

Neue Versuche an Trocknungsapparaten

Von

Prof. Dr. Saburo KAMEI und a. o. Prof. Dr. Ryozo TOEI

Chemie-Ingenieur Abteilung

(Received Feb., 1954)

I. Untersuchung über die Tunneltrockner.

Die vorliegende Untersuchung hat sich eine rechnerische Bestimmung der Vorrichtungen bezüglich des Tunnel- bzw. Bandtrockners. Zum Ziel gesetzt, und zwar wünschten die Verfasser die kontinuierlichen, charakteristischen Kurven der Trocknung zu gewinnen und weiter die Zeitdauer der Trocknung zu bestimmen, indem sie die Zahlenwerte benutzten, welche als Trocknungsgeschwindigkeit für die gegebenen Trocknungsbedingungen in einem beliebigen Schnitt des Trockners nach dem kombinierten Verfahren unter konstanten Bedingungen festgestellt wurden. Die Apparate, deren wir uns bedienen, sind einerseits die Tunneltrockner unter Anwendung des Gegenstrom-isothermalen, des Gegenstrom-adiabatischen und des Gleichstrom-adiabatischen Verfahrens wie auch der mehrstufigen Erhitzungsmethode und andererseits die Bandtrockner¹⁾ mittels des isothermalen Verfahrens sowie der mehrstufigen Erhitzungsmethode. In diesem Bericht aber beschränken wir uns auf die ersten zwei Apparate.

Zweck und Methode der Untersuchung

Zwar werden die Trocknungsapparate nach dem Tunnelsystem allgemein benutzt, aber eine grundlegende Untersuchung ist hier über noch kaum veröffentlicht worden, nur ein annähernder Entwurf für diese Apparate wird jetzt gewohnheitsgemäss gemacht. Obgleich mannigfache Untersuchungen betreffs der charakteristischen Kurven der Trocknung unter stetigen Bedingungen gemacht worden sind, kann man diese doch nicht ohne weiteres auf den Fall des Tunneltrockners in Anwendung bringen, weil die Bedingungen von Luft und Stoff je nach seiner Verwendung verschieden sind. Der hergebrachte Entwurf zum Trockner beruht auf der Annahme, dass die Trocknungsgeschwindigkeit in verlangsamter Trocknungsperiode sich je nach dem Verhältnis des freien Wassergehaltes vermindere oder dass sich in allen Fällen—so sagt man, wenn auch nur auf Grund eines Versuches²⁾—die Trocknungsgeschwindigkeit je nach dem Anteil der Feuchtigkeit verändere.

Neulich haben Broughton und Mickley einen neuen Entwurf bezüglich des Tunnel-trockners veröffentlicht. Er zeigt jedoch manches problematische und ist somit ungenügend.³⁾ In Hinblick hierauf haben die Verfasser für den Trockner einen genau durchdachten Entwurf gemacht, indem sie aus den charakteristischen Kurven der Trocknung unter konstanten Bedingungen die unkonstanten Bedingungen sowohl theoretisch als experimentell festzulegen suchten. Sie setzten nämlich die Trocknungsgeschwindigkeit in einem beliebigen Schnitt des Apparates unter unstetiger Trocknung derjenigen Geschwindigkeit gleich, welche man aus den konstanten charakteristischen Kurven gewinnen kann, die dem Wassergehalt des Stoffes im Schnitt und den Luftbedingungen entsprechen. Das ist theoretisch richtig betreffs der Oberflächenverdampfungsperiode, aber nur annähernd richtig betreffs der Periode der Deffusion im Innern des Feststoffes. Die Annahme in diesem Fall ist: die Trocknungsgeschwindigkeit, welche der von Anfang an unter einer gewissen Bedingung und in stetigem Zustand getrocknete Stoff bei einem bestimmten Wassergehalt zeigt, sei gleich derjenigen Geschwindigkeit, welche bei gleichem Wassergehalt und für gleicher Bedingung an einem Zeitpunkte auf dem Wege der unstetigen Trocknung auftritt. Da die zwei oben erwähnten Fälle bei dem von den Verfassern angestellten Experiment den annähernden Trocknungsverlauf, um den Zustand des gleichen Wassergehaltes zu erreichen zeigen, kann diese Annahme praktisch haltbar sein. Gewinnt man die stetigen charakteristischen Trocknungskurven unter mehreren Bedingungen, so kann man hieraus auch die unstetigen charakteristischen Trocknungskurven berechnen. Wir beschreiben nun im folgenden die Theorie dieses Entwurfes für den Tunnel-trockner und erklären sie mit einigen anschaulichen Beispielen.

Entwurf des Tunnel-trockners

Je nach dem Übergang von Stoff und Luft werden die Tunnel-trocknungsapparate in solche mit der Anwendung von Gegenstrom—und von Gleichstromverfahren geteilt, und weiter je nach der Erhitzungsweise der Luft in solche, die nach isothermaler und nach adiabatischer Methode behandelt werden. In der Praxis werden sie in vielerlei Zusammensetzungen ausgeführt. Weil der isothermale und der adiabatische Gegenstrom-trockner am meisten benutzt werden, beschäftigten wir uns vor allem mit diesen beiden. Was andere Fälle betrifft, so lassen sie sich wie erwähnt berechnen.

Gegenstrom-Tunnel-trockner nach isothermalen Verfahren

Das Wesentliche dieses Modells besteht darin, dass man einen Erhitzungsapparat an der Trockner anlegt, damit die Lufttemperatur konstant werde. Ein Vorteil ist es hierbei, dass man die Temperatur bzw. Feuchtigkeit der Abluft genügend hoch halten kann, und die Luftmenge des Gebläses gering ist. Die Temperatur des Stoffes

lässt sich in der Nähe der zulässigen Temperatur regulieren, so dass die Trocknungsgeschwindigkeit gross wird. Ein Nachteil ist es nur, dass die Einrichtungskosten etwas teuer sind.

Innerer Bau des Trockners

Die Temperatur des Stoffes gelangt schon am Eingang schnell bis zur Feuchtkugeltemperatur der Luft, während ihre konstante Trocknungsgeschwindigkeit bestehen bleibt. Jenseits des kritischen Wassergehaltes fängt die Temperatur an, emporzusteigen und nähert sich allmählich der Trockenkugeltemperatur des Stoffes. Zeigt der Stoff die verlangsamte Trocknungsgeschwindigkeit von Anfang an, so steigt auch seine Temperatur von Anfang an, ohne die Periode der Feuchtkugeltemperatur durchzumachen. Andererseits vergrössert sich die Feuchtigkeit allmählich, da die Lufttemperatur in diesem Fall konstant ist.

Die Trocknungselemente beim Gegenstromtrockner sind wie in Abb. 1, wobei sich die folgende Beziehung ergibt :

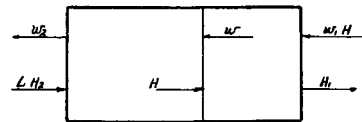


Abb. 1

$$W(w_1 - w_2) = L(H_1 - H_2) \quad (1)$$

Da solche Beziehung auch zwischen dem Wassergehalt w und der Feuchtigkeit H in einem freigestellten Schnitt des Trockners besteht, so ergibt sich die Gleichung :

$$W(w_1 - w) = L(H_1 - H) \quad (2)$$

$$\text{folglich} \quad (w_1 - w) = m(H_1 - H) \quad (3)$$

worin m die Gewichtsproportion von Luft zu Stoff (L/W) bei der Trocknung bedeutet.

Unstetige Trocknungskurve

Der Mechanismus der Trocknung ist in zwei Teilen zu betrachten, weil die Periode der Oberflächenverdampfung ganz verschieden von der inneren Diffusionsperiode ist.

Oberflächenverdampfungsperiode

Man kann die Trocknungsgeschwindigkeit aus der Foamel :

$$dw/d\theta = K(H_w - H) \quad (4)$$

berechnen. Auch wenn man die Trocknungsgeschwindigkeit $dw/d\theta$ als kg/h oder %/h annimmt, lässt sich Formel (4) als eine für diese Einheiten geeignete Gleichung ohne weiteres gebrauchen, falls der Wert des Trocknungskoeffizienten K angepasst wird. Die Luftgeschwindigkeit behält den vorher bestimmten Wert, und die Temperatur ist konstant in diesem Fall. Indem man also von den Luftbedingungen nur

die relative Feuchtigkeit mannigfach ändert, erzielt man die Trocknung und gewinnt ihre charakteristischen Kurven, wie sie in Abb. 2 dargestellt sind. Die Trocknungsgeschwindigkeit zur Zeit des Wassergehalts w_1 beim Eingang des Trockners ist bei Punkt 1 auf der Kurve der relativen Feuchtigkeit φ_1 zu finden. Da die absolute Feuchtigkeit H_1 und die Feuchtkugelfeuchtigkeit H_w , sich aus der Lufttemperatur t

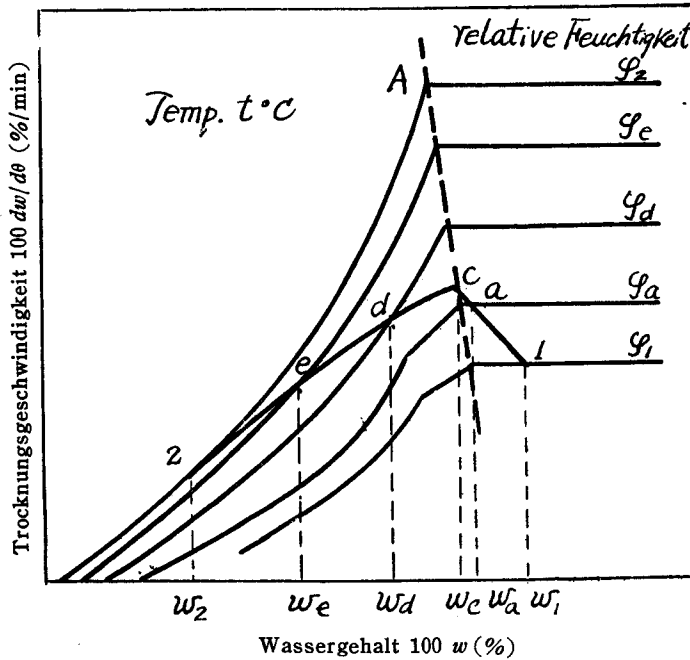


Abb. 2

und der relativen Feuchtigkeit φ_1 , ergeben, kann man sie in die Formel (4) einsetzen, um K zu berechnen. Für einen beliebigen Wassergehalt w_a lässt sich H_a aus Formel (3) ableiten und da sich ferner H_{w_a} aus dem Feuchtigkeitsdiagramm ergibt, so ist $dw/d\theta$ durch Berechnung zu gewinnen. Weil dieser Wert andererseits aber auch experimentell gefunden werden kann, so ist es zweckmässig sich um, beide mit genauer

Untersuchung zu bemühen. Die Trocknungsgeschwindigkeit in diesem Fall ist mit Punkt a bezeichnet. Wenn man auf diese Weise einen Punkt nach dem andern festgestellt hat und 1, a, verbindet, ergibt sich hier eine charakteristische Kurve der oberflächenverdampfungsperiode.

Kritischer Feuchtigkeitsgehalt

Der kritische Feuchtigkeitsgehalt bildet eine Grenze zwischen zwei Perioden, welche in bezug auf ihren Trocknungsmechanismus ganz verschieden sind, weshalb sie korrekt festgestellt werden müssen. Indem man von den verschiedenen relativen Feuchtigkeiten die charakteristischen Kurven auswählt, wird der geometrische Ort des kritischen Feuchtigkeitsgehaltes bestimmt, den die gerade Linie A in Abb. 2 darstellt. Auch in dem Fall, dass man den Kreuzungspunkt der Kurve 1, a, ... mit der geraden Linie sucht, kann der kritische Feuchtigkeitsgehalt wohl bestimmt werden.

Der korrekte Fall aber ist der: durch Aufsuchen eines solchen Kreuzungspunktes und die Einsetzung seines Wertes in die Formeln (3) und (4) findet man auch $dw/d\theta$ und untersucht dann, ob dieses $dw/d\theta$ mit eben dem der bildlichen Darstellung übereinstimmt oder nicht. Dieser Punkt sei c .

Innere Diffusionsperiode

Da Formel (4) für diese Periode nicht mehr angewandt werden kann, stellen wir mehrere Versuche an unter der Bedingung einer niedrigeren relativen Feuchtigkeit als der beim Grenzpunkte, damit die verschiedenen charakteristischen Trocknungskurven erkennbar werden. Für jedes φ somit H berechnet man den dementsprechenden w aus der Gleichung (3) und bestimmt dann aus dem Bilde die Trocknungsgeschwindigkeit des jeweiligen w . Auf diese Weise kann die Trocknungsgeschwindigkeit für jede Bedingung von $d, e, \dots 2$ in Abb. 2 gefunden werden. Die Kurve, die $c, d, e, \dots 2$ verbindet, stellt die Trocknungsgeschwindigkeit der inneren Diffusionsperiode dar. Die Linie, aus Punkten der Kurven $1, a, c, \dots 2$ bestehend, die die Periode der Oberflächenverdampfung und die innere Diffusionsperiode verbindet, ist die charakteristische Kurve der unsteten Trocknung im Gegenstromtunnel Trockner bei isothermalen Verfahren.

Trocknungszeitdauer und Volum des Trockners

Punktiert man w bis zu $d\theta/dw$, nämlich die reziproken Zahlen jedes Wertes von der Geschwindigkeitslinie $1, a, c, \dots 2$, wie sie sich in Abb. 5 zeigen und integriert graphisch, so lässt sich die zur Trocknung benötigte Zeitdauer berechnen, wie sie hier Formel 5 ausdrückt:

$$\int_{w_2}^{w_1} (d\theta/dw) dw = \int_0^\theta d\theta = \theta \quad (5)$$

Hat man die Trocknungszeit bestimmt, so kann man damit auch das Volum des Trockners gewinnen.

Benötigte Erhitzungsmenge und Erhitzungsapparat

Wenn man den Tunnel geziemend teilt, so kann man die bei jedem Teil gebrauchte Zeit ersehen, wodurch die Verdampfungswassermenge in jedem Teil und die notwendige Wärmemenge bestimmt werden. Wir möchten dies mit folgenden Beispielen erklären.

Beispiel 1.

Man stellt einen Tunnel Trockner her, so dass 90 kg (trockenes Gewicht) pro h. von den gehaspelten Viscoseseidenfläden (120 Denir) behandelt werden kann. Der Wassergehalt beträgt 160% am Anfang, der des Produkts ist 9%. Das trockene

Gewicht eines Stückchens des gehaspeltem Fadens beträgt 60 g. Die Erhitzung der Luft erfolgt durch Vorwärmung der Aussenluft. Die Temperatur derselben sei 20°C, die relative Feuchtigkeit 100%.

Lösung :

Da die Trocknung ziemlich lange dauert, ist eine isothermale Temperatur von 70°C für die Trocknungstemperatur geeignet. Für das Modell des Trockners ist das Isothermal-Gegenstromverfahren geeignet. Es ist wünschenswert, dass die Feuchtigkeit der Abluft genügend hoch ist. Wir hielten sie in diesem Fall bei 70%. Diese Luft mit der Feuchtigkeit von 70% ist es, die den Stoff mit dem Wassergehalt von 160% berührt. Da der Einfluss der Windgeschwindigkeit unbedeutend ist, stellen wir sie auf 0.6 m/sec mit Rücksicht auf das Volum, das der Stoff einnimmt. Selbst wenn man den Stoff bei etwa 15°C mit Luft von 70°C und hoher Feuchtigkeit in Berührung bringt, ergibt sich kaum eine Gewichtsvergrößerung

mittelst des Auszugs der Feuchtigkeit für den Stoff, so dass die Einrichtung für die Vorwärmung des Stoffs in diesem Fall unnötig ist. Wird die Luft von 20°C (Temp.) und 100% (Feucht.) i. e. $H_0=0.0147$

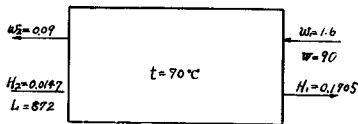


Abb. 3

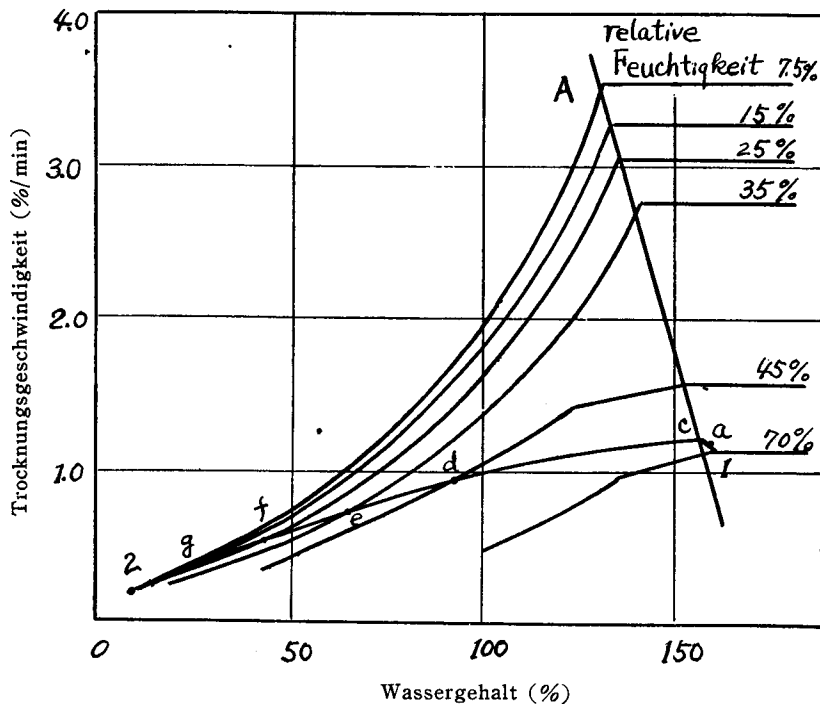


Abb. 4

bis zu 70% vorgewärmt, so sinkt die relative Feuchtigkeit bis zu 7.5%. Da $H_1=0.1705$ bei 70% (Feucht.) ist, so wird die benötigte Luftmenge aus Formel (1) erkennbar.

$$L = 90 (1.60 - 0.09) / (0.1705 - 0.0147) = 872$$

Die Elemente der Trocknung sind also dieselben wie in Abb. 3. In Abb. 4 zeigen wir die Trocknungskurven bei der stetigen Trocknung, wo wir bei 70°C (Temp.) und 0.6 m/sec (Windgeschw.) eine Feuchtigkeit von 7.5, 15, 25, 35, 45 und 70% benutzten. Der Stoff von 160% berührt die Luft von 70% (Feucht.) Die Geschwindigkeit in diesem Fall ist mit Punkt 1 zu bezeichnen; $dw/d\theta=1.15$. Setzen wir den Wassergehalt auf 155% an, so lässt sich die Feuchtigkeit der berührenden Luft H_a aus Formel (2) erhalten: $H_a=0.1648$, aus Formel (3) wird $dw/d\theta=1.224$, was als punkt *a* im Bild erscheint. Folglich wird die Linie 1, *a*, ... zur charakteristischen Kurve der Oberflächenverdampfungsperiode. Der geometrische Ort des Kritischen Wassergehaltes ist durch die gerade Linie *A* in Abb. 4 bezeichnet. Sucht man den Kreuzungspunkt von *A* mit 1, *a*, so findet man ihn bei 154.5%. Der Wert von $dw/d\theta$, der sich aus Formel (3) und (4) ergab, war 1.238, während er sich aus dem Bild als 1.24 herausstellte. Also stimmen die beiden Werte fast überein. Daher darf man den kritischen Wassergehalt als zu 154.5% bestimmen. Dieser Punkt sei *c*. Der kritische Wassergehalt in diesem Fall ist 67.7%. Sucht man für mehreren verschiedene Feuchtigkeiten nach dem kritischen Punkte die entsprechenden Werte von *w* und berechnet die Trocknungsgeschwindigkeit, so lassen sie sich wie die folgende Tabelle zeigt anordnen.

φ	45	35	25	15	7.5
<i>w</i>	0.92	0.67	0.45	0.24	0.09
$dw/d\theta \times 10^2$	1.01= <i>d</i>	0.82= <i>e</i>	0.63= <i>f</i>	0.37= <i>g</i>	0.22="2"

Die Geschwindigkeit der inneren Diffusionsperiode wird mit der Kurve *c*, *d*, ... 2 bezeichnet. Punktirt man *w* zu $d\theta/dw$, so ist sowohl die im ganzen benötigte Zeit, als auch die Zeit, welche erforderlich ist, um den Stoff in den Zustand eines beliebigen Wassergehaltes zu bringen feststellbar.

Nach Abb. 5 beträgt die im ganzen benötigte Zeit 212 Min. Punktirt man weiter das Verhältnis von Zeit zu Wassergehalt, so ergibt sich Abb. 6.

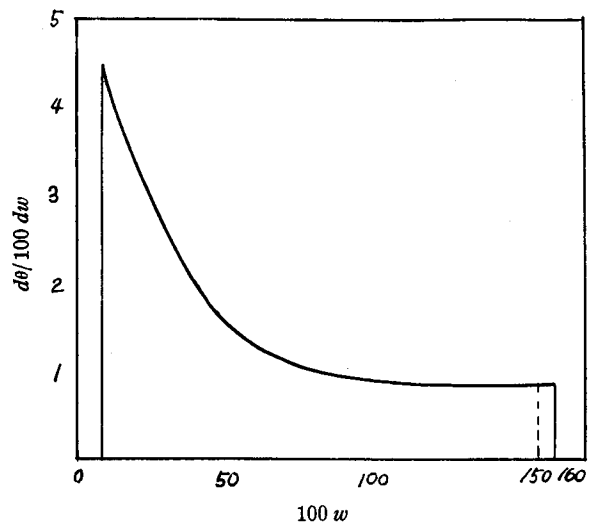


Abb. 5

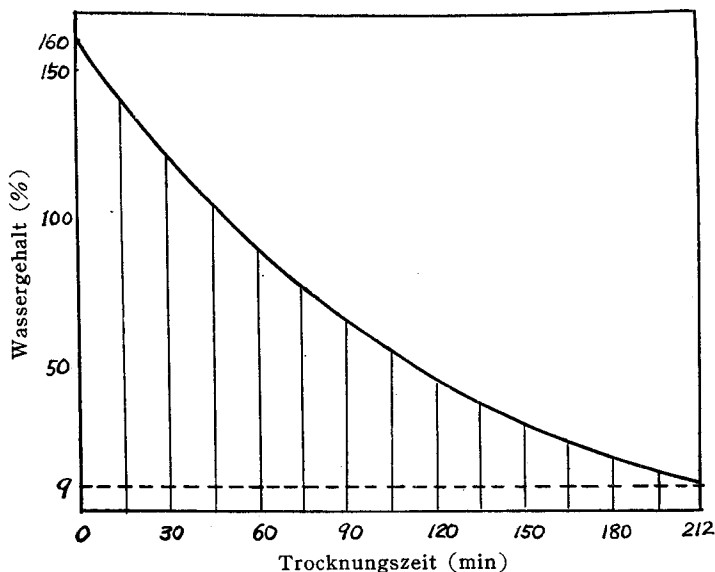


Abb. 6

Falls man die Bewegungsgeschwindigkeit des Stoffes als 0.1 m/min annimmt, wird die Länge des Trockners 21.2 m. Ist das Gewicht von einem Strang 60 g, so werden 1500 Stränge pro Stunde behandelt. Wir hängen 15 Stränge an einen Pfahl, von dem es im ganzen 100 gibt. Der Abstand der Pfähle beträgt 12 cm, sie werden in zwei Gruppen geteilt. Nimmt man für den Abstand der Stränge 6 cm, so wird der innere Teil des Trockners ungefähr 1 m lang und die Höhe ist etwa 1.4 m. Indem man nun den Trockner auf 14 Zimmer verteilt, macht man ein Zimmer 1.5 m lang und stellt an einer Seite jedes Zimmers ein Gebläse auf. Als Geschwindigkeit des Querstroms gilt diejenige, mit der die Luft durch einen halben freien Zwischenraum geht. Ist die Übergangshöhe des Windes bei zwei Stufen von oben und unten 1 m und nimmt die Seide $\frac{1}{3}$ vom Rauminhalt des Schnittes ein, so wird der übrige Rauminhalt wie folgt: $(1.5 \times 1) / 2 \times 2 / 3 = 0.5 \text{ m}^2$. Somit ist die Luftgeschwindigkeit folgendermassen zu berechnen:

$$1080 / 3600 \times 0.5 = 0.6 \text{ m/sec}$$

Da die Blasemaschine am unteren Teil des Trockners aufgestellt wird, so beträgt die Höhe etwa 2 m. Man teilt den Trockner in 14 Zimmer und numeriert diese vom Eingang des Stoffes an nach der Reihe wie 1, 2, ... 14. Dazu gehört noch der Teil für die Luftvorwärmung weiter hin am Ende. Also teilt man sie für je 15 min., nur dass den Stoff bei 14 Zimmern in 17 min. durchgehen lässt. Die Verdampftwassermenge in jedem Zimmer, somit die notwendige Wärme werden berechnet, wie dies aus der folgenden Tabelle ersichtlich ist.

Nummer des Zimmers	Verdampfte Wassermenge		Notwendige Wärme
	%	kg/h	kcal/h
1	19.0	17.1	18390
2	18.0	16.2	9030
3	17.5	15.75	8780
4	15.5	13.95	7770
5	14.5	13.05	7260
6	12.5	11.25	6270
7	11.0	9.9	5510
8	9.5	8.55	4760
9	8.0	7.3	4010
10	6.5	5.85	3260
11	6.0	5.4	3010
12	5.0	4.5	2510
13	4.0	3.6	2020
14	4.0	3.6	2020
Luftvorwärmungsraum	—	—	10780
Totalsumme	151		95380

In dem ersten Zimmer :

(1) Die Temperatur des Stoffes sei 18°C. Die fühlbare Wärme, welche notwendig ist, um diese zur Nasskugeltemperatur von 62.5°C der Luft (70°C Temp., 70% Feucht.) zu erhöhen, lässt sich durch die folgende Formel berechnen, falls die spezifische Wärme des wasserfreiem Stoffes 0.3 ist :

$$Q_1 = 90 (1.60 + 0.3) (62.5 - 18) = 7,610 \text{ kcal/h.}$$

(2) Während der Oberflächenverdampfungsperiode wird zwar die Nasskugeltemperatur, je weiter sich der Stoff von Eingang fortbewegt, um einen winzigen Grad niedriger. Da aber der Ausfluss der Wärme bei einem so kleinen Unterschiede so gering ist, dass man ihn unbeachtet lassen kann, vermag man die latente Wärme der Verdampfung mit der folgenden Formel zu berechnen, vorausgesetzt dass letztere bei 62.5°C stattfindet.

$$Q_2 = 90 (1.60 - 1.545) (561) = 2,780 \text{ kcal/h.}$$

(3) Der kritische Punkt liegt im ersten Zimmer. Die fühlbare Wärme, welche nötig ist, um die Stofftemperatur von 70°C zu erreichen, ist :

$$Q_3 = 90 (1.545 + 0.3) (70 - 62.5) = 1,245 \text{ kcal/h.}$$

(4) Die latente Wärme, welche notwendig ist, um den Wassergehalt des kritischen Punktes auf 141% beim Ausgang aus dem ersten Zimmer zu bringen, wird folgendermassen ausgedrückt :

$$Q_4 = 90 (1.545 - 1.41) 556 = 6,750 \text{ kcal/h.}$$

Die gesamte notwendige Wärme im ersten Zimmer ist :

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 = 18,390 \text{ kcal/h.}$$

Vom zweiten Zimmer an braucht man nur die latente Wärme zu geben. Ein-schliesslich der Luftvorwärmung beträgt die gesamte verbrauchte Wärme 95,389 kcal/h.

Beispiel 2

Wir entwarfen einen Tunneltrockner, um Baumwollsamensabfälle (Linters) von 4,620 kg (wasserfreies Gewicht) pro Tag zu erhalten. Der ursprüngliche Wasser-gehalt macht 150% aus. Wir trocknen die Abfälle bis zu 1.8%.

Lösung :

Zwar sind die Baumwollsamensabfälle reich am Wassergehalt und zeigen von Anfang an eine verlangsamte Trocknungsgeschwindigkeit. Überdies ist die Normalität des Wassergehaltes des Trockenstoffs von strenger Gültigkeit, d. h. er darf im Verlauf

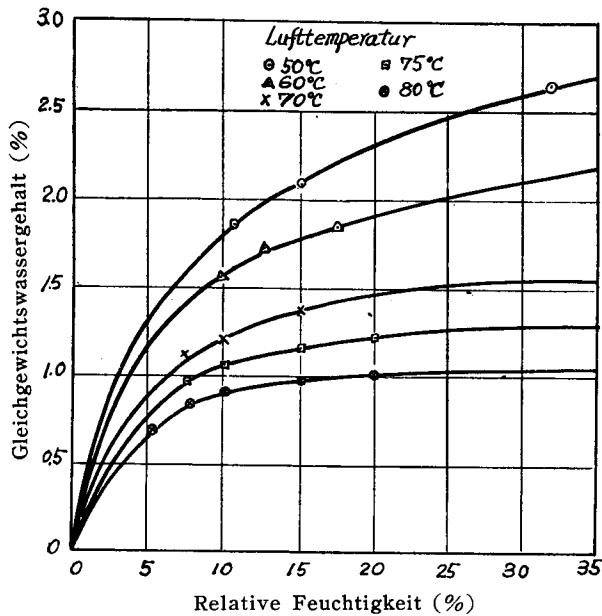


Abb. 7

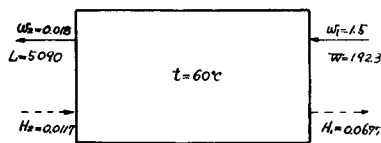


Abb. 8

der Trocknung niemals unter 1% sein. Abb. 7 stellt den Gleichgewichtswassergehalt dar. Die Trocknungstemperatur sei 60°C. Hinsichtlich des Wassergehaltes des Produktes ist es gut, den Gegenstrom-Apparat zu ge-brauchen. Die Temperatur der Aussenwelt sei 20°C mit der relativen Feuchtigkeit von 80% ($H_2=0.0117$). Wir wärmen vor und blasen in den Trockner bei 60°C hinein. Im Fall von 24 Arbeitsstunden pro Tag beträgt die Behan-dlungsmenge $W=4,620/24=192.3 \text{ kg/h}$, nach der Regula f fiasi hält man die Feuchtig-keit der Abluft bei 50%. H_1 ist nämlich 0.0677. Aus Formel (1) ist die Luftmenge klar : $L=5,090 \text{ kg/h}$. Abb. 8 zeigt die Elemente der Trock-

nung. Die Dichtigkeit des Packmaterials ist beim Nassstoff 0.102 g/cm^3 . Auf dem Boden und an den Seiten der Horde stellt man Drahtnetze auf. Das Volum, das die Behandlungsmenge in einer Stunde einnimmt, ist 4.72 m^3 . Schichtet man den Stoff auf der Stufe einer Horde der Dicke, Breite und Tiefe nach zu $5 \text{ cm} \times 1.25 \text{ m} \times 1.5 \text{ m}$ und legt 13 Stufen auf einen Wagen, so sind 4 Wagen pro Stunde erforderlich. In diesem Falle müssen die Wagen pro 30 min. zweifach nebeneinander gehen. Eine Seite des Wagens wird mit einem Brett verschlossen. Zugleich bildet sich in je einem Wagen eine Abteilung, und zwar richtet man den Apparat so ein, dass die Fahrt der Luft entgegengesetzt ist.

Der Abstand der Horden wird passend gemacht, dabei ist die Höhe des Luftlaufs im Wagen 1.48 m , die ganze Höhe 2.13 m . Die Breite des Wagens ist 1.25 m , die Tiefe 1.5 m und der Schnitt durch eine Abteilung ist 1.25×1.48 . Da das mittlere spezifische Volumen $1.05 \text{ m}^3/\text{kg}$ ist, so wird die Geschwindigkeit der übergehenden Luft mit der folgenden Formel ausgedrückt.

$$(5090 \times 1.05) / (0.102 \times 10^3 \times 1.25 \times 1.48) = 0.8 \text{ m/sec.}$$

Ändert man die Feuchtigkeit in 50, 40, 30, 20 und 11.5%, bei einer Temperatur unter 60°C und 0.8 m/sec . (Windgeschwindigkeit), so findet man die in Abb. 9 gegebene Kurve der Trocknungsgeschwindigkeit. Berechnet man den Wassergehalt des Stoffs zu jeder Luftfeuchtigkeit zu Formel (2), sucht die Punkte 1, 2, ... 6 in gleicher Weise wie bei dem vorigen Beispiel, und verbindet sie zu einer Kurve, dann ergibt sich die charakteristische Trocknungskurve beim Tunneltrockner. Wenn man

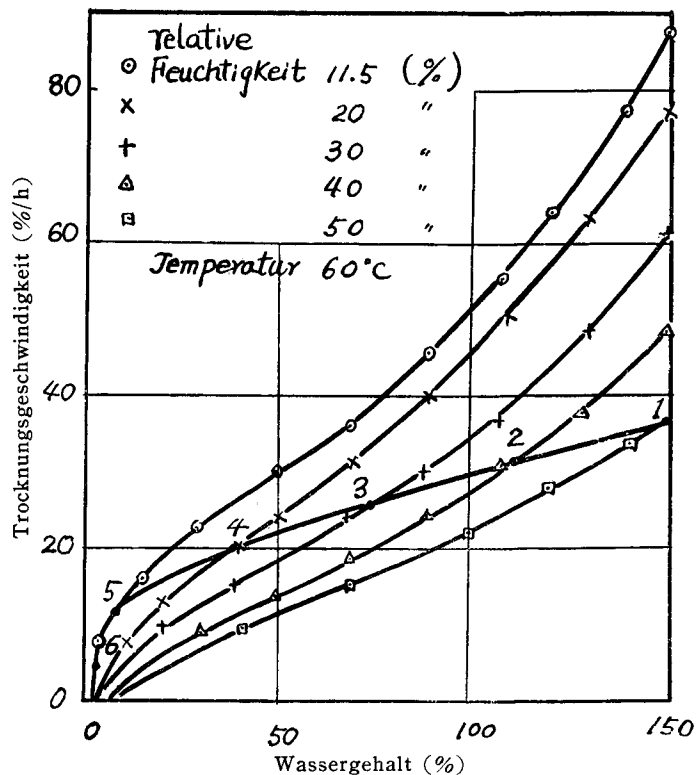


Abb. 9

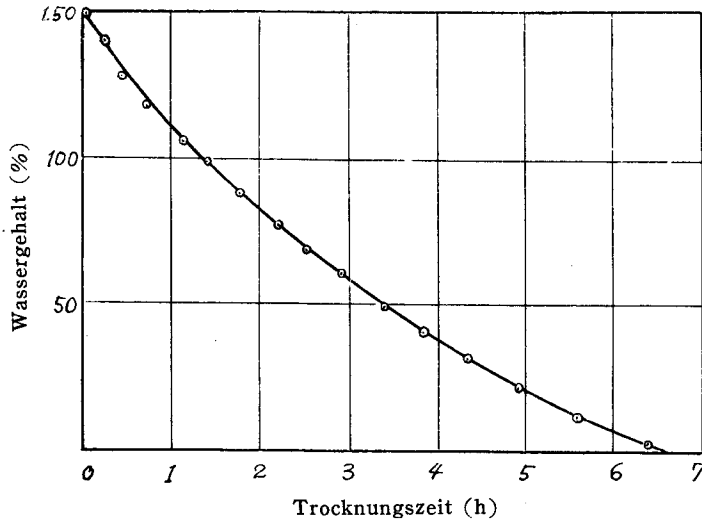


Abb. 10

aus Formel (5) die graphische Integrale benutzt, so ergibt sich für die Trocknungszeit 6.5 Stunden. Die Beziehung zwischen dem Wassergehalt und der Zeit ist in Abb. 10 dargestellt. In der letzten Abteilung zeigt der Stoff beinahe den Gleichgewichtswassergehalt, so dass man zur Sicherheit noch eine Abteilung hinzufügt, wobei die

Trocknungszeit 7 Stunden sein soll. Es gilt folglich im ganzen 14 Abteilungen, die man vom Eingang des Stoffs an der Reihe nach als 1, 2, ... bis 14 numeriert. Die Länge des Trockners ist 17.5 m, die Breite 4.1 m, die Höhe 2.23 m.

Die Wärmeberechnung der Luftvorwärmungsraum :

$$0.246 \times 5090 \times (60 - 20) = 50 \times 10^4 \text{ kcal/h.}$$

Der Hauptteil des Trockners : in der nächsten Tabelle stellen wir die Wasserverdampfungs- menge und die dazu nötige Erhitzungswärme dar. Da die "Linters" sich nach der abnehmenden Trocknung richten, berücksichtigen wir zur Sicherheit in der ersten Abteilung die fühlbare Wärme, die von 20°C bis 60°C erhitzt wird. Die insgesamt notwendige Wärme beträgt 22.42×10^4 kcal/h, der theoretische thermische Wirkungsgrad ist 71.5%

Abteilung	Verdampfte Wassermenge	Notwendige Wärme
13 + 14	4.0	4.33×10^3
12	5.2	$5.63 \times "$
11	7.0	$7.58 \times "$
10	8.1	$8.78 \times "$
9	9.9	1.07×10^4
8	11.0	$1.19 \times "$
7	12.0	$1.30 \times "$
6	12.0	$1.30 \times "$
5	13.0	$1.407 \times "$
4	13.5	$1.461 \times "$
3	16.5	$1.786 \times "$
2	16.5	$1.786 \times "$
1	19.5	$3.49 \times "$ *
Totalsumme	148.2	17.53×10^4

* Die erste Abteilung berücksichtigt die Veränderung der fühlbaren Wärme.

Gegenstrom-Tunneltrockner nach adiabatischem Verfahren

Da man die beschickte, heisse Luft in diesem Trockner nicht weiter erwärmt, wird die Temperatur der Luft immer niedriger, ihre Feuchtigkeit dagegen immer höher. Diese Vorrichtung ist zur Trocknung des Stoffs geeignet, dessen zulässige Temperatur verhältnismässig hoch, oder dessen Wassergehalt gering ist. Es ist zwar eine grosse Luftmenge erforderlich, aber die Einrichtungskosten sind billig.

Wärmebilanz

Berechnet man aus Abb. 11 die ganze Wärmebilanz beim Eingang so wie beim Ausgang des Trockners, so ergibt sich Formel (6).

$$Li_{t_1 H_1} + W(c + w_2) t_2 = Li_{t_2 H_2} + W(c + w_1) t_{w_0} \quad (6)$$

Nehmen wir in dieser Formel die Luftbedingung beim Ausgang (t_1, H_1) an und errechnen weiter die Luftmenge L aus Formel (1), so lässt sich die zur Beschickungsluft erforderliche Temperatur t_2 finden, weil die Stoffbeschickungsmenge W und der vor bzw. nach der Trocknung vorhandene

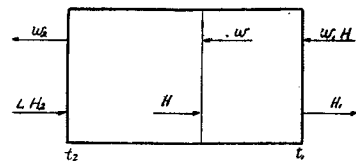


Abb. 11

Wassergehalt w_1 und w_2 schon gegeben sind. Ist dieser Wert nicht richtig, wiederholen wir obiges Verfahren, indem wir die t_1 und H_1 betreffende Annahme ändern.

Unstetige charakteristische Trocknungskurve

Oberflächenverdampfungsperiode

Beim Eingang wird der beschickte Stoff vorgewärmt, wodurch die Temperatur der Abluft eigentlich t_1' sein sollte, in Wirklichkeit aber geht sie von der niedrigeren Temperatur t_1 aus. Infolgedessen steigt die Temperatur t_{w_0} zu der Nasskugeltemperatur t_{w_1} an. Auf Grund der Wärmebilanz beim Eingang des Stoffs werden t_1' und t_{w_1} aus der folgenden Formel bestimmt:

$$LC_{H_1}(t_1' - t_1) = W(c + w_1)(t_{w_1} - t_{w_0}) \quad (7)$$

Nimmt man t_1' in dieser Gleichung an, so wird t_{w_1} bestimmt, während t_{w_1} sich aus H_1 und t_1' des Feuchtigkeitsdiagramms gewinnen lässt. Deshalb muss man die Temperatur suchen, in der beide Werte übereinstimmen. Es ist ferner die Luft von t_1' (Temp.) und H_1 (Feucht.) welche den Stoff von w_1 (Wassergehalt) berührt. Punkt 1 kann auf der charakteristischen Trocknungskurve in Abb. 12 gefunden werden. Da die Formeln (3) und (4) auch in diesem Fall gelten, lässt sich der Trocknungskoeffizient K gewinnen. Die Feuchtigkeit H_a zu einem freigestellten Wassergehalt w_a kann aus (2) gefunden werden, während die Temperatur bei dieser Zeit aus der Formel:

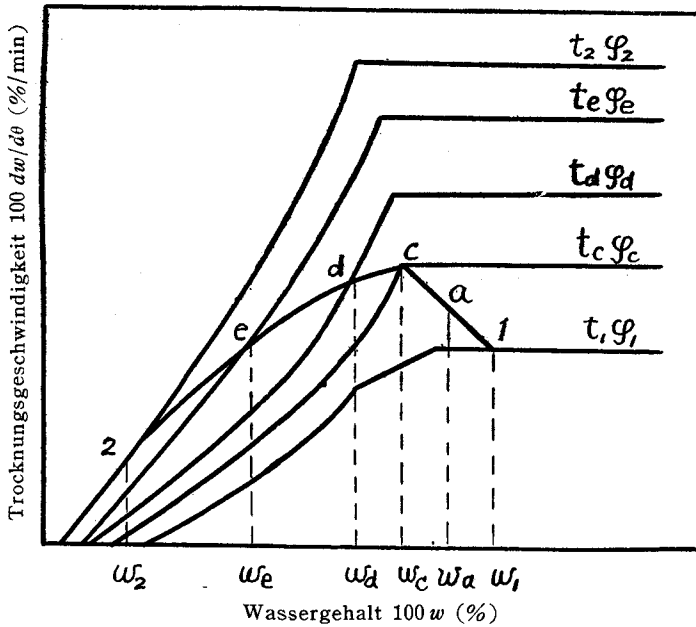


Abb. 12

Kritischer Wassergehalt

Weil in diesem Fall die dem verschiedenen Wassergehalt jedesmal entsprechenden Trocknungsbedingungen ebenfalls verschieden sind, so kann man nicht einfach einen geometrischen Ort aufzeichnen. Wird w gegeben, so lässt sich die Bedingung für diese Zeit wie vorher gezeigt finden. Zuerst stellt man die Werte des kritischen Wassergehaltes im voraus experimentell unter mehreren Bedingungen fest, wobei der kritische Wassergehalt w_c —welcher den durch w erhaltenen Luftbedingungen entspricht—mit diesem w übereinstimmt. Die kritischen Bedingungen t_c, φ_c sind also diejenigen, unter welchen w und w_c übereinstimmen. Bezeichnet man die Trocknungsgeschwindigkeit in diesem Fall mit c , so ist die 1 und c verbindende gerade Linie die Trocknungskurve der Oberflächenverdampfungsperiode und der oben gesuchte Punkt a findet sich auf dieser geraden Linie.

Nach dem kritischen Wassergehalt wird die Temperatur des Stoffes immer höher und nähert sich der Lufttemperatur, während diese selbst allmählich niedriger wird.

Periode der inneren Diffusion

Berücksichtigen wir einen freigestellten Wassergehalt w_a , so ist H_a der Formel (2) zu entnehmen. Da die fühlbare Wärme der Luft gleichzeitig mit der Verdampfung

$$LC_{H_a}(t_a - t_1') = W(w_1 - w_a) t_{w_1} \quad (8)$$

errechnet wird. In gleicher Weise wie im vorigen Fall ist die Trocknungsgeschwindigkeit aus dem diesen Bedingungen unterworfenen Versuch zu berechnen. Da H_w in der Formel (3) konstant ist und das Verhältnis $H:w$ besteht, so wird die Trocknungsgeschwindigkeitsskurve zur geraden Linie im Verhältnis zum Wassergehalte.

der Feuchtigkeit des Stoffes zur Erhöhung seiner Temperatur gebraucht wird, stellt sich ähnlich wie (6), die nächste Formel (9) betreffs der Wärmebilanz heraus:

$$Li_{t_c} H_c + W(c + w_a) t_a' = Li_{t_a} H_a + W(c + w_c) t_c' \quad (9)$$

Die Temperatur der Luft fällt von t_a bis t_c , was aber den Stoff betrifft, so steigt seine Temperatur von t_c' bis t_a' mit der Verdampfung der Feuchtigkeit: $W(w_c - w_a)$, woraus sich t_a berechnen lässt. Die Geschwindigkeit, welche sich bei w_a im Versuch mit $t_a, H_a (= \varphi_a)$ zeigt, bezeichnet Punkt d auf dem Bild. In diesem Fall beträgt der Unterschied zwischen Temp. t_a und t_a' wie t_c und t_c' nur 2 bis 3 Grad. Es wäre kein bedeutender Fehler, wenn wir diese zwei für ungefähr gleich hielten. In derselben Weise können wir weiter eine Reihe von Trocknungskurven 1, $a, c, d, e, \dots 2$ feststellen. Die Trocknungsgeschwindigkeit, das Volum des Trockners usw. lassen sich in gleicher Weise wie im Fall des isothermalen Gegenstromverfahrens bestimmen.

Beispiel 3

Wir entwarfen für den Tunnelrockner eine Vorrichtung, die zum Trocknen von dünnem Leder nach Chromgerbung dient. 820 Lederstücke sollen so getrocknet werden, dass ihnen der Wassergehalt von 90% bis zu 5% innerhalb von 8 Arbeitsstunden pro Tag entzogen wird. Das Leder ist der Länge, Breite und Dicke nach $1 \text{ m} \times 1.3 \text{ m} \times 0.15 \text{ cm}$, das wasserfreie Gewicht eines Stückes beträgt 3 kg.

Lösung:

Als erwärmte Luft dient die Aussenluft, welche eine Temperatur von 20°C hat und deren relative Feuchtigkeit 80%, folglich $H_2 = 0.012$ ist. Die Beschickungsmenge W beträgt 308 kg/h. Das Leder nach Chromgerbung zeigt etwa 60°C als zulässige Temperatur, weshalb die Temperatur der Luft beim Ausgang des Stoffs nicht über 60°C sein darf. Die spezifische Wärme des wasserfreien Stoffes ist 0.36.

Setzt man die bekannten Werte in Formel (1) ein, so wird:

$$308 (0.90 - 0.05) = L(H_1 - 0.012)$$

dann ergibt sich aus Formel (6):

$$\begin{aligned} & L\{0.24t_1 + (596 + 0.46t_1) H_1\} + 308 (0.36 + 0.05) t_2 \\ & = L\{0.24t_2 + 0.012 (596 + 0.46t_2)\} + 308 (0.36 + 0.90) 18 \end{aligned}$$

folglich ist

$$\begin{aligned} & L\{0.24 (t_2 - t_1) + 596 (0.012 - H_1) + 0.46 (0.012t_2 - t_1 H_1)\} \\ & = 308 \{0.36 (t_2 - 18) + (0.05t_2 - 0.918)\} \end{aligned}$$

worin 18 die Nasskugelttemperatur der Luft von 20°C und 80% als die Temperatur des Stoffs darstellt.

Sucht man die annähernden Werte mittels der Regula f. flasi in den vorigen zwei Formeln, so ergibt sich für diese :

$$t_1 = 31, \quad \varphi_1 = 81, \quad H_1 = 0.023, \quad t_2 = 58.3, \quad L = 23,700.$$

Spannt man zwei Felle an einen Pfahl und bewegt sie mittels der Ketten, so wird die Höhe des Schnittes 2.5 m, die Breite 3 m. Da das mittlere spezifische Volumen der Luft $0.926 \text{ m}^3/\text{kg}$ ist, wird die Luftmenge $6.1 \text{ m}^3/\text{sec}$.

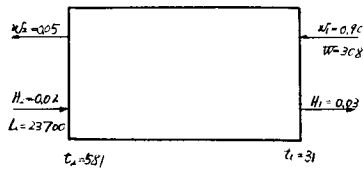


Abb. 13

Stellt man die Blasenmaschinen abwechselnd mit dem Querstromverfahren an den Seiten des Trockners auf und nimmt einen Raum von 5 m^2 pro Gebläse, so wird der Wind 1.2 m/sec . Die Elemente der Trocknung finden sich in Abb. 13

wiedergegeben. Anfänglich zeigt der Stoff 18°C , er wird bei seinem Eingang erwärmt. Aus der Formel (7) und dem Feuchtigkeitsdiagramm erhält man die Werte :

$$t_1' = 31.7, \quad t_{w_1} = 28.3.$$

Die Luft, die den Stoff von 90% Wassergehalt berührt, zeigt die Bedingung von der

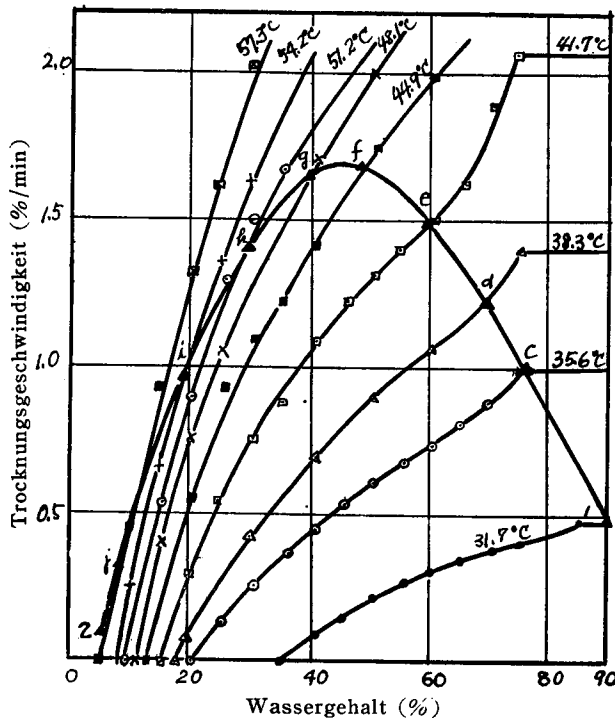


Abb. 14

Temperatur 31.70°C und der Feuchtigkeit 77.5% . Die Trocknungsgeschwindigkeit unter dieser Bedingung ist in Abb. 14 gezeigt, die Geschwindigkeit ist mit Punkt 1 bezeichnet. Gebraucht man Formel (3), wird $K=319$, $H_w=0.0245$, so dass die Trocknungsgeschwindigkeit während der oberflächenverdampfungsperiode aus der Gleichung :

$$dw/d\theta = 319 (0.0245 - H)$$

berechnet werden kann. Um den kritischen Wassergehalt zu bestimmen, stellten wir mehrere Versuche an.

Setzt man $w=0.70$, so wird $H=0.0204$ nach Formel

(2), $t=37.8$ nach Formel (8). Setzt man den kritischen Wassergehalt unter dieser Bedingung als 0.76, ferner w als 0.77 und sucht die Feuchtigkeit wie Temperatur der berührenden Luft, so wird $t_c=35.55^\circ\text{C}$, $\varphi_c=57.5\%$ ($H_c=0.0213$); unter dieser Bedingung wird $w_c=0.77$, was mit Wassergehalt w übereinstimmt. Deshalb ist es zweckmässig, diese Bedingung für den kritischen Wert zu halten. Die Geschwindigkeit dieser Zeit wird durch Punkt c im Abb. 14 bezeichnet. Es genügt 1 mit c zu verbinden, um die Trocknungskurve der Oberflächenverdampfungsperiode zu erhalten. Der Formel (9) gemäss wird $t_c'=36.1^\circ\text{C}$. Die Trocknungsgeschwindigkeit in der Periode

der inneren Diffusion lässt sich berechnen. Die Berechnung und die Resultate der Versuche für verschiedene Wassergehalte zeigen sich in der folgenden Tabelle und in Abb. 14. Ist w_2 ferner 0.05 beim Eingang, so wird $t_2=58.3$, $\varphi_2=10.35$.

Wenn man die Kurve $d, e, \dots j$ extrapoliert und den Kreuzungspunkt mit der Feuchtigkeit 5% nimmt, wird $dw/d\theta=0.10$. Also ist, 1, $c, \dots i, j, 2$ die charakteristische Linie der gesamten Trocknung. Sucht man nach der Formel (5) die Beziehung zwischen der Trocknungszeit und dem Wassergehalt, so wird sie wie Abb. 15 zeigt. Die ganze Trocknungsperiode dauert 98 Minuten, die gesamte notwendige Wärme beträgt 2.264×10^5 kcal/h. Setzt man die Stoffbewegungsgeschwindigkeit zu 0.1 m/min, so wird die Länge des Trockners 9.8 m.

w	t	φ	$dw/d\theta$
0.70	38.3	47.7	1.22 = d
0.59	41.7	37.2	1.51 = e
0.49	44.9	29.4	1.70 = f
0.38	48.1	23.3	1.65 = g
0.29	51.1	18.4	1.42 = h
0.19	54.2	14.5	0.975 = i
0.085	57.3	11.4	0.335 = j

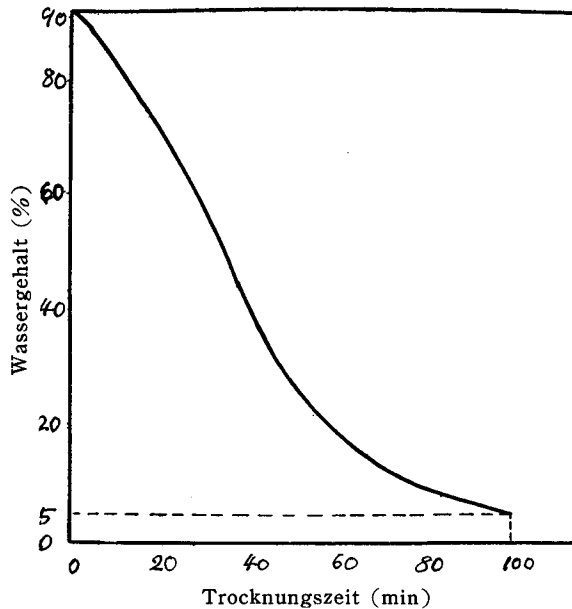


Abb. 15.

Zusammenfassung

(1) Wir betrachteten den Trocknungsmechanismus in einem kontinuierlich arbeitenden Tunnel Trockner in der Weise, dass wir ihn in die Oberflächenverdampfungs-

und die inneren Diffusionsperioden teilten und auf die Bestimmung des die Grenze ausmachenden, kritischen Wassergehaltes achtgaben.

(2) Aus den Formeln bezüglich der Wärme- und Stoffbilanz sowie des Stoffübergangs folgern wir die Trocknungsbedingungen für jede Trocknungsperiode in einem freigestellten Schnitt des kontinuierlich arbeitenden Tunnelrockners, und indem wir die auf Grund dieser Bedingungen unter stetigen Zuständen erprobten Werte hierfür verwandten, bestimmten wir eine Reihe von Trocknungsgeschwindigkeitskurven in jedem Schnitt innerhalb dieses kontinuierlichen Apparates.

(3) Indem wir uns der Trocknungsgeschwindigkeitskurve bedienen, berechneten wir nach der graphischen Integralmethode die erforderliche Trocknungszeit und legten die Methode zur Berechnung des Volumens der Vorrichtung wie auch der notwendigen Wärme dar.

(4) Wir setzten die für den industriellen Gebrauch bestimmten Trocknungsapparate, welche nach dieser neu erdachten Methode entworfen und hergestellt worden waren, wirklich in Bewegung. Sie zeigten die Ergebnisse, die wir erwartet hatten.

Erklärung der Abkürzungen

W :	wasserfreies Stoffgewicht	kg/h.
L :	Trocknungsgasgewicht	kg/h.
w :	Wassergehalt des Stoffs	kg/kg (wasserfreier Stoff)
H :	absolute Gasfeuchtigkeit	kg/kg (Trockengas)
θ :	Trocknungszeit	h
φ :	relative Feuchtigkeit	%
i :	Gasenthalpie	kcal/kg
c :	spezifische Wärme von wasserfreiem Stoff	kcal/kg. °C
t :	Temperatur	°C
C_H :	spezifische Wärme von feuchtem Gas	

Fussnote. Es zeigen :

“1” den Stoffeintritt, “2” den Stoffaustritt, “0” die Aussenluft und “ w ” die Stoffoberfläche.

II. Versuch mit Muldentrockner

Um die fundamentalen Zahlenwerte betreffs des Rührtrockners festzustellen, haben die Verfasser mit dem Mulden- und dem mehrstufigen Tellerrockner experimentiert. Dieser Bericht bezieht sich auf den ersteren. Von welcher Einwirkung sind die Arten des Trocknungsstoffes, das Verhältnis der eingegebenen Stoffmenge zum Apparatvolumen, die Temperatur des Mantels, die Form des Flügelrades, die Drehungsgeschwindigkeit usw. auf die Trocknungsgeschwindigkeit? Das ist in diesem Versuche

ausführlich untersucht worden.

Zweck und Methode des Versuchs

Obgleich der Muldentrockner zur Trocknung schlammartiger oder körniger Stoffe weit und breit in Gebrauch ist, sind fundamentale Zahlenwerte bezüglich der Trocknung bis jetzt kaum veröffentlicht worden. Wir haben nun einen grundlegenden Versuch angestellt und sehr bemerkenswerte Resultate erzielt.

Während man das horizontale Flügelrad in einem halbzylinderförmigen Behälter mit Mantel dreht und den Stoff umrührt, vollzieht sich die Trocknung desselben. Die Wärme wird meistens durch die Flächen der inneren Wände übertragen. Im allgemeinen wurde die Erhitzung wohl durch Wasserdampf geleistet, aber in dem Fall, wo die Temperatur niedrig war, benutzten wir warmes Wasser. Zuerst haben wir die Trocknung körniger Stoffe wie Stärke, Polyvinylchlorid, Ammoniumsulfat, Kalziumkarbonat und dergleichen untersucht.

Ergebnisse des Versuchs und Betrachtung derselben

Folgendes sind die Ergebnisse des Versuchs. Wie man aus Abb. 16, 17, 18, und

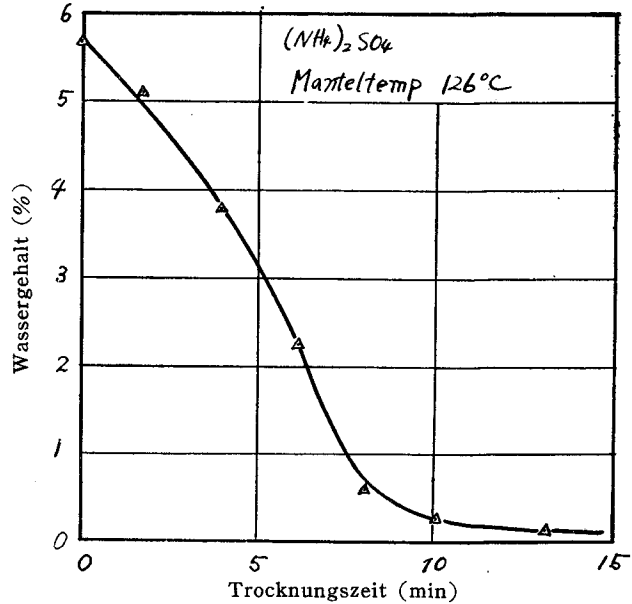


Abb. 16

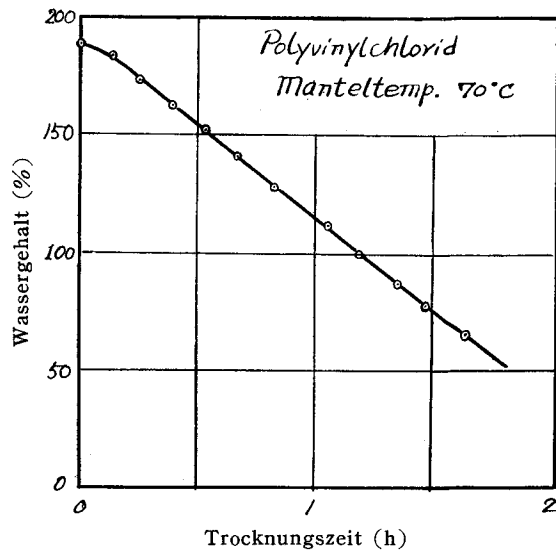


Abb 17

19 ersieht, dauert die Verminderung des Wassergehaltes nach der anfänglichen kurzen Vorwärmungszeit geradlinig an, bis ein sehr niedriger Feuchtigkeitsgehalt erreicht ist. Einerseits ist die Temperatur des Stoffs in dieser Zeit ein wenig höher als die der Feuchtkugel, hält aber einen konstanten Wert, weshalb diese Zeit als eine Periode der scheinbaren konstanten Trocknungsgeschwindigkeit angesehen werden kann.

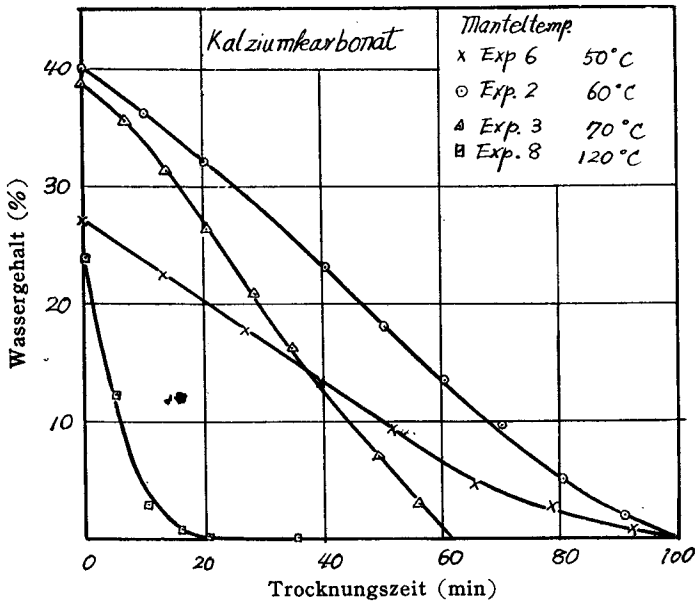


Abb. 18

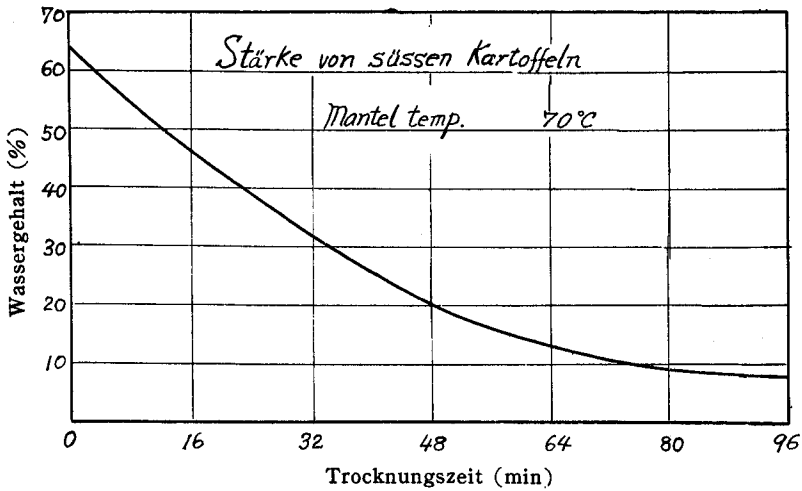


Abb. 19

Vergleicht man sie aber mit den Trocknungskurven bei den stetigen Luftbedingungen ohne Röhren (s. Abb. 20 und 21), werden folgende Punkte klar: Obgleich die konstante Trocknungsgeschwindigkeit von Polyvinylchlorid bis der kritische Wassergehalt von 120% erreicht ist, andauert und das Ammoniumsulfat gar keine konstante Trocknungsgeschwindigkeit hat, bleibt der konstante Satz doch bei letzterer bis ein sehr niedriger Wassergehalt erzielt ist, falls man den Muldentrockner gebraucht. Es ist also klar, dass es noch einen anderen konstanten Trocknungszustand als den des Kammer-trockners gibt.

Betrachtet man die Verdampfungswassermenge pro Stunde je 1 m²-Berührungsfläche als Trocknungsgeschwindigkeit in diesem Fall, so ist dieser Wert beständig, ohne Rücksicht die Stoffsorte und die Proportion der Beschickungsmenge in dem Zylinder, wie es Abb. 22 und Tabelle 1 zeigen, vorausgesetzt, dass die Temperatur des Mantels und die Drehungszahl des Flügelrades konstant sind. Abb. 23 zeigt die Beziehung

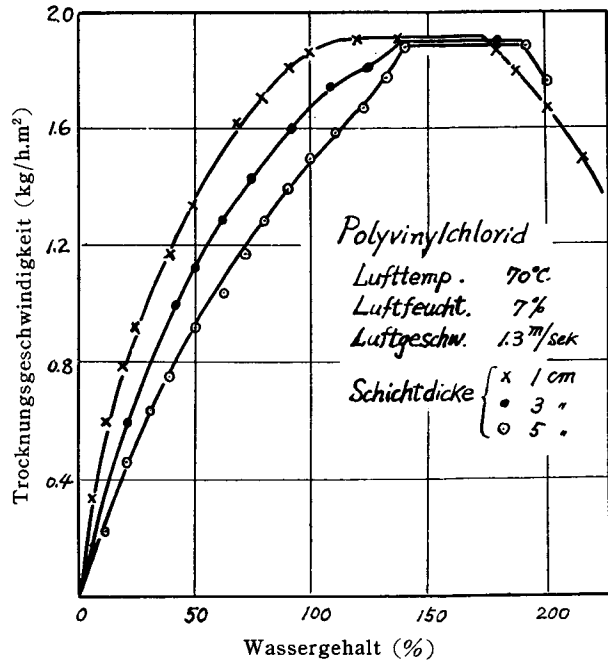


Abb. 20

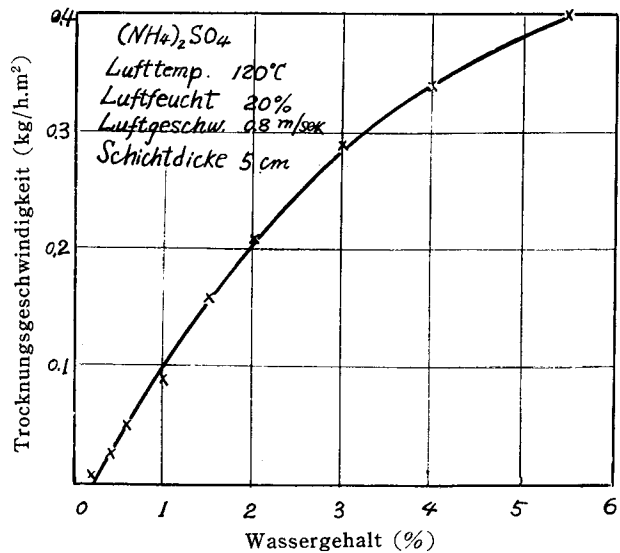


Abb. 21

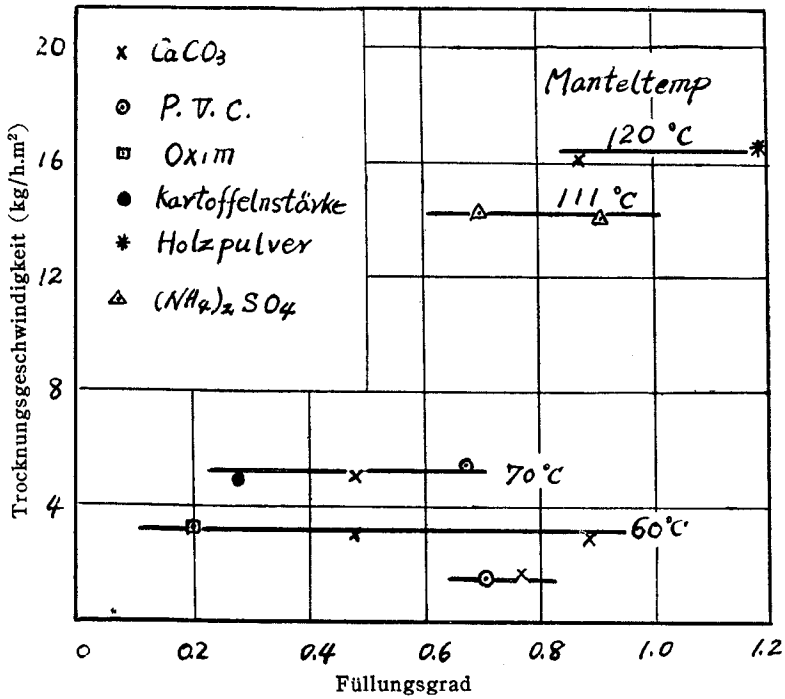


Abb. 22

Tabelle 1 Muldentrockner
(Halbmesser 10 cm, Länge 30 cm)

Stoffarten	Manteltemp. (°C)	Stoffmenge (kg)	Füllungsgrad	Umdrehung des Flügelrades	Trocknungsgeschw. (kg/h. m ²)
Stärke	70	1.0	0.385	30	5.39
P. V. C. (1)	70	1.5	0.665	30	5.32
P. V. C. (2)	60	0.62	0.191	30	4.12
P. V. C.	50	1.2	0.531	30	1.68
Oxim	60	0.43	0.204	30	3.56
Holzpulver	120	1.5	1.23	30	16.4
(NH ₄) ₂ SO ₄	111	2.0	0.60	28	14.1
"	111	3.0	0.90	28	13.8
"	111	3.0	0.90	41	15.1
"	111	3.0	0.90	14.5	10.6
CaCO ₃	60	1.5	0.88	28	2.88
"	60	1.0	0.48	28	2.86
"	70	1.0	0.88	28	4.72
"	50	1.0	0.58	28	1.77
"	120	1.5	0.865	28	16.0

- (1) 20 Stahlkugeln von 15 mm Durchmesser hineingetan.
- (2) 15 Stahlkugeln von 15 mm Durchmesser hineingetan und von oben ultrarote Strahlung.

zwischen der Temperatur des Mantels und der Trocknungsgeschwindigkeit, während Abb. 24 die zwischen der Umrührungszahl und der Trocknungsgeschwindigkeit darstellt. Selbst in dem Fall, dass die Grösse des Zylinders sich verändert, findet man fast dieselbe Gaswindigkeit, wenn die Kreisliniengeschwindigkeit des Flügelrades unverändert bleibt.

Bezeichnet man das wasserfreie Gewicht der einmaligen Beschickung mit W kg, den Halbmesser des Zylinders mit r m, die Länge desselben mit L m, die scheinbare Dichtigkeit des feuchten Stoffes mit ρ_w kg/m³, die Proportion der eingegebenen Stoffmenge zum innern Volum des Halbzylinders mit β , so erhält man folgende Formel.

$$W(1+w_1)/\rho_w = \beta(\pi/2)r^2L$$

Setzt man dann α kg/h.m² für die scheinbare konstante Trocknungsgeschwindigkeit, A m² für den inneren Flächeninhalt, den der Stoff berührt, so ergibt sich:

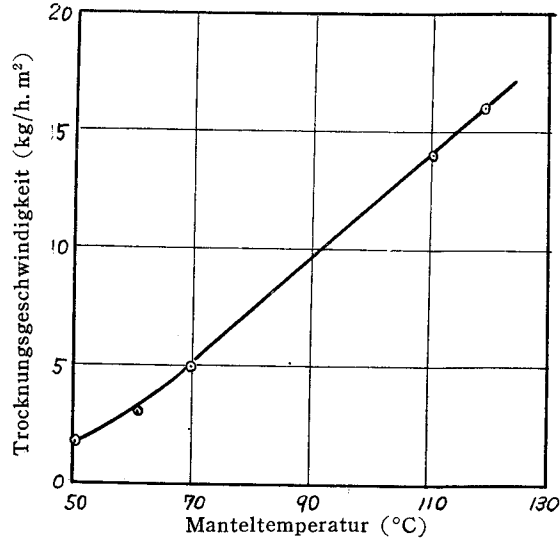


Abb. 23

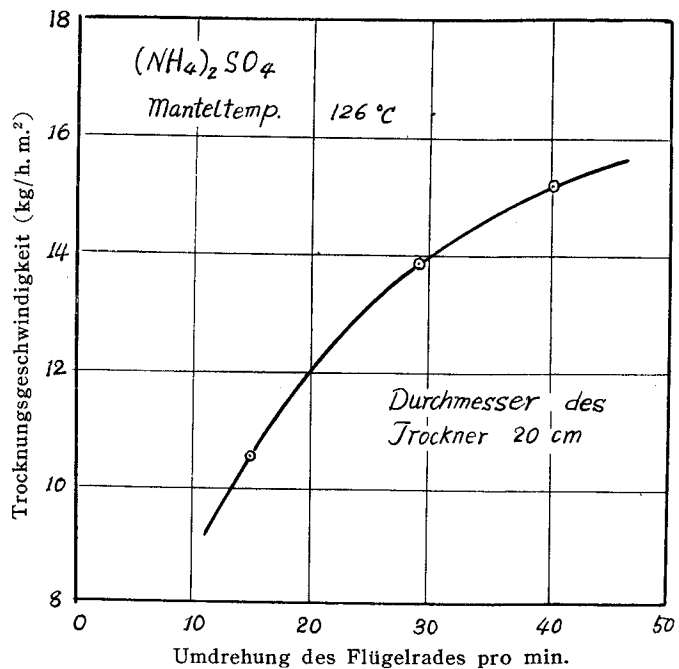


Abb. 24

$W(w_1 - w_2) = \alpha \theta A$, woraus die Trocknungszeit θ zu berechnen ist, Falls man das experimentell gesuchte α gebraucht, ist die Berechnung der Vorrichtung sehr leicht. Bedeutet W' die Menge des Beschickten Stoffs kg/h im Falle des kontinuierlichen Apparats, so erhält man:

$$W(w_1 - w_2) = \alpha A$$

Ferner sind die Filterkuchen von Farbstoff, Sojasauceextrakt, Katalysator u.d.gl. schlammartig. Wenn man sie im Trockner erhitzt, wird ihr Zustand zuerst flüssig, dann im Laufe der Trocknung klebrig, massig und zuletzt pulverig. Was aber den Mechanismus der Trocknung betrifft, so besteht fast kein wesentlicher Unterschied zwischen dem Fall körnigen Stoffs und diesem. Besonders muss man auf die Form des Flügelrades in diesem Fall achten. Gebraucht man nämlich einen breiten Flügel bei klebrigem Stoff, so ist zu befürchten, dass er sich mit dem Stoff nahezu untrennbar zusammendrehet. Darum ist es besser, einen Flügel zu gebrauchen, dessen Spitze spiralförmig ist. Bleibt irgendeine Masse in dem mittleren Teil des Flügels stecken und stört das Verfahren, so kann man dies dadurch verhindern, dass man eine mässige Anzahl kleiner Eisen- oder Porzellankugeln hineinsetzt. Hierdurch wird ausserdem der Stoff zerkleinert, so dass die Trocknung beschleunigt wird. Zwar wurde obiger Versuch unter konstantem Druck angestellt, doch auch bei der Vakuumtrocknung lässt sich leicht dieselbe Beziehung feststellen. Ist die Temperatur des Mantels niedrig, so ist es von Wirkung, wenn man seine gute Ventilation am oberen Teil des Trockners herstellt. Fallen ferner ultrarote Strahlen von oben ein, so kann es vorkommen, dass die Trocknung beschleunigt wird.

Die Verfasser haben dasselbe Experiment mit dem mehrstufigen Tellertrockner angestellt und festgestellt, dass sich derselbe Trocknungsmechanismus, wie bei dem Muldentrockner ergibt. Weiter mag es wohl denkbar sein, dass ein derartiger Mechanismus sich sowohl bei dem Trommeltrockner als auch bei den anderen Vorrichtungen mit Rührverfahren findet.

Zusammenfassung

- (1) Die Trocknungsgeschwindigkeit beim Muldentrockner behält einen konstanten Wert bis ein sehr niedriger Wassergehalt erreicht ist.
- (2) Sind die Temperature des Mantels und die Rührgeschwindigkeit konstant, so zeigt die scheinbare konstante Trocknungsgeschwindigkeit einen konstanten Wert, ohne durch die Sorte des Trocknungsstoffs, das Verhältnis der Beschickungsmenge zum Apparat u. dgl. beeinflusst zu werden.
- (3) Gibt man kleine Kugeln in den Apparat bei der Trocknung von grobkörnigem Stoff, so wird sowohl die Zerkleinerung des Stoffs als auch die Trocknung desselben beschleunigt.

III. Versuch mit Stromtrokner

Die Verfasser haben versuchsweise einen Stromtrokner konstruiert mit vielen Stoffen Trocknungsexperimente angestellt. Besonders haben sie die gleichmässige Beschickung des Stoffs, die Aufsammlung von getrockneten Pulvern, die Messung des Gases im Trocknungsrohr und das Sammeln der Stoffprobe beachtet. Ansserden haben sie betreffs eines Falles experimentiert, in dem eine Zerkleinerung vor der Trocknung erforderlich ist.

Prinzip der Untersuchung

Bei der Stromtrocknung handelt es sich darum, dass man körnige oder pulverige Stoffe heftig an einen heissen Luftstrom anstossen und darin schweben lässt; während des Hochgerissenwerdens ins Luftstrom trocknen sie augenblicklich. Durch diesen Anstoss an den Strom vollzieht sich mehr oder weniger die Zerkleinerung. Im Filterkuchen, ist der Wassergehalt hoch. Darum ist es schwierig, diesen gleich im Luftstrom schweben zu lassen. Daher mischt man mit schon getrocknetem Stoff, damit der Wassergehalt des ersteren herabgesetzt werde. Was die grosse Masse betrifft, so beschickt man dazu mit Mahlzeug. Deshalb bedarf der Stromtrokner ausser dem Trocknungsrohr noch mehrerer zugehöriger Apparate, um die Erhitzungsluft zu erzeugen, den Stoff zu mischen, ihn gleichmässig zu beschicken und die getrockneten Pulver zu sammeln. Die Stromtrocknungsweise ist zwar seit alters her bekannt, aber erst seit ungefähr 1948 ist sie industriell in grösserem Masse angewandt worden. Trotz der Veröffentlichung einiger praktischer Beispiele⁴⁾ ist kein grundlegender Bericht bis jetzt erschienen. Das ist der Grund, warum die Verfasser eine Versuchsvorrichtung konstruiert und eine fundamentale Untersuchung begonnen haben. Wenn diese auch noch zu keinem völligen Abschluss gekommen ist, haben wir doch einige bemerkenswerte Resultate gefunden, welche wir hier bekanntzugeben wünschen.

Versuchsvorrichtung

Abb. 25 zeigt den Umriss der Vorrichtung. Das Trocknungsrohr ist ein Stahlrohr von 4 Zoll Durchmesser, 15 m lang; die maximale Gasmenge des Gebläses beträgt $15 \text{ m}^3/\text{min}$. Als Wärmequelle haben wir uns des Gases der städtischen Gasanstalt bedient und im Bereich von 100 bis 600°C experimentiert. Die maximale Verdampfungswassermenge ist 100 kg/h , die maximale Beschickungsmenge $1,000 \text{ kg/h}$. Als Speisevorrichtung haben wir den Telleraufgabeapparat benutzt und die getrockneten Produkte mit dem Zyklon gesammelt. Für das, was nicht angesammelt werden konnte, haben wir Beutelfilter oder Venturiscrubber gebraucht.

Die Temperatur des Luftstroms ist an 10 Stellen mit dem in Abb. 26 dargestellten Apparate gemessen worden. Durch den Luftstrom dreht sich eine Kappe, wodurch

das Pulver fortfliegt, und sich die genaue Temperatur des Gases zeigt. Mit dem Apparat in Abb. 27 haben die Verfasser die pulverige Probe herausgezogen und den Feuchtigkeitsgehalt an 7 Stellen gemessen. Der statische Druck im Apparate ist an 8 Stellen gemessen worden.

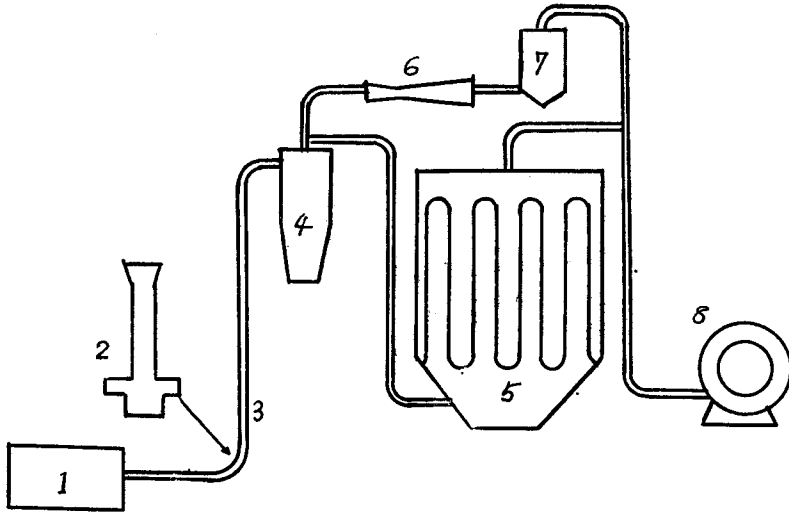


Abb. 25 Umriss des Stromtrockners

1. Lufterhitzer 2. Tellerabgabeapparat 3. Trocknungsrohr
4.7. Zyklon 5. Beutelfilter 6. Venturiscrubber 8. Gebläse

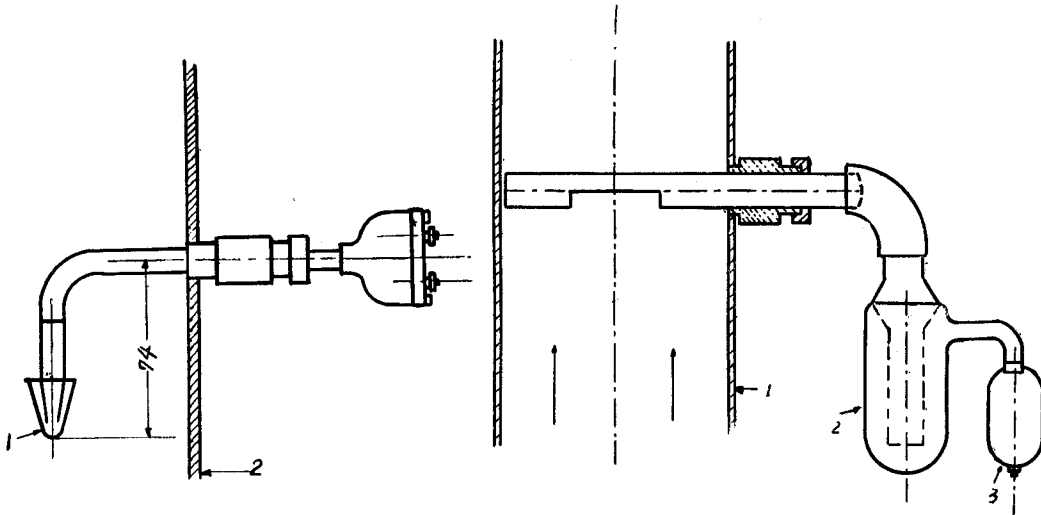


Abb 26

Abb. 27

1. Drehungskappe
2. Trocknungsrohrwand

1. Trocknungsrohrwand
2. Probegefäß
3. Aussauger aus Gummi

Resultate des Versuchs

Experimente mit verschiedenen Stoffen, wie basisches Phosphorkupfer, aktive Kohle, Holzpulver, Staubkohle, Polyvinylchlorid, Vinylidenmischpolymer, Ammoniumsulfat, Kalkkarbonat u. dgl., wurden gemacht und die passendsten Trocknungsbedingungen festgestellt, deren Bereich sich folgendermassen darstellt: Luftgeschwindigkeit=10 bis 30 m/sec, Gewichtsproportion der Beschickung zur Windmenge =0.03 bis 1.0, Trocknungszeit=0.5 bis 2 sek, gesamter Druckverlust=400 bis 500 mm W. S. Wird die Proportion der Stoffbeschickung gross, so wird auch der Druckverlust gross. Die Kurven der Wassergehaltsverminderung im Rohr finden sich in Abb. 28, 29, 30 und 31, dargestellt. Wie man aus diesen Abbildungen ersieht, fällt die Kurve der Verminderung des Wassergehaltes steil ab bis nahe an die anfänglichen 6 m der Rohrlänge, von dieser Stelle an wird sie sehr sanft. Das gilt für alle Stoffe und charakterisiert diesen Trocknungsapparat. Da die Trocknung in einem Augenblick geleistet wird, ist sie zum Trocken derjenigen Stoffe geeignet, die für Wärme empfindlich sind. Beim Versuche wurde Luft von 470°C zur Trocknung von Stärke gebraucht. Die Stofftemperatur war 48°C. Selbst wenn man den Kohlenstaub mit Luft von 500

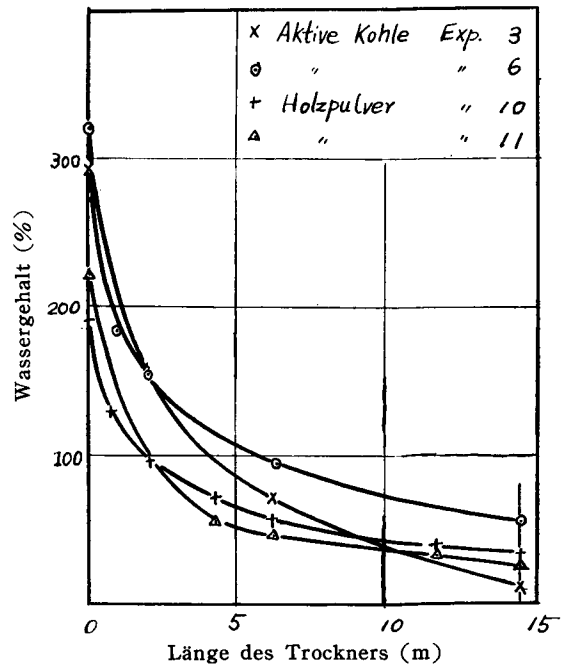


Abb. 28

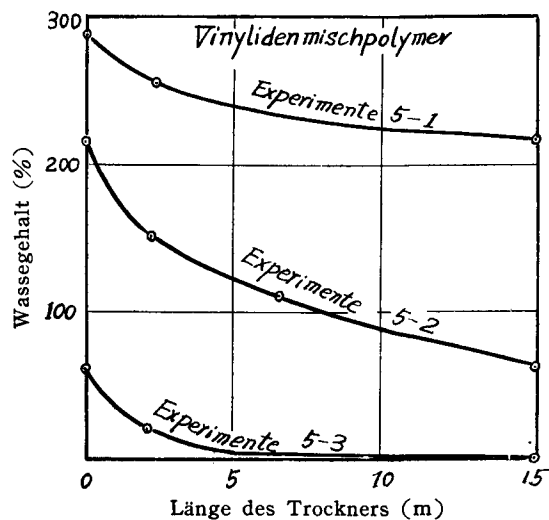


Abb. 29

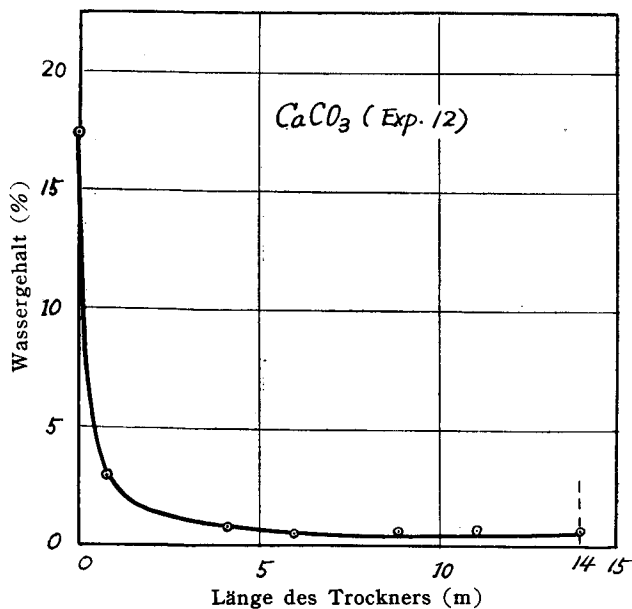


Abb. 30

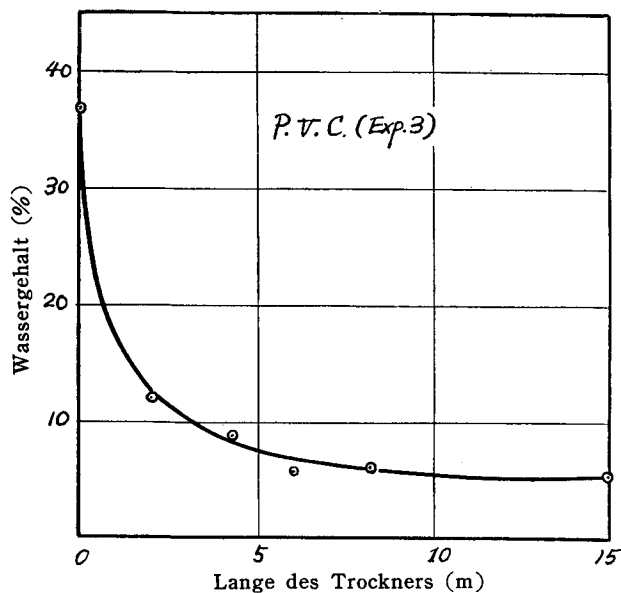


Abb. 31

bis 600°C beschickte, behält der Stoff ungefähr 70°C ohne über die Nasskugeltemperatur hinauszugehen. Im Laufe der Trocknung sinkt die Lufttemperatur, d. h. sie wird etwa 100°C, während die Temperatur des Stoffs allmählich steigt. Falls die

Trocknung sehr schwer ist und man den Wassergehalt äusserst niedrig machen muss, verlängert man die Periode des Verweilens ins Luftstrom oder man vollzieht die Trocknung in mehreren Abschnitten. In Abb. 29 ist ein Beispiele für die dreistufige Trocknung gegeben. Tabelle 2 und 3 sind typische Beispiele für die Messung und die Berechnung der Wert. Ferner zeigt Tabelle 3 den Fall, in dem man den Desintegrator gebraucht. Wie man in Tabelle 4 beobachten kann, findet der grösste Teil dieser Trocknung, nämlich der Verminderung des Wassergehaltes, in der Zerkleinerungsmühle statt.

Tabelle 2

Versuchsnummer	1	2	3	2	12	13
Stoffarten	(NH ₄) ₂ SO ₄	(NH ₄) ₂ SO ₄	P. V. C.	P.V.C. P.V.C. den	CaCO ₃	CaCO ₃
Wassergehalt des Nassgutes	1.95	0.79	37.1	113	17.4	19.4
Beschickungsstoffmenge (kg/h)	764	520	30.5	44.5	171	113.5
Wassergehalt des Trockenstoffs	0.28	0.14	5.0	66	0.4	0.57
Temperatur des Trockenstoffs (°C)	60	48	23.4	34.7	56	55
Trocknungsgasmenge (kg/h)	764	701	1022	997	451	250
Heisslufttemperatur (°C)	210	155	143	94	304	313
Eintrittsgastemp. im Zyklon (°C)	65	55	93.0	39	114	103
Austrittsgastemp. aus dem Zyklon	65	55	81.3	38	107	94
Verdampfte Wassermenge (kg/h)	12	4	7.11	9.82	24.8	17.9
Verdampfte Wassermenge kg pro kg Trockenluft	—	—	0.00698	0.00986	0.0549	0.0716
Verhältnis kg Stoff pro kg Luft	1.00	0.742	0.0298	0.0447	0.380	0.494
Gesamtdruckverlust des Gebläses mm W. S.	570	585	538	577	385	210
Druckverlust im Schlauchfilter mm W. S.	52	40	15	14	46	92
" im Zyklon "	81.5	68	220	233	80	31
" im Trocknerrohr "	375	426	116	117	83	51
Eintrittsgasfeuchtigkeit	0.010	0.012	0.010	0.0155	0.007	0.0081
Abluftfeuchtigkeit	0.026	0.018	0.01698	0.02536	0.0619	0.0797
Gasgeschwindigkeit im Zykloneintritt (m/sek)	25.8	23.75	29.2	29.65	18.6	10.3
Trocknungszeit (sek)	0.45	0.62	0.475	0.4725	0.892	1.44

Tabelle 3

Versuchsnummer	3	4	7	8	8'	10
Stoffarten	Kohle		Kohlenstaub			
Wassergehalt des Nassgutes	14.5	14.5	23.9	23.9	23.9	14.3
Beschickungsstoffmenge (kg/h)	1001	1205	188	170	178	443.5
Wassergehalt des Trockenstoffs (°C)	8.1	8.38	1.75	1.49	1.75	1.12
Temperatur des Trockenstoffs (°C)	43	35	37	53	53	69
Trocknungsgasmenge (kg/h)	10323	1344	1285	1085	950	818
Heisslufttemperatur (°C)	205	185	288	360	355	504
Eintrittsgastemperatur in Zyklon (°C)	60	57	95	112	110	100
Verdampfte Wassermenge (kg/h)	55	63	34	31	32	50.5
Verdampfte Wassermenge kg pro kg Trockenluft	0.0415	0.0468	0.02645	0.0286	0.0337	0.0618
Verhältnis kg Stoff pro kg Luft	0.757	0.896	0.146	0.157	0.187	0.48
Gesamtdruckverlust im Gebläse mm. W. S.	375	397	417	275	275	223
Druckverlust im Schlauchfilter "	45	42	45	40	58	62
" im Zyklon "	40	30	63	35	30	30
" im Trocknerrohr "	200	224	105	8	75	75
" in der Mühle "	70.5	70	162	101	94	40
Eintrittsgasfeuchtigkeit	0.0067	0.0066	0.008	0.008	0.008	0.012
Gasgeschwindigkeit beim Zykloneitritt (m/sek)	28.7	30.8	30.0	27.0	24.6	21.1
Trocknungszeit (sek)	0.362	0.327	0.334	0.371	0.407	0.476

Tabelle 4

Versuchsnummer	3	4	7	8
Stoffarten	Kohl		Kohlenstaub	
Wassergehaltsverminderung %				
in der Mühle { Anfang	14.5	14.5	23.9	23.9
" bis	9.3	9.0	5.0	6.77
" Verminderung	5.2	5.5	18.3	17.13
" Verhältnis von ganzen	87	97	85	76.5
im Trockner { bis	8.54	8.83	1.75	1.5
" Verminderung	0.76	0.17	3.25	5.27
" Verhältnis von ganzen	13	3	15	23.5

Mechanismus der Trocknung

Betrachtet man den Mechanismus der Trocknung im Trocknungsrohr, so sieht man: zuerst stossen sich die Teilchen, die 2 bis 5 mm gross und durch den Wassergehalt kohäriert sind, an der heissen Luft, deren Strömungsgeschwindigkeit etwa 30 m/sek ist, so dass sie dispersieren und die Produkte als Pulver von 20 bis 30 μ aus dem Zyklon herausgenommen werden können. Infolge der Zerkleinerung durch den Anprall vergrössert sich die Trocknungsoberfläche. Die relative Geschwindigkeit der Teilchen is gross, so dass der Wärmeaustansch rasch vorsichgeht und der grösste Teil des Wassergehaltes fast augenblicklich verdampft. Die Geschwindigkeit der Teilchen akzeleriert von 0 bis zur relativen Endgeschwindigkeit. Es ist wohl denkbar, dass

die relative Geschwindigkeit mit der Akzeleration der Teilchen kleiner, somit auch die Trocknung langsamer wird. Wahrscheinlich ist, dass die Separation der Teilchen aber nicht im Augenblick des Anstosses beendet wird, sondern dass dieselbe sich während der Akzeleration wiederholt und ferner die Teilchen durch den Stoss aneinander bzw. an die Wände separiert werden, wodurch sich wiederum Trocknungsflächeninhalt vergrössert und sie Akzeleration weiter

fortsetzt. Aber in einem Stoff wie Kristallit findet die Zerkleinerung in keinem grossen Umfange statt. Abb. 32 eigt den Fall, in dem man Ammoniumsulfat gebrauchte.

Die zur Trocknung des einzelnen Teilchens erforderliche Zeit drückt Perry⁵⁾ durch folgende Formel aus

$$\theta = \rho_m D^2 (w_1 - w_2) \lambda_m / 12 k_f (\Delta t)_m \quad (1)$$

Hieraus stellte er die notwendige Länge des Rohrs $L = \theta u$ fest. In der Fromel bedeutet D den Durchmesser, ρ_m die Dichtigkeit der Teilchen, k_f die Wärmeleitzahl in der Grenzschicht des Gases der Oberfläche des Teilchens, L die Länge des Trocknungsrohrs, die sonstigen Bezeichnungen sind dieselben wie in der nächsten Formel. Was jene

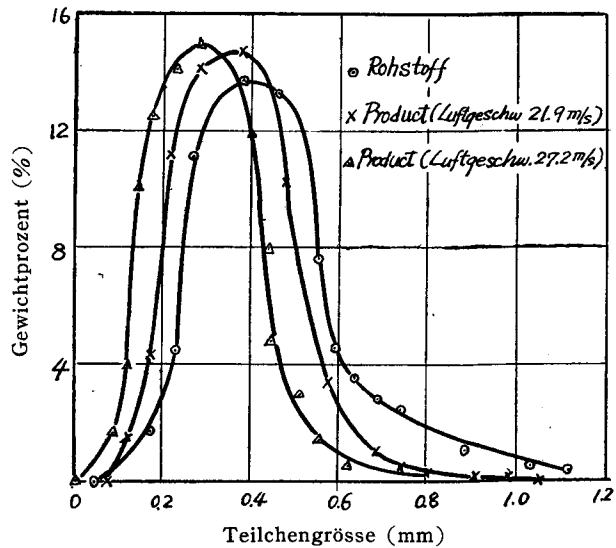


Abb. 32

Fromel betrifft, so berücksichtigte er den Fall, wo ein einzelnes Teilchen von Anfang an die Endgeschwindigkeit u erreicht, wobei das Resultat aber dem Versuchsergebnisse der Verfasser widerspricht. Bezüglich den Versuch mit gefälltem Kalkcarbonat betreffend, sind die Veränderungen der Gastemperatur im Trocknungsrohr, des Wassergehaltes und des statischen Druckverlustes durch Abb. 33 illustriert. Punktirt man den veränderten Zustand der Gastemperatur und Feuchtigkeit auf dem Feuchtigkeitsdiagramm, so wird er wie Abb. 34. zeigt. Bei allen Stoffen, mit denen wir Versuche anstellten, stimmten die Veränderungen der Temperatur bzw. Feuchtigkeit mit den adiabatischen Sättigungslinien nahezu überein.

Demnach kann man vermuten, dass die Veränderung im Trocknungsrohr beinahe eine adiabatische ist. Obgleich der Trocknungsmechanismus, wie wir vorher in qualitativer Beziehung erörtert haben, sehr verwickelt ist, berücksichtigen wir für jetzt einfach den Stoffaustausch- (k_{ga}) und Wärmekapazitätskoeffizienten (ha).

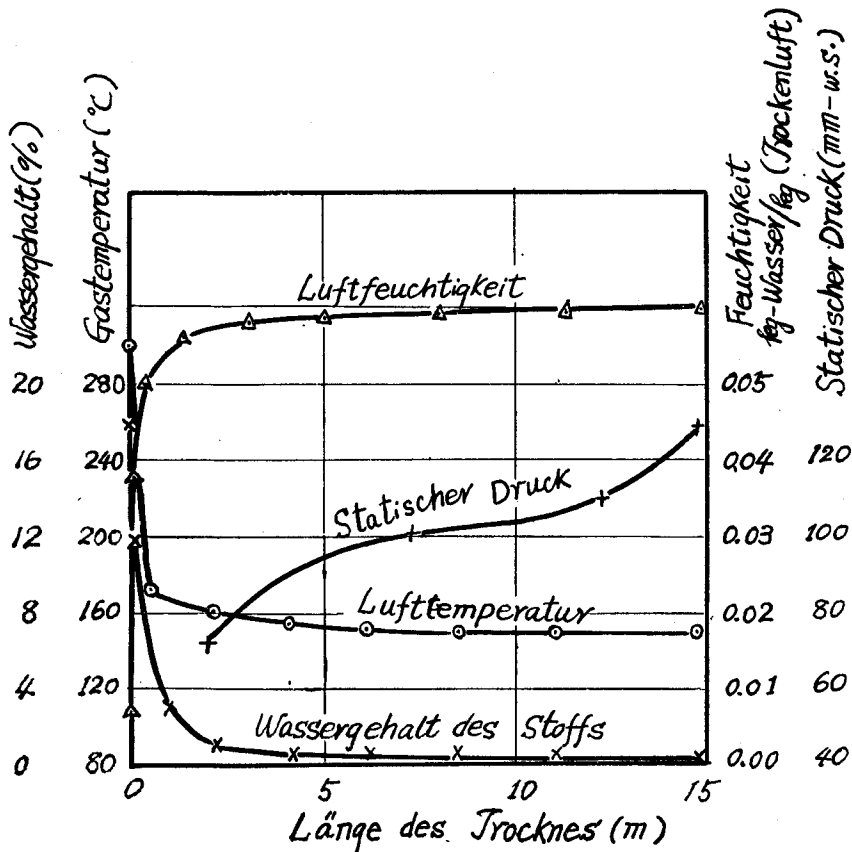
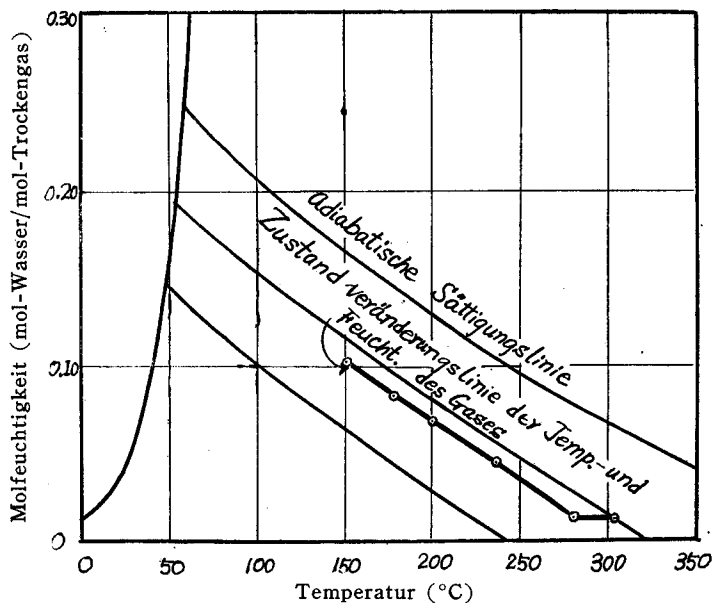


Abb. 33 CaCO₃ : (Experimente 12)

Abb. 34 CaCO_3 (Exp. 12)

Aus der Stoff- und Wärmebilanz ergeben sich:

$$W(w_1 - w_2) = k_G a (\Delta H)_m \quad (2)$$

$$GC_H(t_1 - t_2) = W(w_1 - w_2)\lambda_m = haV(\Delta t)_m \quad (3)$$

- Es ist
- W : das wasserfreie Stoffgewicht kg/h.
 - w : der Wassergehalt kg/kg (wasserfreier Stoff)
 - t : die Gastemperatur °C
 - V : das Volum des Trocknungsrohrs m^3
 - G : das Gasgewicht kg/h
 - $k_G a$: der Stoffaustauschkoeffizient $\text{kg/h.m}^2 \cdot \text{H}$.
 - h : der Wärmeübergangskoeffizient $\text{kcal/h.m}^2 \cdot \text{°C}$.
 - a : die wirksame Berührungsfläche in m^2 je m^3 des aktiven Rohrvolums,
 - ha : der volumetrische Wärmeübergangskoeffizient in kcal für h pro m^3 aktives Volumen bei °C.
 - $k_G a$: der volumetrische Stoffaustauschkoeffizient $\text{kcal/h.m}^3 \cdot \text{h}$.
 - t : Die Gastemperatur °C.
 - t_w : die Stofftemperatur °C.
 - C_H : die spezifische Wärme des Gases. $\text{kcal/kg} \cdot \text{°C}$.
 - λ_m : die latente Wärme des Wassers,

$(\Delta H)_m$: der Durchschnittswert des Unterschiedes zwischen den w_1 bzw. w_2 entsprechenden Gasfeuchtigkeiten H_1 bzw. H_2 und der Feuchtigkeit der Stoffoberfläche H_w

$(\Delta t)_m$: der Durchschnittswert des Unterschiedes zwischen den w_1 bzw. w_2 entsprechenden Gastemperaturen t_1 bzw. t_2 und der Stofftemperatur t_w .

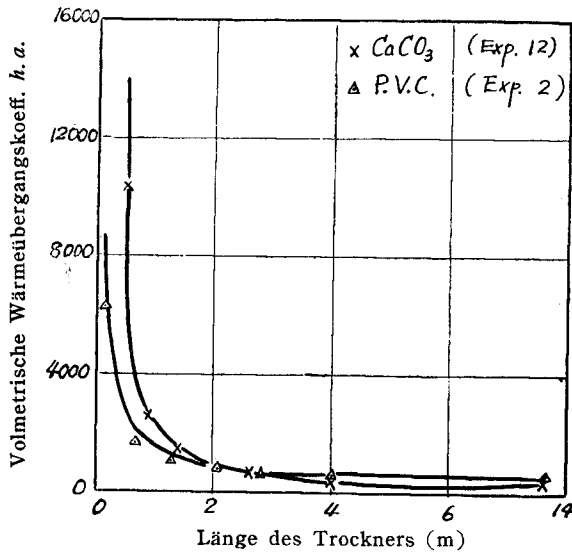


Abb. 35a

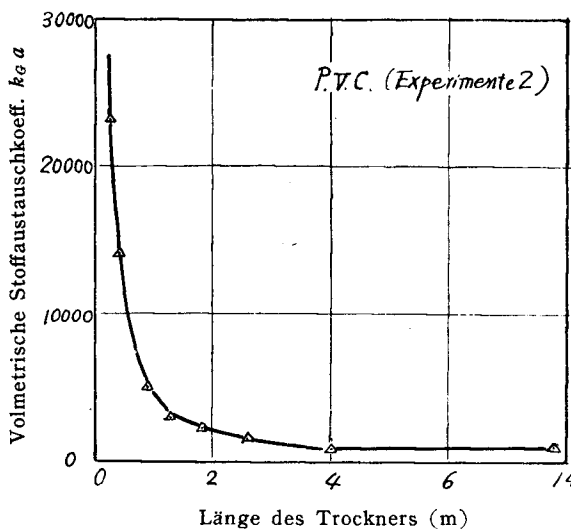


Abb. 35b

Wir haben das Trocknungsrohr in der Richtung der Länge geteilt und h_a bzw. k_{ga} an jedem Punkte aus den Zahlenwerten jeden Teils errechnet, wie dies Abb. 35 illustriert. Sofort nach der Beschickung des Apparates zeigen h_a und k_{ga} wohl die Werte von 4 bis 5×10^4 bzw. 10 bis 18×10^4 , aber sie vermindern sich plötzlich und werden fast konstant, etwa bei den Werten von 2 bis 4×10^2 bzw. 1 bis 1.5×10^3 in dem Teil nach 3 bis 4 m des Rohrs.

Dieses Verhalten war ebenfalls bei allen Stoffen, mit denen die Versuche ausgeführt wurden, das gleiche. Und zwar ergaben sich fast dieselben Zahlenwerte.

Betrachtung der Ergebnisse

Als die im Stromtrocknungsapparate den Mechanismus der Trocknung beeinflussenden Faktoren scheinen in Betracht zu kommen: die Grösse der Teilchen, die

Temperatur sowie Strömungsmenge des Gases, die Zeit der Verweilung, die Stoffmenge der Beschickung und die Dispersionsweise des Rohstoffs in dem Erhitzungsmedium. Falls man den an der Oberfläche des Stoffs adhäsieren Wassergehalt wegnimmt, spielt die Dispersion des Stoffs eine grosse Rolle, während die Zeit des Verweilens kaum beachtenswert ist. Diese Zeit ist jedoch von Einfluss, wenn man den inneren Wassergehalt wegnimmt. Um zu untersuchen, wie diese Faktoren dem Trocknungsmechanismus gemäss die obigen Bedingungen ha und k_{ga} beeinflussen, haben wir so experimentiert, dass wir gefälltes Kalkkarbonat von 30% (Wassergehalt). P. V. C., u. dgl benutzten und die Proportion der Gasmenge zur beschickten Stoffmenge sowie die Gastemperatur veränderten. Leider konnten wir bisher noch keine entscheidende Beziehung finden. Wenn der Einfluss dieser Faktoren auf ha und k_{ga} bekannt wird, muss auch der theoretische Entwurf dieses Trocknungsapparates möglich sein. Wir sind jetzt noch mit weiteren Versuchen zu diesem Zweck beschäftigt.

Zusammengassung

- (1) Der Stromtrockner ist zur raschen Trocknung körniger Stoffe geeignet, erlaubt eine äusserst grosse Behandlungsmenge und sein thermischer Wirkungsgrad ist hoch.
- (2) Die adhäsierende Masse im Trocknungsrohr wird zwar zerkleinert, doch gilt dies Kristallit nur in beschränkter Masse.
- (3) Die Trocknung im Trocknungsrohr verläuft gemäss der adiabatischen Sättigungslinie.
- (4) Nach der Meinung der Verfasser wird der Stromtrockner im Entwurf bestimmbar, wenn man den gegenseitigen Übergang von Wärme und Stoff in der Fliegeschicht beobachtet.

Literatur

- 1) R. Toei, Transactions of the Society of Chemical Engineers, Japan, 8, 86 (1950); S. Kamei, Recent Development of Chemical Engineering, Japan, 209 (1950).
- 2) Walker Lewis, McAdams and Gilliland, Principles of Chemical Engineering, 670 (1937).
- 3) D. B. Broughton and H. S. Mickley: Chem. Eng. Progress, 49, 319 (1953).
- 4) C. W. Gordon, Chemical Engineering Progress, 45, 477 (1949) V. F. Parry and E. O. Wagner, Mining Engineering 187, 974 (1950).
- 5) H. Perry, Chemical Engineering Handbook, 837 (1950).