche statt.

Es findet dabei gleichzeitig Wärmetransport durch Übergang von der konvektiv bewegten Trocknungsluft an die Verdunstungsfläche und von dort Stofftransport des Wasserdampfs durch Übergang in die Trocknungsluft statt. Die Transportprozesse unter Bedingungen der erzwungenen Konvektion der Trockenluft kann hier mit dem bekannten Filmmodell veranschaulicht werden. Es wird wie üblich von einer Grenzschicht an der Gutoberfläche ausgegangen, in diese Grenzschicht wird der gesamte Widerstand für den Transport durch reine Wärmeleitung bzw. molekulare Diffusion gelegt. Außerhalb dieser Grenzschicht wird durch die (turbulente) Konvektion von vollständiger Durchmischung ausgegangen.

Das wichtige Merkmal eines porösen Gutes ist, dass der Wasserverlust an der Gutoberfläche stets durch kapillare Saugeffekte und damit makroskopischen Feuchtetransport aus dem Gutinneren ausgeglichen wird. Die Trocknungsverhältnisse bleiben also für eine gewisse Zeit konstant. Dies entspricht dem Abschnitt konstanter Trocknungsgeschwindigkeit in Abb. 2. Der äußere Porenraum eines realen Gutes, also die Verteilung von Lückenvolumina, die dadurch komplizierte Verteilung von Hohlraumradii und damit die Merkmale des Kapillartransports, ist nicht leicht zu beschreiben. Wann die mit Feuchtwasser gefüllten Kapillaren effektiv beginnen trocken zu fallen und der kapillare Nachtransport an die Gutoberfläche damit zum Erliegen kommt, kann im Grunde nur experimentell festgestellt werden. Dies macht sich in der Trocknungskurve als Knickpunkt bemerkbar. Ab diesem Punkt beginnt sich die Gesamtheit der Verdunstungsstellen (der *Trockenspiegel*) von der Gutoberfläche in das Gut zurückzuziehen. Für den Stoff- und Wärmetransport erwächst dadurch ein stetig zunehmender Transportwiderstand – die Trocknungsgeschwindigkeit sinkt (weiteres siehe unten).

Im Folgenden soll nun die Behandlung der Trocknungskinetik auf eine quantitative Basis gestellt werden.

Die dafür getroffenen Festlegungen für das System sind:

- Poröses, nichthygroskopisches Gut
- Die gesamte Energie für die Verdampfung stammt aus dem Trockenmittel (Luft), der Energieaufwand zur Erwärmung
- Der Trockenluftzustand ändert sich während der Trocknung nicht.

Für den Wärmetransport durch Wärmeübergang lässt sich formulieren

$$\dot{Q} = \alpha \cdot A \cdot (T_L - T_O) \quad \text{Glg. 4}$$

mit dem Index L für Trockenluft und O für Gutoberfläche.

Analog gilt für den Stoffübergang

$$\dot{m} = \beta \cdot \frac{M}{RT} \cdot A \cdot (p_{D,O} - p_{D,L}) \quad \text{Glg. 5}$$

Ist die Temperatur an der Oberfläche messtechnisch zugänglich ist $p_{D,O}$ durch den Sättigungsdruck für Wasser und diese Temperatur an der Oberfläche (bzw. Verdunstungsstelle) und mit der bekannten Luftfeuchte damit die Triebkraft zahlenwertmäßig bekannt.

Für den Transport des Wasserdampfes stellt die Wasseroberfläche als Phasengrenze und Ort der Verdunstung stoffmengenmäßig eine tatsächliche Quelle dar. Die Trockenluft ist für diese Stoffmenge eine Senke, der dadurch existierende Konzentrationsunterschied führt zu einem molekularen Ausgleichsvorgang (=Diffusionsstrom). An jeder Stelle des Systems, also auch an der Phasengrenze, muss der Gesamtdruck – die Summe aus Partialdruck des Wasserdampfes und Partialdruck des Trockenmittels Luft – konstant sein. Dies bedeutet, dass der Teildruck der Luft an der Wasseroberfläche kleiner ist als im Kern der Trockenluft. Dieser Gradient entsteht jedoch nicht dadurch, dass die Wasseroberfläche eine Senke für die Luftmoleküle darstellt (beispielsweise durch chemische oder physikalische Absorption), die Luftmoleküle verschwinden dort nicht. Dieser Umstand wird daher auch durch die Verwendung des Begriffs Inertgastrocknung (=keine Reaktion/Absorption des Trockenmittels) abgebildet oder durch die Bezeichnung einseitige Diffusion, d. h. molekulare Diffusion nur in eine Richtung (hier die des Wasserdampfes); die Phasengrenze (Wasseroberfläche) wirkt wie eine semipermeable Membran – durchlässig nur für Wassermoleküle.

Dieser statische Druckunterschied der Trockenluft führt zu einem konvektiven Beitrag in Richtung Phasengrenze, der, weil das Gesamtsystem ja in Ruhe verbleiben muss, von der Phasengrenze weg durch einen zusätzlichen Strom (*Stefan-Strom*) – nun durch Wasserdampf – ausgeglichen wird. Effektiv fällt dadurch der Wasserdampfstrom höher aus, als rein diffusive Beiträge bei Ansatz des Fickschen Gesetzes für zweiseitige Diffusion ergäben.

Der sich unter den hier beschriebenen Bedingungen tatsächlich ergebende Stoffstrom wird durch das *Stefansche Diffusionsgesetz* ausgedrückt:

$$\dot{m} = \beta \cdot \frac{M}{RT} \cdot A \cdot \frac{P}{P - p_{D,m}} \cdot (p_{D,O} - p_{D,L}) \quad \text{Glg. 6}$$

wobei der mittlere Wasserdampfpartialdruck durch

$$p_{D,m} = \frac{p_{D,o} - p_{D,L}}{\ln \frac{p_{D,o}}{p_{D,L}}} \quad \text{Glg. 7}$$

definiert ist, der aber oft durch das einfache arithmetische Mittel ersetzt werden kann. Der in Glg. 6 als Korrektur eingeführte Stefan-Strom macht sich also um so stärker bemerkbar, je stärker die Triebkraft für den diffusiven Stoffstrom ist, hier der Unterschied des Wasserdampfpartialdrucks zwischen Verdunstungsstelle Wasseroberfläche und der mittleren Feuchte im Kern der Trocknungsluft.

Der in der Trocknungskurve erkennbare konstante Abschnitt stellt einen stabilen, so genannten Beharrungszustand dar. Im Sinne des Filmmodells sind die Gradienten für die Temperatur und den Wasserdampfpartialdruck zeitlich stabil eingestellt. Die Temperatur an der Wasseroberfläche ändert sich nicht mehr (*Beharrungstemperatur*). Dieser stationäre Zustand kann durch folgende Bedingung ausgedrückt werden:

$$\dot{Q} = \dot{m} \cdot L_v \quad \text{Glg. 8}$$

Mit Glgn. 4 und 5 ausformuliert ergibt sich damit

$$(T_L - T_o) = \frac{L_v M}{RT} \cdot \frac{\beta}{\alpha} \cdot (p_{D,o} - p_{D,L}). \quad \text{Glg. 9}$$

Diese Gleichung stellt die Grundlage für ein zuverlässiges und vergleichsweise einfaches Verfahren zur Bestimmung der relativen Luftfeuchtigkeit mittels eines Schleuder-Hygrometers (Psychrometer) dar. Der Kolben eines klassischen Thermometers wird dabei mit einem gut befeuchteten Vlies umhüllt. Die Anordnung wird bis zur Einstellung der Beharrungstemperatur durch die Luft geschleudert. Wenn für den Quotienten α/β ein Zugang besteht (siehe unten), ist die Luftfeuchte dadurch auf gemessene (Temperaturen) bzw. bekannte Stoffgrößen des Wasserdampf/Luft-Systems zurückgeführt.

Soll der Trocknungsprozess über die Glgn. 4 und 5 (bzw. Glg. 9) theoretisch vorab behandelt werden, sind die Übergangskoeffizienten α und β dabei jedoch zunächst noch unbekannt.

Einen Zugang zu diesem Problem liefert die Ähnlichkeitstheorie. In bekannter Weise können für den Fall einer erzwungenen Konvektion die folgenden Kennzahlen definiert werden:

$$Nu = \frac{\alpha \cdot d}{\lambda} \quad (\text{Nusselt}) \quad \text{Glg. 10}$$

$$Sh = \frac{\beta \cdot d}{D} \quad (\text{Sherwood}) \quad \text{Glg. 11}$$

$$Re = \frac{\rho \cdot u \cdot d}{\eta} \quad (\text{Reynolds}) \quad \text{Glg. 12}$$

$$Pr = \frac{\nu}{a_T} = \frac{\rho \cdot c_p \cdot \nu}{\lambda} = \frac{c_p \cdot \eta}{\lambda} \quad (\text{Prandtl}) \quad \text{Glg. 13}$$

$$Sc = \frac{\nu}{D} \quad (\text{Schmidt}) \quad \text{Glg. 14}$$

Die Nusselt- und die Sherwood-Zahl sind ihrerseits über Kriteriengleichungen der Form

$$Nu = C \cdot Re^m \cdot Pr^n \quad \text{Glg. 15}$$

bzw.

$$Sh = C \cdot Re^m \cdot Sc^n \cdot \frac{P}{P - p_{D,m}} \quad \text{Glg. 16}$$

darstellbar.

Dividiert man die Glg. 15 durch 16 und setzt weiter für Nu und Sh die Glg. 10 und 11 ein ergibt sich

$$\frac{\alpha}{\beta} = \frac{\lambda}{D} \cdot \left(\frac{Pr}{Sc}\right)^n \cdot \left(1 - \frac{p_{D,m}}{P}\right) \quad \text{Glg. 17}$$

In der Literatur werden verschiedene Gültigkeitsbereiche für den Exponenten n angegeben, z. B.:

- Rein laminare Strömung n = 0
- Turbulente Strömung im Gasraum, laminare Grenzschicht an Platten n = 1/3
- Rein turbulente Strömung n = 1

Bei vielen Trocknungsprozessen kann mit hinreichender Genauigkeit $p_{D,m}/P \ll 1$ angenommen werden. Das letzte Glied in Glg. 17 kann dadurch entfallen und für den Fall einer rein turbulenten Strömung resultiert das *Lewis'sche Gesetz* als Grenzgesetz

$$\frac{\alpha}{\beta} = \rho \cdot c_p \cdot \quad \text{Glg. 18}$$

Dieses Gesetz kann für erste Abschätzungen des Trocknungsgeschehens (im 1. Abschnitt) benützt werden, schon weil es lediglich mit einfach zugänglichen Größen der Feuchtluft formuliert ist (Stoffdaten siehe Tab. 2).

In der Literatur ist für Glg. 17 auch eine alternative Form angegeben, die sich auf die Lewis-Kennzahl stützt,

$$Le = \frac{\text{Wärmeleitstrom}}{\text{Diffusionsstrom}} = \frac{a_T}{D} = \frac{\lambda}{D \cdot \rho \cdot c_p} = \frac{Sc}{Pr} \quad \text{Glg. 19}$$

Es ergibt sich darüber dann

$$\frac{\alpha}{\beta} = \rho \cdot c_p \cdot Le^{(1-n)}, \quad \text{Glg. 20}$$

wenn der Druckterm vernachlässigt wird. Für den rein turbulenten Fall mit $n = 1$ ergibt sich auch hier wieder das Lewis'sche Grenzgesetz. Die die Lewis-Zahl definierenden Stoffwerte ergeben für das Wasserdampf/Luft-System in größeren Temperatur- und

Partialdruckbereichen für Le Werte nahe 1. Die Sensitivität des Quotienten α/β von der Wahl des Exponenten ist daher nicht übermäßig groß. Im Bild des Filmmodells ist das gut nachvollziehbar, da die Transportkoeffizienten α und β in gleichem Maße von den Strömungsverhältnissen beeinflusst werden, wenn die Abhängigkeiten in einfacher Näherung ganz auf die Dicke der laminaren Grenzschicht reduziert werden.

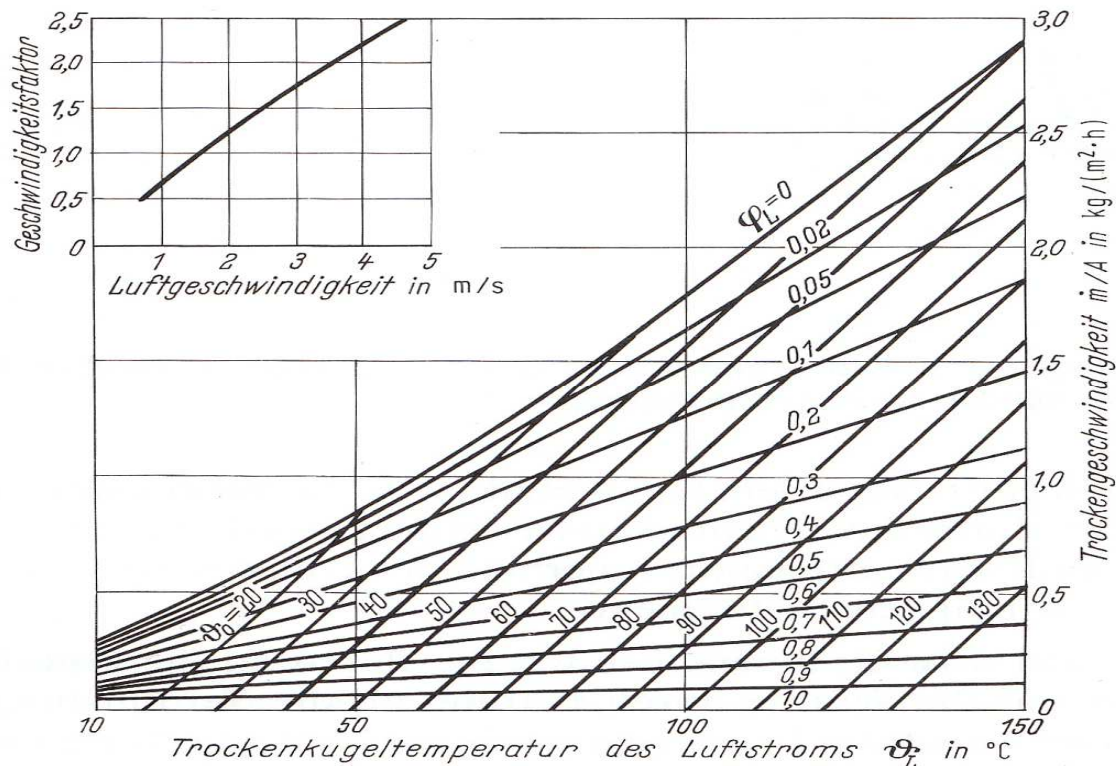


Abb. 3 Shepherd-Diagramm zur Abschätzung der Trockengeschwindigkeit im konstanten Trockenabschnitt, v_L als Temperatur der Trockenluft (= Trockenkugeltemperatur), v_0 als Oberflächentemperatur (= Feuchtkugeltemperatur), φ_L als relative Luftfeuchte (Abb. aus [1])

Eine weitere Möglichkeit, die Trockengeschwindigkeit im konstanten Abschnitt der Trocknung für die Praxis abzuschätzen, ist die Verwendung des Shepherd-Diagramms [5] (Abb. 3). Dieses Diagramm basiert auf einer Vielzahl von Messungen an einem Sand/Wasser-Gemisch als Trockengut unter erzwungener Konvektion. Das Diagramm wird benutzt, indem von der Trockenlufttemperatur ausgehend der Schnittpunkt mit der gegebenen Feuchtekurve gesucht wird. Der Ordinatenwert des Schnittpunkts liefert eine Trocknungsgeschwindigkeit die schließlich noch mit einem Geschwindigkeitsfaktor (Inlay des Diagramms) multipliziert wird. Die Quelle erwähnt als Grundlage der Abhängigkeit von der Konvektion die 0,8. Potenz von der Windgeschwindigkeit.

Wie bereits angedeutet, bricht der kapillare Feuchtetransport aus dem Gutinneren an die Gutoberfläche irgendwann zusammen bzw. die durch Kapillareffekte transportierte Feuchte entspricht nicht mehr der Menge, die an der Oberfläche verdunsten kann. Der Ort der Feuchteverdampfung zieht sich in das Gutinnere zurück. Zur bis dahin rein äußeren Transportlimitierung treten zusätzliche, innere Widerstände hinzu. Die Temperatur der Gutoberfläche wird von nun an steigen. An diesem Temperaturanstieg kann der Beginn des 2. Trocknungsabschnittes auch am genauesten detektiert werden. Es bilden sich im Gut ein Temperatur- und ein Wasserdampfdruckgradient aus. Die Wärmeleitfähigkeit des trockenen Gutes hängt in komplizierter Weise von der Wärmeleitfähigkeit und der Art, Lage und Häufigkeit der Kontaktstellen des Festkörpers ab. Zusätzlich findet Wärmeleitung auch über

die Gasphase im Porenraum des Gutes statt. Diese wiederum kann nicht über die reine Dicke der Trockengutschicht beschrieben werden, sondern hängt von den effektiven Porenängen des Porensystems ab. Das letztere gilt gleichermaßen für den diffusiven Wasserdampftransport von den Verdunstungsstellen an die Gutoberfläche. Wärmeleitfähigkeit und Diffusionskoeffizient durch das Gut werden dadurch zu effektiven Größen, die mittels Tortuositäts- und Labyrinthfaktoren bzw. Diffusionswiderstandszahl modifiziert werden. Sie sind daher vernünftig nur auf experimentellem Weg zugängliche Größen.

Die Widerstandslage für den Trocknungsvorgang verschiebt sich bereits nach kurzer Zeit des 2. Abschnittes sehr deutlich bis vollständig auf die Gutseite. Die äußeren Konvektionsbedingungen beeinflussen den Gesamtprozess also dann praktisch nicht mehr. Das ist im Bild des Filmmodells gut nachvollziehbar: Der Trockenspiegel braucht nur geringe Tiefen des realen Gutes zu erreichen (beispielsweise 1-2 mm, also einen eher kleineren Anteil der Schichtdicke vieler realer Trockengüter), um im Vergleich zu den dünnen, laminaren Grenzschichten (z. B. 0,1 mm) des Filmmodells vollständig zu dominieren.

Der Trocknungsverlauf des 2. Abschnitts soll in diesem Versuch nicht weiter behandelt werden. Es sei nur angemerkt, dass bei einem nichthygroskopischen Gut die letzte Feuchte mit einer *endlichen* Geschwindigkeit – der *Endtrocknungsgeschwindigkeit* – das Gut verlässt (wenn es sich nicht um den Sonderfall frei und gleichförmig angeströmter Kugeln oder Zylinder handelt). Danach ist die Trocknungsgeschwindigkeit null. Bei einem hygroskopischen Gut hingegen konvergiert die Trocknungsgeschwindigkeit allmählich gegen null, weil lediglich der Abstand zur Gleichgewichtsbeladung der Feuchte, gegeben durch die Sorptionsisotherme, zunehmend kleiner wird. Das Gut behält also eine Restfeuchte.

Auch wenn dieser Trocknungsabschnitt hier nicht behandelt werden soll, kann er für den Trocknungsprozess von großer Bedeutung sein, zumindest muss das kinetische Experiment den gesamten 2. Abschnitt erfassen, weil nur dann das zeitliche Trocknungsende (definiert durch die gewünschte Restfeuchte) angegeben und der dafür nötige Gesamttrocknungsaufwand beurteilbar wird. Die geringe Trocknungsgeschwindigkeit unter Gutlimitierung kann zu langen Trocknungszeiten führen und im Falle kontinuierlicher Trocknung aufwändig lange Trocknungstrecken bedingen, wenn kleine Restfeuchten gefordert sind. Die Trocknungsgeschwindigkeit kann hier nur erhöht werden, wenn die Gutoberfläche durch entsprechend heiße Trockenluft auf hohe Temperaturniveaus gebracht wird. Wenn es das Trockengut verträgt, wäre eine kontinuierliche Trocknung dann im Gegenstrom günstig, weil heiße, frische Trocknungsluft das Trocknungsgut am Trocknerausgang dann bis zur Endtrockne führt.

Trocknungstechnik

Die Verfahrenstechnik der thermischen Trocknung hat eine ausgesprochen große Vielfalt an Trocknertypen hervorgebracht. Die wichtigste Systematisierung ist die eingangs bereits erwähnte Unterscheidung nach Kontakt- und Konvektionstrocknern. Jeder dieser Bereiche enthält wiederum eine breite Palette an unterschiedlichsten Bauformen die sich – im Falle der kontinuierlichen Trocknung – durch die Art der Gutbewegung, der relativ dazu ausgeführten Trockenluftbewegung und deren Strömungszustand sowie Gesichtspunkten der Gleich-, Gegen- und Kreuzstromführung unterscheiden.

Die konkrete Entscheidung für eine bestimmte Trocknerbauform hängt in recht komplexer Form von exemplarisch folgenden Faktoren ab:

- Eigenschaften des feuchten Trockengutes wie mechanische Beschaffenheit und Fließ- bzw. Rieseigenschaften, Art der Feuchtebindung, Grad der Porosität, Hygroskopizität, Schrumpfverhalten

- Eigenschaften des angetrockneten bzw. trockenen Gutes wie thermische Beständigkeit und Abriebfestigkeit, Agglomerationsverhalten, gewünschte Eigenschaften des Endproduktes wie Restfeuchte, Partikelgröße und Rieselfähigkeit
- Gesichtspunkte wie Raumbedarf, Investitions- und vor allem Betriebskosten

Selbstredend gelten die hier genannten Gesichtspunkte sinngemäß auch für chargenweise betriebene Trocknungsprozesse.

In Tab. 3 sind beispielhaft nur für den Fall der Konvektionstrocknung charakteristische Merkmale verschiedener Trocknerbauformen zusammengestellt.

Trocknertyp	Gutsbeschaffenheit	Spezifische Verdunstungsleistung [kg Wasser/ m ² · h]	Spezifischer Wärmebedarf [kJ/kg Wasser]	Trocknertyp – spezifische Daten	Betriebsform k Kontinuierlich d absatzweise
Kammertrockner	stückig bis pastös, kleine Mengen	0,15 bis 1,5 für überbelüftetes Gut 0,1 bis 12 für durchbelüftetes Gut	6000 bis 15000	Schichtdicke auf den Horden: 20 bis 100 mm	d
Darre	landwirtschaftliche Erzeugnisse	6 bis 20	5000 bis 6000	Schichtdicke: 150 bis 200 mm Luftgeschwindigkeit: 0,2 bis 1 m/s	d, d–k
Kanaltrockner	große Mengen stückiger bis pastöser Güter	0,2 bis 12	4400 bis 5000	Schichtdicke: 20 bis 50 mm Kanallänge: 20 bis 60 m Kanaltiefe: 3 bis 6 m Luftgeschwindigkeit: 2 bis 3 m/s	d–k
Bandrockner	grobstückige, sperrige, faserige Güter in großen Mengen	5 bis 20	4000 bis 5000	1 bis 5 Bänder übereinander Bandnutzlänge: 5 bis 50 m Bandnutzbreite: 0,5 bis 3 m Bandnutzfläche: 3 bis 100 m ² Bandgeschwindigkeit: 0,3 bis 0,6 m/min Luftgeschwindigkeit: 2 bis 3 m/s	k
Tellertrockner	schaufelbare Schüttgüter, pulverig, pastös, stückig	5 bis 15	4400 bis 5000 bei Konvektionstrocknung 3000 bis 3800 bei Kontakt-trocknung	Tellerdurchmesser: 2 bis 5 m Tellerfläche: 20 bis 900 m ² Drehzahl: 0,5 bis 3 min ⁻¹ Schichtdicke: 10 bis 20 mm Luftgeschwindigkeit: ≈ 2 m/s Leistungsaufnahme: 6 bis 25 kW	k
Trommeltrockner	nichtklebende, stückige, pulverige oder kristalline Güter; große Durchsätze	25 bis 50 (kg/m ³ · h) bei direkter Beheizung (3 bis 200 kg/m ³ · h)	4000 bis 8000	Trommeldurchmesser: 1 bis 4 m Verhältnis Trommellänge/Trommeldurchmesser: 4 bis 7 Trommeldrehzahl: 0,5 bis 10 min ⁻¹ Trommelneigung: 1 bis 6° Luftgeschwindigkeit: 2 bis 3 m/s	(d) k
Stromtrockner	pulverige, kristalline, feinkörnige, pneumatisch förderbare Güter	25 bis 500 kg/m ³ · h	4000 bis 8000	Stromrohrdurchmesser: 0,3 bis 1,2 m Stromrohlänge: 15 bis 30 m Strömungsgeschwindigkeit: 10 bis 40 m/s Korngröße: 0,01 bis 10 mm Trockenzeit: 2 bis 8 s Leistungsaufnahme: 15 bis 100 kW	k
Zerstäubungstrockner	dünn- und dickflüssige, breiartige und pastöse Güter, hohe Durchsatzleistung	1,5 bis 50 kg/m ³ · h	4000 bis 10000	Turmdurchmesser: bis ≈ 6,5 m Bauhöhe: bis ≈ 20 m Spezifischer Luftbedarf: 8 bis 45 Nm ³ /kg Wasser Leistungsaufnahme: 0,1 bis 0,3 kW/kg Wasser	k

Tab. 1

Charakteristische Merkmale einiger Trocknerbauformen aus dem Bereich der Konvektionstrocknung, Quelle: [2]

Durchführung des Versuches

Versuchsaufbau

Die Trocknungsapparatur ist in Abb. 4 skizziert. Das wabenförmige Heizelement und das

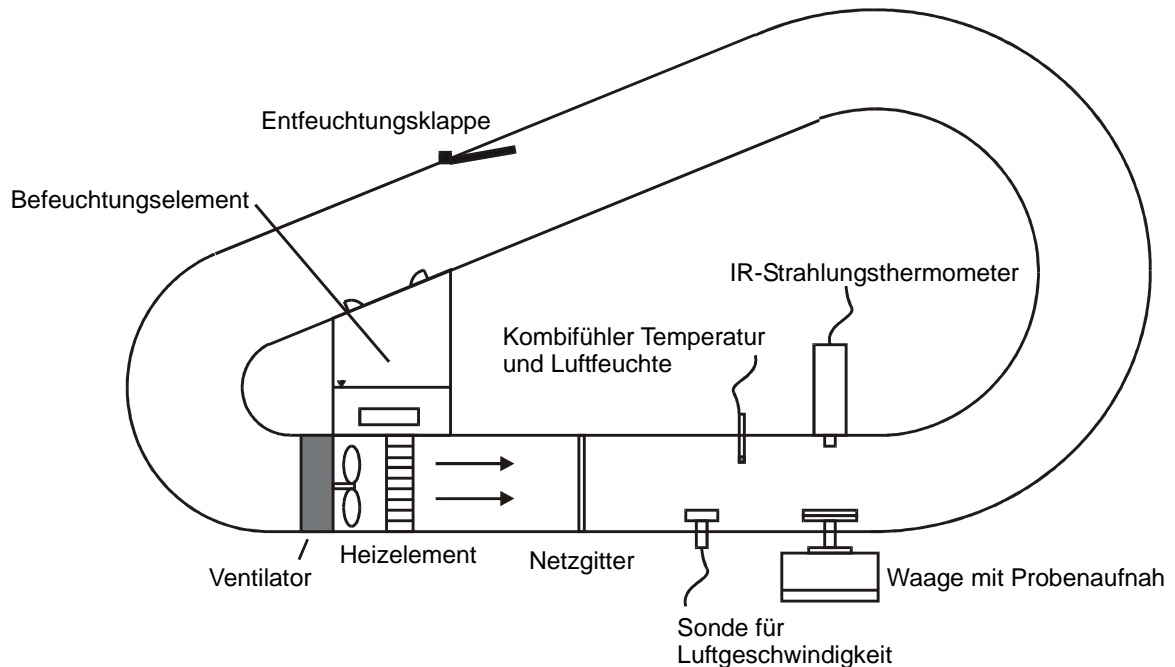


Abb. 4 Sisse des Versuchsaufbaus

folgende Gitternetz sollen helfen, ein möglichst gleichmäßiges, drallfreies Strömungsfeld zu erreichen. Über eine Öffnung gelangt ein Teilluftstrom in das Befeuchtungselement und überströmt die darin befindliche Wasseroberfläche. Bereits dadurch wird teilweise erreicht, dass die einzuhaltende Luftfeuchte der Trockenluft konstant bleibt. Durch Austausch mit der Umgebung über Spalte und Undichtigkeiten dringt stets eine kleine Menge Außenluft in die Anlage, welche durch die dann erfolgende Aufheizung auf die Arbeitstemperatur die Luftfeuchte der Trockenluft erniedrigt. Sinkt die Luftfeuchte unter den Sollwert wird durch den Ultraschallgeber eine kleine Wassermenge verdampft und als Nebel durch den Luftstrom in den Trockenluftstrom des Kanals gebracht. Die Belüftungsklappe an der Kanaloberseite dient andererseits als Möglichkeit zum kontrollierten Luftaustausch mit der Umgebung um zu hohe Luftfeuchten absenken zu können. Diese beiden gegenläufigen Maßnahmen gestatten es, die relative Luftfeuchte in relativ engen Grenzen gut konstant zu halten. Die Oberflächentemperatur des Trockengutes wird berührungslos über ein Strahlungsthermometer (Pyrometer) erfasst. Die **angezeigte** Temperatur weicht von der tatsächlichen ab und diese Abweichung ist über Kalibriermessungen erfasst und in dem Excelfile für die Auswertung eingearbeitet. Die Luftgeschwindigkeit wird mittels eines kleinen Flügelradanemometers kurz vor der Probenbühne auf Höhe des Probentellers gemessen. Das Probengewicht wird direkt im bewegten Luftstrom mit einer oberhalbigen Waage erfasst. Eine geeignete Probenaufnahme sitzt, durch eine Bohrung des Kanals durchgeführt, auf der Waage auf. Die durch die Konvektion erzeugten Schwankungen der Messung sind tolerabel klein.

In die Handhabung des die Anlage steuernden μ -Controllers wird durch den Versuchsbetreuer eingeführt. Ebenso in die Bedienung der Lüfteransteuerung.

Versuchsablauf

Der Trocknungskanal muss zu Beginn mit einer Luftgeschwindigkeit von 2 m/s in Betrieb genommen werden, damit zunächst ein stationärer Zustand der Anlage mit den gewünschten Betriebsparametern erreicht wird.

Während dieser Aufheizphase wird in einem bereitgestellten, verschließbaren Gefäß 180 g Sand einer bestimmten Kornfraktion (vom Betreuer festgelegt) mit 33 g Wasser eingewogen. Dieses Gemisch muss intensiv geschüttelt werden, damit eine homogene Feuchteverteilung des Trockengutes sichergestellt ist. Dieses Gemisch dient als Vorrat für die drei durchzuführenden Messungen.

Als nächstes ist das Gewicht der leeren Probenschale zu bestimmen und der Innendurchmesser der Probenschale auszumessen.

Ist die Trockenanlage stationär, wird die Probenschale möglichst gleichmäßig, ohne Freiräume mit dem Trockengut befüllt und die Schicht mit einem Gefäßdeckel leicht angedrückt und glattgestrichen. Im Idealfall soll das Trockengut plan mit der Schalenoberkante abschließen.

Die Waage der Anlage wird nun tariert und die Probe auf den Probenteller aufgesetzt. Die Waage danach nicht wieder tarieren! Sogleich wird die ausstehende Stoppuhr in Gang gesetzt und die Startwerte für Gewicht und Oberflächentemperatur in die Exceltabelle eingetragen.

Die zunächst erfolgende instationäre Aufheizung des Gutes wird im Minutenabstand gemessen. Nach ca. 10 Minuten hat sich der konstante Beharrungszustand eingestellt und das Messintervall kann auf 5 Minuten (bei 1 bzw. 2 m/s) bzw. 3 Minuten (1 m/s) erhöht werden. Sobald bei der Messung die Oberflächentemperatur signifikant zu steigen beginnt, d. h. der Knickpunkt zum 2. Trockenabschnitt ist erreicht, wird das Messintervall wieder auf 1 Minute reduziert und so lange gemessen, bis die Temperaturänderung hinreichend klein geworden ist. Es muss keinesfalls bis zur Temperaturkonstanz gemessen werden.

Nach dieser Messung wird die Probenschale entnommen und das trockene Gut in ein Übergabefäß gegeben. Die neue Windgeschwindigkeit wird eingestellt. Die Stationarität der Anlage kontrolliert, sodann die Probenschale erneut befüllt und die nächste Messung gestartet.

Für den Versuch ist die Temperatur der Trocknungsluft auf 50° C festgelegt.

Die relative Luftfeuchte ist mit 20% vorgegeben.

Es wird bei Windgeschwindigkeiten von 1 bzw. 2 bzw. 3 m/s der vollständige Trocknungsverlauf gemessen.

Alle Messdaten werden fortlaufend am Rechner des Versuchstandes in das Excelfile eingetragen.

Auswertung und Diskussion

Es sind folgende Diagramme zu erstellen:

1. Masse über Zeit mit drei Windgeschwindigkeiten (in ein Diagramm)
2. Dito Temperatur über Zeit
3. Trocknungsgeschwindigkeit über Gutsfeuchte

Diagramm 1 ist geeignet, um über den linearen Verlauf und dessen Steigung die mittlere Trocknungsgeschwindigkeit des 1. Trockenabschnittes zu definieren.

Diskutieren Sie, ob der Einfluss der Windgeschwindigkeit auf das Temperaturniveau des Konstantabschnittes den Erwartungen entspricht.

Es soll eine Reynoldszahl für die Trockenluftströmung angegeben werden. Als Stoffdaten der feuchten Luft können dafür mit hinreichender Genauigkeit bei 50 °C für die Dichte 1,092

kg/m³, für die dynamische Viskosität 1,95·10⁻⁵ Pa·s genommen werden. Für den Durchmesser ist hier der hydraulische Durchmesser zu verwenden

$$d_{\text{äqu}} = \frac{4A_q}{U} \quad \text{Glg. 21}$$

Dabei ist A_q die durchströmte Querschnittsfläche des Kanals und U der benetzte Umfang der durchströmten Fläche. Die Innenabmessungen des Kanalquerschnitts sind 0,2 x 0,2 m.

Die weitere Diskussion bezieht sich ausschließlich auf den Abschnitt konstanter Trocknung und die dafür ermittelte Trocknungsgeschwindigkeit.

Es soll geprüft werden, ob die eigenen Experimente über das Lewis'sche Gesetz wiedergegeben werden können. Für diese Abschätzung können die folgenden Stoffdaten herangezogen werden:

Temperatur °C	20	50	80
$\rho \cdot c_p \cdot 10^{-3} \text{ J} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$	1,218	1,129	1,040

Tab. 2 Stoffdaten (Dichte und spez. Wärmekapazität) feuchter Luft für verschiedene Temperaturen

Es ist α/β als Funktion der Strömungsgeschwindigkeit anzugeben. Der Einfluss der Windgeschwindigkeit auf die Oberflächentemperatur ist festzuhalten und zu diskutieren, ob er den Erwartungen entspricht.

Weiterhin soll das Ergebnis der Abschätzung über das Shepherd-Diagramm mit den eigenen Ergebnissen verglichen werden.

Schließlich soll über den rein empirischen Ansatz

$$dm/dt = C \cdot w^m \quad \text{Glg. 22}$$

mit C als Konstante und w als der Windgeschwindigkeit der Versuch gemacht werden, einen Exponenten für den Strömungseinfluss auf die Trocknungsgeschwindigkeit zu bestimmen. Die Windgeschwindigkeit soll hier stellvertretend für die Reynoldszahl stehen. Der gefundene Exponent soll bei der Diskussion des Lewis'schen Gesetzes und des Shepherd-Diagramms berücksichtigt werden.

Es sollen plausible Vorschläge gemacht werden, Abweichungen zwischen Theorie und Experiment zu begründen.

Wichtige Lernziele

Nach der Ausarbeitung zu diesem Versuch sollte über die folgenden Gesichtspunkte der Trocknung ein grundlegender Überblick und ein sicherer Umgang mit den Begriffen erreicht werden:

- Analogie von Stoff- und Wärmetransport und die elementare Behandlung mittels Ähnlichkeitstheorie
- Kopplung von Stoff- und Wärmetransport als Beharrungszustand
- Wie sich eine äußere Stofftransportlimitierung in einem Trocknungsverlauf darstellt und warum das ein günstiger Umstand für eine Trocknung ist.

- Grundlegende Vorstellungen darüber, warum das gemachte kinetische Experiment wichtig für die Dimensionierung eines Trocknungsprozesses ist, d. h. für die Auswahl und die Betriebsweise eines Trockenapparates,.
- Vorstellungen darüber auf welche Weise wichtige Trockeneigenschaften wie Porosität und Hygroskopizität den Trocknungsverlauf beeinflussen.
- Was unter Trocknungsaufwand verstanden wird und welche den Trocknungsprozess kennzeichnenden Parameter diesen Aufwand maßgeblich festlegen.
- Mit dem Zahlenwert des gemessenen Wärmeübergangskoeffizienten nachvollziehen, dass beim Versuch A6 „Wärmetauscher“ ein Wärmeeintrag von der Umgebung an das Kaltwasser der einzelnen Wärmetauscher keine nennenswerten Beiträge für Fehler bei der Messung der Wärmeströme darstellen kann.

Symbolverzeichnis

a_T	Temperaturleitzahl	m^2s^{-1}
c_p	spez. Wärmekapazität bei konst. Druck	$Jkg^{-1}K^{-1}$
A	Fläche	m^2
d	charakteristische Abmessung	m
$d_{\text{äqu}}$	Äquivalentdurchmesse	m
D	Diffusionskoeffizient	m^2s^{-1}
L	Länge	m
L_v	spez. Verdampfungsenthalpie	Jkg^{-1}
Le	Lewis-Zahl	
m	Masse	kg
\dot{m}	Massenstrom	$kg s^{-1}$
M	Molmasse	mol
Nu	Nusselt-Zahl	
p	Druck, Partialdruck	Nm^{-2}
P	Gesamtdruck	Nm^{-2}
Pr	Prandtl-Zahl	
\dot{Q}	Wärmestrom = Wärmemenge pro Zeit	$W = kg m^2s^{-3}$
R	universelle Gaskonstante	$Jmol^{-1}K^{-1}$
Re	Reynolds-Zahl	
Sc	Schmidt-Zahl	
Sh	Sherwood-Zahl	
T	Temperatur	K
t	Zeit	s
U	Umfang	m
\dot{V}	Volumenstrom	m^3s^{-1}
w	Stömungsgeschwindigkeit	ms^{-1}
x	Abstand	m

α	Wärmeübergangskoeffizient	$\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$
β	Stoffübergangskoeffizient	ms^{-1}
χ	Gutsfeuchte	
φ	rel. Luftfeuchte	
η	dynamische Viskosität	$\text{kgm}^{-1}\text{s}^{-1}$
λ	Wärmeleitfähigkeit, Wärmeleitzahl	$\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$
ν	kinematische Viskosität	m^2s^{-1}
ρ	Dichte	kgm^{-3}

Indizes

<i>a</i>	außen
<i>D</i>	Dampf
<i>f</i>	feucht
<i>L</i>	Luft
<i>m</i>	<i>mittel</i>
<i>O</i>	Oberfläche
<i>p</i>	Anfangszustand
<i>q</i>	Querschnitt
<i>s</i>	Sättigung
<i>tr</i>	trocken

Literaturverzeichnis

1. Patat/Kirchner, Praktikum der Technischen Chemie, de Gruyter, 3. Auflage, 1975
2. Sattler, K., Thermische Trennverfahren, Vogel Verlag, 1977
3. Gnielinski V., Mersmann A., Thurner F., Verdampfung, Kristallisation, Trocknung, Vieweg, 1993
4. A. S. Mujumbar, Handbook of Industrial Drying, CRC Press, 3rd edition, 2006, Part I Chap. 1
5. Shepherd, C. B., Hadlock, C., Brewer R. C., Ind. Engng. Chem., 30 (1938), 388