Untersuchung über die Trocknung fester Stoffe III.

Von Saburo Kamei.

Inhalt:

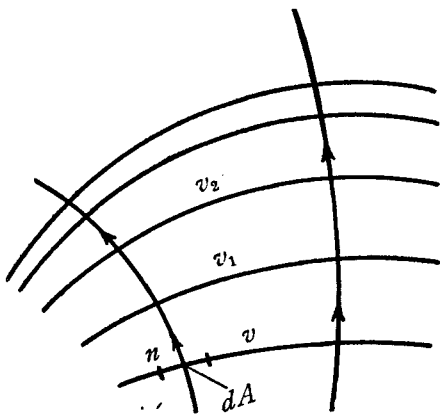
I. Die theoretische Untersuchung der Trocknung fester Stoffe.
II. Der Feuchtigkeitsverteilungszustand im Innern des Feststoffes im Verlauf der Trocknung.
III. Die praktische Anwendung der theoretischen Trocknungsformel.
IV. Die Beziehung zwischen Trocknungsgeschwindigkeit und Probenform.
V. Die empirische Formel für die Trocknung fester Stoffe in der zweiten Periode verlangsamter Trocknungsgeschwindigkeit.

I. Die theoretische Untersuchung der Trocknung fester Stoffe.

1. *Diffusion des Wassers im Innern des Feststoffes und ihre fundamentale Differentialgleichung.*

Der Verteilungszustand des Wassergehaltes im Innern eines homogenen Körpers verändert sich als eine Funktion von Zeit und Lage in demselben, ganz analog der Veränderung der Temperatur im homogenen Körper. Alle Punkte von augenblicklich gleicher Feuchtigkeit bilden eine Isofeuchtigkeitsfläche innerhalb des Körpers. In Abb. I sind einige solcher Flächen verschiedener Feuchtigkeit gezeigt.

Abb. 1.



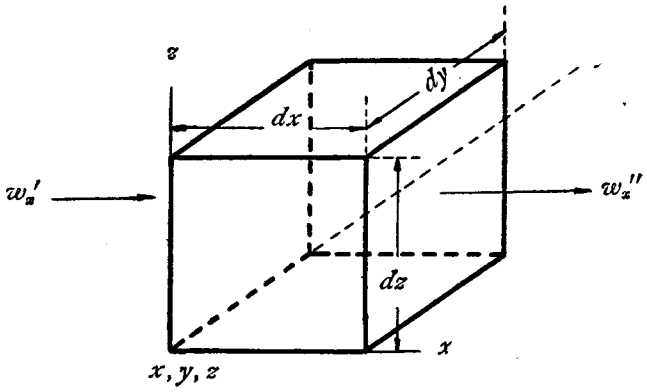
Aus diesen Kurven kann man den augenblicklichen Zustand der Wasserverteilung im Innern des Feststoffes beinahe feststellen. Weder Kontakt noch Kreuzung von zwei Flächen dürfen vorhanden sein, weil ein bestimmter Punkt einer Fläche nicht gleichzeitig zwei Flächen von ungleichen Feuchtigkeitswerten gemeinsam sein kann. Also müssen diese Flächen abgegrenzt sein oder ihre Enden müssen sich am Rande des Körpers befinden, wonach sie sich immerfort umformen, und auch ihre Stellungen sich zeitlich bewegen. Aus unseren Erfahrungen über Wärmeleitung dürfen wir den Schluss ziehen, dass der Wassergehalt im homogenen Körper ebenfalls senkrecht zu den erwähnten Isofeuchtigkeitsflächen diffundiert.

Die Wassermenge dw, die durch die kleine Ebenengrösse dA einer bestimmten Isofeuchtigkeitsfläche, in der kurzen Zeit $d\theta$ diffundiert, steht im Verhältnis $\partial v/\partial n$ zur Wassergehaltsneigung längs der Richtung des Diffundierens und wird folgendermassen ausgedrückt:

$$dw = -\lambda dA \cdot d\theta \partial v/\partial n \quad \ldots\ldots\ldots\ldots (1),$$

worin v der freie Wassergehalt pro Einheitsvolumen des Körpers und λ der Diffusionskoeffizient innerhalb desselben sind. Um einen allgemeinen Fall zu konstruieren, wird ein sehr kleines rechtwinkliges Hexaeder, wie Abb. 2 zeigt, in einem homogenen

Abb. 2.



und isotropen Körper angenommen, dessen drei Seiten die Länge dx, dy und dz haben; so wird die durch eine Ebene des Hexaeders diffundierende Wassermenge folgenderweise ausgedrückt. Erstens ist die längs der x-Achse, d.h. die durch die yz-Ebene hineinkommende Wassermenge

$$dw_x' = -\lambda (dy\,dz) d\theta \frac{\partial v}{\partial x}.$$

Andererseits ist die längs der x-Achse austretende Menge

$$dw_x'' = -\lambda (dy\,dz) d\theta \frac{\partial}{\partial x}\left(v + \frac{\partial v}{\partial x} dx\right).$$

Deshalb ist die Zunahme der Wassermenge längs der x-Achse

$$dw_x = dw_x' - dw_x'' = \lambda (dx\,dy\,dz) d\theta \frac{\partial^2 v}{\partial x^2}.$$

Ganz ähnlich ist die Zunahme der Wassermenge längs der y- und z-Achsen, und zwar wird sie folgenderweise ausgedrückt:

$$dw_y = dw'_y - dw''_y = \lambda(dx\,dy\,dz)\,d\theta\,\frac{\partial^2 v}{\partial y^2}$$

und

$$dw_z = dw'_z - dw''_z = \lambda(dx\,dy\,dz)\,d\theta\,\frac{\partial^2 v}{\partial z^2}.$$

Also ist die gesamte Zunahme der Wassermenge im Hexaeder

$$\begin{aligned} dw_1 &= dw_x + dw_y + dw_z \\ &= \lambda(dx\,d\theta\,dz)\,d\theta\left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2}\right) \ldots (2) \end{aligned}$$

Damit die Feuchtigkeit im Hexaeder andererseits innerhalb der gleichen Zeit $d\theta$ sich um $\frac{\partial v}{\partial \theta}\,d\theta$ vermehre, muss folgende Wassermenge notwendig sein:

$$dw_2 = (dx\,dy\,dz)\frac{\partial v}{\partial \theta}\,d\theta \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (3)$$

Da $dw_1 = dw_2$ sein soll, ist

$$\frac{\partial v}{\partial \theta} = \lambda\left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2}\right) \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (4)$$

Die Formel (4) ist die Grundlage für die Berechnung zeitlich veränderlicher Diffusion des Wassers innerhalb des Körpers.

Im Fall, dass die Diffusion des Wassers längs der y- und z-Richtungen gar nicht stattfindet, z.B. dass die vier Seiten der Hexaederprobe mit einem wasserdichten Stoffe bedeckt sind, damit das Wasser nur an den beiden parallelen Flächen vorn und hinten verdampfen kann, erkennt man deutlich in Formel (4) folgende Verhältnisse:

$$\frac{\partial^2 v}{\partial y^2} = 0 \text{ und } \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} = 0$$

Dann wird die Formel (4) wie folgt

$$\frac{\partial v}{\partial \theta} = \lambda\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (5)$$

Auch dürfte Formel (5) auf den Fall anwendbar sein, in dem die vier Seiten des Hexaeders nicht wasserdicht, aber die übrigen zwei Flächen vorn und hinten gross genug sind, um den Einfluss der vier Seiten nicht beachten zu brauchen.

2. *Besondere Lösungen und ihre Grenzbedingungen.*

Die besonderen Lösungen für Formel (5) sind ganz analog wie die für die Wärmeleitung und wie folgt wiedergegeben

$$\left.\begin{aligned} v &= e^{-\lambda n^2 \theta}\, C \cos(nx) \\ &\text{und} \\ v &= e^{-\lambda n^2 \theta}\, D \sin(nx) \end{aligned}\right\} \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (6)$$

Hierbei sind C, D und n alles Konstanten, die in sich die Verwandlungsquantitäten x und θ nicht enthalten.

Die besonderen Lösungen, wie man sieht, enthalten Exponential- und Schwingungsfunktionen. Die Gleichung der Feuchtigkeitsverteilung für die gegebenen Bedingungen kann man im allgemeinen aus der Allgemeinlösung, die auf der besonderen Lösung beruht, dadurch gewinnen, dass man die gegebenen örtlichen und zeitlichen Grenzwerte in sie einsetzt und die Konstantenwerte bestimmt.

Grenzbedingungen.

Man kann gewöhnlich die Oberflächenbedingungen in die drei folgenden einteilen:

1. $v = 0$ oder konstant

Oberflächenfeuchtigkeitsgehalt null oder konstant d.h. keine zeitliche Veränderung.

2. $\frac{\partial v}{\partial x} = 0$

Wasserdicht bedeckte Oberfläche d.h. keine Oberflächenverdampfung

3. $\lambda\frac{\partial v}{\partial x} = -av$

order

$$\frac{\partial v}{\partial x} = -hv,$$

worin $h = a/\lambda$

und a der Oberflächenverdampfungskoeffizient ist.

Bei der dritten Bedingung handelt es sich um allgemeine Oberflächenbedingungen, unter denen der Wassergehalt in die umgebende Luft verdampft, die mit den Oberflächen in Kontakt steht. Überdies nehmen wir an, dass die umgebende Luftfeuchtigkeit sich nicht zeitlich verändert und auch die Koeffizienten λ und a konstant sind. Wird h in der dritten Bedingung sehr klein, so wird sie annähernd auf die zweite Bedingung hinauslaufen, wird aber h im Gegenteil sehr gross oder λ sehr klein, so nähert sich die dritte der ersten Bedingung an. Kurz gesagt, die Bedingung (3) enthält alle Fälle der Oberflächenbedingungen in sich.

Ferner gibt es für die Anfangsbedingungen folgende zwei Fälle, die davon abhängig sind, ob der Wassergehalt im Körper gleich ist oder eine bestimmte Feuchtigkeitsneigung zuvor besteht; dabei sei

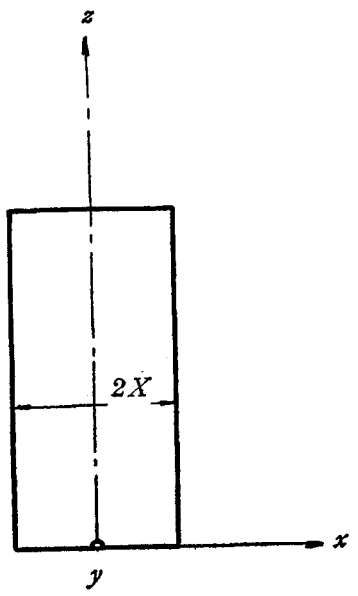
$$(v)_{\theta=0} = \text{konstant}$$

oder

$$(v)_{\theta=0} = f(x),$$

wenn das Wasser unter gleichen Bedingungen an beiden Oberflächen der festen Probe verdampft und ihre Feuchtigkeit innerhalb der Probe zur Zeit $\theta = 0$ überall gleich ist, ist es klar, dass die beiden Neigungskurven der Feuchtigkeit zur yz- Ebene, die inmitten von zwei Wänden steht, symmetrisch

Abb. 3.



werden. Wenn wir ferner den Nullpunkt der Koordinatenachse an den Mittelpunkt verlegen, so wird demzufolge die Feuchtigkeitsverteilung ganz gleich wie in dem Fall, wo die yz- Ebene in Abb. 3, an $x=0$ wasserdicht bedeckt ist.

Die Oberflächenbedingungen sind deshalb wie folgt:

$$x=0 : \left(\frac{\partial v}{\partial x}\right)_{x=0}=0$$

und

$$x=X: \left(\frac{\partial v}{\partial x}\right)_{x=X}=-hv.$$

Darin stellt $2X$ die Dicke der Probe dar.

3. *Trocknungsgeschwindigkeiten und Grenzbedingungen.*

Den Versuchsresultaten nach teilt der Verfasser die Trocknungskurven fester Stoffe in folgende vier Arten auf Grund der Stoffarten, Trocknungsbedingungen usw. ein.

a. Zu Anfang findet sich die konstante Trocknungsgeschwindigkeit. Von der Grenze eines gewissen Wassergehaltes an folgt darauf die erste Periode verlangsamter Trocknungsgeschwindigkeit und dann die zweite der verlangsamten Trocknungsgeschwindigkeit. Dies ist ganz normal.

b. Auf die konstante Trocknungsperiode direkt folgt die zweite Periode verlangsamter Trocknungsgeschwindigkeit.

c. Von Anfang an herrscht die zweite Periode verlangsamter Trocknungsgeschwindigkeit.

d. Die Trocknung beginnt mit der ersten Periode der Verlangsamung und danach folgt die zweite.

Gemäss den oberen vier Fällen darf man die verschiedenen Grenzbedingungen für die fundamentalen Gleichungen wie folgt annehmen:

I. Konstante Trocknungsgeschwindigkeit.

Grenzbedingungen:

$$\left.\begin{array}{ll} (1) & x=0 : \left(\frac{\partial v}{\partial x}\right)_{x=0}=0 \\ (2) & x=X: \left(\frac{\partial v}{\partial x}\right)_{x=X}=-hv \\ (3) & \theta=0 : (v)_{\theta=0}=v_0 \end{array}\right\} \cdots\cdots\cdots (7)$$

worin v_0 den Wassergehalt vor der Trocknung bedeutet. Man muss die zweite Bedingung von Formel (7) sorgfältig beachten, denn unachtsam mag man leicht die Wassergehaltsneigung an der Oberfläche während der Periode konstanter Trocknungsgeschwindigkeit für konstant, d.h. $\left(\frac{\partial v}{\partial x}\right)_{x=X}=-h$, halten. In der Tat zeigt das experimentelle Resultat des Verfassers das Gegenteil.

II. Erste Periode verlangsamter Trocknungsgeschwindigkeit.

A. Diese Periode folgt auf die der konstanten Trocknungsgeschwindigkeit.

B. Die erste Periode vollzieht sich von Anfang an ohne konstante Trocknungsperiode.

Grenzbedingungen:

$$\left.\begin{array}{ll} (1) & x=0 : \left(\frac{\partial v}{\partial x}\right)_{x=0}=0 \\ (2) & x=X: \left(\frac{\partial v}{\partial x}\right)_{x=X}=-hv \\ (3) & \theta=0 : \begin{cases} \text{A} : (v)_{\theta=0}=f(x)=v_c \\ \text{B} : (v)_{\theta=0}=v_0 \end{cases} \end{array}\right\} \cdots (8)$$

Aus dem Experiment geht hervor, dass die Feuchtigkeitsverteilung zur Grenzzeit innerhalb der Probe überall gleich ist, i.e. $f(x)=v_c$, worin v_c gleich dem verteilten Grenzwassergehalt ist. Daher muss im Fall A, $(v)_{\theta=0}=v_c$ die Zeit θ von der Grenzzeit an gerechnet werden, aber im Fall B, $(v)_{\theta=0}=v_0$ die Zeit θ von Anfang der Trocknung an.

III. Die zweite Periode verlangsamter Trocknungsgeschwindigkeit.

A. Ohne irgendwelche vorhergehende Trocknungsperiode.

B. Nach vorhergehender konstanter Trocknungsperiode (ohne erste Periode verlangsamter Trocknung.)

C. Nach vorhergehender erster Periode verlangsamter Trocknung.

Grenzbedingungen:

$$\left.\begin{array}{ll} (1) & x=0 : \left(\frac{\partial v}{\partial x}\right)_{x=0}=0 \\ (2) & x=X: (v)_{x=X}=0 \\ (3) & \theta=0 : \begin{cases} \text{A} : (v)_{\theta=0}=v_0 \\ \text{B} : (v)_{\theta=0}=v_c \\ \text{C} : (v)_{\theta=0}=f(x) \end{cases} \end{array}\right\} \cdots (9)$$

In der zweiten Periode verlangsamter Trocknung vermehrt sich der Widerstand gegen die Wasserdiffusion in der Probe, während im Vergleich dazu der Widerstand gegen die Oberflächenverdampfung gering ist.

Aus der Wassergehaltskurve wurde experimentell bestätigt, dass der Wassergehalt in einem Fall sehr schnell mit der Luft im Gleichgewicht gehalten ist, was zeigt, dass $(v)_{x=X}=0$ ist.

Für die Anfangsbedingungen gilt ferner $(v)_{\theta=0}=v_0$ bei Fall A, aber $(v)_{\theta=0}=v_c$ bei Fall B.

Bei Fall A wird θ von der Anfangszeit an gerechnet, bei den anderen Fällen dagegen von der Grenzzeit an. Bei Fall C gilt $(v)_{\theta=0}=f(x)$, mit anderen Worten, v ist von x abhängig und der Wassergehalt in der Probe zur Anfangszeit nicht überall gleich, ferner stimmt der Nullpunkt mit der Anfangszeit überein.

4. *Bestimmung der Konstantenwerte in der allgemeinen Lösung.*

Bei diesem Zustand können wir die Formel der Feuchtigkeitsverteilung, d.h. die allgemeine Lösung der partiellen Differentialgleichungen mittels besonderer Lösungen erschliessen und die Tatsache erkennen, dass nach unendlich langem Zeitverlauf, anders gesagt, bei einem Gleichgewichtszustand von Feuchtigkeiten innerhalb und ausserhalb der Probe die Feuchtigkeitsverteilungskurve linear wird.

$$v=A+Bx+\sum_{k=1}^{k=\infty}e^{-\lambda n_k^2\theta}\{C_k\cos(n_kx)+D_k\sin(n_kx)\} \quad \text{.....(10)}$$

worin A, B, C, D, und n alles Konstanten darstellen, jede enthält nicht x und θ in sich.

Bestimmt man die Werte dieser Konstanten aus den oberen Grenzbedingungen, so kann man eben die erforderlichen Gleichungen der Feuchtigkeitsverteilung erhalten. Wir wollen folgenderweise die Konstantenwerte in der allgemeinen Lösung eine um die andere bestimmen.

I. Konstante Trocknungsgeschwindigkeit.

Grenzbedingungen:

$$\left.\begin{array}{ll}(1) & x=0:\ \left(\dfrac{\partial v}{\partial x}\right)_{x=0}=0\\ (2) & x=X:\ \left(\dfrac{\partial v}{\partial x}\right)_{x=X}=-hv\\ (3) & \theta=0:\ (v)_{\theta=0}=v_0\end{array}\right\} \quad \text{.....(7)}$$

Da der freie Wassergehalt bei dem Gleichgewichtszustand, der $\theta=\infty$ entspricht, sich Null nähern soll, ist es klar, dass A und B unter unbestimmten Konstanten in Formel (10) gleich Null angesehen werden können.

Um nun aus den Oberflächenbedingungen den Wert n_k zu erschliessen, setzt man die aus Formel (10) berechneten Werte von $\left(\dfrac{\partial v}{\partial x}\right)_0$ sowohl wie $\left(\dfrac{\partial v}{\partial x}\right)_X$ als auch von $(v)_X$ an den entsprechenden Stellen der Gleichung (7) ein, so ist

$x=0$:

$$\left(\frac{\partial v}{\partial x}\right)_{x=0}=\sum_{k=1}^{k=\infty}e^{-\lambda n_k^2\theta}D_kn_k=0$$

$$\therefore\ D_k=0 \quad \because\ n_k\neq 0 \text{ und } e^{-\lambda n_k^2\theta}\neq 0$$

$x=X$:

$$\left(\frac{\partial v}{\partial x}\right)_{x=X}'=-h\sum_{k=1}^{k=\infty}e^{-\lambda n_k^2\theta}C_k\cos\delta_k$$

$$=-\sum_{k=1}^{k=\infty}e^{-\lambda n_k^2\theta}C_kn_k\sin\delta_k$$

worin $n_kX=\delta_k$

$$\therefore\quad \delta_k\sin\delta_k=hX\cos\delta_k$$

$$\tan\delta_k=hX/\delta_k \quad \text{.....(11)}$$

Nach Formel (11) hat δ_k unendlich viele Realwurzeln und ist $D_k=0$, so ist nur C_k unbestimmt geblieben. Den Anfangsbedingungen nach ist

$\theta=0$:

$$(v)_{\theta=0}=\sum_{k=1}^{k=\infty}C_k\cos(n_kx)=v_0 \quad \text{.....(12)}$$

und C_k steht ausserdem in folgendem Verhältnis zur Fourierschen Theorie

$$C_k=\frac{\int_0^X v_0\cos(n_kx)\,dx}{\int_0^X\cos^2(n_kx)\,dx}=v_0\frac{2\sin\delta_k}{\sin\delta_k\cos\delta_k+\delta_k} \quad \text{.....(13)}$$

Setzt man die oben gefundenen Konstantenwerte in Formel (10) ein, und auch $n_k=\delta_k/X$, so erhält man die erforderliche Gleichung für die Verteilung des Wassergehaltes:

$$v=v_0\sum_{k=1}^{k=\infty}2\frac{\sin\delta_k}{\sin\delta_k\cos\delta_k+\delta_k}e^{-\delta_k^2\frac{\lambda\theta}{X^2}}\cos\left(\delta_k\frac{x}{X}\right) \quad \text{...(14)}$$

Ferner ist nach dem Verhältnis von $\tan\delta_k=hX/\delta_k$

$$\frac{\sin\delta_k}{\sin\delta_k\cos\delta_k+\delta_k}=\frac{hX\sqrt{\delta_k^2+h^2X^2}}{\delta_k(\delta_k^2+h^2X^2+hX)} \quad \text{.....(15)}$$

Gleichung (14) wird

$$v=v_0\sum_{k=1}^{k=\infty}\frac{2hX\sqrt{\delta_k+h^2X^2}}{\delta_k^2(\delta_k^2+h^2X^2+hX)}e^{-\delta_k^2\frac{\lambda\theta}{X^2}}\cos\left(\delta_k\frac{x}{X}\right) \quad \text{...(16)}$$

Während des oben erwähnten Falls, in dem eine Seite der Probe von der Dicke X wasserdicht ist, findet die Verdampfung nur an der anderen Seite statt. Wenn aber die Verdampfung an beiden Oberflächen stattfindet, muss man die Wanddicke als doppelt so gross betrachten. In diesem Fall ist daher der Feuchtigkeitsverteilungszustand symmetrisch zur Mittelfläche, welche als eine wasser-

dicht gehaltene yz-Ebene angenommen wird. Ferner erhält man den Durchschnittswassergehalt v_m in der Zeit θ aus Formel (14) und (16) wie folgt:

$$v_m=\frac{1}{X}\int_0^X v\,dx=\frac{1}{X}v_0\sum_{k=1}^{k=\infty}\frac{2\sin\delta_k}{\delta_k+\sin\delta_k\cos\delta_k}e^{-\delta_k^2\frac{\lambda\theta}{X^2}}\int_0^X\cos\left(\delta_k\frac{x}{X}\right)dx$$

$$=v_0\sum_{k=1}^{k=\infty}\frac{2\sin^2\delta_k}{\delta_k(\delta_k+\sin\delta_k\cos\delta_k)}e^{-\delta_k^2\frac{\lambda\theta}{X^2}}$$

$$=v_2\sum_{k=1}^{k=\infty}\frac{2h^2X^2}{\delta_k^2(\delta_k^2+h^2X^2+hX)}e^{-\delta_k^2\frac{\lambda\theta}{X^2}}\quad\ldots\ldots\ldots\ldots(17)$$

II. Erste Periode verlangsamter Trocknungsgeschwindigkeit.

A. Nach vorhergehender konstanter Trocknungsgeschwindigkeit.

B. Ohne vorhergehende konstante Trocknungsperiode.

Vergleicht man die Formal (7) mit (8), so wird klar, dass beide gleiche örtliche Grenzbedingungen haben und in den Fällen B_{I} und B_{II} die Anfangsbedingungen ebenfalls einander gleich sind, im Fall A_{II} aber ihr Anfangswassergehalt nicht v_0 sondern v_c ist. Deshalb sind die Formeln von (11) bis (17) auf Fall B_{II} ohne kleinste Veränderung in sich anwendbar; doch bei Fall A_{II} muss v_c statt v_0 eingesetzt werden. Ferner muss die Zeit θ im Fall A_{II} von der Grenzzeit an gerechnet werden. Bei Betrachtung der verschiedenen Resultate bemerkt man, dass Fall B sehr selten auftritt, Fall A dagegen häufiger. Im allgemeinen ist die erste Periode verhältnismässig von kurzer Dauer und findet sich manchmal überhaupt nicht, wie schon erwähnt, wenn die Trocknungsgeschwindigkeit sehr gross ist.

III. Zweite Periode verlangsamter Trocknungsgeschwindigkeit.

A. Ohne irgendwelche vorhergehende Trocknungsperiode.

Grenzbedingungen:

$$\left.\begin{aligned} x=0&:\left(\frac{\partial v}{\partial x}\right)_{x=0}=0\\ x=X&:\left(\frac{\partial v}{\partial x}\right)_{x=X}=0\\ \theta=0&:(v)_{\theta=0}=v_0\end{aligned}\right\}\quad\ldots\ldots\ldots\ldots(9_{\mathrm{A}})$$

Hier sind auch $A=0$ und $B=0$, wie in Fall I. Setzt man die Werte von $\left(\frac{\partial v}{\partial x}\right)_0$ und $(v)_X$ aus Gleichung (10) an die entsprechende Stelle der Formel (9), so erhält man folgendes Resultat

$x=0$:

$$\left(\frac{\partial v}{\partial x}\right)_{x=0}=\sum_{k=1}^{k=\infty}e^{-\lambda n_k^2\theta}D_k n_k=0$$

Ähnlich wie in Fall I kann man daraus schliessen, dass $D_k=0$ ist.

$x=X$:

$$(v)_{x=X}=\sum_{k=1}^{k=\infty}e^{-\lambda n_k^2\theta}C_k\cos(n_kX)=0$$

$$\therefore\ \cos(n_kX)=\cos\left(\frac{2k-1}{2}\pi\right)=0$$

$$\therefore\ n_k=\frac{2k-1}{2X}\pi\quad\ldots\ldots\ldots\ldots(18)$$

$\theta=0$:

$$(v)_{\theta=0}=v_0=\sum_{k=1}^{k=\infty}C_k\cos(n_kx)\quad\ldots\ldots\ldots\ldots(19)$$

Nach der Fourierschen Reihentheorie ist

$$C_k=\frac{\int_0^X v_0\cos(n_kx)dx}{\int_0^X\cos^2(n_kx)dx}=v_0\frac{2\sin(n_kX)}{n_kX}\quad\ldots\ldots(20)$$

Setzt man die oben gefundenen Werte der Konstanten in Formel (10) ein, so erhält man

$$v=v_0\sum_{k=1}^{k=\infty}\frac{2\sin(n_kX)}{n_kX}e^{-\lambda n_k^2\theta}\cos(n_kx)$$

$$=v_0\sum_{k=1}^{k=\infty}\frac{4\sin\left(\frac{2k-1}{2}\right)\pi}{(2k-1)\pi}e^{-\lambda\left(\frac{\pi}{2}\right)^2\frac{(2k-1)^2\theta}{X^2}}\cos\left(\frac{2k-1}{2}\pi\frac{x}{X}\right)$$

$$=v_0\left(\frac{4}{\pi}\right)\sum_{k=1}^{k=\infty}\frac{(-1)^{k-1}}{(2k-1)}e^{-\left(\frac{\pi}{2}\right)^2(2k-1)^2\frac{\lambda\theta}{X^2}}\cos\left(\frac{2k-1}{2}\pi\frac{x}{X}\right)\quad\ldots\ldots\ldots\ldots(21)$$

Der Durchschnittswassergehalt v_m zur Zeit θ ist:

$$v_m=\frac{1}{X}\int_0^X v\,dx=v_0\left(\frac{8}{\pi^2}\right)\sum_{k=1}^{k=\infty}\frac{1}{(2k-1)^2}e^{-\left(\frac{\pi}{2}\right)^2(2k-1)^2\frac{\lambda\theta}{X^2}}$$

$$=v_0\left(\frac{8}{\pi^2}\right)\left\{e^{-\left(\frac{\pi}{2}\right)^2\frac{\lambda\theta}{X^2}}+\frac{1}{9}e^{-9\left(\frac{\pi}{2}\right)^2\frac{\lambda\theta}{X^2}}+\frac{1}{25}e^{-25\left(\frac{\pi}{2}\right)^2\frac{\lambda\theta}{X^2}}+\ldots\ldots\right\}\quad(22)$$

B. Nach vorhergehender konstanter Trocknungsperiode.

Setzt man v_c an Stelle von $(v)_{\theta=0}=v_0$ in die Anfangsbedingungen des Falls A ein und rechnet θ von der Grenzzeit aus, so sind die Formeln von (18) bis (22) auf diesen Fall direkt anwendbar.

C. Nach vorhergehender erster Periode verlangsamter Trocknung.

Grenzbedingungen:

$$\left.\begin{aligned}&(1)\quad x=0:\left(\frac{\partial v}{\partial x}\right)_{x=0}=0\\&(2)\quad x=X:(v)_{x=X}=0\\&(3)\quad \theta=0:(v)_{\theta=0}=f(x)\end{aligned}\right\}\quad\ldots\ldots\ldots\ldots(9_{\mathrm{C}})$$

Aus vielen Versuchen des Verfassers geht hervor, dass die Feuchtigkeitsverteilungskurve am Ende der ersten Periode verlangsamter Trocknungsgeschwindigkeit im allgemeinen parabelförmig verläuft. Unter diesen Umständen nimmt der Verfasser an, dass die unbekannte Funktion $(v)_{\theta=0}=f(x)$ der Anfangsbedingungen in Fall C eine Parabel darstellt. Bezeichnet man jetzt den Wassergehalt in den Flächen von $x=0$ und $x=X$ mit v_z und v_s, so lautet die Gleichung der Parabel:

$$v=v_z-\frac{v_z-v_s}{X^2}x^2$$

$$\therefore\quad (v)_{\theta=0}=f(x)=v_z-\frac{v_z-v_s}{X^2}x^2$$

Wie in III_A erhält man ferner

$$D_k=0$$

$$n_k=\frac{2k-1}{2X}\pi$$

dazu

$$(v)_{\theta=0}=f(x)=v_z-\frac{v_z-v_s}{X^2}x^2$$

$$=\sum_{k=1}^{k=\infty}C_k\cos n_k x \quad\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots(24)$$

$$\therefore\quad C_k=\frac{\int_0^X f(x)\cos(n_k x)dx}{\int_0^X\cos^2(n_k x)dx}$$

$$=\frac{2}{n_k X}\left\{v_s+(v_z-v_s)\frac{2}{(n_k X)^2}\right\}\sin(n_k X)$$

$$=\frac{4(-1)^{k-1}}{(2k-1)\pi}\left\{v_s+2(v_z-v_s)\frac{(2/\pi)^2}{(2k-1)^2}\right\}\quad(25)$$

Setzt man diese Werte in Formel (10) ein, so erhält man

$$v=\frac{4}{\pi}\sum_{k=1}^{k=\infty}\frac{(-1)^{k-1}}{2k-1}\left\{v_s+2(v_z-v_s)\frac{(2/\pi)^2}{(2k-1)^2}\right\}$$

$$e^{-\left(\frac{\pi}{2}\right)^2(2k-1)^2\frac{\lambda\theta}{X^2}}\cos\left(\frac{2k-1}{2}\pi\frac{x}{X}\right)\quad\ldots\ldots(26)$$

Der Durchschnittswassergehalt v_m wird daher in der Zeit θ wie folgt:

$$v_m=\frac{1}{X}\int_0^X v\,dx$$

$$=\left(\frac{8}{\pi^2}\right)\sum_{k=1}^{k=\infty}\frac{1}{(2k-1)^2}\left\{v_s+2(v_z-v_s)\frac{(2/\pi)^2}{(2k-1)^2}\right\}$$

$$e^{-\left(\frac{\pi}{2}\right)^2(2k-1)^2\frac{\lambda\theta}{X^2}}$$

$$=\left(\frac{8}{\pi^2}\right)v_s\left\{e^{-\left(\frac{\pi}{2}\right)^2\frac{\lambda\theta}{X^2}}+\frac{1}{9}e^{-9\left(\frac{\pi}{2}\right)^2\frac{\lambda\theta}{X^2}}\right.$$

$$\left.+\frac{1}{25}e^{-25\left(\frac{\pi}{2}\right)^2\frac{\lambda\theta}{X^2}}+\ldots\ldots\right\}$$

$$+\left(\frac{64}{\pi^4}\right)(v_z-v_s)\left\{e^{-\left(\frac{\pi}{2}\right)^2\frac{\lambda\theta}{X^2}}+\frac{1}{81}e^{-9\left(\frac{\pi}{2}\right)^2\frac{\lambda\theta}{X^2}}\right.$$

$$\left.+\frac{1}{625}e^{-25\left(\frac{\pi}{2}\right)^2\frac{\lambda\theta}{X^2}}+\ldots\ldots\right\}\quad(27)$$

5. *Formeln für Wasserverdampfungsmenge und Trocknungsgeschwindigkeit.*

Bei der Trocknung fester Stoffe kann man die gesamte Verdampfungsmenge dadurch berechnen, dass die Verdampfung der beiden Oberflächen in der umgebenden Luft zeitlich zusammengerechnet wird oder dass die Wassermenge, die notwendig ist, um eine gegebene zeitliche Wassergehaltsverminderung innerhalb eines kleinen Volumens zu verursachen, für das gesamte Volum integriert wird. In ersterem Fall ist die von den kleinen Oberflächenteilchen dA in die umgebende Luft verdampfte Menge während der Zeit $d\theta$ gleich $avdAd\theta$. Deshalb wird die Gesamtmenge an beiden Flächen wie folgt ausgedrückt

$$W=2\int_0^\theta avdAd\theta\quad\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots(28)$$

Andererseits vermindert sich der Wassergehalt des kleinen Volumens $dAdx$ eben um (v_0-v_m) während der Zeit $d\theta$, die Verdampfungsmenge beträgt dabei $(v_0-v_m)\ dA\cdot dx\cdot d\theta$. Die Verdampfungsmenge muss daher vollständig für das Probenvolumen integriert werden, *d.h.*, die Gesamtverdampfungsmenge an den Oberflächen, deren Höhe und Breite Y und Z gleich sind, beträgt für die folgende Summe während des Zeitverlaufs von 0 bis zu θ:

$$W=2YZ\int_0^\theta(v_0-v_m)dx\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots(29)$$

Auf Grund von Formel (29) wollen wir ferner die Gleichungen für die Wasserverdampfung bei verschiedenen Fällen aufsuchen.

I. Konstante Trocknungsgeschwindigkeit.

Setzt man v_0 aus Formel (12) und v_m aus Formel (14) in Gleichung (29) ein, so stellt sich die gesamte Verdampfungswassermenge wie folgt dar

$$W=2YZ\int_0^X\sum_{k=1}^{k=\infty}C_k\cos(n_k x)\left(1-e^{-\delta_k^2\frac{\lambda\theta}{X^2}}\right)dx$$

$$=2YZ\sum_{k=1}^{k=\infty}C_k\left(1-e^{-\delta_k^2\frac{\lambda\theta}{X^2}}\right)\int^X\cos(n_k x)dx$$

$$=2YZXv_0\sum_{k=1}^{k=\infty}\frac{2\sin\delta_k}{\sin\delta_k\cos\delta_k+\delta_k}\left(1-e^{-\delta_k^2\frac{\lambda\theta}{X^2}}\right)$$

$$\frac{\sin n_k X}{\delta_k}$$

$$=W_0\sum_{k=1}^{k=\infty}\frac{2\sin^2\delta_k}{(\sin\delta_k\cos\delta_k+\delta_k)\delta_k}\left(1-e^{-\delta_k^2\frac{\lambda\theta}{X^2}}\right)$$

$$=W_0\sum_{k=1}^{k=\infty}\frac{2h^2X^2}{\delta_k^2(\delta_k^2+h^2X^2+hX)}\left(1-e^{-\delta_k^2\frac{\lambda\theta}{X^2}}\right)(30),$$

worin $W_0 = 2XAv_0 = 2XYZv_0$ der gesamte freie Wassergehalt bei $\theta = 0$ ist.

Ferner ist Formel (30) auf die erste Periode verlangsamter Trocknnngsgeschwindigkeit anwendbar, nur mit Einsetzung von v_c an die Stelle von v_0.

II. Zweite Periode verlangsamter Trocknungsgeschwindigkeit.

Bei A und B.

Setzt man v_0 aus Formel (19) und v_θ aus (21) in Formel (29) ein, so wird die Verdampfungsmenge wie folgt ausgedrückt,

$$W = 2YZ\int_0^X \sum_{k=1}^{k=\infty} C_k \cos(n_k x)\left(1 - e^{-\lambda n_k^2 \theta}\right) dx$$

$$= 2YZv_0 \sum_{k=1}^{k=\infty} \frac{2\sin(n_k X)}{n_k X}\left(1 - e^{-\lambda n_k^2 \theta}\right)\int_0^X \cos n_k x\, dx$$

$$= 2YZv_0 \sum_{k=1}^{k=\infty} \frac{2\sin\frac{2k-1}{2}\pi}{\frac{2k-1}{2}\pi}\left(1 - e^{-\left(\frac{\pi}{2}\right)^2 (2k-1)^2 \frac{\lambda\theta}{X^2}}\right)$$

$$\frac{\sin\frac{2k-1}{2}\pi}{\frac{2k-1}{2X}\pi}$$

$$= 2XYZv_0 \sum_{k=1}^{k=\infty}\left(\frac{8}{\pi^2}\right)\frac{1}{(2k-1)^2}\left(1 - e^{-\left(\frac{\pi}{2}\right)^2 (2k-1)^2 \frac{\lambda\theta}{X^2}}\right)$$

$$= W_0\left(\frac{8}{\pi^2}\right)\sum_{k=1}^{k=\infty}\frac{1}{(2k-1)^2}\left(1 - e^{-\left(\frac{\pi}{2}\right)^2 (2k-1)^2 \frac{\lambda\theta}{X^2}}\right) \quad (31)$$

III. Zweite Periode verlangsamter Trocknungsgeschwindigkeit.

Bei C.

Setzt man v_0 aus Formel (24) und v_θ aus Formel (26) in Formel (29) ein, so wird:

$$W = 2YZ\int_0^X \sum_{k=1}^{k=\infty} C_k \cos n_k x\left(1 - e^{-\lambda n_k^2 \theta}\right)$$

$$= 2YZ\left(\frac{4}{\pi}\right)\sum_{k=1}^{k=\infty}\frac{(-1)^{k-1}}{(2k-1)}\left\{v_s + 2(v_z - v_s)\frac{\left(\frac{2}{\pi}\right)^2}{(2k-1)^2}\right\}$$

$$\left(1 - e^{-\left(\frac{\pi}{2}\right)^2 (2k-1)^2 \frac{\lambda\theta}{X^2}}\right)\int_0^X \cos\left(\frac{2k-1}{2X}\pi x\right) dx$$

$$W = 2YZX\left(\frac{8}{\pi^2}\right)\sum_{k=1}^{k=\infty}\frac{1}{(2k-1)^2}\left\{v_s + 2(v_z - v_s)\frac{\left(\frac{2}{\pi}\right)^2}{(2k-1)^2}\right\}$$

$$\left(1 - e^{-\left(\frac{\pi}{2}\right)^2 (2k-1)^2 \frac{\lambda\theta}{X^2}}\right) \quad \ldots\ldots\ldots \quad (32)$$

Differenziert man nun die oben gefundenen Gleichungen für die verdampfte Wassermenge in bezug auf die Zeit θ, so findet man die Gleichungen für die Verdampfungsmenge pro Stunde, d.h. die Gleichungen der Trocknungsgeschwindigkeiten.

I. Konstante Trocknungsgeschwindigkeit.

Aus Formel (30) ist

$$\frac{dW}{d\theta} = \frac{\lambda W_0}{X}\sum_{k=1}^{k=\infty}\frac{2h^2X^2}{\delta^2 + h^2X^2 + hX} e^{-\delta^2 \frac{\lambda\theta}{X^2}} \quad \ldots\ldots (33),$$

worin $W_0 = v_0 AX$ und A die gesamte Verdampfungsoberfläche ist. Deshalb ist die Trocknungsgeschwindigkeit:

$$\frac{dW}{Ad\theta} = \frac{\lambda v_0}{X}\sum_{k=1}^{k=\infty}\frac{2h^2X^2}{\delta^2 + h^2X^2 + hX} e^{-\delta^2 \frac{\lambda\theta}{X^2}} \quad \ldots\ldots (33a)$$

II. Zweite Periode verlangsamter Trocknungsgeschwindigkeit.

Aus Formel (31) ist

$$\frac{dW}{d\theta} = W_0 \frac{2\lambda}{X^2}\sum_{k=1}^{k=\infty} e^{-\left(\frac{\pi}{2}\right)^2 (2k-1)^2 \frac{\lambda\theta}{X^2}} \quad \ldots\ldots\ldots (34),$$

wo $W_0 = v_0 AX$.

Ferner ist

$$\left(\frac{dW}{Ad\theta}\right) = \frac{2\lambda v_0}{X}\sum_{k=1}^{k=\infty} e^{-\left(\frac{\pi}{2}\right)^2 (2k-1)^2 \frac{\lambda\theta}{X^2}}$$

$$= \frac{2\lambda v_0}{X}\left(e^{-\left(\frac{\pi}{2}\right)^2 \frac{2\lambda\theta}{X^2}} + e^{-9\left(\frac{\pi}{2}\right)^2 \frac{\lambda\theta}{X^2}}\right.$$

$$\left. + e^{-25\left(\frac{\pi}{2}\right)^2 \frac{\lambda\theta}{X^2}} + \cdots\right) \quad \ldots\ldots (34a)$$

Bei ähnlicher Behandlung von Formel (32) findet man die Gleichung der Trocknungsgeschwindigkeit für die zweite Periode nach vorhergehender erster Periode verlangsamter Trocknung.

$$\left(\frac{dW}{d\theta}\right) = 4YZX\frac{\lambda}{X^2}v_z\left(\frac{8}{\pi^2}\right)\sum_{k=1}^{k=\infty}\frac{1}{(2k-1)^2}$$

$$e^{-\left(\frac{\pi}{2}\right)^2 (2k-1)^2 \frac{\lambda\theta}{X^2}} \quad \ldots\ldots (35)$$

Setzt man $2YZ = A$ und $\frac{2}{3}v_z = v_0$, so wird:

$$\left(\frac{dW}{Ad\theta}\right)' = \left(\frac{24}{\pi^2}\right)\frac{\lambda' v_0}{X}\sum_{k=1}^{k=\infty}\frac{1}{(2k-1)^2}$$

$$e^{-\left(\frac{\pi}{2}\right)^2 (2k-1)^2 \frac{\lambda'\theta}{X^2}}$$

$$= \left(\frac{24}{\pi^2}\right)\frac{\lambda' v_0}{X}\left(e^{-\left(\frac{\pi}{2}\right)^2 \frac{\lambda'\theta}{X^2}} + \frac{1}{9}e^{-9\left(\frac{\pi}{2}\right)^2 \frac{\lambda'\theta}{X^2}}\right.$$

$$\left. + \frac{1}{25}e^{-25\left(\frac{\pi}{2}\right)^2 \frac{\lambda'\theta}{X^2}} + \cdots\right) \ldots (35a)$$

Zusammenfassung.

1. Bei der Betrachtung der Wasserdiffusion innerhalb fester Proben ist ganz analog der Wärmeleitung die fundamentale partielle Differentialgleichung zu Grunde gelegt worden.

2. Für die besondere Lösung der fundamentalen Differentialgleichung des Hexaeders mit wasserdicht bedeckten vier Seiten ist die Grenbedingung für jede Stufe der Trocknungsgeschwindigkeit beschrieben worden.

3. Aus den Grenzbedingungen bei jeder Trocknungsperiode sind die Konstantenwerte in der allgemeinen Lösung gewonnen worden.

4. Die Formel für die Feuchtigkeitsverteilung bei der Trocknung fester Stoffe ist eine unendliche Reihe mit exponentialen sowie Schwingungsfunktionen, die Formel für den durchschnittlichen Wassergehalt ist dagegen eine unendliche Reihe nur mit Exponentialfunktionen.

5. Die Formel für die verdampfte Wassermenge sowie auch für die Trocknungsgeschwindigkeiten bei verschiedenen Trocknungsperioden wurden theoretisch ermittelt.

II. Feuchtigkeitsverteilungszustand im Innern des Feststoffes im Verlauf der Trocknung.

1. *Methode des Experimentes.*

Um nun die theoretischen Ergebnisse betreffs der Feuchtigkeitsverteilung innerhalb fester Stoffe auch experimentell nachzuprüfen, ist der Feuchtigkeitsverteilungszustand bei jeder Stufe des Trocknungsvorganges untersucht worden. Etwa 10 unter gleichen Bedingungen geformte Proben wurden zur gleichen Zeit dem gleichen Trocknungsverfahren ausgesetzt. Nach einer bestimmten Zeitdauer nahm man eine nach der anderen heraus und schnitt sie parallel zur Verdampfungsoberfläche in viele Stückchen, deren Dicken von 1.5 bis 2 mm betrugen. Dann berechnete man den Wassergehalt jedes Stückchens im elektrischen Thermostat bei etwa 100 bis 105°C. Zu gleicher Zeit mass man die Trocknungsgeschwindigkeit und auch die Temperaturveränderung der Probe, um die Beziehungen zwischen den oberen Varianten und den Feuchtigkeitsverteilungskurven festzusetzen. Zu den Versuchen wurden Tonerde, Papierstoff, Seife und Holz verwandt.

2. *Ergebnisse der Experimente.*

Tonerde.

Für den Versuch verwendete der Verfasser Mino-Kaolin und Kawachi-Feldspat mit gleichen Trockengewichtsprozenten. Die Probe ist vor der Trocknung der Höhe, Breite und Dicke nach 8 × 16 × 3 cm. Da die fünf Oberflächen, oben und unten, links und rechts sowie hinten, wie im letzten Versuch mit Stanniol luftdicht bedeckt sind, erfolgt die Verdampfung nur aus der vorderen Oberfläche.

Die Tabellen 1 bis 3 stellen diese Versuchsresultate, die in Abb. 4 bis 6 graphisch wiedergegeben sind, dar, worin die Stellung der Stückchen auf der Abszisse und der freie Wassergehalt auf der Ordinate eingetragen sind. Jede Kurve zeigt den entsprechenden Feuchtigkeitsverteilungszustand. Abb. 7 zeigt die Trocknungsgeschwindigkeit und

Tabelle 1.

Zeitliche freie Wasserverteilung in %.

Probe: Minokaolin und Kawachifeldspat in gleichen Prozenten.

Versuche 103 und 109 der Tonerde. Trocknungsbedingungen: 40°C, 30% und 4.0 m/sek. Plastizitätswassergehalt: 29.0%.

Stückchennummer \ Trocknungsdauer, hr	1 (II/103)	1 (III/109)	2 (IV/103)	3 (V/109)	4 (VI/103)	3½ (VII/109)	6.35 (VIII/103)	5.45 (IX/103)	9 (X/103)	14 (XI/103)	18 (XII/103)	25 (XIII/103)	30 (XIV/103)	40 (XV/103)
1	20.575	20.435	18.530	10.425	5.25	5.875	3.638	4.262	3.0615	1.03	0.627	0.91	0.234	0.09
2	20.905	20.355	18.260	12.895	7.45	9.325	6.562	6.965	5.115	2.665	2.305	1.83	0.726	0.415
3	21.355	20.575	18.200	13.725	9.885	10.925	8.540	8.46	6.805	4.125	6.385	3.705	0.784	0.927
4	21.575	21.585	18.470	14.355	11.495	11.825	9.710	9.545	7.785	5.645	4.351	4.135	2.895	1.234
5	22.175	21.375	18.420	14.745	12.505	12.505	10.775	10.625	8.687	6.365	5.335	4.225	3.335	1.605
6	22.575	21.775	18.680	14.965	13.385	12.805	11.575	11.315	9.175	6.788	6.188	4.588	3.765	2.67
7	23.155	22.265	18.720	15.185	14.105	13.335	12.165	11.625	9.615	7.335	6.450	5.30	4.60	3.005
8	24.075	22.745	18.660	15.175	14.545	12.525	12.705	12.375	9.815	7.828	6.615	5.675	4.85	2.665
9	25.025	23.635	18.300	14.975	14.585	15.650	12.955	12.608	10.225	8.225	6.955	5.65	5.235	3.455
10	25.475	24.575	18.720	15.155	14.705	15.435	12.902	13.075	10.487	8.575	7.155	5.885	5.315	3.69
11	25.945	25.885	19.170	15.245	15.005	—	13.345	11.945	10.975	8.675	7.395	6.325	5.595	4.01
12	26.075	25.465	18.890	15.225	15.025	14.835	13.745	13.325	11.185	8.538	7.495	6.490	5.855	3.875
13	25.975	25.125	18.730	17.870	15.145	14.275	13.365	13.265	10.795	8.649	6.805	6.345	5.915	4.245
14	26.205	25.425	18.680	15.215	14.145	14.735	13.235	12.995	10.775	9.055	7.055	6.525	5.615	4.485
15		25.555	18.965	15.335	15.805	13.095			11.055	8.625	7.385	6.15	6.285	4.475
16			19.750	15.705		13.175				8.775			6.485	

Anmerkung für Tabelle 1 bis 6:
1. Die eingeklammerten Zeichen sind Kurven sowie Versuchsnummern.
2. Die Nummern der etwa 2 mm dick geschnittenen Stückchen stellen die entsprechende Entfernung von der Oberfläche dar.
3. Je nach dem Versuch ist der Wassergehalt der Probe nach einer bestimmten Trocknungszeit nicht immer gleich.

Temperaturveränderung unter gleichen Bedingungen wie in Abb. 4 und 5; ebenso Abb. 8 wie in Abb. 6.

Bei der Trocknung fester Stoffe verdampft das Wasser zuerst an der Oberfläche. Durch diese Wassergehaltsverminderung tritt ein Wassergehaltsunterschied zwischen der Mitte und Oberfläche der Probe auf. Doch am Anfang ist der Wassergehalt an der Oberfläche so gross, dass ohne Diffusion des Wassers von der Mitte aus, sondern mit Benutzung des Oberflächenwassers an der Stelle des geringsten Widerstandes bei der Diffusion, die konstante Trocknungsgeschwindigkeit noch erhalten bleibt.

Deshalb ist während dieser Periode die Ersetzung des Wassers durch Innendiffusion ganz gering, wenn eine solche überhaupt stattfindet. Wird der Oberflächenwassergehalt kleiner, so wird das zur Verdampfung benötigte Wasser ziemlich stark von den noch reichlich Wasser enthaltenden Stellen, die nahe an der Oberfläche liegen, ersetzt, doch noch erst wenig von der Mitte her.

Also findet die Verminderung des Wassergehaltes stellenweise von der Oberfläche nach der Mitte der Probe statt, so dass die Diffusion des Wassers aus dem Innern als ausschlaggebender Faktor auftritt. Nach obiger Erklärung wird das zur Verdampfung benötigte Wasser teils durch Oberflächenwasser, teils durch Innendiffusion ersetzt,

Tabelle 2. Zeitliche freie Wasserverteilung in %. Versuche 113 der Tonerde. Probe: Minokaolin und Kawachifeldspat in gleichen Prozenten. Trocknungsbedingungen: 40°C, 30%, 4.0 m/sek. Plastizitätswassergehalt: 27.9%.

Trocknungsdauer, hr / Stückchennummer	0.30(I)	1.(II)	1.20(IV)	1.50(V)	2.(VI)	2.(VII)	2 20(VIII)	3.30(IX)
1	22.505	20.775	20.205	20.325	19.385	18.565	17.285	12.605
2	22.485	21.025	22 025	20.275	19.305	18.915	16 865	14.655
3	23.305	21.655	21.575	20.175	19.795	19.345	17.255	14.995
4	24.595	21.885	22.275	20.675	20 155	19.675	17.365	15.445
5	25.955	22.395	22.905	20.935	20.275	19.625	17.625	15.855
6	26.795	23.075	23.625	20.975	20.405	19.995	17.625	15.575
7	27.475	23.455	25.655	21.505	20.605	19.895	17.725	15.695
8	27.675	24.445	——	21.175	20.595	20.275	17.725	15.575
9	27.575	25.495	——	21.455	20.505	20.055	17.825	15 615
10	27.385	26.095	——	21.805	20.875	20.465	17.630	15.675
11	27.455	27.075	26.325	21.805	20.955	20.145	17.630	15.865
12	27.635	21.095	26.575	21.895	21.275	20.885	17.775	15.655
13	27.375	27.425	27.155	22.315	21.575	21.495	17.845	16.035
14	26.975	27.555	27.555	22.455	21.355	21.255	17.885	15.575
15	27.445	27.095	26.855	22.465	21.755	21.625	17.765	15.875
16		27.545	26.945	22.555	21.415		18.055	
17					21.475			

Tabelle 3.

Zeitliche freie Wasserverteilung in %.

Versuche 117 und 123 der Tonerde. Probe: Minokaolin und Kawachifeldspat in gleichen Prozenten.
Trocknungsbedingungen: 30°C, 30% und 2.14 m/sek. Plastizitätswassergehalt: 26.3%.

Trocknungsdauer / Stückchennummer	1(I/117)	2(II/117)	3(III/117)	4(IV/117)	5(V/117)	5(V/117)	6(VI/117)	7(VII/117)	8(VIII/117)	10(IX/123)	13(X/123)	15(XI/123)	17(XII/123)	20(XIII/123)	30(XIV/123)	40(XV/123)
1	21.405	21.425	20.245	18.600	16.795	16.655	13.695	9.035	5.325	4.795	4.288	4.325	2.575	0.485	0.598	0.413
2	22.295	21.505	20.475	18.555	16.275	16.315	14.325	11.175	9.165	7.355	6.525	5.705	5.185	3.635	2.655	1.261
3	22.675	21.745	20.655	18.495	16.795	16.695	14 775	12.185	9.425	8.225	——	7.205	6.735	5.185	4.035	2.402
4	23.255	22.255	21.005	18.845	16.855	16.755	14.885	12.775	10.735	8.975	8.815	7.320	7.535	6.225	4 945	3.115
5	23.655	22.655	21.005	18.755	16.905	16.665	15.043	13.335	11.115	9.895	9.275	8.605	8.085	6.635	5.655	3.615
6	24.525	22.955	21.325	——	16.075	16 475	15.355	13.745	11.975	10.405	9.995	9.176	8.745	6.835	5.965	3.815
7	25.345	23.175	21.555	18.885	17.085	16.975	15.495	14.035	12.555	10.375	10.165	9.715	8.745	7.535	6.395	4.655
8	25.575	23.465	21.495	19 085	16.995	16.715	15.675	14.395	13.015	10 725	10.705	9.745	9.305	7.725	6.535	4.255
9	26.015	23.545	21.495	18.995	16.945	16.635	15.545	14.725	13.465	10.925	10.875	10.165	9.495	8.195	6.575	4.855
10	26.195	23.925	21.885	19.085	16.695	16.735	15 495	14.855	13.595	10.705	10.988	10.305	9.615	8.215	6.515	4.935
11	27.175	24.465	21.745	19 195	17.675	71.005	13.155	14.825	13.495	11.535	11.175	10.375	9.795	8.365	6.685	5.165
12	26.865	24.550	22.055	19.155	17.255	16 775	16.875	14.905	13.755	11.575	11.355	10.005	10 095	9.045	6.745	4.855
13	26.075	25 475	22.525	18.995	16 895	16.895	15.805	15.075	14.175	11.645	11.635	10.375	10.245	9.05	6.835	5.485
14	25.105	25.665	22.475	18.855	17.035	17.025	——	15.175	14.275	12.015	12.175	10.485	9.935	8.975	7.125	5.565
15	26.455	25 595	22.555	18.355	16.995	17.025	15.750	15.395	14.355	11.625	11.615	10.575	10.005	8 665	6 515	5.385
16		25.785		18.275	16.765					12.325						
17										12.235						
18										12.475						

das Verhältnis beider Mengen ist jedoch zeitlich verschieden. Die experimentelle Verteilungskurve des Wassers auf Abb. 4 bis 6 bezeugt diese Tatsache sehr gut. Innerhalb der ersten Stunde ist die Verminderung des Wassergehaltes an der Oberfläche am grössten, wird allmählich der Entfernung von der Oberfläche gemäss geringer und ist in der Mitte am geringsten.

Im Verlauf der Trocknung wird die Neigung der Verteilungskurven nach und nach schwächer und die Linien werden flach. Obwohl der Oberflächenwassergehalt sich zuerst unter diesen Umständen dem Grenzwert nähert, wird er mittels der Diffusion des Wassers aus dem noch über

Abb. 4.

Zeitliche Wasserverteilungskurve.

Kurve	Versuch	Trocknungsdauer
I	103	0 h
II	"	1
III	109	1
IV	103, 109	2
V	109	3
VI	103	4
VII	103, 109	3.30
VIII	103	6.35
IX	"	5.45
X	"	9
XI	"	14
XII	"	18
XIII	"	25
XIV	"	30
XV	"	40

Probe: Minokaolin: Kawachifeldspat = 5 : 5

Trocknungsbedingungen: 40°C, 30%, 4.0 m/sek.

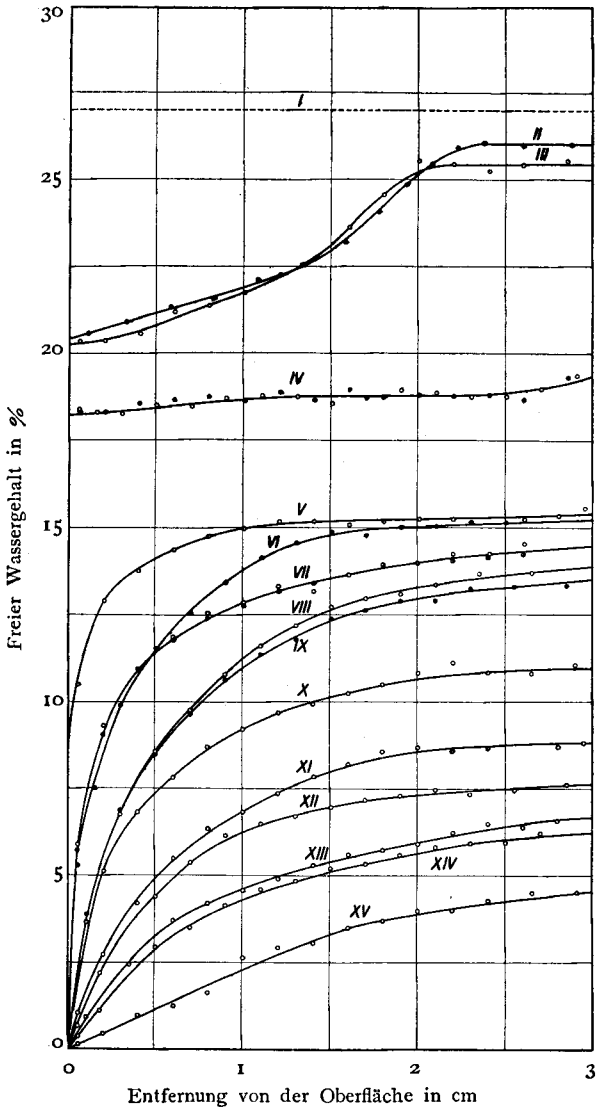


Abb. 5.

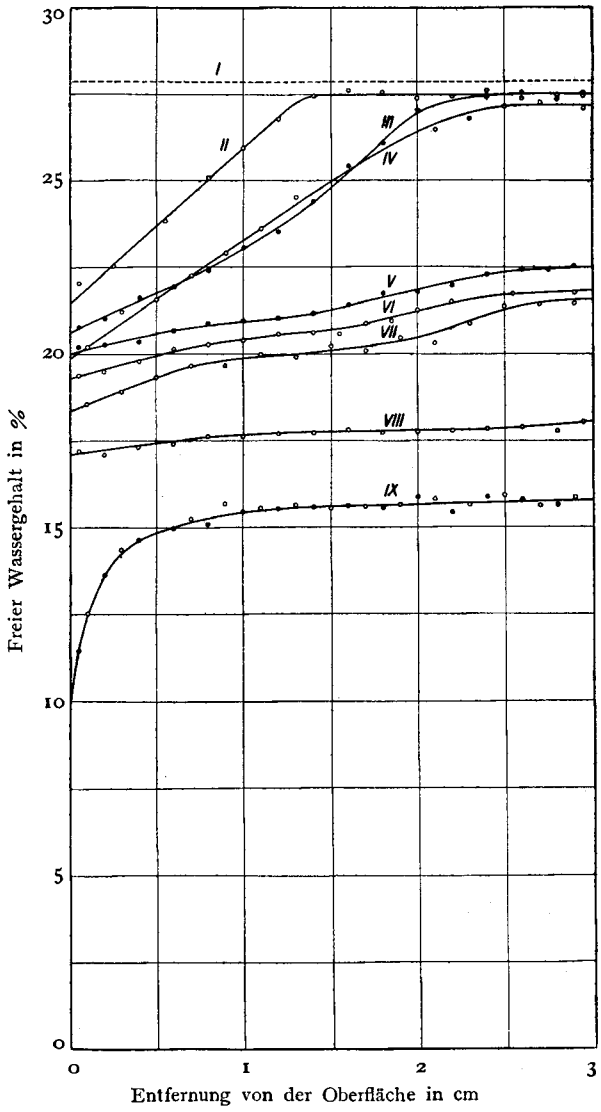
Zeitliche Wasserverteilungskurve.

Versuch 113 der Tonerde.

Kurve	Trocknungsdauer
I	0 h
II	0.30
III	1
IV	1.20
V	1.50
VI	2
VII	2
VIII	2.20
IX	2.30

Probe: Minokaolin: Kawachifeldspat = 5 : 5

Trocknungsbedingungen: 40°C, 30%, 4.0 m/sek.



den Grenzwert Wasser enthaltenden Stellen, doch zunächst aufrecht erhalten.

Vermindert sich der Wassergehalt weiter, so nähert sich derselbe im Innern auch dem Grenzwert. Schliesslich erreicht die ganze Probe über-

Abb. 6.

Zeitliche Wasserverteilungskurve.

Kurve	Versuch	Trocknungsdauer
I	117	0 h
II	"	1
III	"	2
IV	"	3
V	"	4
VI	"	5
VII	"	6
VIII	"	7
IX	123	8
X	"	10
XI	"	13
XII	"	15
XIII	"	17
XIV	"	20
XV	"	30
XVI	"	40

Probe: Minokaolin : Kawachifeldspat = 5 : 5.
Trocknungsbedingungen: 40°C, 30%, 4.0 m/sek.

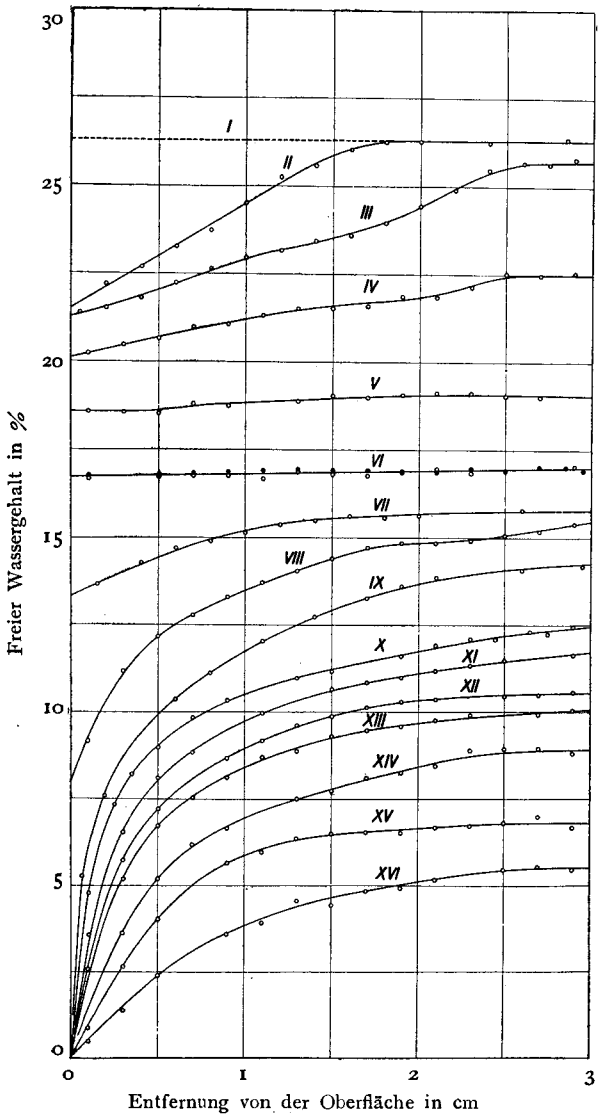


Abb. 7.

Versuch 129 der Tonerde.

Kurve I Trocknungsgeschwindigkeit.
" II Trocknungsdauer.
" III Probentemperatur.

Probe: Minokaolin : Kawachifeldspat = 5 : 5.
Lufttemperatur 40°C.
Feuchtigkeitsgrad 30%.
Luftgeschwindigkeit 4.0 m/sek.
Probenmasse: 10×8×3 cm.

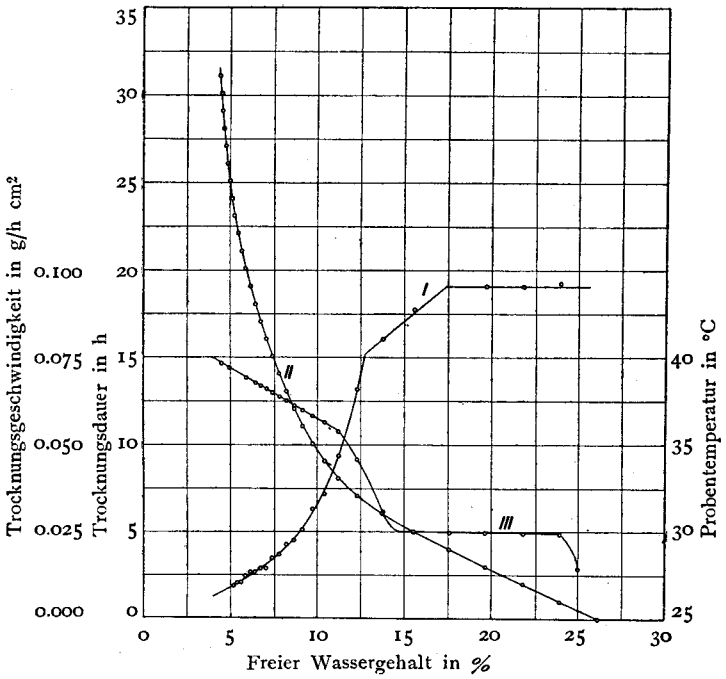


Abb. 8.

Versuch 94-B der Tonerde.

Kurve I Trocknungsgeschwindigkeit.
" II Trocknungsdauer.
" III Probentemperatur.

Probe: Minokaolin, Kawachifeldspat = 5 : 5.
Lufttemperatur 30°C.
Feuchtigkeitsgrad 30%.
Luftgeschwindigkeit 2.14 m/sek.
Probenmasse: 10×8×3 cm.

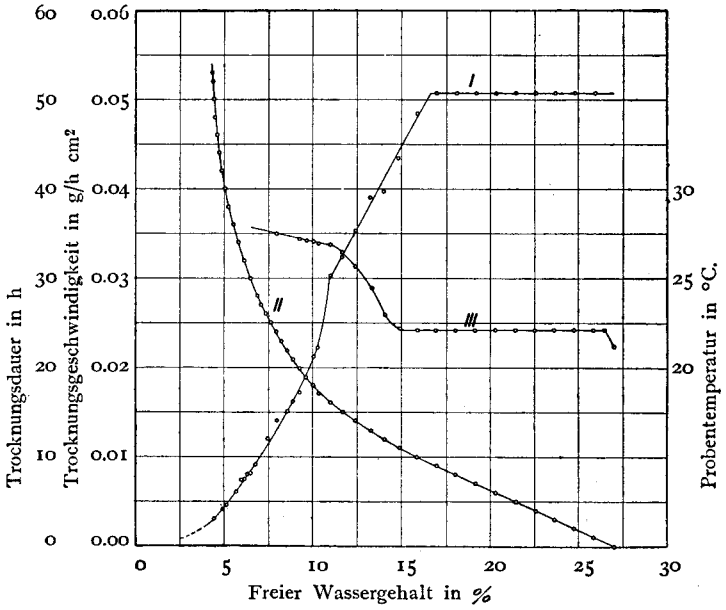
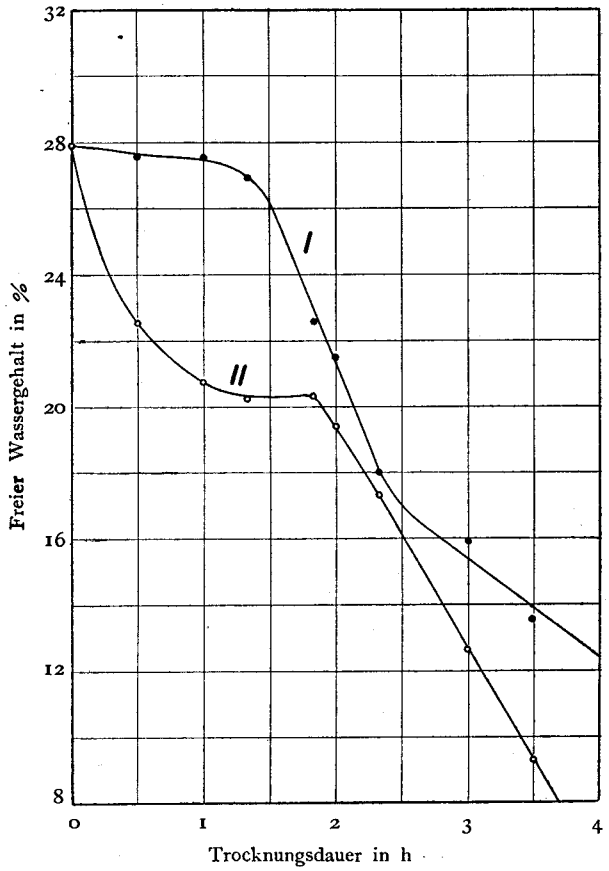


Abb. 9.

Wassergehalt von verschiedener Fläche abhängig v. d. Zeit.
Versuch 113 der Tonerde.

Kurve I Mitte der Probe.
„ II Oberfläche der Probe.



all den gleichen, d.h. den kritischen Wassergehalt. Dies erklärt sehr einleuchtend die Bedeutung der horizontalen Kurve, die nach einigen Stunden der Trocknung auftritt.

Bis heute noch nicht veröffentlicht, wurde diese Kurve vom Verfasser viel studiert, doch erhielt er, trotz zahlreich wiederholter Untersuchungen immer die gleichen Resultate. Auch bei der Trocknung der Papierstoffe liess sich dieselbe Erscheinung beobachten.

Abb. 9 bis 22 drücken die zeitlichen Wassergehaltsveränderungen der verschiedenen Stellen der Probe aus und bezeugen nochmals obige Tatsache. Nach einer bestimmten Zeit, d.h. beim kritischen Wassergehalt, bemerkt man ein Zusammentreffen der gesamten Kurven. Vor dem Grenzpunkt geht die Verminderung ganz rasch vonstatten, aber nach demselben sehr langsam.

Bei der Trocknung fester Stoffe findet die Wasserverdampfung zuerst an ihren Oberflächen statt und die von der umgebenden Luft übertragene Wärme wird fast sämtlich zur Verdampfung verwendet. Hieraus folgt deshalb, dass die Temperatur der Probe während dieser Periode an den wärmeübertragenden Oberflächen niedriger als im Innern steht. Sechs Thermoelemente sind in das Innere in 0.5cm Entfernung voneinander in der Richtung senkrecht zur Oberfläche hineingesteckt. Abb. 12 zeigt die zeitlichen Temperaturveränderungen jeder Schicht und bestätigt obige Beobachtung.

Unter konstanten Bedingungen für die Trocknung ist zu verstehen, dass die Luftfeuchtigkeit konstant bleibt, dass der Wassergehalt aber an der Oberfläche fester Stoffe, obwohl es sich um die konstante Trocknungsperiode handelt, durchaus nicht konstant bleibt.

Aus diesem Grund und auch aus der oben erwähnten Tatsache muss die Grenzbedingung für konstante Trocknungsperiode nicht

$$\left(\frac{\partial v}{\partial x}\right)_{x=X} = -h, \text{ sondern}$$

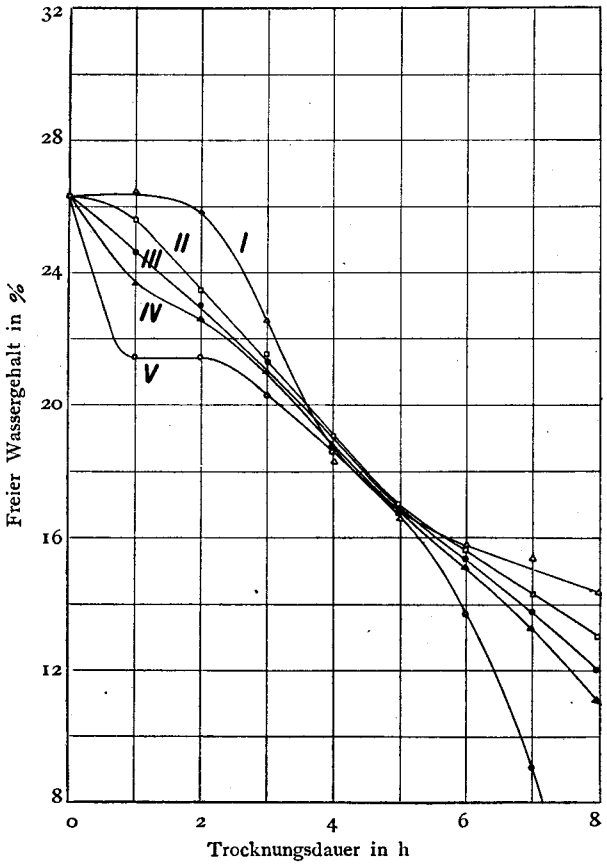
$$\left(\frac{\partial v}{\partial x}\right)_{x=X} = -hf(v) \text{ sein.}$$

Aber die Funktion $f(v)$ ist unbekannt und

Abb. 10.

Wassergehalt von verschiedener Fläche abhängig v. d. Zeit.
Versuch 117 und 123 der Tonerde.

Kurve	Entfernung von der Oberfläche
I	3.0 cm.....(Mitte)
II	1.6
III	1.2
IV	1.0
V	0 .....(Oberfläche)



vielleicht sehr kompliziert. Der Verfasser verwendet daher annähernd die folgende Formel

$$\left(\frac{\partial v}{\partial x}\right)_{x=X} = -hv$$

In dem Augenblick nun, wo in der Probe überall der gleiche kritische Wassergehalt erreicht ist, nimmt die Diffusion in Innern ab und die Probe vermag nicht mehr das zur Oberflächenverdampfung erforderliche Wasser aufzunehmen. Der Wassergehalt an der Oberfläche wird kleiner als der kritische Wert, die Oberfläche des Materials wird stellenweise trocken und die für die Verdampfung wirksame Oberfläche nimmt ab. Dies bedeutet, dass jetzt die erste Periode verlangsamter Trocknungsgeschwindigkeit eingesetzt hat.

Die Wasserverteilungskurven dieser Periode sind Parabeln ähnlich. Nimmt der Wassergehalt allmählich weiter ab und kommt derselbe an der Oberfläche dem Gleichgewichtsfeuchtigkeitsgehalt sehr nahe, d.h. erreicht er den Nullpunkt in der Abbildung, so beginnt die zweite Periode verlangsamter Trocknungsgeschwindigkeit. Hier tritt nunmehr nicht mehr die Verdampfung an der Oberfläche, sondern die Diffusion der Feuchtigkeit aus dem Innern als ausschlaggebender Faktor auf. Die Trocknung verlangsamt sich auch in diesem

Abb. 11.

Wassergehalt von verschiedener Fläche abhängig v. d. Zeit.
Versuch 103 und 113 der Tonerde.

Kurve	Entfernung von der Oberfläche
I	0.1 cm
II	0.5
III	1.0
IV	1.5
V	2.0
VI	3.0

Trocknungsbedingungen: 40°C, 30%, 4.0 m/sek.

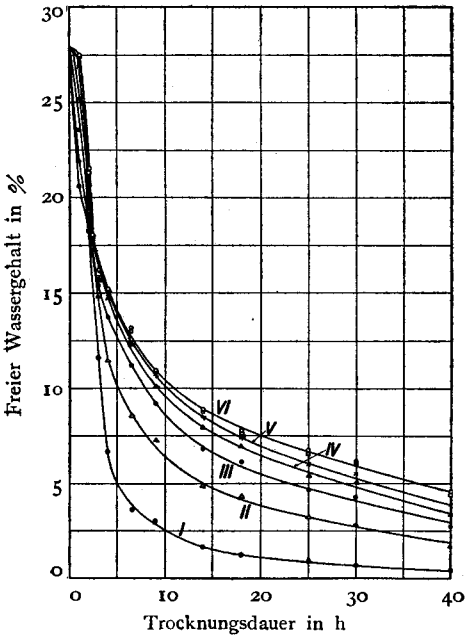
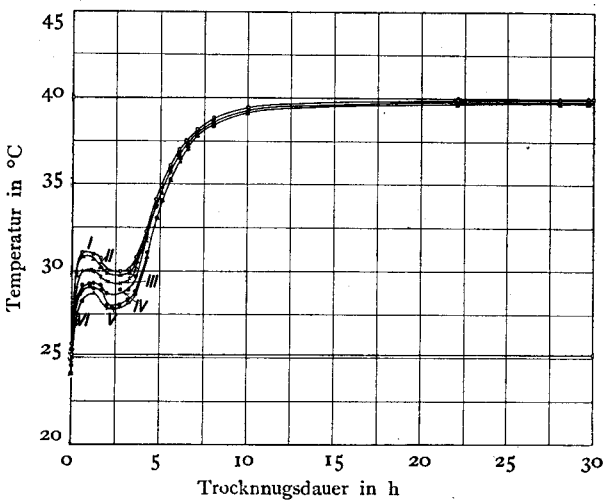


Abb. 12.

Temperatur von verschiedener Fläche der Probe abhängig v. d. Zeit.
Versuch 118 der Tonerde.

Kurve	Entfernung von der Oberfläche
I	3.0 cm
II	2.5
III	2.0
IV	1.5
V	1.0
VI	0.5
O_1	Trockenkugeltemperatur.
O_2	Feuchtkugeltemperatur.

Probe: Minokaolin : Kawachifeldspat = 5 : 5.
Lufttemperatur 40°C.
Feuchtigkeitsgrad 30%.
Luftgeschwindigkeit 4.0m/sek.



Abschnitt, weil der durchschnittliche Feuchtigkeitsgehalt des Feststoffes abnimmt.

Vergleicht man jetzt die drei Veränderungsstufen der Wasserverteilungskurven mit der Veränderung der Trocknungsgeschwindigkeit, so kann man leicht erkennen, dass diese regelmässigen Veränderungen auf einem genau bestimmbaren Trocknungsmechanismus beruhen. Der Wassergehalt z.B. auf dem Punkte der Umwandlung der Horizontalen in die Parabel in Abb. 6 beträgt annähernd 16.6%, und dieser Wert stimmt mit dem kritischen Wassergehalt in der Trocknungskurve von Abb. 8 gut überein. Also ist die Erscheinung des kritischen Wassergehaltes von beiden Gesichtspunkten aus experimentell bestätigt. Nimmt man nun die Wasserverteilungskurve als geometrische Parabel und stellt man den Wassergehalt an der Oberfläche, im Mittelpunkt und den Durchschnittswert mit v_s, v_z und v dar, so ergibt sich die folgende Gleichung

$$v = \frac{2v_z + v_s}{3}.$$

In Abb. 6 beträgt v_z im zweiten Umwandlungspunkt annähernd 15%. Setzt man v_s, den Oberflächenwassergehalt, der sich mit der Trocknungsluft im Gleichgewicht hält, gleich Null, so erhält man

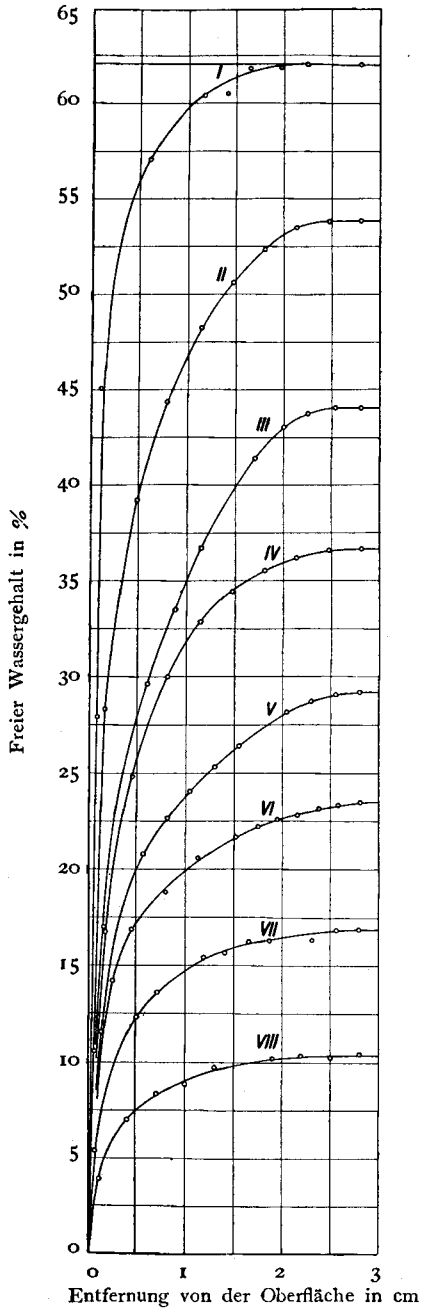
$v = 10\%$ welcher Wert auch beinahe mit dem Wassergehalt von 10.8% zu Anfang der zweiten Periode in Abb. 8 übereinstimmt. Über den Wassergehaltsverteilungszustand gibt es eine Mitteilung von R. S. Troop und F. Wheeler[1]. Sie geben 5 solche Kurven für 6 bis 36 Stunden nach dem Trocknungsanfang wieder. Aus ihren Trocknungsbedingungen kann man vielleicht vermuten, dass diese Kurven dem Verteilungszustand nach dem Grenzpunkt entsprechen. Deshalb kann man aus ihrer Mitteilung den Verteilungszustand in der konstanten sowie kritischen Periode beobachten.

Abb. 13.

Zeitliche Wasserverteilungskurve.
Versuch 15 der Seife.
Probe: Velvetseife I.

Kurve	Trocknungsdauer
I	2 h
II	20
III	116
IV	284
V	597
VI	933
VII	1700
VIII	1844

Trocknungsbedingungen: 50°C, 20%, 2.14 m/sek.

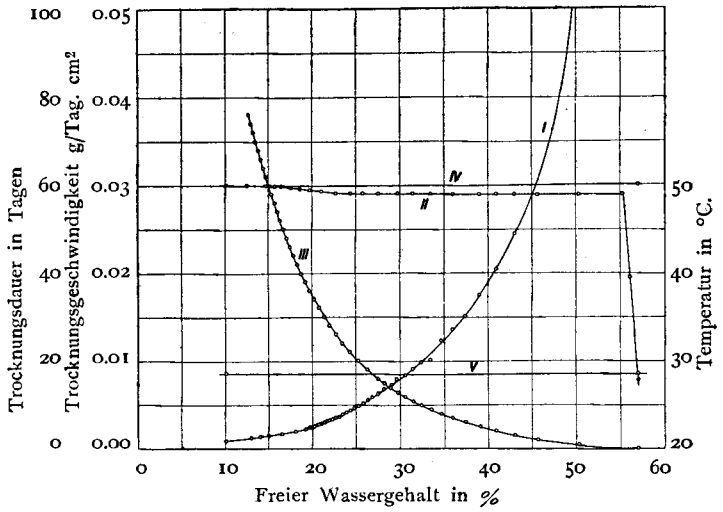


Seife.

Der Seife eignet ein sehr grosser Widerstand gegen die Innendiffusion des Wassers, diese Innendiffusion spielt aber stets die Hauptrolle bei der Trocknung, während der Widerstand gegen die Oberflächenverdampfung im Vergleich zur Diffusion gering ist. Deshalb beobachtet man bei der Trocknung der Seife nur eine einzige Trocknungsstufe und zwar die der zweiten verlangsamten Trocknungsgeschwindigkeit, ohne die zwei vorhergehenden Stadien. Abb. 13 und Tabelle 4 zeigen die Versuchsresultate betreffs des Wasserverteilungszustandes in der Seife, während des Trocknungsverfahrens. Aus diesen Kurven kann man auch ersehen, dass die Trocknung, gemäss dem grossen Widerstand gegen die Innendiffusion, nicht beginnt, sobald die Seife an ihrer Oberfläche das Gleichgewicht mit der Luft erreicht hat. Es

Abb. 14.

Versuch 4-A der Seife.
Probe: Velvetseife I.
Kurve I Trocknungsgeschwindigkeit.
" II Probentemperatur.
" III Trocknungsdauer.
" IV Trockenkugeltemperatur.
" V Feuchtkugeltemperatur.
Lufttemperatur 50°C.
Feuchtigkeitsgrad 20%.
Luftgeschwindigkeit 2.14 m/sek.
Probenmasse: 5×8×3 cm.



1) R. S. Troops und F. Wheeler: Trans. Eng. Cer. Soc. 1927, 27, 231.

Tabelle 4.

Zeitliche freie Wasserverteilung in %.

Versuch 15 der Seife.

Trocknungsbedingungen: 50°C, 20% und 2.14 m/sek.

Plastizitätswasergehalt: 62.1%.

Trocknungsdauer / Stückchennummer	2 (I)	20 (II)	116 (III)	284 (IV)	597 (V)	933 (VI)	1700 (VII)	1844 (VIII)
1	27.93	28.40	19.67	16.75	10.56	7.42	5.42	3.86
2	45.02	39.32	20.25	24.49	19.40	14.25	7.71	8.60
3	56.25	43.64	27.55	30.12	21.32	16.84	12.32	8.82
4	60.99	48.22	33.26	32.92	22.76	—	13.57	7.67
5	59.75	50.62	36.30	34.18	23.12	18.90	15.47	11.67
6	60.50	52.13	38.13	35.68	24.15	20.75	15.64	13.95
7	61.90	53.20	41.20	36.27	25 90	21.32	14.46	10.68
8	61.92	53.68	43.67	36.65	29.22	22.71	16.34	9.30
9	61.25	53.76	43.68	36.12	28.43	22.60	16.13	10.43
10	56.50		45.00		28.62	22.75	16.05	
11	62.20		44.38		29.02	22.99	16.48	
12					29.50	23.33	16.83	
13						22.64	16.37	

Tabelle 5.

Zeitliche freie Wasserverteilung in %.

Versuch 22 und 24 des Papierstoffs.

Trocknungsbedingungen: 40°C, 40% und 1.01 m/sek.

Trocknungsdauer / Stückchennummer	7 $\left(\frac{I}{24}\right)$	8 $\left(\frac{II}{24}\right)$	9 $\left(\frac{III}{24}\right)$	11 $\left(\frac{IV}{24}\right)$	12 $\left(\frac{V}{24}\right)$	13 $\left(\frac{VI}{24}\right)$	15 $\left(\frac{VII}{24}\right)$	17 $\left(\frac{VIII}{24}\right)$	19 $\left(\frac{IX}{24}\right)$	65 $\left(\frac{X}{22}\right)$	95 $\left(\frac{XI}{22}\right)$
1	96.88	83.08	36.58	8.58	9.44	24.46	5.21	3.54	3.48	3.69	1.86
2	98.08	89.98	76.78	26.70	35.30	31.18	16.51	11.26	8.88	3.63	2.18
3	96.98	88.68	77.28	64.18	65.18	63.48	38.63	23.66	19.18	4.56	2.53
4	97.78	89.58	78.38	66.98	67.40	66.03	61.03	37.98	29.78	4.88	3.24
5	96.98	88.28	78.78	67.03	68.28	67.18	62.75	56.08	45.38	5.65	3.97
6	95.68	88.78	78.58	67.48	69.18	67.08	63.38	58.90	56.18	7.38	4.58
7	95.78	87.98	78.28	69 48	68.58	67.28	63.48	60.28	58.78	9.01	5.68
8	95.78	87.80	79.38	69.68	67.78	68.08	63.68	60.40	57.90	9.69	5.61
9	93.78	86.93	79.28	69.58	70.88	68.18	63.58	61.31	59.51	10.88	5.83
10	92.98	88.38	80.78	69.68	69.18	67.78	63.88	61.08	58.91	11.14	7.35
11	94.03	88.28	77.28	70.28	69.38	67.68	64.33	59.88	58.78	12.21	8.08
12	93.53	86.38	78.78	68.78	68.88	67.18	63.91	60.88	58.28	12.26	8.47

Tabelle 6.

Zeitliche freie Wasserverteilung in %.

Versuch 25 des Papierstoffs.

Trocknungsbedingungen: 40°C, 40% und 1.01 m/sek.

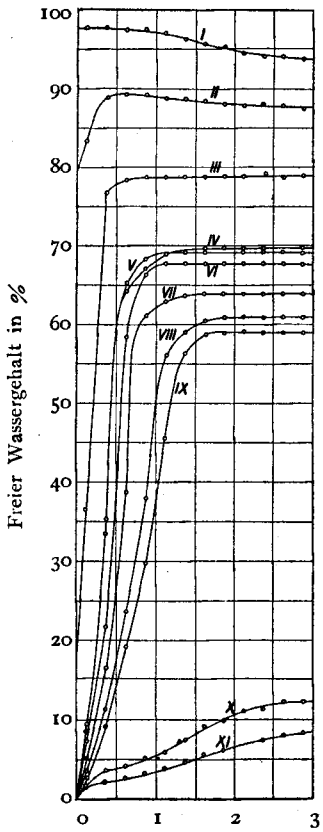
Trocknungsdauer / Stückchennummer	2 (I)	4 (II)	6 (III)	7 (IV)	8 (V)	10 (VI)	11 (VII)
1	129.78	98.38	86.58	77.66	71.78	64.38	12.76
2	126.18	99.48	87.88	84.28	83.48	75.02	59.98
3	124.38	99.78	87.91	85.88	83.78	79.78	69.88
4	124.98	98.38	87.08	86.28	84.98	81.28	73.03
5	122.58	97.28	87.85	85.91	86.88	81.68	73.38
6	117.18	98.58	86.68	86.18	85.08	81.48	74.38
7	119.98	98.78	87.88	85.78	86.08	83.38	74.78
8	120.88	97.58	86.68	86.48	83.68	82.38	74.68
9	118.88	97.98	87.93	87.13	85.28	82.28	75.38
10	116.98	98.08	87.58	86.48	84.78	82.68	75.43
11	118.98	96.98	86.98	86.38	84.79	83.13	74.98
12	117.28	96.88	87.08	84.98	83.78	82.88	75.08

Abb. 15.

Zeitliche Wasserverteilungskurve.

Kurve	Versuche	Trocknungsdauer
I	24	7 h
II	"	8
III	"	9
IV	"	11
V	"	12
VI	"	13
VII	"	15
VIII	"	17
IX	"	15
X	22	65
XI	"	95

Probe: Papierstoff.
Trocknungsbedingungen: 40°C, 40%, 1.01m/sek.



gibt nämlich weder eine konstante noch eine erste verlangsamte Periode, sondern nur eine zweite verlangsamte Periode.

Die parabolischen Verteilungskurven neigen sich allmählich flacher in der Zeit vom Anfang bis über 3 Monate hin. Sie sind denselben in der zweiten Periode in Abb. 4 bis 6 sehr ähnlich. Abb. 14 stellt die Trocknungsgeschwindigkeit und Temperaturveränderung der Seife unter den gleichen Bedingungen wie in Abb. 13 dar.

Papierstoff.

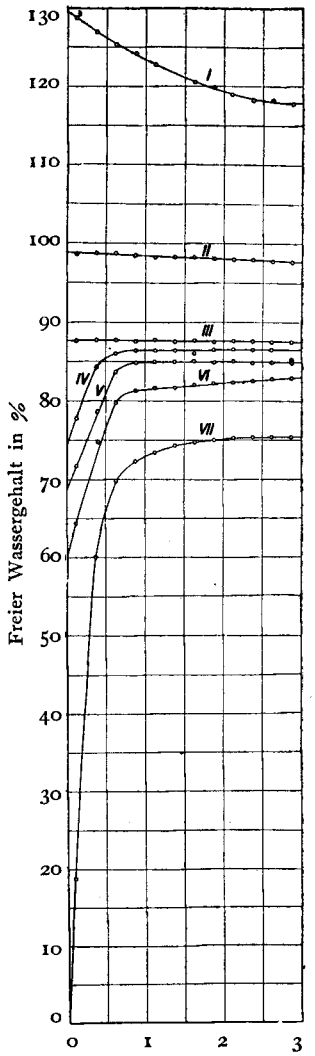
Zur Untersuchung vom Wasserverteilungszustand des Papierstoffes wird die Probe folgenderweise angefertigt. Der brettförmige Papierstoff wird in Stückchen von $8 \times 10 cm^2$ Grösse abgeschnitten; etwa 24 solche Brettchen werden bis zu ungefähr 3 cm Dicke aufeinander gestapelt und zusammengenäht. Nach Eintauchung über eine Nacht lang wischt man des Oberflächenwasser ab, bedeckt die vier Seiten wie gewöhnlich wasserdicht mit Stanniol, so dass die Verdampfung nur an den zwei parallelen Oberflächen erfolgt. 10 solche Proben werden zu gleicher Zeit dem Trocknungsverfahren ausgesetzt. Nach bestimmter Zeit wird eine von ihnen herausgezogen, um den Verteilungszustand des Wassers zu erforschen. Abb. 15 und Tabelle 5 zeigen die Versuchsresultate betreffs des

Abb. 16.

Zeitliche Wasserverteilungskurve.
Versuch 25 des Papierstoffs.

Kurve	Trocknungsdauer
I	2 h
II	4
III	6
IV	7
V	8
VI	10
VII	11

Trocknungsbedingungen: 40°C, 40%, 1.01 m/sek.



Wasserverteilungszustandes bei der Trocknung der Papierstoffe.

Da diese Verteilungskurven aber vor der zweiten Periode nicht genügend erforscht sind, werden die gleichen Untersuchungen noch einigemal wiederholt. Ihre Ergebnisse sind in Tabelle 6 und graphisch in Abb. 16 wiedergegeben.

Nach den Versuchsresultaten, die in den Tabellen 5 und 6 sowie in Abb. 15 und 16 dargestellt sind, findet man, dass die Neigung der Wasserverteilungskurve in der konstanten Periode anfangs entgegengesetzt der bei der Tonerde ist, d.h. der Wassergehalt ist im Fall des Papierstoffes grösser an seinen Oberflächen als im Innern.

Die wiederholten Versuche des Verfassers ergaben immer die gleichen Resultate. Betreffs dieser Erscheinung kann man sagen, dass das Eindringen des Wassers ins Innere der Probe während des Eintauchens etwas schwierig ist, weil die vier Seiten der Probe zusammengenäht sind. Bei der geformten Probe aus zerkleinerten Papierstoff beobachtet man keine solche Erscheinung. Die Verteilungskurven in der konstanten Periode weisen daher Widersprüche auf, aber beim Grenzpunkt stellt man dennnoch die horizontale Kurve mit gleichem Wassergehalt fest. Der Wasserverteilungszustand in der Periode erster und auch zweiter verlangsamter Trocknungsgeschwindigkeiten ist sehr ähnlich wie im Fall der Tonerde. Abb. 17 zeigt dann die Beziehungen zwischen dem freien Wassergehalt, der Trocknungsgeschwindigkeit sowie der Probentemperatur unter gleichen Trocknungsbedingungen wie in Abb. 15 und 16; somit kann man die verschiedenen

Abb. 17.

Versuch 25 der Papierstoffe.
Kurve I Trocknungsgeschwindigkeit.
„ II Probentemperatur.
„ III Trocknungsdauer.
Lufttemperatur 40°C.
Feuchtigkeitsgrad 40%.
Luftgeschwindigkeit 2.14 m/sek.

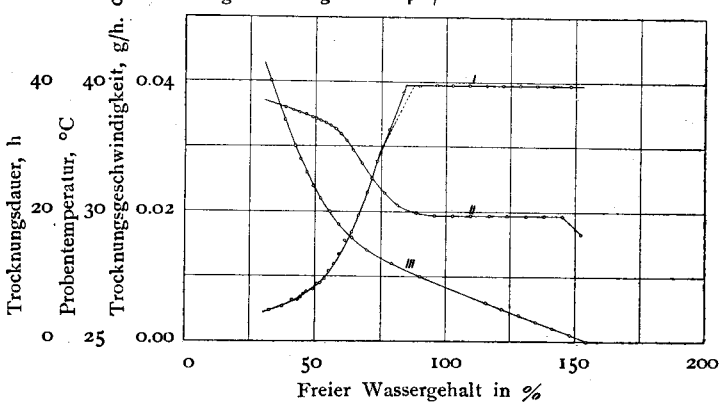
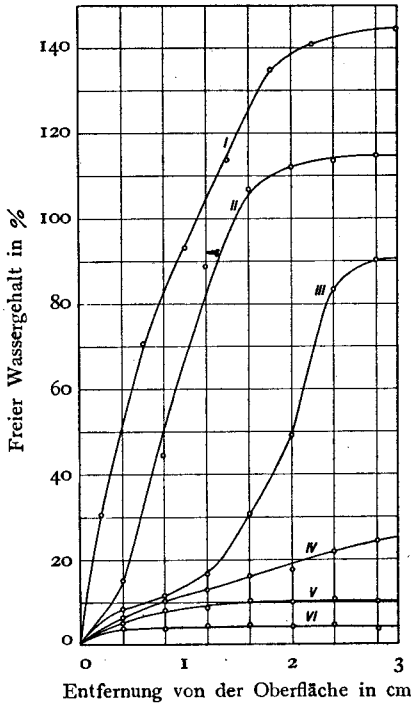


Abb. 18.

Zeitliche Wasserverteilungskurve.

Kurve	Versuche	Trocknungsdauer
I	4	36
II	5	48
III	5	112
IV	4	135
V	4	204
VI	5	208

Trocknungsbedingungen:
(30°C, 80%, 2.14 m/sek) bei Versuche 4,
(20°C, 60%, 2.14 m/sek) bei Versuche 5.



Eigenschaften miteinander vergleichen.

Über den Wasserverteilungszustand des Papierstoffes gibt es die Mitteilungen von D. W. McCready und W. L. McCabe[1] sowie von T. K. Sherwood[2].

Die Anzahl jedoch der Verteilungskurven genügt nicht, um den Wasserverteilungszustand der verschiedenen Trocknungsperioden ganz genau zu untersuchen.

Holz.

In Abb. 18 sind die Wasserverteilungskurven des Zypressenholzes gezeigt. Nach dem Trocknungsversuche des Verfassers[3] beginnt die Trocknung dieses Holzes von Anfang an mit der zweiten Periode, ähnlich wie die der Seife.

Die Wasserverteilungskurven des Zypressenholzes zeigen auch eine sehr ähnliche Beschaffenheit wie die der Seife.

1) D. W. McCready und W. L. McCabe: Trans. Am. Inst. Chem. Eng. 1933, 29, 131.
2) T. K. Sherwood: J. Ind. Eng. Chem. 1930, 20, 132.
3) Saburo Kamei: Mem. Colleg. Eng. Kyoto Imp. Univ., 1935, IX, 83.

Zusammenfassung.

1. Bei der Trocknung fester Proben neigt sich die Wasserverteilungskurve sehr steil am Anfang der konstanten Trocknungsperiode, aber mit der Zeit wird sie allmählich flacher, endlich am Grenzpunkt verläuft sie parallel zur Abszisse. Nach dem Grenzpunkt d. h. in der ersten verlangsamten Periode beginnt sie bald wieder sich zu neigen, sich der Form einer Parabel annähernd. Dann schliesslich stimmt das Ende der parabolischen Kurve mit dem Nullpunkt überein, dies entspricht der zweiten Periode verlangsamter Trocknungsgeschwindigkeit.

2. Bei der Trocknung der Seife oder des Zypressenholzes, die beide einen grossen Widerstand gegen die Innendiffusion aufweisen, zeigen die Wasserverteilungskurven von Anfang an nur die parabolische Beschaffenheit der zweiten verlangsamten Periode, wie in der Kurve der Trocknungsgeschwindigkeit.

III. Die Praktische Anwendung der theoretischen Trocknungsformel.

1. *Diffusionskoeffizient* λ.

Dem Diffusionskoeffizienten λ kommt bei der Trocknung fester Stoffe eine analoge Bedeutung zu wie dem Leitungskoeffizienten in der Wärmelehre mit der Einheit g/h. cm. v/cm. oder cm²/h.

Nach den Versuchsergebnissen ist der Koeffizient λ keine Konstante, sondern von dem vorhandenen Wassergehalt abhängig, ebenso wie der der Wärmeleitung. Überdies ist der Koeffizient λ nach dem Versuche des Verfassers sowohl von der Temperatur, der relativen Feuchtigkeit und Luftgeschwindigkeit, als auch von der Zusammenzetzung und Dimension der Probe beeinflusst. Eine theoretische und experimentelle Untersuchung über die Wasserdiffusion innerhalb fester Proben findet sich bisher sehr selten. Besonders fehlt es an Angaben der Werte des Diffusionskoeffizienten, der praktisch für die Verwendung der Wasserverteilungskurve und Diffusionsformel unentbehrlich ist. Das heisst, es gibt keine Mitteilung über die Werte λ bei den Perioden der konstanten sowie der ersten verlangsamten Trocknungsgeschwindigkeiten.

Über den Wert des Koeffizienten λ in der zweiten Periode verlangsamter Trocknungsgeschwindigkeit finden sich einige Arbeiten, und zwar von F. Tuttle[1] bei Holz, von T. K. Sherwood[2] bei Holz und Tonerde und von E. L. Lederer[3] bei Seife. Jeder bringt aber nur ein oder zwei mittels der theoretischen Formel berechnete experimentelle Werte von λ. Der Einfluss der Trocknungsbedingungen und Wassergehaltsveränderungen auf die Werte von λ ist deshalb bis jetzt noch ungeklärt. Unter diesen Umständen bemühte sich der Verfasser um die Feststellung des für die theoretische Behandlung der Trocknung unentbehrlichen Diffusionskoeffizienten von λ.

2. *Schaubilder des Diffusionskoeffizienten von* λ.

Vor allem müssen die Werte des Diffusionskoeffizienten gefunden werden, um die theoretische Wasserverteilungskurve mittelst der experimentell gefundenen Konstantenwerte zu zeichnen, um ferner die theoretische Kurve mit der experimentellen zu vergleichen und endlich die daraus erschlossenen Ergebnisse zur Berechnung verschiedenen Arten der Trochnung anwenden zu können.

Alle Wasserdiffusionsformeln bestehen aus einer unendlichen Exponentialreihe, so dass es sehr mühsam ist, aus der Setzung der experimentellen Werte auf Grund einer komplizierten Rechnung die Ergebnisse zu gewinnen. Stellt man nun die gegebene Formel, auch wenn sie augenscheinlich kompliziert ist, in geschickter Weise als Funktion von nur zwei Variablen oder Variablengruppen dar, so kann man die Funktion dieser zwei Variablen in technisch leicht brauchbaren Tabellen und Abbildungen wiedergeben und die Rechnung stellt sich folglich für den praktischen Gebrauch sehr einfach dar.

Zum Beispiel enthielt die Formel (17) d.h.

Tabelle 7.

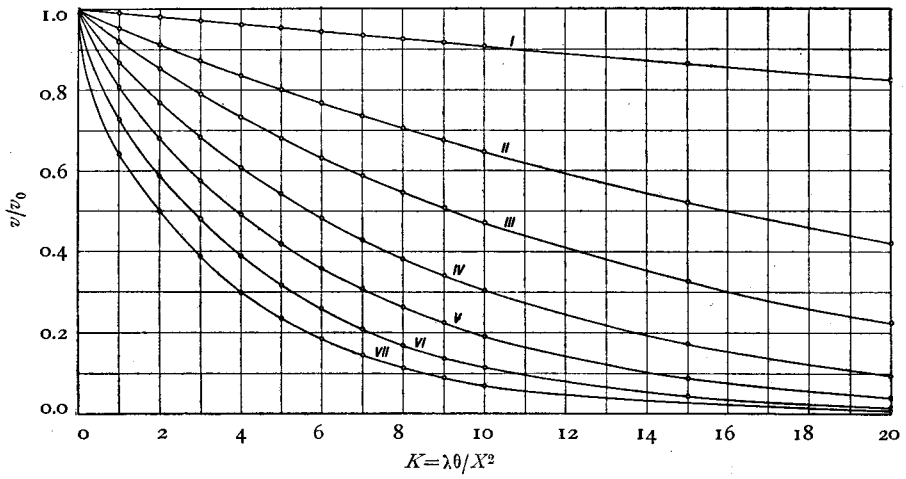
Wurzeln δ_k der Gleichung (11) für $k=1$ bis 5.

hX	δ_1	δ_2	δ_3	δ_4	δ_5
∞	1.57 $=\frac{1}{2}\pi$	4.71 $=\frac{3}{2}\pi$	7.85 $=\frac{5}{2}\pi$	11.00 $=\frac{7}{2}\pi$	14.15 $=\frac{9}{2}\pi$
1000	1.57	4.71	7.84	10.98	14.13
100	1.56	4.66	7.77	10.88	14.00
50	1.54	4.62	7.70	10.78	13.87
20	1.50	4.49	7.49	10.51	13.55
10	1.43	4.30	7.22	10.20	13.22
9.0	1.412	4.277	7.181	—	—
8.0	1.397	4.227	7.127	—	—
7.0	1.377	4.175	7.066	—	—
6.0	1.350	4.114	6.993	—	—
5.0	1.314	4.035	6.902	—	—
4.0	1.260	3.930	6.810	9.78	12.87
3.0	1.192	3.810	6.703	—	—
2.0	1.076	3.643	6.578	—	—
1.0	0.860	3.42	6.43	9.52	12.65
0.5	0.650	3.29	6.36	9.47	12.61
0.1	0.31	3.17	6.30	9.43	12.57
0.01	0.10	3.14	6.28	9.42	12.57
0	0.00 $=0$	3.14 $=\pi$	6.28 $=2\pi$	9.42 $=3\pi$	12.57 $=4\pi$

1) F. Tuttle: J. Frankl. Inst. 1925, 200, 609.
2) T. K. Sherwood: J. Ind. Eng. Chem. 1929, 21, 12; 1932, 24, 309.
3) E. L. Lederer: Seifensieder Ztg. 1924, 51, 779.

Abb. 19.
Schaubild des Diffusionskoeffizienten von λ
Konstante Trocknungsperiode.
(Platte mit wasserdicht bedeckten Vierseiten)

Kurve	hX
I	0.1
II	0.5
III	1.0
IV	2
V	4
VI	10
VII	∞



$$v_m = v_0 \sum_{k=1}^{k=\infty} \frac{2h^2X^2}{\delta_k^2(\delta_k^2+h^2X^2+hX)} e^{-\delta_k^2 \frac{\lambda\theta}{X^2}}$$

die vier Variablen von λ, h, δ_k und θ in sich. Inzwischen ist δ_k abhängig von hX wie $\tan \delta_k = hX/\delta_k$ in der Formel (11).

Eucken und Jakob[1] bringen die ersteren fünf Arten der Werte von δ_k für verschiedene hX, wie Tabelle 7 zeigt. Nimmt man nun $\lambda\theta/X^2$ als eine Variablengruppe, so kann die Formel (17) schliesslich wie folgt geschrieben werden

$$v_m = v_0 \varphi\left(\frac{\lambda\theta}{X^2}, hX\right).$$

Gilt hX oder $\frac{\lambda\theta}{X^2}$ für konstant, wird v_m eine Funktion mit nur einer Variablengruppe von hX oder $\lambda\theta/X^2$.

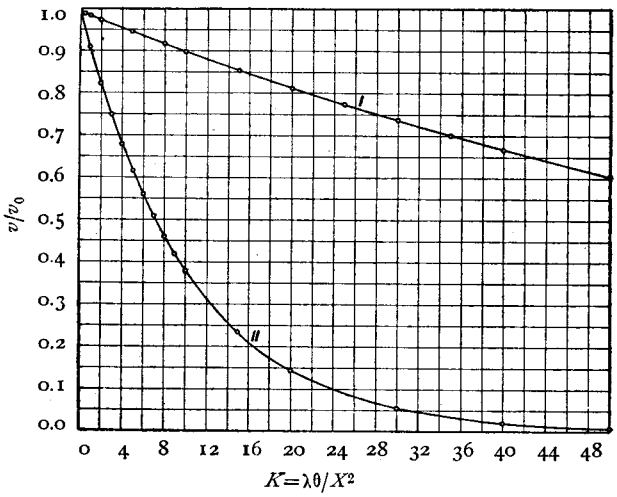
H. Gröber[2] betrachtete $\lambda\theta/X^2$ bei der Wärmeleitung als konstant, woraus sich dann die Beziehung zwischen v_m und hX, das sogenannte Gröbersche Schaubild, ergibt. Um den Wasserverteilungszustand im Innern fester Proben zu untersuchen, setzt der Verfasser nicht $\lambda\theta/X^2$ sondern hX als konstant voraus, d.h. $\lambda\theta/X^2$ gilt als Variable. Für 15 verschiedene Werte von hX=0.01 bis ∞ wurde die Beziehung zwischen $\lambda\theta/X^2$ und v_m festgestellt.

Abb. 19 und 20 zeigen 8 von den oberen Resultaten, wobei v_m/v_0 als Ordinate und $\lambda\theta/X^2$ als Abszisse dargestellt sind. Abb. 20 hat jedoch eine kleinere Abszissenskala als Abb. 19.

Die Gleichung der zweiten Periode verlangsamter Trocknungsgeschwindigkeit, d.h. die Formel (22),

Abb. 20.
Schaubild des Diffusionskoeffizienten von λ
Konstante Trocknungsperiode.
(Platte mit wasserdicht bedeckten Vierseiten)

Kurve I hX= 0.01
" II " =0.10



1) Eucken und Jakob: d. Chem. Ing. I—I, S 196.
2) H. Gröber: V. D. I. 1925, 69, 705.

$$v_m = v_0\left(\frac{8}{\pi^2}\right)\sum_{k=1}^{k=\infty}\frac{1}{(2k-1)^2}e^{-\left(\frac{\pi}{2}\right)^2(2k-1)^2\frac{\lambda\theta}{X^2}}$$

$$= v_0\left(\frac{8}{\pi^2}\right)\left\{e^{-9\left(\frac{\pi}{2}\right)^2\frac{\lambda\theta}{X^2}} + \frac{1}{9}e^{-9\left(\frac{\pi}{2}\right)^2\frac{\lambda\theta}{X^2}} + \frac{1}{25}e^{-25\left(\frac{\pi}{2}\right)^2\frac{\lambda\theta}{X^2}} + \cdots\right\}$$

enthielt nur eine Variablengruppe. Auch hier gilt $\lambda\theta/X^2$ als Variablengruppe und die Kurve I in Abb. 21 zeigt die Beziehung zwischen v_m und $\lambda\theta/X^2$. Die Formel (27),

$$v_m = \left(\frac{8}{\pi^2}\right)\sum_{k=1}^{k=\infty}\frac{1}{(2k-1)^2}\left\{v_s + 2(v_z - v_s)\left(\frac{2}{\pi}\right)^2\frac{1}{(2k-1)^2}\right\} e^{-\left(\frac{\pi}{2}\right)^2(2k-1)^2\frac{\lambda\theta}{X^2}}$$

hat auch nur eine Variable $\lambda\theta$. Wenn deshalb der Anfangszustand der Wasserverteilungsparabel bekannt ist, kann man diese Formel ganz analog wie Formel (22) behandeln.

Wäre diese Wasserverteilungskurve nun parabolisch, so würde sich der Durchschnittswassergehalt dabei wie folgt darstellen:

$$v_c = \frac{1}{X}\int_0^X\left(v_s - \frac{v_z - v_s}{X^2}x^2\right)dx = \frac{2v_z + v_s}{3}$$

Der Oberflächenwassergehalt in der zweiten Periode verlangsamter Trocknungsgeschwindigkeit wird theoretisch festgestellt und ausserdem noch aus der experimentellen Wasserverteilungskurve, die als Null angenommen wird, bestätigt. Gilt diese Tatsache am Ende der ersten auch noch für den Anfang der zweiten Periode verlangsamter Trocknungsgeschwindigkeit, so wird

$$v_s = 0,$$

$$\therefore \quad v_c = \frac{2}{3}v_z$$

Also wird die Formel (27),

$$v_m = \left(\frac{64}{\pi^4}\right)v_z\sum_{k=1}^{k=\infty}\frac{1}{(2k-1)^4}e^{-\left(\frac{\pi}{2}\right)^2(2k-1)^2\frac{\lambda\theta}{X^2}}$$

oder

$$\frac{v_m}{v_c} = \frac{96}{\pi^4}\sum_{k=1}^{k=\infty}\frac{1}{(2k-1)^4}e^{-\left(\frac{\pi}{2}\right)^2(2k-1)^2\frac{\lambda\theta}{X^2}}$$

$$= \frac{96}{\pi^4}\left\{e^{-\left(\frac{\pi}{2}\right)^2\frac{\lambda\theta}{X^2}} + \frac{1}{81}e^{-9\left(\frac{\pi}{2}\right)^2\frac{\lambda\theta}{X^2}} + \frac{1}{625}e^{-25\left(\frac{\pi}{2}\right)^2\frac{\lambda\theta}{X^2}} + \cdots\right\} \quad \text{.....(27a)}$$

Die Kurve II in Abb. 21 zeigt die Beziehungen zwischen v_m/v_c und $\lambda\theta/X^2$ in der Formel (27a).

Abb. 21.

Schaubild des Diffusionskoeffizienten von λ
Zweite verlangsamte Periode.
(Platte mit wasserdicht bedeckten Vierseiten)

Kurve	Formel	Anfänglicher Wasserverteilungszustand
I	22	gleichmässig
II	27	parabolisch

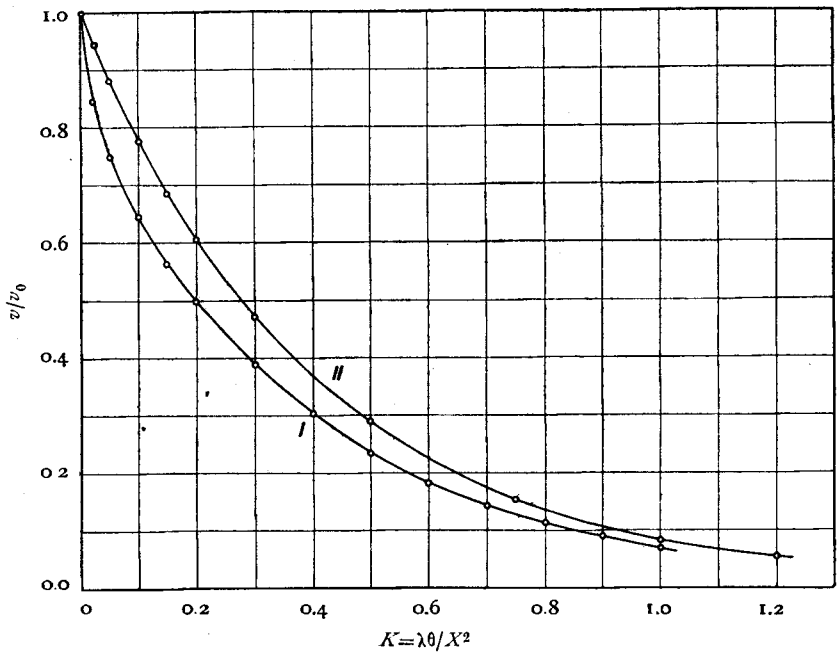


Tabelle 8.

Versuch 94-*B* der Tonerde.
Probe: Minokaolin und Kawachifeldspat in gleichen Prozenten.
Trocknungsbedingungen: 30°C, 30% und 2.14 m/sek.
Probenmasse: 10×8×3 cm.
Trockengewicht: 360.767 gr.

Zeitdauer in h	Ansteigen des Registriertrommelzeigers in mm/h	Gewichtsabnahme in g/h	Trocknungsgeschwindigkeit in g/cm² h	Freier Wassergehalt in g	Freier Wassergehalt in %
0				97.7686	27.05
1	5.02	4.0562	0.0507	93.7124	25.90
2	"	"	"	89.6562	24.80
3	"	"	"	85.6000	23.68
4	"	"	"	81.5438	22.58
5	"	"	"	77.4876	21.43
6	"	"	"	73.4314	20.32
7	"	"	"	69.3752	19.19
8	"	"	"	65.3190	18.07
9	"	"	"	61.2628	16.96
10	4.82	3.894	0.0486	57.3688	15.88
11	4.30	3.474	0.0434	53.8948	14.91
12	3.90	3.151	0.0394	50.7438	14.07
13	"	"	"	47.5928	13.20
14	3.50	2.828	0.0354	44.7648	12.40
15	3.20	2.586	0.0323	42.1788	11.69
16	3.00	2.424	0.0303	39.7548	11.00
17	2.20	1.778	0.0222	37.9768	10.33
18	2.10	1.697	0.0212	36.2798	10.05
19	1.80	1.454	0.0182	34.8258	9.65
20	1.70	1.374	0.0172	33.4518	9.28
21	1.60	1.293	0.0162	32.1588	8.90
22	1.50	1.212	0.0152	30.9468	8.57
23	"	"	"	29.7348	8.24
24	1.40	1.131	0.0141	28.6038	7.92
25	"	"	"	27.4728	7.62
26	1.20	0.970	0.0121	26.5028	7.35
27	"	"	"	25.5328	7.07
28	0.90	0.7272	0.0091	24.8054	6.88
29	"	"	"	24.0784	6.67
30	0.80	0.6464	0.0081	23.4320	6.50
31	"	"	"	22.7856	6.31
32	0.75	0.6060	0.0076	22.1796	6.15
33	"	"	"	21.5736	5.96
34	0.60	0.4848	0.0061	21.0888	5.85
35	"	"	"	20.6040	5.70

Abb. 22. Versuch 94-*B* der Tonerde.
Kurve I Trocknungsgeschwindigkeit.
" II Trocknungsdauer.
" III Probentemperatur.
Probe: Minokaolin : Kawachifeldspat = 5 : 5.
Lufttemperatur 30°C.
Feuchtigkeitsgrad 30%.
Luftgeschwindigkeit 2.14 m/sek.
Probenmasse: 10×8×3 cm.

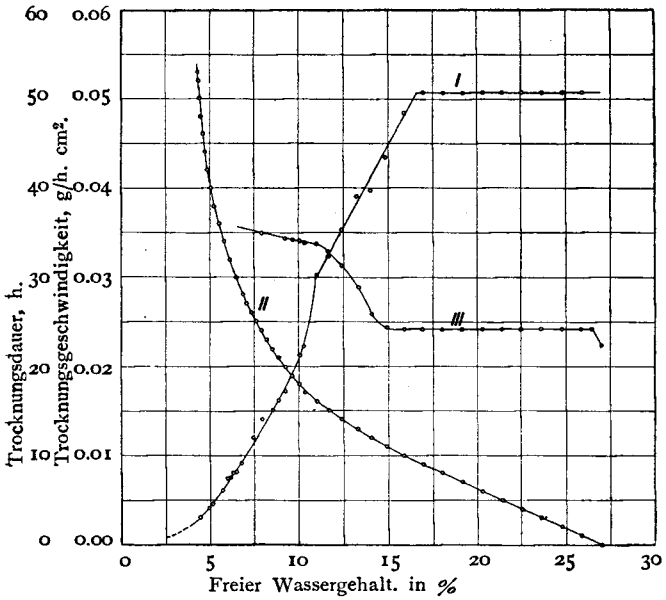


Tabelle 9.

Diffusionskoeffizienten für die konstante Trocknungsperiode.
Probe: Minokaolin und Kawachifeldspat in gleichen Prozenten.
Versuch 94-*B* der Tonerde.
Trocknungsbedingungen: 30°C, 30%, 2.14 m/sek. Probenmasse: 10×8×3 cm, X=3 cm.

θ, h	θ/X_2	v, g/cm³	v/v_0	$hX=0.01$ $K_{theor.}$	λ	$K_{exp.}$	$hX=0.1$ $K_{theor.}$	λ	$K_{exp.}$	$hX=0.5$ $K_{theor.}$	λ	$K_{exp.}$	$hX=1.0$ $K_{theor.}$	λ	$K_{exp.}$	$hX=2.0$ $K_{theor.}$	λ	$K_{exp.}$	$hX=4.0$ $K_{theor.}$	λ	$K_{exp.}$	$hX=10.0$ $K_{theor.}$	λ	$K_{exp.}$	$hX=\infty$ $K_{theor.}$	λ	$K_{exp.}$
0	0	0.4070	1.000																								
1	0.111	.3903	.960	3.40	30.6	4.450	.417	3.753	.480	.082	.738	.103	(.047)	.423	.059	(.027)	.243	.035	(.014)	.126	.022	(.005)	.045	.012	(.001)	.009	.006
2	0.222	.3737	.917	8.00	36.0	8.800	.900	4.05	.960	.186	.837	.206	.104	.468	.117	(.058)	.261	.069	(.034)	.153	.044	(.014)	.063	.025	(.004)	.018	.013
3	0.333	.3568	.876	12.40	37.2	13.32	1.335	4.01	1.440	.289	.867	.309	.164	.492	.176	(.094)	.282	.104	(.057)	.171	.065	(.028)	.084	.0372	(.010)	.030	.019
4	0.444	.3400	.835	17.37	39.5	17.77	1.858	4.18	1.920	.398	.896	.412	.228	.513	.234	.132	.297	.138	(.082)	.185	.087	(.044)	.099	.0495	(.020)	.045	.0254
5	0.555	.3227	.794	22.43	40.4	22.23	2.360	4.25	2.40	.516	.929	.515	.294	.529	.293	.173	.312	.173	.109	.196	.108	(.064)	.115	.0620	(.032)	.0576	.0318
6	0.666	.3059	.751	28.20	42.3	26.67	2.995	4.49	2.88	.648	.972	.618	.368	.552	.352	.221	.332	.208	.142	.213	.130	(.087)	.131	.0744	(.047)	.0705	.0382
7	0.777	.2890	.710	33.70	43.3	31.12	(3.55)	4.57	3.36	.780	1.003	.721	.444	.571	.410	.267	.344	.242	.174	.224	.152	.111	.143	.0868	(.064)	.0822	.0445
8	0.888	.2720	.669	39.75	44.7	35.55	(4.18)	4.70	3.84	.920	1.035	.824	.522	.587	.469	.318	.358	.277	.208	.234	.173	.137	.154	.0991	(.083)	.0934	.0508
9	1.000	.2552	.626	46.42	46.42	39.996	(4.87)	4.87	4.32	1.068	1.068	.927	.613	.613	.528	.374	.374	.311	.250	.250	.194	.169	.169	.114	.109	.109	.0572
Durchschnittswert				**39.990**			**4.319**			**0.927**			**0.528**			**0.3114**			**0.1947**			**0.1114**			**0.0572**		

Über ein Schaubild von λ in der Periode konstanter Trocknungsgeschwindigkeit und in der ersten Periode verlangsamter Trocknungsgeschwindigkeit ist bisher nichts berichtet worden. Dagegen wurden, was die zweite Periode verlangsamter Trocknungsgeschwindigkeit betrifft, der Abb. 21 ähnliche Schaubilder von T. K. Sherwood[1] E. L. Lederer[2] und noch A. B. Newman[3] veröffentlicht. Dennoch wurden experimentelle Werte von λ, wie oben erwähnt, nur in sehr geringem Masse angegeben. Dem Verfasser gelang es, auf Grund seiner Versuchsergebnisse die Werte von λ unter verschiedenen Bedingungen zu gewinnen, worauf er weiter die Beziehungen zwischen λ und den verschiedenen Variablen studierte.

3. *Experimenteller Wert des Diffusionskoeffizienten bei Tonerde.*

Der Koeffizient λ wird hier für die folgenden drei Fälle d. h. in der Periode konstanter Trocknungsgeschwindigkeit sowie der ersten und zweiten Periode der Verlangsamung ermittelt.

Periode konstanter Trocknungsgeschwindigkeit.

Tabelle 8 und Abb. 22 stellen die Ergebnisse der Trocknungsversuche 94-B der Tonerde dar. Die Periode konstanter Trocknungsgeschwindigkeit dauert demnach vom Anfang bis zur 9.4ten Stunde, wobei der Grenzwassergehalt 16.6% ist. Die erste Periode der Verlangsamung dauert bis zur 16.5ten Stunde, an derem Ende der freie Wassergehalt 10.8% beträgt. Hieran schliesst sich die zweite Periode der Verlangsamung, die bis zum Ende des Prozesses dauert.

Abb. 23.
Theoretische und experimentelle Werte von $K=\lambda\theta/X^2$
Versuch 94-*B* der Tonerde.
Konstante Trocknungsperiode.
$hX=0.10$, $X=3.0$.
Kurve I Ktheor.
" II Kexp.

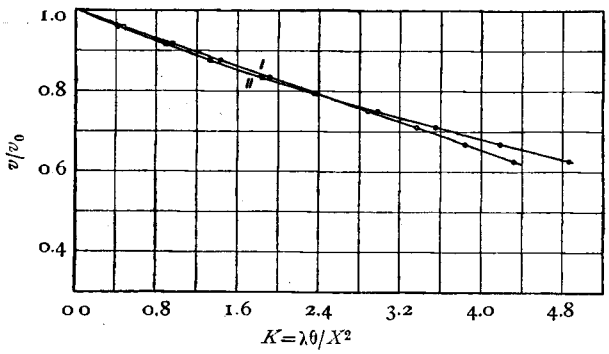
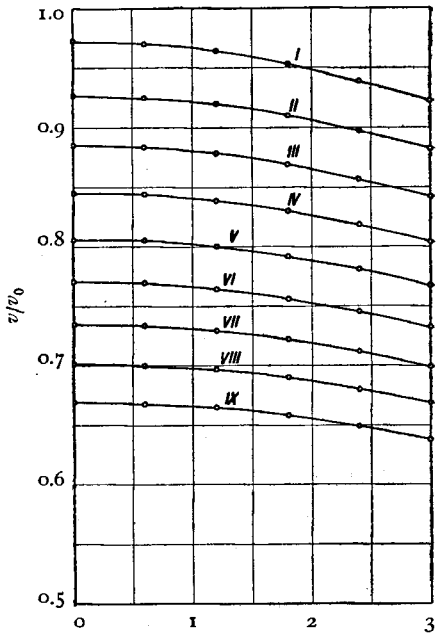


Abb. 24.
Theoretische Wasserverteilungskurven.
Konstante Trocknungsperiode.
$hX=0.1$, $\lambda=4.319$, $X=3.0$.

Kurve	Trocknungsdauer
I	1 h
II	2
III	3
IV	4
V	5
VI	6
VII	7
VIII	8
IX	9



Ist hX bestimmt, so gewinnt man die Werte von $\frac{\lambda\theta}{X^2}$ —später mit "K" ausgedrückt— für die verschiedenen v/v_0 in der entsprechenden Zeit aus dem Schaubild von λ in der Abb. 19 und 20 und bezeichnet sie hier mit $K_{\text{theor.}}$. Dividiert man jedesmal $K_{\text{theor.}}$ durch entsprechende θ/X^2, so erhält man den Wert von λ. Nun multipliziert man den Durchschnittswert von λ mit θ/X^2 in den einzelnen Zeiten, so ergibt sich $K_{\text{exp.}}$. $K_{\text{theor.}}$ und $K_{\text{exp.}}$ in Tabelle 9 wurden alle Werte auf diese Weise für die verschiedenen hX ermittelt.

Es findet jetzt die Auswahl des richtigsten Wertes von λ, der für verschiedene hX passt, nach dem Grade der Übereinstimmung zwischen dem theoretischen und experimentellen Werte von K statt.

In der Tat ist für $hX=0.1$ die Abweichung zwischen den beiden Werten von λ, wie Abb. 23 zeigt, verhältnismässig gering. Abb. 23 stellt die

1) T. K. Sherwood: Loc. cit.
2) E. L. Lederer: Loc. cit.
3) A. B. Newman: Trans. Am. Inst. Chem. Eng. 1931, 27, 310.

Beziehung zwischen $\lambda\theta/X^2$ und v/v_0 dar.

Für $hX=0.1$ erhält man $\lambda=4.319$, so ist $h=a/\lambda=0.033$ 1/cm,

$$\therefore \quad a=\frac{0.10\times 4.319}{3}=0.144 \quad \text{cm/h.}$$

Die Werte von $hX=0.1$ und $\lambda=4.319$ für diese Probe ergeben sich auch bei folgender Prüfung als richtig:

Setzt man $hX=0.1$, $\lambda=4.319$, $X=3$ und noch den aus der Tabelle gefundenen Wert δ_k in die Formel (33) ein

$$\frac{dW}{Ad\theta}=\frac{\lambda v_0}{X}\sum_{k=1}^{k=\infty}\frac{2h^2X^2}{\delta^2+h^2X^2+hX}e^{-\delta^2\frac{\lambda\theta}{X^2}},$$

so ergibt sich

$$\frac{dW}{Ad\theta}=0.0543 \text{ g/h. cm}^2.$$

Dieser Wert ist dem experimentell gefundenen Wert 0.0507 in der Tabelle 8 für die Periode der konstanten Trocknungsgeschwindigkeit sehr ähnlich.

Abb. 24 stellt die theoretischen Wasserverteilungskurven für $\theta=1$ bis 9 dar, die durch Einsetzung von $hX=0.1$, $\lambda=4.319$ und dem entsprechenden δ_k in die Formel (16) gefunden wurden. Diese theoretischen Wasserverteilungskurven stimmen jedoch in der Periode konstanter Trocknungsgeschwindigkeit mit den experimentellen in der früheren Abbildung nicht gut überein. Eingehender dargelegt zeigt sich, dass beide, nur mit wenigen Abweichungen bei der Tonerde am Anfang und am Ende dieser Periode, im grossen und ganzen übereinstimmen.

Berücksichtigt man die Kontraktion der Probe, so ergibt sich Tabelle 10 des Diffusionskoeffizienten, welcher etwas kleiner als sonst ist, worin V aus der Formel (4) und (4a) in dieser Mitteilung II[1] berechnet ist. Über das Schaubild von λ in der Periode konstanter Trocknungsgeschwindigkeit findet sich noch kein Bericht. Bei der Ableitung der theoretischen Wasserverteilungskurve haben E. R. Gilliland und T. K. Sherwood[2] den Wert λ, welcher der Periode der verlangsamten Trocknungsgeschwindigkeit entspricht, in die Formel der konstanten Trocknungsperiode eingeführt.

Die erste Periode der verlangsamten Trocknungsgeschwindigkeit.

Tabelle 11 wurde für die erste Periode der verlangsamten Trocknungsgeschwindigkeit auf dieselbe Weise wie Tabelle 9 angefertigt. Darin bedeuten θ' die von dem Grenzpunkt an berechnete Zeitdauer und v_c den kritischen Wassergehalt. Unter den verschiedenen Werten von hX ist die

1) Saburo Kamei: Mem. Colleg. Eng. Kyoto Imp. Univ. 1935, IX, 95.

2) E. R. Gilliland und T. K. Sherwood: J. Ind. Eng. Chem. 1933, 25, 1134.

Tabelle 10.

Diffusionskoeffizienten für die konstante Trocknungsperiode.

Versuch 94–*B* der Tonerde. Probe: Minokaolin und Kawachifeldspat in gleichen Prozenten.

Trocknungsbedingungen: 30°C, 30% und 2.14 m/sek. Probenmasse: 10×8×3 cm, X=3 cm.

θ h	θ/X^2	v, cm³	v, g/cm³	v/v_0	$hX=0.01$ $K_{theor.}$	λ	$K_{exp.}$	$hX=0.1$ $K_{theor.}$	λ	$K_{exp.}$	$hX=0.5$ $K_{theor.}$	λ	$K_{exp.}$	$hX=1.0$ $K_{theor.}$	λ	$K_{exp.}$	$hX=2.0$ $K_{theor.}$	λ	$K_{exp.}$	$hX=4.0$ $K_{theor.}$	λ	$K_{exp.}$	$hX=10$ $K_{theor.}$	λ	$K_{exp.}$	$hX=\infty$ $K_{theor.}$	λ	$K_{exp.}$
0	0	240	.407	1.000	0		0	0		0	0		0	0		0	0		0	0		0	0		0	0		0
1	.111	236.1	.396	.972	2.20	19.8	2.90	.290	2.61	0.3195	.057	0.513	0.0677	.032	0.2880	0.0384	.018	0.1620	0.0222	.008	.0720	.0134	.003	.0270	.0069	.001	.009	.00315
2	.222	232.2	.386	.946	4.95	22.27	5.80	.540	2.61	.637	.116	0.522	.1353	.065	0.2925	0.0767	.037	0.1665	0.0445	.021	.0945	.0269	.007	.0315	.0138	.002	.009	.00629
3	.333	228.7	.374	.918	7.82	23.45	8.70	.887	2.66	.959	.182	0.546	.203	.101	0.3930	0.1150	.058	0.1740	0.0667	.034	.1020	.0403	.013	.0390	.0207	.004	.012	.00944
4	.444	225.3	.363	.889	11.00	24.75	11.60	1.192	2.68	1.279	.254	0.571	.2707	.144	0.3240	0.1533	.082	0.1845	0.0889	.049	.1102	.0538	.023	.0518	.0276	.008	.018	.0126
5	.555	221.7	.351	.858	14.4	25.92	14.50	1.566	2.817	1.597	.335	0.603	.338	.192	0.3457	0.1917	.109	0.1963	0.1111	.067	.1207	.0672	.034	.0612	.0345	.014	.025	.0157
6	.666	218.0	.337	.826	18.53	27.80	17.40	1.965	2.945	1.918	.425	0.6375	.406	.243	0.3645	0.2300	.141	0.2115	0.1333	.088	.1320	.0807	.048	.0720	.0414	.022	.033	.0189
7	.777	214.2	.324	.794	22.43	28.85	20.30	2.36	3.035	2.238	.516	0.664	.474	.294	0.378	0.2683	.173	0.2223	0.1556	.109	.1401	.0942	.064	.0823	.0483	.032	.041	.0220
8	.888	210.7	.311	.760	26.93	30.30	23.20	2.85	3.205	2.557	.617	0.694	.541	.351	0.395	0.3067	.210	0.2362	0.1778	.134	.1508	.1077	.082	.0922	.0552	.044	.0495	.0252
9	1.000	207.5	.295	.725	31.63	31.63	26.09	3.33	3.330	2.877	.731	0.731	.609	.416	0.416	0.3450	.250	0.2500	0.2000	.162	.1620	.1210	.102	.1020	.0621	.058	.058	.0283
	Durchschnittswert				**26.086**			**2.877**			**0.609**			**0.345**			**0.200**			**0.121**			**0.0621**			**0.0283**		

Tabelle 11.

Diffusionskoeffizienten für die erste Periode verlangsamter Trocknungsgeschwindigkeit.
Versuch 94-*B* der Tonerde.
Probe: Minokaolin und Kawachifeldspat in gleichen Prozenten.
Trocknungsbedingungen: 30°C, 30% und 2.14 m/sek.
Probenmasse: 10×8×3 cm, X=3 cm.

θ, h	θ/X^2	v, g/cm³	v/v_c	hX=0.1			hX=0.5			hX=1.0			hX=2.0			hX=4.0			hX=10.			hX=∞		
				$K_{theor.}$	λ	$K_{exp.}$	$K_{theor.}$	λ	$K_{exp.}$	$K_{theor.}$	λ	$K_{exp.}$	$K_{theor.}$	λ	$K_{exp.}$	$K_{theor.}$	λ	$K_{exp.}$	$K_{theor.}$	λ	$K_{exp.}$	$K_{theor.}$	λ	$K_{exp.}$
0	0	.2552	1.000																					
1	$.1\bar{1}$	.2387	.946	0.573	5.155	0.625	.116	1.043	.135	(.065)	.585	.077	(.037)	.333	.045	(.021)	.1890	.029	(.0075)	.0675	.0164	(.002)	.018	.0085
2	$.2\bar{2}$	.2245	.891	1.171	5.270	1.249	.251	1.148	.270	.148	.666	.154	(.081)	.3645	.091	(.049)	.2203	.057	(.023)	.1034	.0328	(.008)	.036	.0170
3	$.3\bar{3}$	.2115	.829	1.925	5.77	1.873	.414	1.242	.405	.237	.711	.231	.138	.4145	.136	(.086)	.2581	.086	(.048)	.1441	.0491	(.022)	.066	.0255
4	$.4\bar{4}$	.1985	.779	2.545	5.73	2.497	.559	1.258	.540	.319	.718	.308	.189	.425	.181	.120	.2700	.115	(.072)	.1620	.0655	(.0375)	.0839	.0340
5	$.5\bar{5}$	.1866	.731	3.25	5.85	3.121	.713	1.283	.676	.404	.727	.385	.244	.439	.227	.158	.2843	.143	.098	.1763	.0819	(.0550)	.099	.0425
6	$.6\bar{6}$	.1760	.690	3.87	5.80	3 746	.848	1.272	.811	.482	.723	.462	.292	.438	.272	.192	.288	.172	.123	.1845	.0983	(.0740)	.1109	.0510
7	$.7\bar{7}$	.1657	.6495	(4.48)	5.76	4.365	.983	1.263	.945	.561	.721	.539	.343	.441	.318	.226	.292	.200	.150	.193	.1146	(.094)	.121	.0595
Durchschnittswert						**5.619**			**1.216**			**.693**			**.408**			**.2574**			**.1473**			**.0764**

Wertenveränderung von λ bei hX=0.1 und hX=0.5 am geringsten, und die Abweichung zwischen dem theoretischen und experimentellen Werte von K ist in diesem Falle nicht so gross.

hX=0.1, λ=5.619, h=0.033, a=0.187,
hX=0.5, λ=1.219, h=0.167, a=0.203.

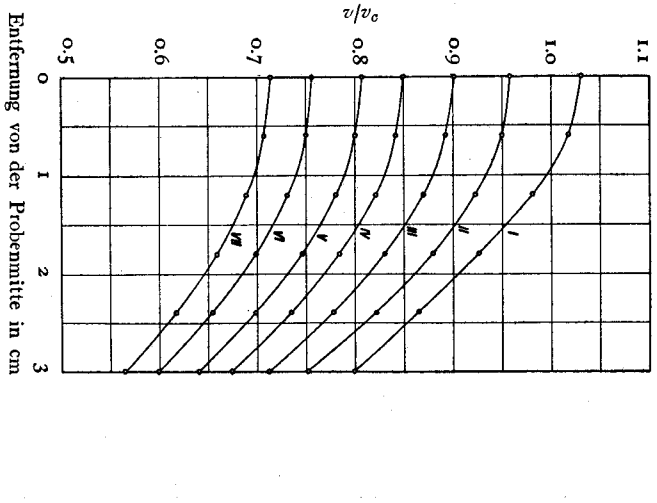


Abb. 25.
Theoretische Wasserverteilungskurven.
Erste verlangsamte Periode.
hX=0.50, λ=1.219, X=3.0.
Kurve I II III IV V VI VII
Trocknungsdauer 1 h 2 3 4 5 6 7

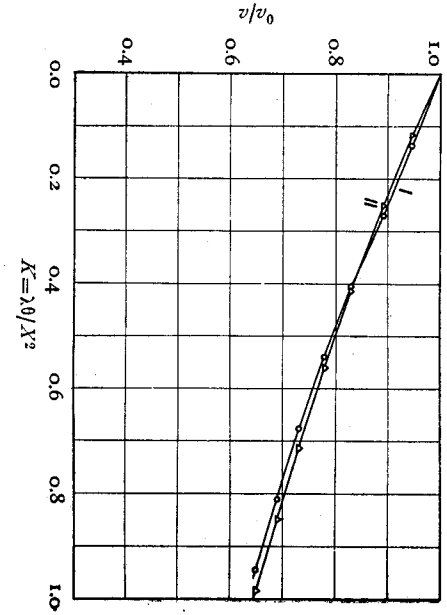


Abb. 26.
Theoretische und experimentelle Werte von K.
Versuch 94-*B* der Tonerde.
Erste verlangsamte Periode.
Kurve I K exp.
" II K theor.

Die theoretischen Wasserverteilungskurven von $hX=0.5$ und $\lambda=1.219$ stimmen mit den experimentellen für $\theta'=1$ bis 7 besser als die anderen überein. Es sind also die theoretischen Wasserverteilungskurven in der Abb. 25 den experimentellen Parabeln der ersten Periode in der Abb. 6 sehr ähnlich. Abb. 26 stellt die gute Übereinstimmung der Beziehungen zwischen v/v_c und K in der Theorie sowie auch im Experiment dar.

Die zweite Periode der verlangsamten Trocknungsgeschwindigkeit.

Tabelle 12 zeigt den Wert von λ in der zweiten Periode der verlangsamten Trocknungsgeschwindigkeit beim Versuch 94-B abgeleitet aus Abb. 22 und Tabelle 8, worin θ' die vom Anfang der zweiten Periode berechnete Zeitdauer und v_c den freien Wassergehalt bedeuten.

In der gleichen Weise nun wie bei Abb. 19 und 20 findet man $K_{\text{theor.}}$, λ und $K_{\text{exp.}}$ einen Wert nach dem andern aus Abb. 21. Demgemäss ergeben sich v/v_c und θ/X^2. Die beigefügten Zeichen I und II entsprechen den Kurven I bzw. II in Abb. 21. Abb. 27 stellt weiter die Beziehungen zwischen v/v_c und den theoretischen sowie experimentellen Werten $\lambda\theta/X^2$ für Fall I und II dar.

Bei jedem Paar der beiden Kurven weicht die theoretische ein weniges von der experimentellen Berechnung ab. Da der parabolische Wasserverteilungszustand am Anfang der zweiten Periode verlangsamter Trocknungsgeschwindigkeit eine besseren Übereinstimmung zwischen Theorie und Experiment in der Kurve II als der gleiche Verteilungszustand in der Kurve I zeigt, ist hieraus zu ersehen, dass das Wasser innerhalb der Probe am Ende der ersten Periode fast parabolisch verteilt ist. Eine noch deutlichere Übereinstimmung beider Kurven beobachtet man in Tabelle 13 und Abb. 28 bei Fall II, worin die Veränderung der Werte in jeder Stunde durch die Periode der

Tabelle 12.

Diffusionskoeffizienten für die zweite Periode verlangsamter Trocknungsgeschwindigkeit.
Versuch 94-*B* der Tonerde.
Probe: Minokaolin und Kawachifeldspat in gleichen Proxenten.
Trocknungsbedingungen: 30°C, 30% und 2.14 m/sek.
Probenmasse: 5×8×3 cm, $X=3$ cm.

θ	θ'	θ'/X^2	v	v/v_c	Kurve I			Kurve II		
					$K_{\text{theor.}}$	λ	$K_{\text{exp.}}$	$K_{\text{theor.}}$	λ	$K_{\text{exp.}}$
17	0		0.1582	1.000						
18	1	$0.11\bar{1}$	.1512	.956	.0045	0.0405	0.0080	0.018	0.1620	.0140
22	5	$.55\bar{5}$	.1290	.816	.0295	.0531	.0399	.082	0.1477	.0698
27	10	$1.11\bar{1}$	.1062	.671	.0850	.0765	.0798	.158	.1421	.1397
32	15	$1.66\bar{6}$	.0923	.584	.1360	.0816	.1195	.216	.1295	.2092
37	20	$2.22\bar{2}$	.0811	.513	.1890	.0895	.1597	.268	.1207	.2793
42	25	$2.77\bar{7}$	.0731	.462	.2325	.0837	.1990	.308	.1109	.3485
47	30	$3.33\bar{3}$	.0680	.430	.2615	.0784	.2392	.337	.1010	.4185
52	35	$3.88\bar{8}$	.0655	.414	.2770	.0712	.2790	.352	.0905	.4885
					Durchschnittswert	**0.0718**			**0.1256**	

Abb. 27.
Theoretische und experimentelle Werte von K.
Versuch 94-*B* der Tonerde.
Zweite verlangsamte Periode.

Kurve	Formel	Anfänglicher Zustand
I	22	gleichmässig
II	27	parabolisch

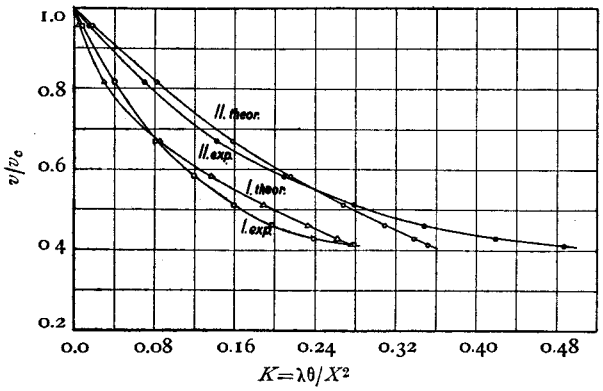


Abb. 28.
Theoretische und experimentelle Werte von K.
Versuch 94-*B* der Tonerde.
Zweite verlangsamte Periode.

Kurve	Formel	Anfänglicher Zustand
I	22	gleichmässig
II	27	parabolisch

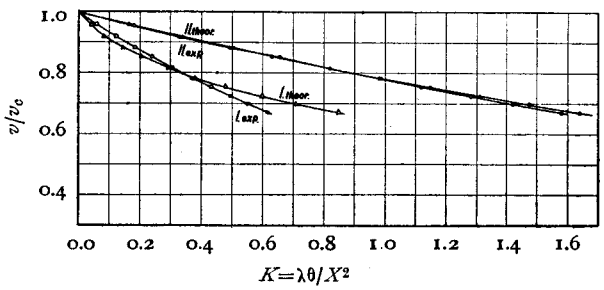


Tabelle 13.

Diffusionskoeffizienten für die zweite Periode verlangsamter Trocknungsgeschwindigkeit.
Versuch 94-*B* der Tonerde.

θ	θ'	θ'/X^2	v	v/v_c	Kurve I			Kurve II		
					$K_{theor.}$	λ	$K_{exp.}$	$K_{theor.}$	λ	$K_{exp.}$
17	0		0.1582	1.000						
18	1	$0.11\bar{1}$	.1512	.956	.0045	.0405	.0062	0.0180	0.1620	.0164
19	2	$.22\bar{2}$	.1451	.918	.0085	.0383	.0123	.0340	.1530	.0328
20	3	$.33\bar{3}$	.1393	.881	.0145	.0435	.0185	.0505	.1517	.0491
21	4	$.44\bar{4}$	.1349	.853	.0205	.0461	.0247	.0630	.1418	.0655
22	5	$.55\bar{5}$	.1290	.816	.0295	.0531	.0309	.0820	.1477	.0820
23	6	$.66\bar{6}$	.1238	.782	.0380	.0570	.0370	.0980	.1470	.0984
24	7	$.77\bar{7}$	.1192	.754	.0489	.0617	.0432	.112	.1440	.1148
25	8	$.88\bar{8}$	.1145	.724	.060	.0675	.0494	.128	.1440	.1310
26	9	$1.00\bar{0}$	.1104	.699	.071	.0710	.0555	.142	.1420	.1475
27	10	$1.11\bar{1}$	.1062	.671	.085	.0765	.0617	.158	.1421	.1640
					Durchschnittswert		**.0555**			**.1475**

Tabelle 14.

Diffusionskoeffizienten für die zweite Periode verlangsamter Trocknungsgeschwindigkeit.
Versuch 94-*A* der Tonerde.
Probe: Minokaolin und Kawachifeldspat in gleichen Prozenten.
Trocknungsbedingungen: 30°C, 30% und 2.14 m/sek.
Probenmasse: 5×8×6 cm, X=6 cm.

θ	θ'	θ'/X^2	v	v/v_c	Kurve I			Kurve II		
					$K_{theor.}$	λ	$K_{exp.}$	$K_{theor.}$	λ	$K_{exp.}$
10	0	0	0.2389	1.00						
11	1	0.0278	.2270	.9500	.0050	0.1798	0.0062	0.021	0.755	0.01162
12	2	.0556	.2167	.9065	.0105	(.1890)	.0124	.039	(0.7012)	.02325
15	5	.139	.1953	.8175	.0285	.205	.031	.081	0.583	.0581
20	10	.278	.1712	.7165	.0630	.2266	.062	.133	0.478	.1162
25	15	.418	.1540	.6440	.0990	.2367	.0932	.174	0.4162	.1748
30	20	.556	.1413	.5912	.1315	.2365	.124	.211	0.380	.2325
35	25	.695	.1297	.5425	.1650	.2376	.1549	.2465	0.3545	.2905
40	30	.835	.1204	.5040	.1960	.2346	.1861	.274	0.328	.3495
45	35	.972	.1128	.4723	.2230	.2294	.2165	.3005	0.3086	.406
50	40	1.111	.1061	.4438	.2480	.2233	.2478	.324	0.2918	.465
55	45	1.250	.100	.4180	.2725	.2181	.2785	.348	0.2883	.5225
					Durchschnittswert		**.2228**			**0.4183**

Verlangsamuug gemessen ist.

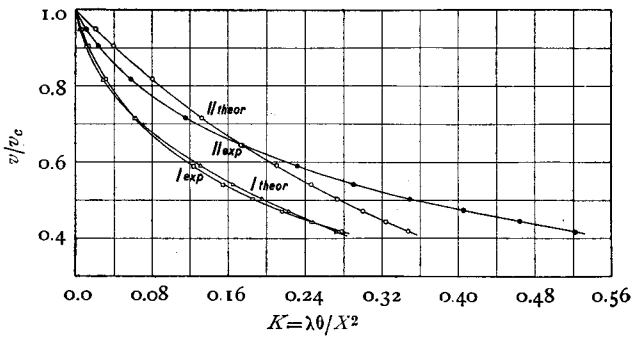
Tabelle 14 und Abb. 29 zeigen ebenfalls die Ergebnisse des Versuches 94-A der Tonerde in der zweiten Periode, welche schon in Abb. 17 der vorigen Mitteilung[1] graphisch dargestellt war. Im Gegensatz zu dem letzten Fall aber stimmen beide Kurven in Theorie und Versuch bei Paar I genauer als II überein. Das hat vielleicht darin seinen Grund, dass die erste Periode, wie aus Abb. 17 ersichtlich ist, so kurz ist, dass das Wasser während derselben sich innerhalb der Probe nicht parabolisch verteilen kann.

Die Schwierigkeit des Versuchs und die Kompliziertheit der Berechnung lassen den wahren Charakter von λ in der zweiten Periode bis jetzt nicht erkennbar werden. Beim Integrieren der fundamentalen Formel setzt man λ als konstant,

Abb. 29.

Theoretische und experimentelle Werte von K.
Versuch 94-*A* der Tonerde.
Zweite verlangsamte Periode.

Kurve	Formel	Anfänglicher Zustand
I	22	gleichmässig
II	27	parabolisch



1) Saburo Kamei: Loc. cit.

obgleich es meinem Versuch nach gar nicht konstant ist. Die Wärmeleitungszahl des Nichtmetalles, z.B. von Holz, Ziegel oder Tonerde, ist durchaus nicht konstant, sondern muss sich in Abhängigkeit vom Wassergehalt und von anderen Faktoren ändern. Wie verhält sich nun der Koeffizient λ einerseits zu Temperatur, Feuchtigkeit und Geschwindigkeit der Luft sowie anderseits zur Zusammensetzung der Probe?

Tabelle 15 A.

Beziehung zwischen dem Diffusionskoeffizienten und der Lufttemperatur.
Probe: Kibushitonerde.
Feuchtigkeitsgrad 21%, Luftgeschwindigkeit 2.14 m/sek.

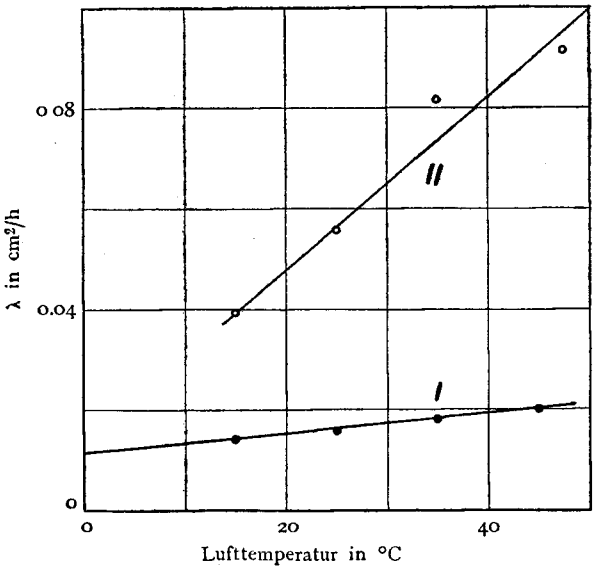
Versuch	Lufttemperatur °C	λ I	λ II
18	15	0.0144	0.0396
19	25	0.0158	0.0560
20	35	0.0468	0.0819
21	45	0.0572	0.0914

Tabelle 15 B.

Beziehung zwischen dem Diffusionskoeffizienten und der Lufttemperatur.
Probe: Minokaolin.
Luftgeschwindigkeit: 0.5 m/sek.

Versuch	Lufttemperatur °C	Feuchtigkeitsgrad %	λ I	λ II
139	60	8.19	0.0810	—
140	70	6.67	0.1168	—
141	80	6.37	0.1635	—
142	90	4.05	0.2071	—

Abb. 30.A
Diffusionskoeffizient abhängig von der Lufttemperatur.
Kurve I : λ_I
" II : λ_{II}
Probe: Tonerde.



Einige Versuchsresultate des Verfassers werden in Tabelle 15 bis 19 gezeigt. Abb. 30, die graphische Darstellung von Tabelle 15, drückt die Verminderung des Koeffizienten gemäss der Erhöhung der Lufttemperatur aus. Abb. 31 und Tabelle 16 zeigen wiederum die Verminderung im umgekehrten Verhältnisse zur relativen Feuchtigkeit. Nach der Kurve I ist $\lambda=0$, wenn die relative Feuchtigkeit 100% ist.

Der Koeffizient hat allgemein die Neigung, wie Tabelle 17 zeigt, sich im Verhältnis zur Luftgeschwindigkeit zu vermehren, doch ist dies nicht regelmässig der Fall. Natürlich liegt der Gedanke nahe, dass die Luftgeschwindigkeit den Koeffizienten

Abb. 30.B
Diffusionskoeffizient abhängig von der Lufttemperatur.
Probe: Tonerde.

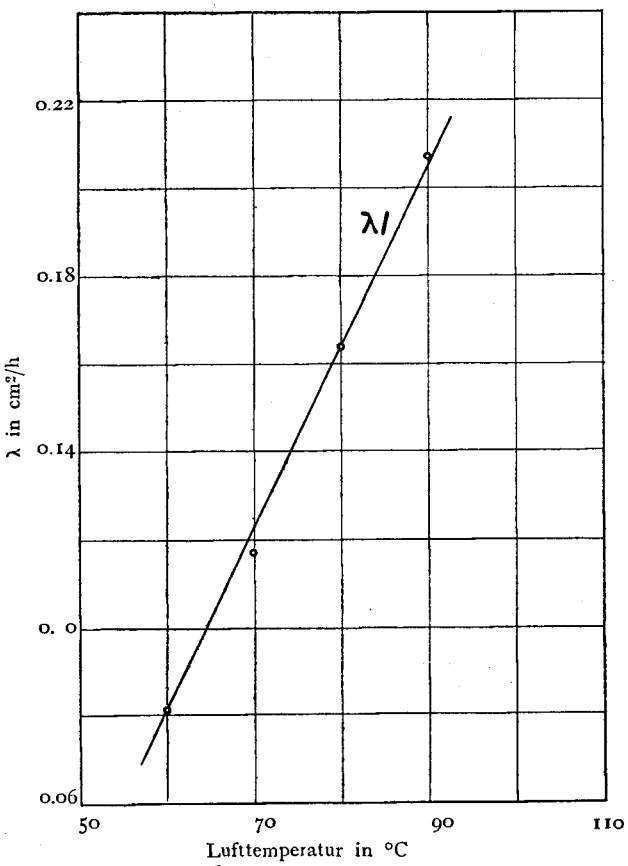


Tabelle 16.

Beziehung zwischen dem Diffusionskoeffizienten und Feuchtigkeitsgrad.
Probe: Kibushitonerde.
Lufttemperatur: 45°C, Luftgeschwindigkeit 2.14 m/sek.

Versuch	Feuchtigkeitsgrad %	λ I	λ II
21	21.0	0.0572	0.0914
9	37.3	0.0463	0.0800
11	53.7	0.0368	0.0660
13	75.8	0.0200	0.0500

Tabelle 17.

Beziehung zwischen dem Diffusionskoeffizienten und der Luftgeschwindigkeit.
Probe: Minokaolin und Kawachifeldspat in gleichen Prozenten.

Versuche	Luftgeschwindigkeit m/sek	λ I
119	0.500	0.1049
120	1.010	0.0713
121	1.489	0.0854
122	2.150	0.0918
124	5.150	0.1150
125	7.100	0.1036
126	9.200	0.0929
	Durchschnittswert	**0.0943**

Tabelle 18.

Diffusionskoeffizienten für verschiedene Flüssigkeiten.
Probe: Seikireikaolin.
Trocknungsbedingungen: 30°C, 40% und 1.01 m/sek.

Versuch	Flüssigkeitsart	Molekulargewicht	λ_I
48	Äthylalkohol	46	0.0517
49	Methylalkohol	32	0.1110
50	Benzin	—	0.0862
51	Benzol	78	0.2580
52	Toluol	92	0.2180
53	Aceton	58	0.2070
60	Xylol	107	0.0350
61	Essigsaures Amyl	130	0.0445
62	Essigsaures Äthyl	88	0.2133
63	Tetrachlorkohlenstoff	154	0.3370
65	Wasser	18	0.0212

Tabelle 19.

Diffusionskoeffizienten für das verschiedene Mischungsverhältnis von Quarz mit Kaolin.
Trocknungsbedingungen: 40°C, 40% und 2.14 m/sek.

Versuch	Minokaolin: Kawachiquarz %	λ_m I	λ_m II
29	100 : 0	0.0335	0.0634
34	90 : 10	0.0323	0.0624
35	80 : 20	0.0340	0.0650
36	70 : 30	0.0393	0.0724
37	60 : 40	0.0398	0.0746
38	50 : 50	0.0401	0.0732
39	40 : 60	0.0618	0.1005
40	30 : 70	0.0549	0.0924
41	20 : 80	0.0743	0.1127

sehr wenig beeinflusst. Tabelle 18 zeigt die Beziehungen zwischen verschiedenen Flüssigkeiten und ihren Diffusionskoeffizienten. Abb. 32 und Tabelle 19 lassen erkennen, dass der Koeffizient λ, mit einigen Ausnahmen, sich allgemein entsprechend der Zunahme des Quarzgehaltes in der Tonerde vergrössert. T. K. Sherwood[1] hat den einen Wert von λ=0.0259 (Trockenkugeltemperatur 25°C, Feuchtkugeltemperatur 17°C und Luftgeschwindigkeit 15.2 m/sek) festgestellt.

Abb. 31.
Diffusionskoeffizient abhängig v. d. relativen Feuchtigkeit.
Kurve I : λ_I
" II : λ_{II}
Probe: Tonerde.

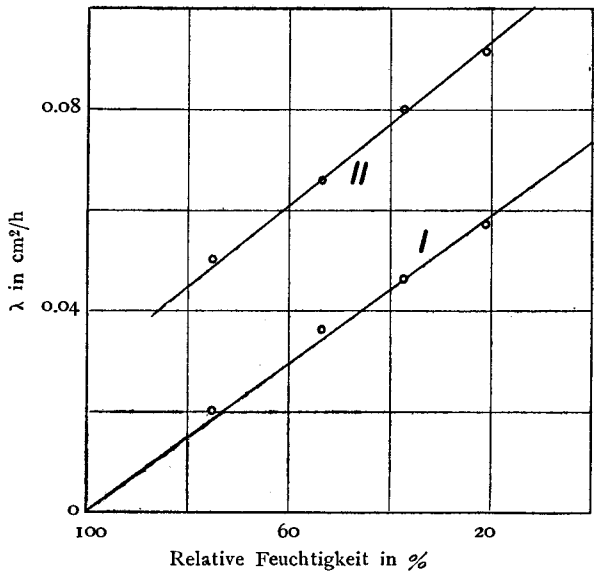
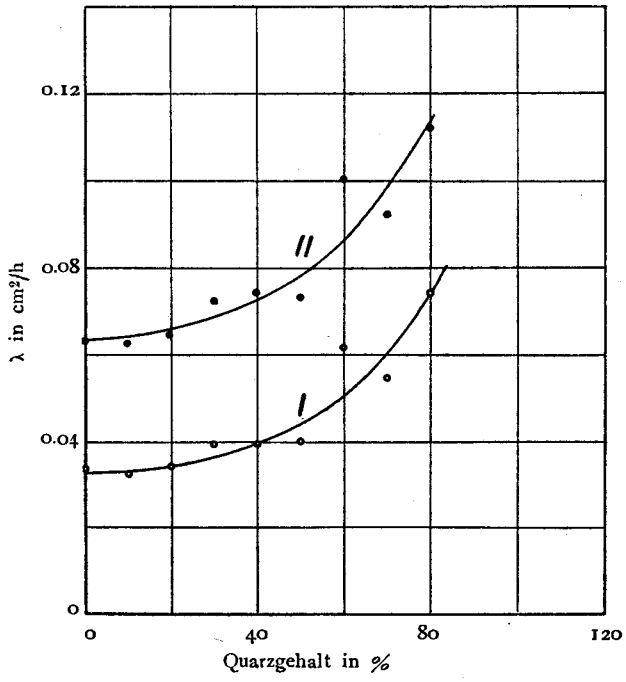


Abb. 32.
Diffusionskoeffizient abhängig vom Quarzgehalt.
Kurve I : λ_I
" II : λ_{II}
Probe: Tonerde.



1) T. K. Sherwood: Loc. cit.

Tabelle 20.

Diffusionskoeffizienten für die zweite Periode verlangsamter Trocknungsgeschwindigkeit.
Versuch 4–*A* der Seife.
Probe: Velvetseife.
Trocknungsbedingungen: 50°C, 20% und 2.14 m/sek.
Probenmasse: 5×8×3 cm, X=1.5 cm.

θ, Tag	θ/X^2	v, g/cm³	v/v_0	$K_{theor.}$	λ	$K_{exp.}$
0	0	.3580	1.00			
1	0.445	.3155	.883	0.0109	0.02448	0.0101
5	2.225	.2446	.684	.0778	.03495	.0506
10	4.45	.2032	.568	.1452	.03265	.1009
15	6.66	.1768	.495	.2008	.03015	.1512
20	8.89	.1583	.443	.2474	.02782	.2018
25	11.11	.1446	.405	.2827	.02545	.2521
30	13.33	.1337	.374	.317	.02378	.3027
35	15.57	.1250	.350	.345	.02217	.3532
40	17.78	.1177	.329	.369	.02075	.4035
45	20.00	.1111	.311	.393	.01965	.454
50	22.22	.1051	.294	.414	.01861	.505
55	24.45	.0996	.279	.435	.01778	.555
60	26.70	.0943	.264	.456	.01709	.606
65	28.90	.0894	.250	.477	.01650	.656
70	31.13	.0846	.237	.499	.01602	.706
75	33.35	.0804	.225	.517	.01550	.757

Durchschnittswert **0.0227**

Tabelle 21.

Diffusionskoeffizienten für die zweite Periode verlangsamter Trocknungsgeschwindigkeit.
Versuch 3–*A* der Seife.
Probe: Velvetseife.
Trocknungsbedingungen: 50°C, 30% und 0.5 m/sek.
Probenmasse: 5×8×3 cm, X=1.5 cm.

θ Tag	θ/X^2	w%	v, g/cm³	v/v_0	$K_{theor.}$	λ	$K_{exp.}$
0	0	44.00	.3025	1.00	0		0
1	.445	37.85	.2558	.861	0.0151	0.03392	0.01047
5	2.225	30.25	.2040	.688	.0760	.03412	.0524
10	4.45	25.54	.1724	.581	.1366	.03070	.1047
15	6.66	22.52	.1521	.512	.1871	.02810	.1567
20	8.89	20.30	.1370	.461	.2295	.02580	.2090
25	11.11	18.50	.1249	.421	.2670	.02402	.2615
30	13.33	16.98	.1147	.386	.305	.02286	.3140
35	15.57	15.63	.1056	.3555	.338	.02172	.3665
40	17.78	14.45	.0976	.3285	.370	.02081	.4185
45	20.00	13.40	.0905	.3047	.400	.02000	.4710
50	22.22	12.43	.0840	.2830	.429	.01927	.5237
55	24.45	11.59	.0782	.2635	.456	.01866	.576
60	26.70	10.82	.0731	.2460	.484	.01812	.629
65	28.90	10.13	.0684	.2305	.508	.01757	.680
70	31.13	9.53	.0643	.2165	.534	.01716	.732

Durchschnittswert **0.02353**

1) Saburo Kamei: Loc. cit.

4. *Experimenteller Wert des Diffusionskoeffizienten der Seife.*

Seife weist, wie schon erwähnt, von Anfang an die zweite Periode verlangsamter Trocknungsgeschwindigkeit auf, weder die konstante noch die erste verlangsamte Periode sind bemerkbar. Daher kann in der gleichen Weise, wie für die zweite Periode bei Tonerde, Tabelle 20 aus Tabelle des Versuchs 4-A mit Seife in der vorigen Mitteilung[2)] angefertigt werden. Diese Tabelle entspricht aber nur der Kurve I in der Abb. 21.

Dasselbe Resultat des Versuches 3-A ist in Tabelle 21 dargestellt, während Abb. 33 und 34 die Beziehung zwischen den theoretischen und experimentellen Werten von K und der zugehörigen v/v_0, in Versuch 3-A bzw. 4-A zeigen. Beide stimmen demnach genügend überein.

Abb. 33.
Theoretische und experimentelle Werte von K.
Versuch 3–*A* der Seife.
Zweite verlangsamte Periode.
λ=0.02353, X=1.5
Kurve I : Ktheor.
Kurve II : Kexp.

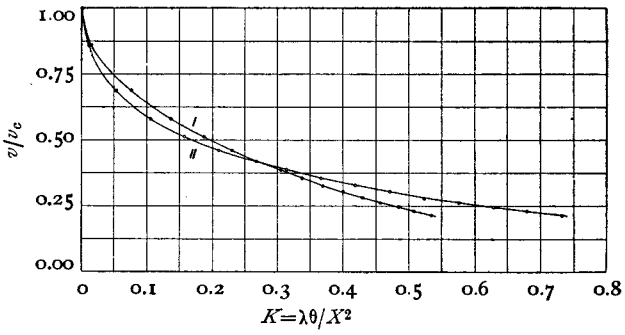


Abb. 34.
Theoretische und experimentelle Werte von K.
Versuch 4–*A* der Seife.
Zweite verlangsamte Periode.
λ=0.0227, X=1.5
Kurve I : Ktheor.
" II : Kexp.

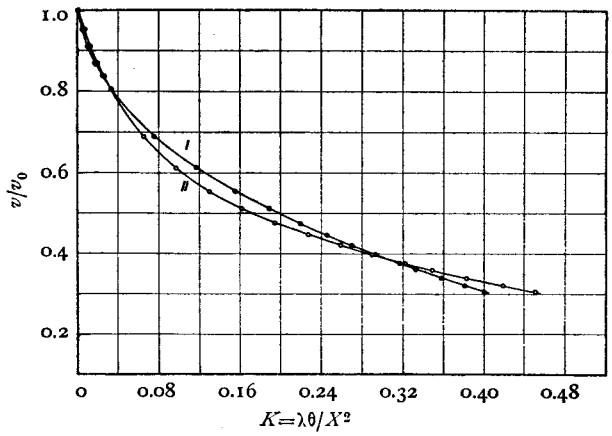


Abb. 35 zeigt wieder die 8 theoretischen Wasserverteilungskurven für $\theta=\frac{1}{10}$ bis zu 50 Tagen, die aus der Formel (21)

$$v=v_0\left(\frac{4}{\pi}\right)\sum_{k=1}^{k=\infty}\frac{(-1)^{k-1}}{(2k-1)}e^{-\left(\frac{\pi}{2}\right)^2(2k-1)^2\frac{\lambda\theta}{X^2}}\cos\left(\frac{2k-1}{2}\pi\frac{x}{X}\right)$$

und ausserdem mit Hilfe des Durchschnittswertes von $\lambda=0.0277$ berechnet sind. Diese theoretischen Kurven sind den experimentellen in Abb. 13 der Seife sehr ähnlich.

Die Beziehungen des Koeffizienten λ zu den Trocknungsbedingungen ergeben sich weiter wie in Tabelle 22. Daraus kann man schliessen, dass der Diffusionskoeffizient in der Seife, falls die Probendicke bestimmt ist, sich allgemein entsprechend der Temperaturerhöhung, Feuchtigkeitsabnahme und Geschwindigkeitszunahme der Luft vergrössert. Doch beeinflusst solche Variable weit weniger den Koeffizienten in der Seife als in der Tonerde.

Tabelle 22.

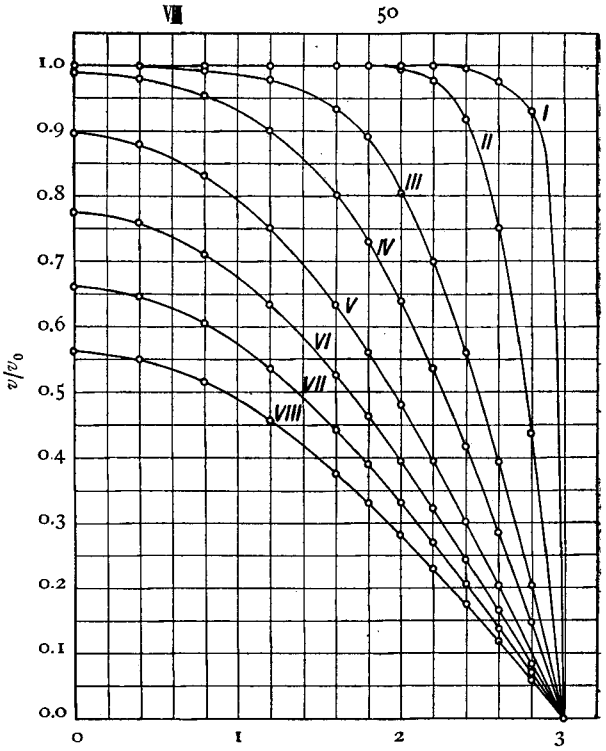
Beziehung zwischen dem Diffusionskoeffizienten und den Trocknungsbedingsbedingungen.
Probe: Velvetseife.

Versuch	Probendicke $2X$cm	Lufttemperatur °C	Feuchtigkeitsgrad %	Luftgeschwindigkeit m/sek	λ cm²/Tag
1A	3	40	40	0.5	0.0221
2A	3	50	40	0.5	0.0237
3A	3	50	30	0.5	0.0235
4A	3	50	20	2.14	0.0227
7A	3	50	20	4.00	0.0251
1B	2	40	40	0.5	0.0161
2B	2	50	40	0.5	0.0163
3B	2	50	30	0.5	0.0168
4B	2	50	20	2.14	0.0180
7B	2	50	20	4.00	0.0214
				Durchschnittswert	**0.0206**

Abb. 35.

Theoretische Wasserverteilungskurven.
Zweite verlangsamte Trocknungsperiode.
λ = 0.0227.

Kurve	Trocknungsdauer
I	1/10 Tag
II	1
III	5
IV	10
V	20
VI	30
VII	40
VIII	50



Entfernung von der Probenmitte in cm

Tabelle 23.

Diffusionskoeffizienten für die zweite Periode verlangsamter Trocknungsgeschwindigkeit.
Versuch 18 des Papierstoffes.
Trocknungsbedingungen: 40°C, 40% und 1.01 m/sek.
Probenmasse: 10×8×1.5 cm, $2X$=1.5 cm.

θ	θ'	θ'/X^2	w%	v/v_0	Kurve I $K_{theor.}$	Kurve I λ	Kurve I $K_{exp.}$	Kurve II $K_{theor.}$	Kurve II λ	Kurve II $K_{exp.}$
25	0		79.15	1.00	0		0	0		
26	1	0.444	64.89	0.8200	0.028	0.0630	0.4912	0.079	0.1778	0.0758
27	2	0.888	53.70	.6788	.081	.0912	.0982	.153	.1722	.1530
28	3	1.333	44.70	.5650	.148	.1110	.1475	.229	.1718	.2274
29	4	1.777	37.45	.4734	.222	.1250	.1965	.300	.1690	.3030
30	5	2.222	31.71	.4010	.290	.1310	.2458	.3665	.1650	.3788
35	10	4.444	13.25	.1674	.635	.1428	.4913	.7175	.1615	.7589
40	15	6.666	4.50	.05688				1.175	.1765	1.134
					Durchschnittswert	**0.1106**			**0.1705**	

Auch E. L. Lederer[1] hat den Koeffizienten der Seife untersucht. Seinen Versuchsresultaten nach vergrössert sich der Koeffizient wohl im Verhältnis zur Temperaturerhöhung der Luft, sowie zum vorhandenen Wassergehalt am Anfang des Vorganges, während der Einfluss der Feuchtigkeit nicht gross genug ist, um ihn in Betracht ziehen zu müssen. Überdies meint Lederer, dass die Zusammensetzung der Seife eine wichtige Rolle für λ spielt, deren Wert in dem Gebiet von 0.0027 bis 0.0148 liegt.

5. *Experimenteller Wert des Diffusionskoeffizienten bei Papierstoff.*

Tabelle 23 und 24 stellen den Koeffizienten λ des Papierstoffes in der zweiten Periode der verlangsamten Trocknungsgeschwindigkeit dar. In diesem Fall stimmen ebenfalls die aus der Kurve II in der Abb. 21 abgeleiteten Resultate in Theorie und Experiment gut miteinander überein. Der Durchschnittswert des Koeffizienten ist hier für beide 0.1765 bzw. 0.1574.

Tabelle 24.

Diffusionskoeffizienten für die zweite Periode verlangsamter Trocknungsgeschwindigkeit.
Versuch 19 des Papierstoffes.
Trocknungsbedingungen: 40°C, 40% und 1.01 m/sek.
Probenmasse: 10×8×1.0 cm, $2X$=1.0 cm.

θ	θ'	θ'/X^2	w%	v/v_0	Kurve I			Kurve II		
					$K_{theor.}$	λ	$K_{exp.}$	$K_{theor.}$	λ	$K_{exp.}$
17	0	0	74.75	1.00	0		0	0		
18	1	1	53.25	0.7130	.065	.0650	.1236	.134	.1340	.1574
19	2	2	36.75	.4920	.207	.1035	.2472	.285	.1425	.3148
20	3	3	23.65	.3165	.385	.1284	.3708	.465	.1550	.4720
21	4	4	14.12	.1890	.585	.1462	.494	.670	.1675	.630
22	5	5	7.44	.0996	.875	.1750	.618	.940	.1880	.782
23	6	6	3.21	.0430						
				Durchschnittswert		**.1236**			**.1574**	

Tabelle 25.

Beziehung zwischen dem Diffusionskoeffizienten und der Lufttemperatur.
Probe: Papierstoff.
Feuchtigkeitsgrad: 40%.
Luftgeschwindigkeit: 1.01 m/sek.

Versuch	Lufttemperatur °C	λ I	λ II
9	50	0.1050	0.1330
1	40	0.0733	0.1080
10	30	0.0382	0.0697
11	20	0.0270	0.0570

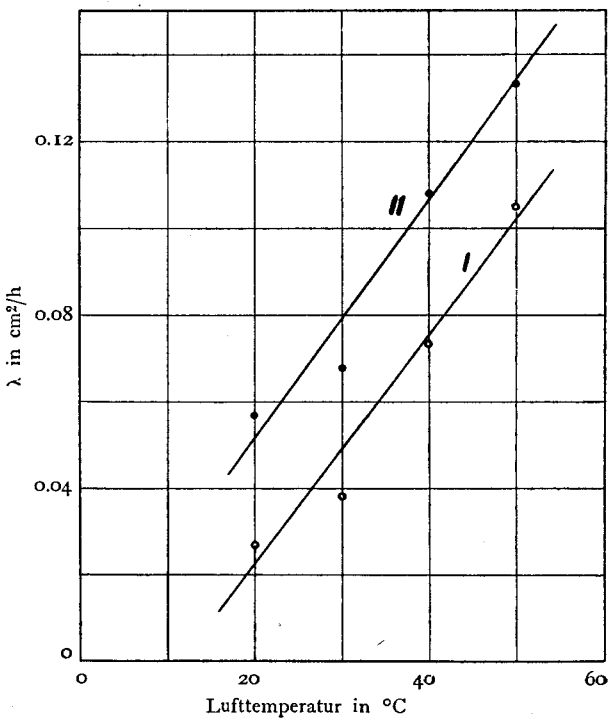
Tabelle 26.

Beziehung zwischen dem Diffusionskoeffizienten und der relativen Feuchtigkeit.
Probe: Papierstoff.
Lufttemperatur: 40°C.
Luftgeschwindigkeit: 1.01 m/sek.

Versuch	Feuchtigkeitsgrad %	λ I	λ II
6	20	0.1040	0.1425
1	40	0.0733	0.1080
7	60	0.0427	0.0750
8	80	0.0236	0.0517

Abb. 36.

Diffusionskoeffizient abhängig v. d. Lufttemperatur.
Kurve I : λ_I
" II : λ_{II}
Probe: Papierstoff.



1) E. L. Lederer: Loc cit.

Die Beziehungen zwischen dem Diffusionskoeffizienten des Papierstoffes und den Trocknungsbedingungen ergeben sich wie in Tabelle 25 bis 27. Abb. 26 und 37 gehören zu der Tabelle 25 und 26. Aus diesen Resultaten ist ersichtlich klar, dass der Koeffizient des Papierstoffes sich auch im entsprechenden Verhältnis mit der Erhöhung der Lufttemperatur, Luftgeschwindigkeit und weiter

Tabelle 27.

Beziehung zwischen dem Diffusionskoeffizienten und der Luftgeschwindigkeit.
Probe: Papierstoff.
Lufttemperatur: 40°C.
Feuchtigkeitsgrad: 40%.

Versuch	Luftgeschwindigkeit m/sek.	λ I	λ II
13	2.92	0.0822	0.1290
12	2.45	0.1110	0.1460
4	1.77	0.1190	0.1570
3	1.49	0.1020	0.1420
2	1.19	0.0930	0.1310
1	1.01	0.0733	0.1080
5	0.22	0.0696	0.1040

Abb. 37.
Diffusionskoeffizient von relativer Feuchtigkeit.
Kurve I : λ_I
„ II : λ_{II}
Probe: Papierstoff.

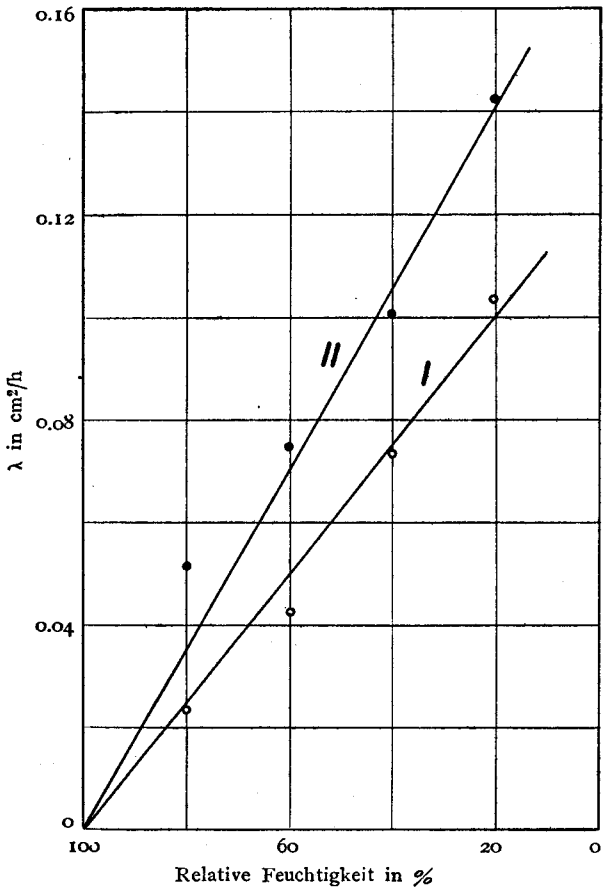


Tabelle 28.

Diffusionskoeffizienten für die zweite Periode verlangsamter Trocknungsgeschwindigkeit.
Versuche 1 des Holzes.
Probe: Zypressenholz.
Trocknungsbedingungen: 30°C, 20% und 1.42 m/sek.
Probenmasse: 7.95×9.63×3.0 cm, X=1.5 cm.

θ	θ/X^2	w %	v/v_0	$K_{theor.}$	λ	$K_{exp.}$
0	0	67.30	1.000	0		0
1	.4$\bar{4}$	62 05	.922	0.005	0.01125	.0061
2	.8$\bar{8}$	59.25	.881	.011	.01238	.0122
3	1.3$\bar{3}$	57.00	.847	.018	.0135	.0184
4	1.7$\bar{7}$	55.45	.823	.024	.0135	.0245
5	2.2$\bar{2}$	53.95	.802	.030	.0135	.0306
10	4.4$\bar{4}$	47.90	.711	.064	.0144	.0612
15	6.6$\bar{6}$	44.01	.654	.090	.0135	.0917
20	8.8$\bar{8}$	40.50	.602	.121	.0136	.1222
25	11.1$\bar{1}$	36.95	.549	.158	.01422	.1529
30	13.3$\bar{3}$	34.00	.506	.191	.01432	.1836
35	15.5$\bar{5}$	31.41	.467	.223	.01433	.2139
40	17.7$\bar{7}$	29.15	.433	.253	.01422	.2443
45	20.0	27.00	.401	.285	.01425	.2752
50	2.22$\bar{2}$	24.80	.369	.320	.01440	.3060
55	24.4$\bar{4}$	22.95	.341	.353	.01443	.3365
60	26.6$\bar{6}$	21.40	.318	.381	.01429	.3668
				Durchschnittswert		**0.01376**

Tabelle 29.

Diffusionskoeffizienten für die zweite Periode verlangsamter Trocknungsgeschwindigkeit.
Versuch 4 des Holzes.
Probe: Zypressenholz.
Trocknungsbedingungen: 30°C, 80% und 1.42 m/sek.
Probenmasse: 7.75×9.6×2.95 cm, X=1.475 cm.

θ	θ/X^2	w %	v/v_0	$K_{theor.}$	λ	$K_{exp.}$
0	0	101.20	1.00	0		0
1	.4$\bar{4}$	98.95	0.9770	0.0025	0.00563	0.00329
2	.8$\bar{8}$	96.80	.9560	.0040	.0045	.00657
3	1.3$\bar{3}$	94.95	.9375	.0062	.00465	.00985
4	1.7$\bar{7}$	93.05	.9189	.0090	.00507	.01313
5	2.2$\bar{2}$	91.26	.9020	.0112	.00505	.01642
10	4.4$\bar{4}$	83.20	.8220	.0275	.00619	.03285
15	6.6$\bar{6}$	76.40	.7550	.0475	.00513	.04925
20	8.8$\bar{8}$	71.00	.7016	.0700	.00788	.0657
25	11.1$\bar{1}$	66.30	.6550	.0930	.00887	.0821
30	13.3$\bar{3}$	62.10	.6135	.1165	.00875	.0985
35	15.5$\bar{5}$	58.35	.5761	.1412	.00908	.1150
40	17.7$\bar{7}$	55.05	.5438	.1640	.00923	.1313
45	20.00	52.23	.5160	.1862	.00931	.1478
50	22.2$\bar{2}$	49.90	.4930	.2050	.00923	.1642
55	24.4$\bar{4}$	47.73	.4712	.2240	.00917	.1807
60	26.6$\bar{6}$	45.60	.4500	.2380	.00893	.1970
				Durchschnittswert		**0.00739**

mit der Abnahme der relativen Feuchtigkeit vergrössert; bei 100% relativer Feuchtigkeit wird er gleich Null.

6. *Experimenteller Wert des Diffusionskoeffizienten bei Holz.*

Tabelle 28 und 29 sind die Darstellung des Koeffizienten λ des Holzes in der zweiten Periode der verlangsamten Trocknungsgeschwindigkeit; in Abb. 38 und 39 ist weiter sein theoretischer Wert dem experimentellen gegenübergestellt. Beide stimmen demnach ziemlich gut miteinander überein, und die Werte von λ in Abb. 38 und 39 sind 0.1376 bzw. 0.00739.

Die Beziehungen zwischen λ und den Trocknnngsbedingungen sind in Tabelle 30 bis 32 wiedergegeben und in den zugehörigen Abb. 40 bis 42 bildlich gezeigt. Der Koeffizient λ des Holzes wird

Abb. 38.

Theoretische und experimentelle Werte von K.
Versuch 1 des Holzes.
Zweite verlangsamte Periode.
λ=0.01376, X=1.50.
Kurve I : Ktheor.
" II : Kexp.

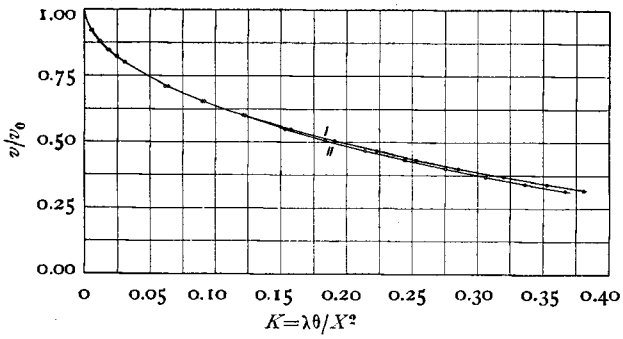


Abb. 39.

Theoretische und experimentelle Werte von K.
Versuch 4 des Holzes.
Zweite verlangsamte Periode.
λ=0.00379, X=1.475.
Kurve I : Ktheor.
" II : Kexp.

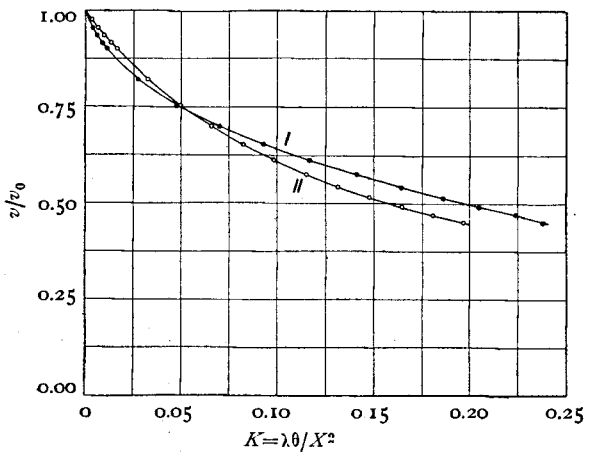


Tabelle 30.

Beziehung zwischen dem Diffusionskoeffizienten und der Lufttemperatur.
Probe: Zypressenholz.
Feuchtigkeitsgrad: 60%.
Luftgeschwindigkeit: 2.14 m/sek.

Versuch	Lufttemperatur °C	λ_m I
5	20	0.00697
3	30	0.00923
6	40	0.01196
7	50	0.0208

Tabelle 31.

Beziehung zwischen dem Diffusionskoeffizienten und der relativen Feuchtigkeit.
Probe: Zypressenholz.
Lufttemperatur: 30°C.
Luftgeschwindigkeit: 2.14 m/sek.

Versuch	Feuchtigkeitsgrad %	λ_m I
1	20	0.0138
2	40	0.0119
3	60	0.0092
4	80	0.0074

Abb. 40.

Diffusionskoeffizien tabhängig v. d. relativen Lufttemperatur.
Probe: Zypressenholz.

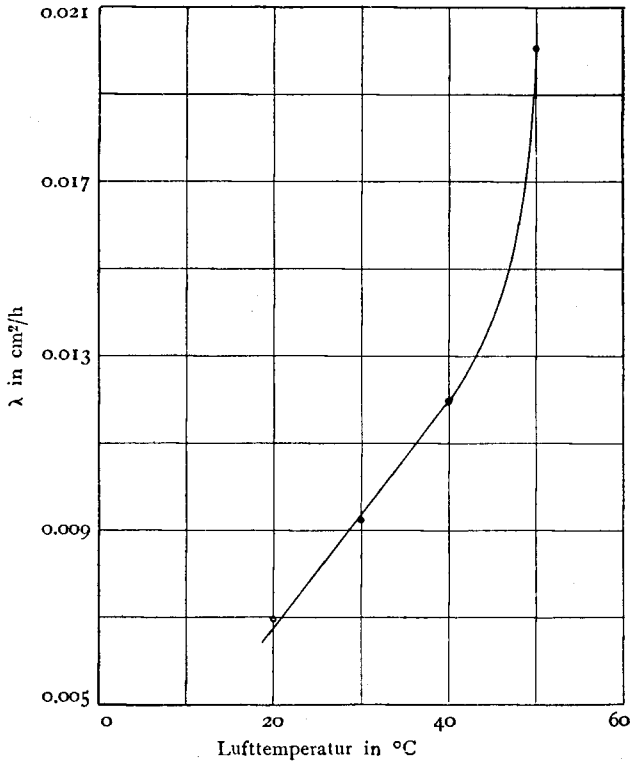


Abb. 41.

Diffusionskoeffizient abhängig von relativer Feuchtigkeit.
Probe: Zypressenholz.

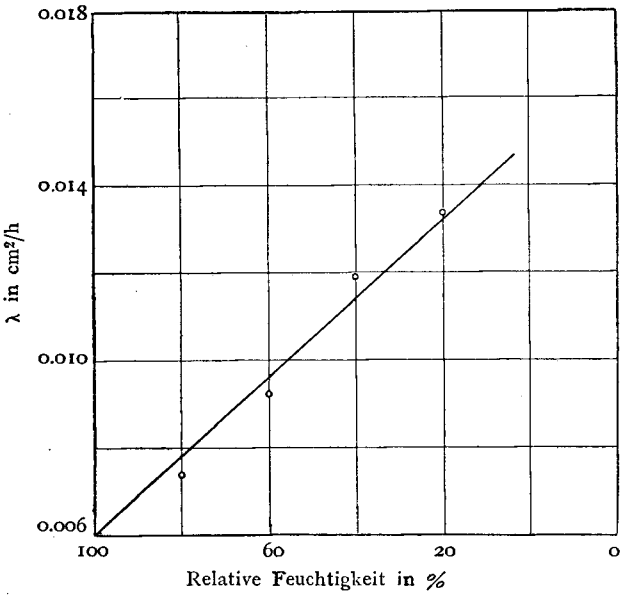


Abb. 42.

Diffusionskoeffizient abkängig v. d. Luftgeschwindigkeit.
Kurve I : λ_I
" II : λ_{II}
Probe: Zypressenholz.

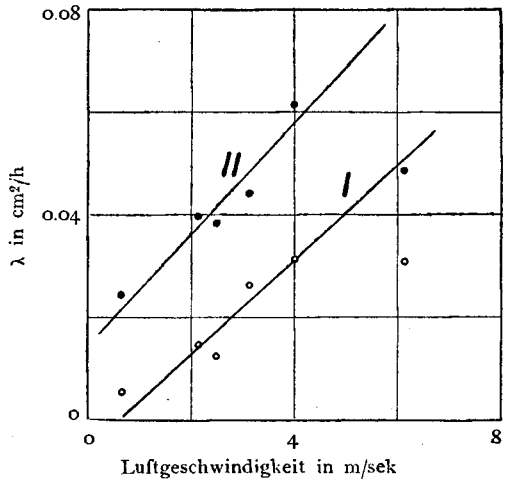


Tabelle 32.

Beziehung zwischen dem Diffusionskoeffizienten und der Luftgeschwindigkeit.
Probe: Kiefernholz.
Lufttemperatur: 40°C.
Feuchtigkeitsgrad: 40%.

Versuch	Luftgeschwindigkeit m/sek.	λ I	λ II
18	6.14	0.0207	0.0486
16	4.00	0.0301	0.0597
15	3.12	0.0261	0.0440
14	2.51	0.0122	0.0368
13	2.14	0.0148	0.0400
17	0.64	0.0059	0.0247

ebenfalls um so grösser, je höher die Lufttemperatur, oder je niedriger die relative Feuchtigkeit wird; er wird zu Null bei einer Feuchtigkeit von 100%.

Der Koeffizient ist nicht regelmässig von der Luftgeschwindigkeit abhängig, hat aber im grossen und ganzen die Neigung, entsprechend der Zunahme der Luftgeschwindigkeit zuzunehmen.

Obige Resultate kurz zusammengefasst ergibt sich, dass die Trocknungsbedingungen auf den Koeffizienten der Tonerde nach dem gleichen Gesetz wie bei der Seife, dem Papierstoff und Holz ein wirken.

Untersuchungen über den Wert des Koeffizienten λ des Holzes finden sich bisher nur wenig.

Tabelle 33.

Diffusionskoeffizienten für die zweite Periode verlangsamter Trocknungsgeschwindigkeit.
Versuch 94-*C* der Tonerde.
Probe: Minokaolin und Kawachifeldspat in gleichen Prozenten.
Trocknungsbedingungen: 30°C, 30% und 2.14 m/sek.
Probenmasse: 5×8×3 cm, $X=3$ cm.

θ	θ′	θ'/X^2	v	v/v_c	Kurve I $K_{theor.}$	Kurve I λ	Kurve I $K_{exp.}$	Kurve II $K_{theor.}$	Kurve II λ	Kurve II $K_{exp.}$
6	0	0	0.2121	1.00	0		0	0		0
7	1	$0.1\bar{1}$	.1925	.9075	0.0105	.0946	.0136	.038	.3420	.0208
8	2	$.2\bar{2}$	.1773	.836	.0240	.1082	.0272	.072	.3255	.0416
10	4	$.4\bar{4}$	.1555	.733	.0560	.1261	.0544	.123	.2839	.0830
12	6	$.6\bar{6}$	.1389	.654	.0930	.1395	.0817	.168	.2520	.1247
14	8	$.8\bar{8}$	.1256	.592	.1305	.1468	.1087	.2105	.2367	.1661
16	10	$1.1\bar{1}$	.1155	.544	.1635	.1472	.136	.244	.2198	.2078
21	15	$1.6\bar{6}$	.0966	.456	.2380	.1428	.204	.314	.1885	.3118
26	20	$2.2\bar{2}$	.0834	.3938	.2970	.1338	.272	.372	.1675	.4160
31	25	$2.7\bar{7}$	.0731	.3445	.3515	.1265	.340	.424	.1528	.5195
36	30	$3.3\bar{3}$	.0652	.3075	.3975	.1194	.408	.4725	.1420	.6230
41	35	$3.8\bar{8}$	.0581	.2738	.4420	.1138	.476	.524	.1352	.7275
46	40	$4.4\bar{4}$	.0518	.2442	.4865	.1095	.544	.580	.1306	.8300
53	47	$5\ 2\bar{2}$	.0452	.2132	.5390	.1033	.640	.647	.1231	.9770
				Durchschnittswert		**.12237**			**.18695**	

F. Tuttle[1] gab $\lambda=0.029$ für Tannenholz und T. K. Sherwood[2] $\lambda=0.0338$ für Pappelholz an.

7. *Beziehung zwischen der Probendicke und der Trocknungsgeschwindigkeit.*

Von dem experimentellen Ergebnisse für die Beziehung zwischen Probendicke und Trocknungsgeschwindigkeit bei den verschiedenen Materialen hat der Verfasser hier schon einigemal gesprochen. Es sollen nun diese experimentell gefundenen Ergebnisse mit den theoretisch aus der Gleichung berechneten in Vergleich gesetzt werden.

Jedoch ist der Einfluss der Probendicke auf die Trocknungsgeschwindigkeit, wie schon erwähnt, in der Periode der konstanten Trocknungsgeschwindigkeit sowie in der ersten Periode der verlangsamten gering genug, um ihn vernachlässigen zu dürfen, so dass hier nur die Beeinflussung in der zweiten Periode der Verlangsamung hauptsächlich in Betracht kommt.

I. Tonerde.

Tabelle 33 bis 35 zeigen die Versuchserge bnisse für die Probendicke von 2.0, 1.0 und 0.5 cm. Aus den oberen drei Tabellen und Tabelle 14 der vorigen Mitteilung wurde Tabelle 36 gebildet, um einige experimentelle Werte den theoretischen gegenüberzustellen.

Tabelle 34.

Diffusionskoeffizienten für die zweite Periode verlangsamter Trocknungsgeschwindigkeit.
Versuch 94–*D* der Tonerde.
Probe: Minokaolin und Kawachifeldspat in gleichen Prozenten.
Trocknungsbedingungen: 30°C, 30% und 2.14 m/sek.
Probenmasse: 5×8×1 cm, $X=1.0$ cm.

θ	θ'	θ'/X^2	v	v/v_c	Kurve I			Kurve II		
					$K_{theor.}$	λ	$K_{exp.}$	$K_{theor.}$	λ	$K_{exp.}$
3	0	0	.172	1.00	0		0	0		
4	1	1	.1325	.770	.0425	.0425	.0572	.104	.1040	.0785
5	2	2	.1060	.616	.115	.0575	.1142	.193	.0965	.1570
6	3	3	.0875	.509	.192	.0640	.1713	.270	.0900	.2355
7	4	4	.0750	.436	.255	.06375	.2285	.332	.0830	.3140
8	5	5	.0662	.385	.306	.06120	.2855	.3825	.0765	.3925
9	6	6	.0585	.340	.357	.05950	.3427	.434	.0273	.471
10	7	7	.0527	.3065	.400	.05714	.4000	.478	.0683	.550
11	8	8	.0442	.2570	.466	.05825	.4572	.551	.0690	.628
12	9	9	.0410	.2383	.497	.05520	.5140	.581	.0640	.707
13	10	10	.0380	.2208	.526	.05260	.5716	.610	.0610	.785
					Durchschnittswert	**.05716**			**.07850**	

Tabelle 35.

Diffusionskoeffizienten für die zweite Periode verlangsamter Trocknungsgeschwindigkeit.
Versuch 94–*E*.
Probe: Minokaolin und Kawachifeldspat in gleichen Prozenten.
Trocknungsbedingungen: 30°C, 30% und 2.14 m/sek.
Probenmasse: 5×8×0.5 cm, $X=0.5$ cm.

θ	θ'	θ'/X^2	v	v/v_c	Kurve I			Kurve II		
					$K_{theor.}$	λ	$K_{exp.}$	$K_{theor.}$	λ	$K_{exp.}$
2	0	0	.1385	1.00	0		0	0		0
3	1	4	.0830	.599	.126	.03150	.1282	.204	.05100	.1428
4	2	8	.0535	.386	.305	.03813	.2563	.381	.04763	.2855
5	3	12	.0375	.2705	.447	.03727	.3847	.523	.0437	.4280
6	4	16	.0270	.1947	.575	.03595	.5130	.667	.0417	.5210
7	5	20	.0210	.1515	.689	.03445	.6410	.758	.0379	.7140
8	6	24	.0170	.1225	.775	.03230	.7690	.840	.0351	.8570
9	7	28	.0145	.1045	.840	.03000	.8980	.905	.0323	1.000
10	8	32	.0120	.0863	.920	.02875	1.026	.985	.0308	1.141
11	9	36	.0105	.0757	.970	.02692	1.153	1.025	.0285	1.285
12	10	40	.0095	.0683	1.006	.02515	1.282	1.090	.0273	1.428
13	11	44	.0082	.0612				1.145	.0260	1.521
14	12	48	.0075	.0538				1.250	.0260	1.713
					Durchschnittswert	**.0319**			**.0357**	

1) F. Tuttle: Loc. cit. 2) T. K. Sherwood: Loc. cit.

Tabelle 36.

Vergleich der experimentellen Trocknungsgeschwindigkeit für die verschiedene Probendicke mit der theoretischen.
Probe: Minokaolin und Kawachifeldspat in gleichen Prozenten.

Versuchsnummer	94-*A*	94-*C*	94-*D*	94-*E*
Probendicke in cm	6	3	1	0.5
Freier Wassergehalt in %	8.05	7.70	4.275	1.06
θ'	30	10	5	5
v_c	0.2389	.2121	.1720	.1385
v/v_c	.504	.5440	.3850	.1515
K_{I}	.1861	.1635	.3060	.6800
λ_{I}	.2228	.12237	.0572	.03193
K_{II}	.3495	.2440	.3825	.7580
λ_{II}	.4183	.1870	.0785	.0357
$(dW/Ad\theta)_{\mathrm{exp.}}$	.0100	.0145	.0088	.0030
$(dW/Ad\theta)_{\mathrm{theor.\,I}}$	.0115	.0125	.00925	.0032
$(dW/Ad\theta)_{\mathrm{theor.\,II}}$	.0170	.0176	.0128	.0037

Tabelle 37.

Diffusionskoeffizienten für die zweite Periode verlangsamter Trocknungsgeschwindigkeit.
Versuch 4-*B* der Seife.
Probe: Velvetseife.
Trocknungsbedingungen: 50°C. 20% nnd 2.14 m/sek.
Probenmasse: 5×8×2 cm, X= 1 cm.

θ	θ/X^2	w%	v g/cm³	v/v_c	$K_{\mathrm{theor.}}$	λ	$K_{\mathrm{exp.}}$
0	0	56.80	0.3420	1.00	0		0
1	1	45.12	.2878	.7940	.0328	.03280	.01801
5	5	30.10	.1919	.5300	.1732	.03464	.09005
10	10	23.28	.1482	.4100	.2768	.02768	.1801
15	15	19.51	.1243	.3435	.352	.02345	.2701
20	20	16.90	.1078	.2980	.408	.02040	.3602
25	25	14.84	.0946	.2615	.459	.01834	.4503
30	30	13.22	.0844	.2330	.502	.01673	.5403
35	35	11.87	.0756	.2093	.542	.01549	.6304
40	40	10.78	.0686	.1900	.585	.01463	.7204
45	45	9.87	.0629	.1740	.620	.01378	.8105
50	50	9.11	.0580	.1603	.653	.01306	.9005
55	55	8.48	.0540	.1494	.683	.01241	.9906
60	60	7.93	.0505	.1396	.712	.01187	1.080
65	65	7.44	.0474	.1310	.739	.01136	1.171
70	70	6.95	.0442	.1223	.768	.01097	1.261
75	75	5.56	.0418	.1153	.791	.01055	1.351
				Durchschnittswert		**.01801**	

Zum Beispiel kann man $\left(\frac{dW}{Ad\theta}\right)_{\mathrm{theor.\,I.}}$ und $\left(\frac{dW}{Ad\theta}\right)_{\mathrm{theor.\,II.}}$ für die Probe A auf folgende Weise ausrechnen: Man setzt die Werte der verschiedenen Konstanten von A_{I} in Tabelle 36 in die Formel (34a), so ergibt sich

$$\left(\frac{dW}{Ad\theta}\right)_{\mathrm{I}}=\frac{2(0.2389)(0.2228)}{6}\left\{e^{-\left(\frac{\pi}{2}\right)^2(0.1861)}+e^{-9\left(\frac{\pi}{2}\right)^2(0.1861)}+e^{-25\left(\frac{\pi}{2}\right)^2(0.1861)}\right\}$$
$$=(0.01776)(0.6313+0.0159+0.00001)$$
$$=0.0115$$

Hierauf erhielt man aus A_{II} in Tabelle 36 und der Formel (35a);

$$\left(\frac{dW}{Ad\theta}\right)_{\mathrm{II}}=\left(\frac{24}{\pi^2}\right)\frac{(0.2389)(0.4183)}{6}\left\{e^{-\left(\frac{\pi}{2}\right)^2(0.3495)}+\frac{1}{9}e^{-9\left(\frac{\pi}{2}\right)^2(0.3495)}+\frac{1}{25}e^{-25\left(\frac{\pi}{2}\right)^2(0.3495)}+\cdots\right\}$$
$$=(0.0405)(0.4211+0.00004)$$
$$=0.0170$$

Die beiden gefundenen theoretischen Werte von $\left(\frac{dW}{Ad\theta}\right)$ stimmen annähernd mit den experimentellen Trocknungsgeschwindigkeiten überein.

II. Seife.

Bei der Seife steht, wie schon in voriger Mitteilung[1] gezeigt wurde, die Trocknungsgeschwindigkeit fast im umgekehrten Verhältnis zur Probendicke.

Tabelle 38.

Diffusionskoeffizienten für die zweite Periode verlangsamter Trocknungsgeschwindigkeit.
Versuch 4-*C* der Seife.
Probe: Velvetseife.
Trocknungsbedingungen: 50°C, 20% und 2.12 m/sek.
Probenmasse: 5×8×1 cm, X=0.5 cm.

θ Tag	θ/X^2	w%	v g/cm³	v/v_0	$K_{\mathrm{theor.}}$	λ	$K_{\mathrm{exp.}}$
0	0	55.00	.3743	1.00	0		0
1	4	33.66	.2295	.612	0.118	.02948	.0328
5	20	18.69	.1272	.340	.357	.01785	.1638
10	40	13.25	.0903	.241	.492	.01230	.328
15	60	10.39	.0708	.189	.586	.00977	.492
20	80	8.81	.0600	.1602	.653	.00816	.656
25	100	7.60	.0518	.1382	.715	.00715	.819
30	120	6.68	.0455	.1215	.770	.00642	.983
35	140	5.95	.0405	.1081	.817	.00583	1.148
40	160	1.40	.0368	.0982	.860	.00537	1.311
45	180	4.99	.0340	.0908	.894	.00497	1.475
50	200	4.63	.0315	.0841	.925	.00463	1.638
55	220	4.30	.0293	.0781	.952	.00433	1.802
60	240	4.11	.0280	.0747	.971	.00404	1.967
65	260	3.93	.0268	.0714	.789	.00381	2.130
70	280	3.74	.0255	.0681	1.005	.00359	2.295
75	300	3.56	.0243	.0647	1.025	.00342	2.458
				Durchschnittswert		**0.00819**	

1) Saburo Kamei: Loc. cit

Tabelle 39.

Diffusionskoeffizienten für die zweite Periode verlangsamter Trocknungsgeschwindigkeit.
Versuch 4–*D* der Seife.
Probe: Velvetseife.
Trocknungsbedingungen: 50°C, 20% und 2.14m/sek.
Probenmasse: 5×8×0.5 cm, X=0.25 cm.

θ,Tag	θ/X^2	w%	v g/cm³	v/v_0	$K_{theor.}$	λ	$K_{exp.}$
0	0	58.50	0.392	1.00	0	.02037	0
1	16	21.40	.144	.366	.326	.01390	.1304
2	32	15.89	.107	.272	.445	.00808	.2615
5	80	9.54	.066	.1632	.646	.00521	.6525
10	160	6.12	.042	.1045	.833	.00395	1.304
15	240	4.63	.032	.0791	.948	.00320	1.957
20	320	3.81	.026	.0650	1.022	.00320	2.607
			Durchschnittswert			**0.00816**	

Tabelle 40.

Vergleich der experimentellen Trocknungsgeschwindigkeit für verschiedene Probendicke mit der theoretischen.
Probe: Velvetseife.

Versuchsnummer	4–*A*	4–*B*	4–*C*	4–*D*
Probendicke 2X in cm	3.0	2.0	1.0	0.5
Freier Wassergehalt in %	28.17	23.28	18.69	15.89
θ	15	10	5	2
v_0	0.3580	.3420	.3743	.3920
v/v_0	.4950	.4100	.3400	.2720
K	.2008	.2768	.3570	.4450
λ	.0227	.01801	.00819	.00816
$(dW/Ad\theta)_{exp.}$	.60688	.00638	.00613	.00925
$(dW/Ad\theta)_{theor.}$	.00673	.00625	.00509	.00854

Man berechnet die Werte λ aus den Tabellen der früheren Mitteilung und setzt sie in die Tabelle 20 und auch in die folgenden drei Tabellen 37 bis 39 für die Probendicke von 3.0, 2.0, 1.0 bzw. 0.5cm ein. Aus den vier Tabellen wurde Tabelle 40 gebildet, um einige experimentelle Werte den theoretischen gegenüberzustellen. Die Trocknungsgeschwindigkeiten bei Theorie $\left(\frac{dW}{Ad\theta}\right)_{theor.}$ und Versuch $\left(\frac{dW}{Ad\theta}\right)_{exp.}$ stimmen beinahe miteinander überein. Anfangs ist der experimentelle Wert etwas grösser als der theoretische, dann wird die Differenz zwischen beiden Werten allmählich kleiner, gemäss der Zeitdauer und am Ende zeigen beide das entgegengesetzte Verhalten. Bei oberen Versuchen findet die Wasserverdampfung nur an zwei Oberflächen der vorderen und hinteren statt, während die übrigen vier Seiten stets wasserdicht gehalten werden. Bei Abb. 43 der Versuche 16-A, B und C mit der Probendicke 6, 3 bzw. 2 cm, findet die Verdampfung, ohne wasserdichte Bedeckung, überall an allen Oberflächen

Abb. 43.

Versuch 16 der Seife.

Kurve	Versuch	Probendicke
I	16–*C*	2 cm
II	16–*B*	3
III	10–*A*	6

Probe: Velvetseife ohne geschützte Seite.
Trocknungsbedingungen: 40°C, 30%, 2.14m/sek.

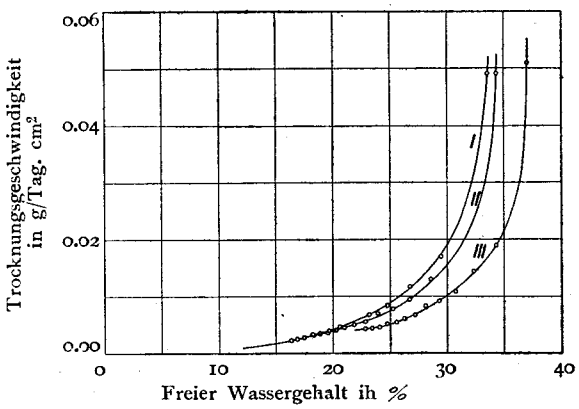
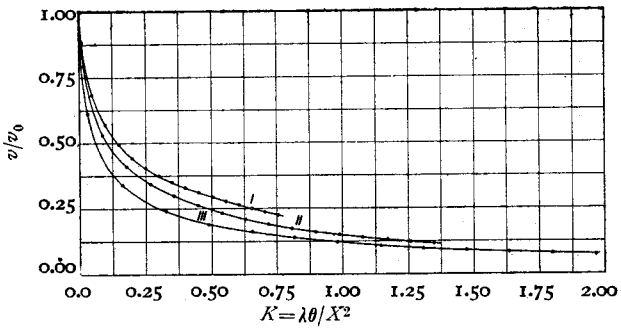


Abb. 44.

Schaubild λ abhängig v. d. Probendicke.
Versuch 4 der Seife.

Kurve	Versuch	Probendicke
I	4–*A*	3 cm
II	4–*B*	2
III	4–*C*	1

Probe: Velvetseife mit wasserdicht bedeckten Vierseiten.
Trocknungsbedingungen: 50°C, 20%, 2.14m/sek.



statt. Doch verhält sich die Trocknungsgeschwindigkeit noch beinahe umgekehrt proportional der Probendicke.

Abb. 44 drückt die Beziehungen von v/v_0 zu K in dem Versuche 4-A bis 4-C der Seife aus. Nimmt man nun einen bestimmten Wart von v/v_0 z.B. 0.40, so sind die Schnittpunkte mit A, B und C d.h. die Werte von K gleich 0.255, 0.193 bzw. 0.112.

Daher ergibt sich folgende Kettenrechnung

$$\frac{\lambda_A\theta_A}{X_A^2} : \frac{\lambda_B\theta_B}{X_B^2} : \frac{\lambda_C\theta_C}{X_C^2} = 0.255 : 0.193 : 0.112,$$

ferner λ_A=0.0227, λ_B=0.0188, λ_C=0.0082. Folglich wird obere Rechnung wie folgt

$$\theta_A : \theta_B : \theta_C = 1.12X_A^2 : 1.07X_B^2 : 1.37X_C^2$$
$$= X_A^2 : 0.96X_B^2 : 1.22X_C^2$$
$$\doteqdot X_A^2 : X_B^2 : X_C^2$$

Also ist die Zeitdauer in der zweiten Periode verlangsamter Trocknungsgeschwindigkeit, die nötig ist, um den Wassergehalt einer Probe von verschiedener Dicke vom anfänglichen Wert v_0 bis zu einem bestimmten Wert v zu vermindern, ungefähr proportional dem Quadrat der Probendicke. Doch ist die Zeitdauer in der konstanten Periode, worin die Trocknungsgeschwindigkeit von der Probendicke unabhängig ist, selbstverständlich nur der einfachen Probendicke proportional.

8. *Beziehung zwischen dem Diffusionskoeffizienten und der Probendicke sowie dem Wassergehalt.*

Der Diffusionskoeffizient in der zweiten Periode verlangsamter Trocknungsgeschwindigkeit ist, wie schon mehrmals gesagt und auch zeichnerisch dargestellt wurde, gar nicht konstant, sondern abhängig von Probengrösse, Zusammensetzung, Wassergehalt und ausserdem von den Trocknungsbedingungen. Bei der Trocknung z.B. von Holz und Tonerde wird der Wert grösser, gemäss der Erhöhung der Lufttemperatur, der Verminderung der relativen Feuchtigkeit oder Vermehrung der Luftgeschwindigkeit.

Abb. 45 zeigt die Beziehung von Wassergehalt und Probendicke zum Werte λ in dem Versuche I bis 4 der Seife. Die Kurven I bis IV stellen den Wert λ für verschiedene Stärken und die punktierte Kurve V den Durchschnittswert dieser vier Kurven dar.

Hierbei beobachtet man, dass der Wert λ in einer bestimmten Probe dem freien Wassergehalt proportional ist, und dass er in verschiedenen Proben ungefähr der Dicke proportional ist. Nimmt man nun den freien Wassergehalt als $w\%$ an, so wird die Gieichung dieser Linien wie folgt,

$$\lambda = mv + a \qquad \text{(a)},$$

worin m und a die Konstante bedeuten. Die Werte weiter für fünf Linien sind:

I. $\lambda = 0.001w + 0.00535$
II. $\lambda = 0.001w + 0.004$
III. $\lambda = 0.001w$ (b)
IV. $\lambda = 0.001w - 0.00135$
V. $\lambda = 0.001w + 0.0022$

Bei einem bestimmten Wassergehalt erhält man eine gerade Linie zwischen λ und der Probendicke X, z.B. für $w = 10\%$,

$$\lambda_{w=10} = 0.0067(X+1) \qquad \text{(c)}$$

Um daher die Beziehung zwischen λ und w bei jeder Probendicke zu erfassen, ermittelt man erstens den Wert von $\lambda_{w=10}$ aus Formel (c) und setzt diesen dann in die Formel (a) ein.

Abb. 46 stellt die Beziehung zwischen dem freien Wassergehalt und dem Koeffizienten λ bei verschiedener Probendicke der Tonerde dar. Während der anfänglichen Zeitdauer verhält sich der Koeffizient umgekehrt zur Verminderung des freien Wassergehaltes, aber nachdem der Maximalwert erreicht ist, nimmt er proportional der Verminderung des Wassergehaltes ab. Diese Erscheinung lässt sich vielleicht durch einen Vergleich der Temperaturkurven von Seife und Tonerde bestätigen. Während die Temperatur der Probe bei der Seife von Anfang der Trocknung an fast der Trockenkugeltemperatur gleich ist, zeigt sie bei der Tonerde am Anfang fast die Feuchtkugeltemperatur, steigt dann allmählich, doch erst nach Ablauf der konstanten Trocknungsperiode, und erreicht schliesslich am Ende die Trockenkugeltemperatur.

Andererseits verkleinert sich der Diffusions-

Abb. 45.

Diffusionskoeffizient λ abhängig von Probendicke und Wassergehalt.
Probe: Velvetseife.

Kurve	Probendicke, $2X$
I	3 cm
II	2
III	1
IV	0.5
V	Durchschnittswert

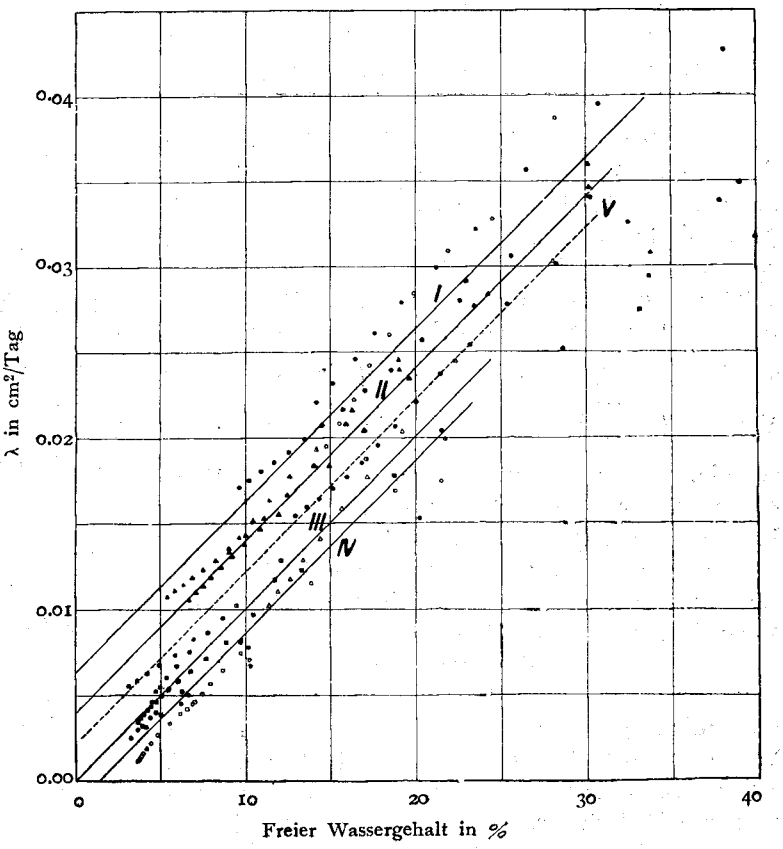
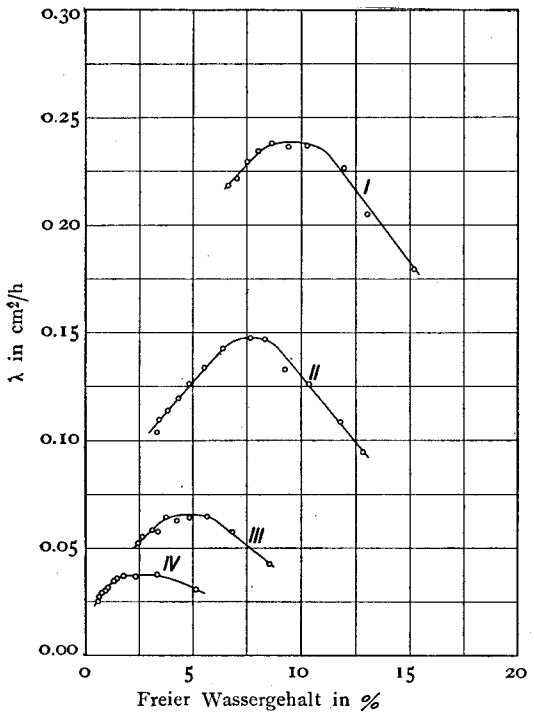


Abb. 46.

Diffusionskoeffizient λ abhängig von Probendicke und Wassergehalt.
Probe: Minokaolin: Kawachifeldspat = 5 : 5.

Kurve	Probendicke, X
I	6 cm
II	3
III	1
IV	0.5



koeffizient gemäss der Verminderung des freien Wassergehaltes und vergrössert sich gemäss der Erhöhung der Lufttemperatur, wie es seinen Eigenschaften nach selbstverständlich ist und auch durch den vorhergehenden Versuch bestätigt wird. Will man ausführlicher sein, so ist zu sagen, bei dem Versuche mit Tonerde vermehrt sich der Koeffizient λ am Anfang der Trocknung aus dem Grund, weil die Temperaturerhöhung der Probe nach Überschreiten des Grenzwassergehaltes stärker auf λ einwirkt als die Abnahme des Wassergehaltes dabei. Die Verminderung von λ gründet sich darauf, dass der Temperaturanstieg der Probe beinahe aufhört und er weniger als die Wassergehaltsabnahme einwirkt.

Die Durchnittswerte von λ bei verschiedener Dicke der Tonerde sind wie folgt

Probendicke in cm	6	3	1	0.5
λ_m.	0.2228	0.1224	0.0572	0.0324

Die Beziehung von X und λ kann ungefähr mit einer geraden Gleichung ausgedrückt werden

$$\lambda = 0.0336\,X + 0.0122.$$

9. *Annähernder Wert des Diffusionskoeffizienten λ.*

Der Verfasser hat, wie schon erwähnt, den Wert des Diffusionskoeffizienten λ nicht aus der Berechnung der komplizierten exponentialen Funktion gewonnen, sondern einfach dem Schaubild von λ entnommen. Setzt man nun die Werte des Koeffizienten beim Trocknungsversuehe 94-A der Tonerde, $\lambda = 0.2228$, in Formel (22) ein:

$$\frac{v}{v_0} = \left(\frac{8}{\pi^2}\right)\left\{e^{-\left(\frac{\pi}{2}\right)^2\frac{\lambda\theta}{X^2}} + \frac{1}{9}e^{-9\left(\frac{\pi}{2}\right)^2\frac{\lambda\theta}{X^2}} + \frac{1}{25}e^{-25\left(\frac{\pi}{2}\right)^2\frac{\lambda\theta}{X^2}} + \cdots\right\},$$

so entsteht die folgende unendliche Reihe für $\theta = 10$:

$$\frac{v}{v_0} = \left(\frac{8}{\pi^2}\right)\left\{0.8581 + 0.0281 + 0.00088 + \cdots\cdots\right\}$$

In dieser exponentialen Funktion sind alle Glieder vom zweiten ab sehr viel kleiner als das erste und je kleiner λ wird, desto mehr vermindern sie sich, so dass man sie schliesslich vernachlässigen kann. z.B. für $\lambda = 0.018$ beim Versuche 4-B der Seife wird v/v_0 folgendermassen

$$\frac{v}{v_0} = \left(\frac{8}{\pi^2}\right)(0.6415 + 0.002 + 0.000\,000\,1 + \cdots\cdots)$$

Daher wird die Formel 22, unter Vernachlässigung der Glieder vom zweiten ab

$$\frac{v}{v_0} = \left(\frac{8}{\pi^2}\right)e^{-\left(\frac{\pi}{2}\right)^2\frac{\lambda\theta}{X^2}}$$

Dies wird logarithmisch wie folgt dargestellt:

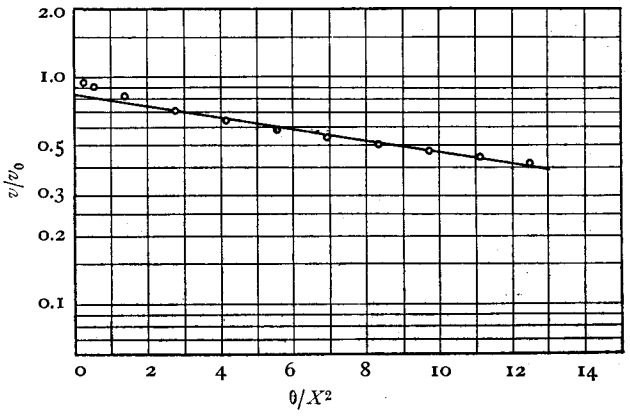
$$\log\frac{v}{v_0} = \log\left(\frac{8}{\pi^2}\right) - \frac{1}{2\cdot 3}\left(\frac{\pi}{2}\right)^2\frac{\lambda\theta}{X^2}.$$

Abb. 47 zeigt die Beziehung zwischen Log $\frac{v}{v_0}$ und θ/X^2 auf Grund der oberen Versuchsresultate im halblogarithmischen Masstab.

Dies Ergebnis ist, streng gesagt, nicht geradlinig, weil die Glieder vom zweiten ab fortgelassen sind, und dazu noch der Diffusionskoeffizient eigentlich nicht konstant ist, sondern sich,

Abb. 47.

Annähernder Wert von λ.
λ exp. = 0.2228.
θ = 10.



abhängig von dem vorhandenen Wassergehalt, verändert. Die Neigung bei dem übrigen fast geradlinigen Teil der Kurve verhält sich jedoch wie folgt

$$\tan\alpha=\frac{2\cdot1\times0\cdot144}{12\cdot7\times0\cdot10}=\frac{1}{2\cdot3}\left(\frac{\pi}{2}\right)^2\lambda,$$

so erhält man $\lambda=0.2220$.

Folglich stimmt der graphisch aus dem Schaubild von λ gewonnene Wert $\lambda=0.2228$ fast mit dem oberen bei den halblogarithmischen Kurven erhaltenen Wert überein. Dieser Übereinstimmung nach ist das Schaubild von λ für unsere Zwecke gut brauchbar.

10. *Verwendungsmöglichkeit von Schaubild λ.*

Es werden hier einige Beispiele angeführt, um zu erläutern, wie die graphische Methode zur Lösung praktischer Probleme bequem anwendbar ist.

1) Ein Stück Zypressenholz ($7.95\times9.63\times30$ cm) mit einem anfänglichen Wassergehalt von 67.30% wird unter den Trocknungsbedingungen von 30°C, 20% und 1.42 m/sek. getrocknet. Wieviel beträgt der Wassergehalt nach 10 Stunden und wie gross ist die Verdampfungswassermenge während dieser Zeitdauer?

Nach dem Versuche ist $\lambda=0.01376$, ferner ist die Probendicke hier $X=1.5$ cm, so wird

$$\lambda\frac{\theta}{X^2}=0.01376\,\frac{10}{1\cdot5^2}=0.0612.$$

Weiter ist $\frac{v}{v_0}=0\,72$ nach der Kurve I in dem Schaubild 21. Der erfragte Wassergehalt ist somit:

$$w_{10}=0.72\times67.30=48.40\%$$

oder $$v_{10}=0.72\times0.293=0.211\ \mathrm{g/cm^3}.$$

Die verdampfte Wassermenge W während 10 Stunden beträgt

$$\begin{aligned}W&=W_0-W_{10}=A(v_0-v_{10})\\&=2\times7\cdot95\times9\cdot63\times1\cdot5(0.293-0.211)\\&=18\cdot80\ \mathrm{g},\end{aligned}$$

worin W_0 und W_{10} den gesamten Wassergehalt in der Zeit $\theta=0$ bzw. $\theta=10$ bedeuten. Die experimentellen Werte von w_{10} und W sind 47.90% bzw. 16.30 g, und zwar sind beide etwas kleiner als die theoretischen Werte.

2) Nach wieviel Stunden erreicht der Wassergehalt von derselben Probe wie 1) 25%? Da $v/v_0=25/67.3$, so erhält man aus dem Schaubild von λ, $\frac{\lambda\theta}{X^2}=0.316$, folglich $\theta=\frac{0\cdot316\times1\cdot5^2}{0.01376}=51\cdot6$ Stunden. Der experimentelle Wert $\theta=50$.

3) Velvetseife von 3 cm Probendicke und mit einem anfänglichen Wassergehalt von 44% wird unter den Trocknungsbedingungen von 50°C, 20% und 2.14 m/sek getrocknet. Wie hoch ist der Wassergehalt nach 10 Tagen? Aus der Tabelle 21 erhält man

$$\lambda=0.02353\quad\therefore\quad\frac{\lambda\theta}{X^2}=0.02363\,\frac{10}{1\cdot5^2}=0.145.$$

Folglich ist $v/v_0=0.577$ aus Schaubild λ und

$w=0.577\times44=25.40\%$, exp. $w=25.54\%$.

4) Nach wieviel Tagen beträgt der Wassergehalt derselben Probe 15%? Da $\frac{v}{v_0}=\frac{15}{44}=0.351$, und nach dem Schaubild $\frac{\lambda\theta}{X^2}=0.345$, ist folglich $\theta=\frac{0.345\times1.5^2}{0.02353}=33$, exp. $\theta=35$ bei $w=15.63\%$.

Zur Berechnung obiger Beispiele wurde der Durchschnittswert von λ gebraucht. Die aus dem Durchschnittswert von λ ausgezogenen Berechnungsresultate stimmen aber manchmal nicht mit den experimentellen, besonders am Anfang sowie auch am Ende des Versuches überein. Für die Auswahl des zur Berechnung brauchbaren Wertes von λ ist daher eine genügende Berücksichtigung dieses Umstandes erforderlich. Mit der Diffusionsformel kann man die verschiedenen Beziehungen z.B. Wasserverteilung, Verdampfungswassermenge, Trocknungsdauer u.s.w. in jeder Trocknungsperiode feststellen.

Aber in der Periode der konstanten Trocknungsgeschwindigkeit und auch in der ersten Periode der verlangsamten Trocknungsgeschwindigkeit, worin die Verdampfung hauptsächlich an den Oberflächen stattfindet, kann man die Trocknungsbeziehungen aus den Formeln der Oberflächenverdampfung 1 bis 5 in der vorigen Mitteilung[1] weit einfacher als aus den komplizierten Diffusionsformeln ermitteln. Überdies stimmt in der Periode konstanter Trocknungsgeschwindigkeit die aus der Formel berechnete Verteilungskurve nicht gut mit der Versuchskurve überein. In der zweiten Periode verlangsamter Trocknungsgeschwindigkeit dagegen, worin die Innendiffusion die Hauptrolle bei der Trocknung spielt, ist die Formel der Oberflächenverdampfung nicht anwendbar. Deshalb ist die Diffusionsformel in dieser Periode notwendig und unentbehrlich.

Zusammenfassung.

1. Nach dem Gröberschen Schaubild bei der Wärmeleitung hat der Verfasser das analoge Bild des Diffusionskoeffizienten in jeder Periode von dem Trocknungsvorgang fester Stoffe angefertigt und daraus die Werte λ graphisch bestimmt.

1) Saburo Kamei: Loc. cit.

2. Die Werte des Diffusionskoeffizienten λ in der konstanten Periode und in der ersten Periode der Verlangsamung bei Tonerde wurden aus der Übereinstimmung zwischen den theoretischen und experimentellen Werten von $\frac{\lambda\theta}{X^2}$ bestimmt. Die theoretische Wasserverteilungskurve weicht in der konstanten Periode ein wenig von der experimentellen ab, stimmt aber in der ersten Periode der Verlangsamung sehr gut mit dieser überein.

3. Die Werte von λ für Tonerde, Seife, Papierstoff und Holz in der zweiten Periode verlangsamter Trocknungsgeschwindigkeit wurden aus dem Schaubilde von λ gewonnen.

Der Wasserverteilungszustand am Anfang der zweiten Periode der verlangsamten Trocknungsgeschwindigkeit nach vorhergehender erster Periode verlangsamter Trocknung wurde experimentell als parabelförmige Kurve geprüft, aber nicht bei gleichmässiger Wasserverteilung.

Im Fall jedoch von Seife und Zypressenholz, worin die erste Periode sehr kurz oder gar nicht auftritt, muss natürlich ein gleichmässigerer Wasserverteilungszustand als bei der Anfangsbedingung vorhanden sein. Die nach diesem Wert von λ gezeichnete theoretische Wasserverteilungskurve zeigt gute Übereinstimmung mit der experimentellen.

4. Der Diffusionskoeffizient λ in der zweiten Periode vermehrt sich im gleichen Verhältnis wie die Erhöhung der Lufttemperatur, die Vergrösserung der Luftgeschwindigkeit oder die Verminderung der relativen Feuchtigkeit.

5. Der Wert λ, der aus der Kurvenneigung auf dem halblogarithmischen Millimeterpapier berechnet wird, ist fast gleich dem des Schaubildes λ.

6. Das Schaubild ist sehr bequem dazu, den Wassergehalt in einer willkürlich gesetzten Zeit sowie die Zeitdauer bis zur Erreichung eines bestimmten Wassergehaltes im Trocknungsvorgang in der zweiten Periode graphisch zu berechnen.

7. Dass die Trocknungsgeschwindigkeit in der zweiten Periode verlangsamter Trocknungsgeschwindigkeit umgekehrt proportional der Probendicke ist, wurde mittels der Diffusionsformel nachgeprüft.

8. Die zur Trocknung fester Stoffe benötigte Zeitdauer in der zweiten Periode ist ungefähr dem Quadrat der Probendicke proportional.

9. Je dicker die Probe und je kleiner der Wassergehalt in ihr, umso niedriger wird der Diffusionskoeffizient λ.

IV. Die Beziehung zwischen Trocknungsgeschwindigkeit und Probenform.

1. *Gleichung für die Wasserverteilung und den Durchschnittswassergehalt.*

E. D. Williamson und L. H. Adams[1] sowie H. Gröber[2] haben theoretisch eine Formel für die nichtstationäre Wärmeleitung in Körpern von verschiedener Form gefunden. Diese Formel suchte A. B. Newman[3] weiter auf die Trocknung anzuwenden auf Grund seiner Überlegung, dass sie, wenn jedes ihrer Glieder in entsprechender Bedeutung verstanden wird auch selbständig gebraucht werden und hierfür wohl verwendbar sein dürfte. Aber seine theoretisch abgeleitete Formel fand keine experimentelle Bestätigung. Deshalb untersuchte ich hier die Verwendungsmöglichkeit dieser Formeln mittels mehrerer Trocknungsversuche mit verschiedenen Probenformen.

Zunächst erläutere ich die Diffusionsformel jeder Form, um dann die Resultate der entsprechend durchgeführten Versuche wiederzugeben.

I. Hexaeder.

Das Hexaeder ist 2a, 2b bzw. 2c lang, parallel zur x-, y-, bzw. z-Achse in einer rechtwinkligen Koordinate, deren Nullpunkt genau mit dem Mittelpunkt übereinstimmt. Nach der Stellung und der Zahl der Oberflächen, an denen die Verdampfung des Wassers stattfindet, ergibt sich eine Untersuchung für die folgenden drei Fälle:

A. Die Verdampfung tritt nur an den zur x-Achse senkrechten zwei Oberflächen auf, weil die übrigen 4 Seiten wasserdicht gehalten sind.

B. Die Verdampfung findet an 4 Oberflächen statt, von denen je zwei zur y- und z-Achse senkrecht stehen, indem die übrigen zwei wasserdicht bedeckt sind.

C. Die Verdampfung findet an allen Oberflächen statt.

Die fundamentale Differentialgleichung wird für jeden Fall folgendermassen ausgedrückt.

$$\mathrm{I_A} \quad \partial v/\partial\theta = \lambda \frac{\partial^2 v}{\partial x^2}$$

$$\mathrm{I_B} \quad \partial v/\partial\theta = \lambda\left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2}\right)$$

$$\mathrm{I_C} \quad \partial v/\partial\theta = \lambda\left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2}\right)$$

Newman nun bietet die folgenden Grenzbedingungen für die allgemeine Lösung der Gleichungen,

(1) $\theta = 0: \quad v = v_0$ (konstant)

(2) $x = a$ und $x = -a$: $v = 0$

1) E. D. Williamson und L. H. Adams: Phys. Review, 1929, 14, 99.
2) H. Gröber: V. D. I. 1925, 69, 705.
3) A. B. Newman: Trans. Am. Inst. Chem. Eng. 1931. 29, 310.

Im Fall von B and C setzte ich auch den Wassergehalt an jeder Verdampfungsoberfläche stets als Null der sich daraus ergebende Schluss darf indessen nur für die zweite Periode der verlangsamten Trocknungsgeschwindigkeit verwendet werden.

$$\mathrm{I_A.}\quad \frac{v}{v_0}=\frac{4}{\pi}\left\{\cos\frac{\pi x}{2a}e^{-\lambda\theta\left(\frac{\pi}{2a}\right)^2}+\frac{1}{3}\cos\frac{3\pi x}{2a}e^{-9\lambda\theta\left(\frac{\pi}{2a}\right)^2}+\frac{1}{5}\cos\frac{5\pi x}{2a}e^{-25\lambda\theta\left(\frac{\pi}{2a}\right)^2}+\cdots\right\}\ \ldots\ (36)$$

Formel (36) ist anscheinend von der Formel (21) verschieden ist aber in Wirklichkeit dieselbe. Abgekürzt bezeichnet man die rechte Seite der Formel (36) mit (S.A.).

Der mittlere Wassergehalt in den einzelnen Zeiten ergibt sich auf dieselbe Weise wie in Formel (22)

$$\frac{v_m}{v_0}=\frac{8}{\pi^2}\left(e^{-\left(\frac{\pi}{2}\right)^2\frac{\lambda\theta}{a^2}}+\frac{1}{9}e^{-9\left(\frac{\pi}{2}\right)^2\frac{\lambda\theta}{a^2}}+\frac{1}{25}e^{-25\left(\frac{\pi}{2}\right)^2\frac{\lambda\theta}{a^2}}+\cdots\right)\ldots(37).$$

Die rechte Seite der Formel (37) wird später kurz als (S.A.′) dargestellt. Ähnlich folgt für $\mathrm{I_B}$ und $\mathrm{I_C}$:

$\mathrm{I_B}$. Wasserverteilungsformel:

$v/v_0=$(S.A.) (S.B.)

Durchschnittswassergehalt:

$v_m/v_0=$(S.A.′) (S.B.′) .....(38)

$\mathrm{I_C}$. Wasserverteilungsformel:

$v/v_0=$(S.A.) (S.B.) (S.C.)

Durchschnittswassergehalt:

$v_m/v_0=$(S.A.′) (S.B.′) (S.C.′).....(39)

II. Kugel.

Die Wasserdiffusion in der Kugel ist mit der folgenden Formel dargestellt, worin r den Abstand vom Zentrum bedeutet.

$$\frac{\partial v}{\partial\theta}=\lambda\left(\frac{\partial^2 v}{\partial r^2}+\frac{2}{r}\frac{\partial v}{\partial r}\right)$$

Nimmt man hier die folgenden Grenzbedingungen:

$\theta=0:\quad v=v_0$

$r=a$ (Kugeloberfläche): $\quad v=0,$

so ergibt sich die Wasserverteilungsformel:

$$\frac{v}{v_0}=\frac{2a}{\pi r}\left\{\sin\frac{\pi r}{a}\cdot e^{-\lambda\theta\left(\frac{\pi}{a}\right)^2}-\frac{1}{2}\sin\frac{2\pi r}{2}e^{-4\lambda\theta\left(\frac{\pi}{a}\right)^2}+\frac{1}{3}\sin\frac{3\pi r}{a}e^{-9\lambda\theta\left(\frac{\pi}{a}\right)^2}+\cdots\right\}\ldots\ldots(40)$$

Hier ist die rechte Seite als (S.S.) bezeichnet.

Der Durchschnittswassergehalt in einer bestimmten Zeit θ ist:

$$\frac{v_m}{v_0}=\frac{3}{a^3}\int_0^a(\mathrm{S.S.})r^2dr=\frac{6}{\pi^2}\left\{e^{-\pi^2\left(\frac{\lambda\theta}{a^2}\right)}+\frac{1}{4}e^{-4\pi^2\left(\frac{\lambda\theta}{a^2}\right)}+\frac{1}{9}e^{-9\pi^2\left(\frac{\lambda\theta}{a^2}\right)}+\cdots\right\}\ (41)$$

Bei Abkürzung ergibt sich

$v_m=v_0$ (S.S.′)

III. Zylinder.

$\mathrm{III_A}$. Bei dem unendlich langen Zylinder oder dem Zylinder mit wasserdicht gehaltenen Endflächen bedeutet r den Abstand von der Mittellinie bis zur Peripherie. Die fundamentale Differentialgleichung lautet somit

$$\frac{\partial v}{\partial\theta}=\lambda\left(\frac{\partial^2 v}{\partial\theta^2}+\frac{1}{r}\frac{\partial v}{\partial\theta}\right).$$

Da nun für $\theta=0$: $v=v_0$ und

für $r=0$: $v=0$ sein soll, ergibt die Integration:

$$\frac{v}{v_0}=2\left\{\frac{J_0\left(\frac{R_1}{a}r\right)}{R_1J_1\left(\frac{R_1}{a}a\right)}e^{-\lambda\theta\left(\frac{R_1}{a}\right)^2}+\frac{J_0\left(\frac{R_2}{a}r\right)}{R_2J_1\left(\frac{R_2}{a}a\right)}e^{-\lambda\theta\left(\frac{R_2}{a}\right)^2}+\cdots\right\}\ (42)$$

oder abgekürzt $v=v_0$ (S.R.),

worin $J_0(x)=\left\{1-\frac{x^2}{2^2}+\frac{x^4}{2^2\cdot4^2}-\frac{x^6}{2^2\cdot4^2\cdot6^2}+\cdots\right\}$

und

$$-J_1(x)=\frac{d[J_0(x)]}{dx}=-\left\{\frac{x}{2}-\frac{x^3}{2^2\cdot4}+\frac{x^5}{2^2\cdot4^2\cdot6}+\cdots\right\}$$

zwei Besselsche Funktionen mit unendlich vielen Wurzeln bedeuten. Weiter zeichnet man eine Schwingungsfunktion mit $J_0(x)$ als Ordinate und einen passenden Wert von x als Abszisse, dann zeigt R_1 den kleinsten Wert uon x für $J_0(x)=0$, d.h. den ersten Schnittpunkt der Kurve mit der x-Achse.

R_2 ist der zweitkleinste Wert von x für $J_0(x)=0$, d.h. den zweiten Schnittpunkt der Kurve mit der Achse usw.

Die anfänglichen 5 kleineren Werte von R stellen sich folgendermassen dar:

n	R_n	$J_1(R_n)$
1	2.4048	0.51915
2	5.5201	−0.34026
3	8.6540	0.2714
4	11.792	−0.2325
5	14.931	0.2065

Da der Wassergehalt in dem sehr dünnen Zylinder von der Dicke dr, der Höhe L und dem Radius a gleich $2\pi rLvdr$ ist, so ergibt sich der Durchschnittswassergehalt:

$$v_m(\pi a^2 L)=\int_0^a 2\pi rLvdr,$$

$$v_m/v_0=\frac{2}{a^2}\int_0^a (\text{S.R.})\, rdr$$

$$=\left\{\frac{1}{R_1^2}e^{-R_1^2\left(\frac{\lambda\theta}{a_2}\right)}+\frac{1}{R_2^2}e^{-R_2^2\left(\frac{\lambda\theta}{a^2}\right)}+\cdots\right\} \quad (43)$$

oder kurz $v_m=v_0\,(\text{S.R.}')$

III_B. In dem Falle, dass die Wasserverdampfung an allen Oberflächen des Zylinders stattfindet, indem x den von dem Boden des Zylinders parallel zur Mittellinie gemessenen Abstand bedeutet, können die entsprechende Wasserdiffusion, Wasserverteilung und der Durchschnittswassergehalt wie folgt ausgedrückt werden:

$$\frac{\partial v}{\partial \theta}=\lambda\left(\frac{\partial^2 v}{\partial r^2}+\frac{1}{r}\frac{\partial v}{\partial r}+\frac{\partial^2 v}{\partial x^2}\right)$$

$$v=v_0\,(\text{S.A.})\,(\text{S.R.}) \quad \ldots\ldots\ldots\ldots (44)$$

$$v_m=v_0\,(\text{S.A.}')\,(\text{S.R.}') \quad \ldots\ldots\ldots\ldots (45)$$

Aus der bei der Integration benutzten Grenzbedingung ergibt sich klar, dass diese Formeln für verschiedene Probenformen nur in den Fällen Geltung haben, wo der Trocknungsvorgang von Anfang an nach der zweiten Periode der verlangsamten Trocknungsgeschwindigkeit erfolgt, ohne irgendwelche vorhergehende Trocknung. Zur experimentellen Bestätigung dieser Formeln dient daher am besten die Seife. Aus diesem triftigen Grunde benutzte ich die Velvetseife, um die verschiedenen Beziehungen zwischen Probenform, Probendicke, Trocknungsgeschwindigkeit wie auch Trocknungsdauer zu studieren. Newman hat sodann eine parabolische Anfangsbedingung für die verlangsamte Periode der Trocknungsgeschwindigkeit nach vorhergehender konstanter Trocknungsperiode angenommen. Diese Bedingung entspricht jedoch nicht den experimentellen Tatsachen.

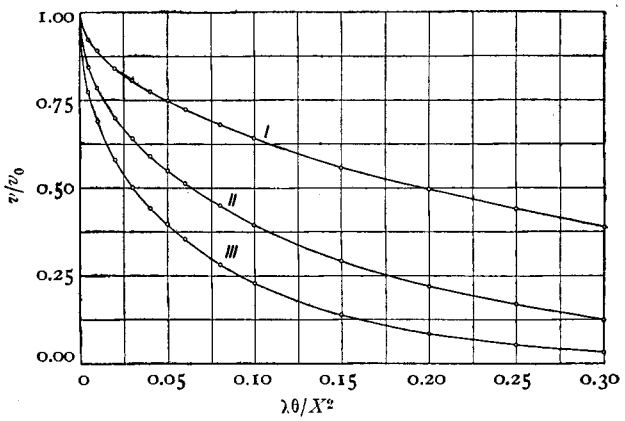
2. *Schaubild des Diffusionskoeffizienten λ für verschiedene Formen von Proben.*

Kurve I, II und III in Abbildung 48 zeigen das Verhältnis von v/v_0 zu $\lambda\theta/X^2$ in Platte (Formel 37), Zylinder (Formel 43) bzw. Kugel (Formel 41). Hier bedeutet X die halbe Dicke bei der Platte und die Halbmesser bei Zylinder und Kugel. Die Verdampfungs-oder Trocknungsgeschwindigkeit an der Oberfläche des festen Körpers ist um so grösser, je kleiner sein Volumen und damit sein Wassergehalt ist, ebenso ist sie um so grösser, je grösser die Oberfläche ist.

Da aber bei gleicher linearer Abmessung das Verhältnis von Volumen zu Oberfläche bei der Kugel am kleinsten und bei der Platte am grössten ist, so ist umgekehrt die Trocknungsgeschwindigkeit bei der Kugel am grössten, bei der Platte am kleinsten. Dies findet man bestätigt, wenn man in dem zugehörigen Schaubild 48 die Verhältnisse

Abb. 48.

Schaubild λ für verschiedene Probenformen.
Kurve I : Platte.
„ II : Zylinder.
„ III : Kugel.



v_1/v_0 und v_2/v_0 bei den gleichen Werten der Kenngrössen vergleicht. Für kurze Zylinder oder Hexaeder verändert sich dieses Verhältnis selbstverständlich gemäss ihrer Dimension d.h. je nach der Höhe und dem Halbmesser beim Zylinder oder je nach Höhe, Breite uud Tiefe beim Hexaeder.

3. *Trocknung verschiedener Probenformen mit gleichen Volumen.*

Es wurden hier Würfel, quadratischer Balken, Zylinder und Kugel von folgender Grösse benutzt.

	Grösse cm	Volum cm³	Gesamte Oberfläche, cm²
Würfel	4×4×4	64	96
Quadratischer Balken	3×2.7×8 (Höhe)	64.8	107.4
Zylinder	3.2 (Durchmesser)× 7.85 (Höhe)	63.2	95.1
Kugel	5.0 (Durchmesser)	65.5	78.5

Um jetzt die Trocknungsvorgänge dieser 4 Arten von Proben zu vergleichen, wurde deren gegebene Dimension in die Formeln (38) bis (45) eingeführt. Abb. 49 zeigt das zugehörige Schaubild λ.

Tabelle 41.

Kurven-nummer	Probenform	Formel-nummer	Ungeschützte Oberfläche	Geschützte Oberfläche	Verdampfungs-Oberfläche, A cm²	Probendicke cm
I	Würfel	38	4 Seiten	oben und unten	64.6	$2a=2b=4$
II	Kugel	41	gesamt	keine	78.5	$2a=D=5$
III	Zylinder	43	Mantelfläche	oben und unten	78.8	$2a=D=3.2$
IV	Würfel	39	gesamt	keine	96.0	$2a=2b=2c=4$
V	Quadratischer Balken	38	4 Seiten	oben und unten	91.2	$2a=3.0$, $2b=2.7$
VI	Zylinder	45	gesamt	keine	95.5	$2a=D=3.2$, $2h=7.85$
VII	Quadratischer Balken	39	gesamt	keine	107.4	$2a=3.0$, $2b=2.7$, $2c=8$

Hier sind v/v_0 als Ordinate und nicht $\lambda\theta/X_2$ sondern $\lambda\theta$ als Abszisse dargestellt, weil die Werte von X^2 für die verschiedenen Proben schon gegeben und nur $\lambda\theta$ in $\lambda\theta/X^2$ als Variablengruppe noch unbestimmt zurückgeblieben ist.

Deshalb kann man $\lambda\theta$ oder θ für die verschiedenen Probenformen direkt miteinander in Vergleich setzen ohne Berücksichtigung der Probendicke.

Die Kurven I bis VII in Abb. 49 stellen die in Tabelle 41 gegebenen Bedingungen dar.

Aus diesen Kurven sieht man, dass die Trocknungsdauer θ, die nötig ist, um einen Wassergehalt von dem anfänglichen Wert v_0 bis zu einem erforderlichen Wert v zu vermindern, bei der Kurve I am grössten und bei der Kurve VII am kleinsten ist. Vergleicht man nun die viererlei Proben bei ungeschützter Gesamtoberfläche, dann nimmt die Trocknungsdauer nach der Reihe: Kugel,

Abb. 50.

Theoretische und experimentelle Werte von $\lambda\theta$.

Kurve	Probenform	
II	Kugel	keine geschützte Oberfläche
IV	Würfel	
VI	Zylinder	
VII	Qnadratischer Balken	

○ : theoretisch, △ : experimentell.

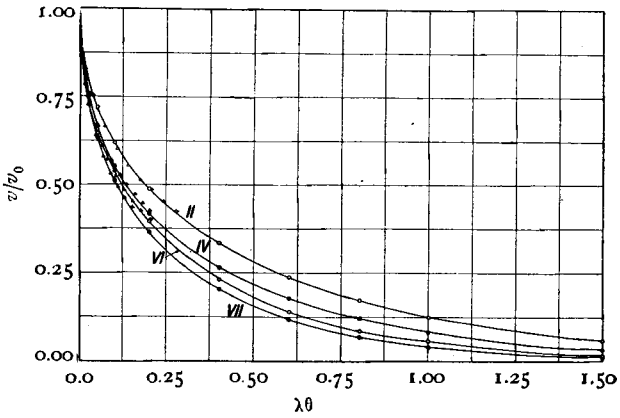


Abb. 49.

Schaubild λ für werschiedene Probenformen.

Kurve	Probenform	Geschützte Oberfläche	Probendicke, cm
I	Würfel	oben und unten	$2a=2b=2c=4$
II	Kugel	keine	$2a=D=5$
III	Zylinder	oben und unten	$2a=D=3.2$
IV	Würfel	keine	$2a=2b=2c=4$
V	Quadratischer Balken	oben und unten	$2a=3$, $2b=2.7$
VI	Zylinder	keine	$2a=D=3.2$, $2h=7.85$
VII	Quadratischer Balken	keine	$2a=3$, $2b=2.7$, $2c=8$

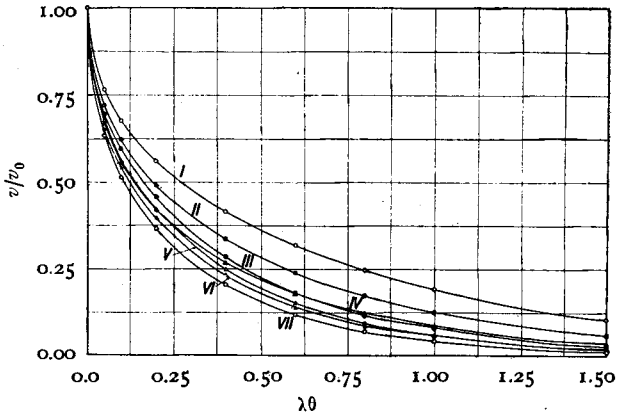


Abb. 51.

Theoretische und experimentelle Werte von $\lambda\theta$.

Kurve	Probenform	Geschützte Oberfläche
I	Würfel	oben und unten
II	Kugel	keine
III	Zylinder	oben und unten
V	Quadratischer Balken	oben und unten

○ : theoretisch, △ : experimentell.

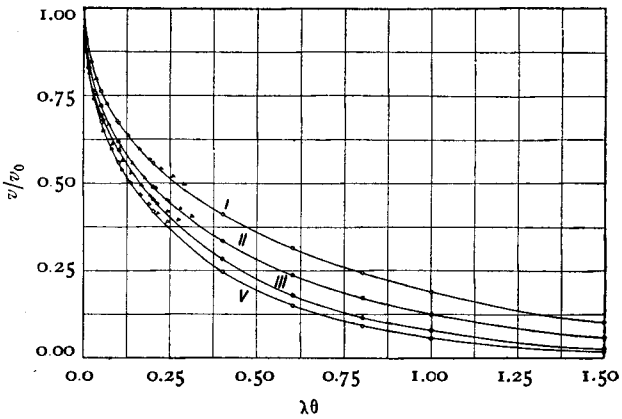


Tabelle 42.

Versuch 13 der Tonerde. Probe: Velvetseife. Trocknungsbedingungen: 40°C, 30% und 2.14 m/sek.

Versuch	13-A			13-B			13-C				13-D		
Probenform	Würfel			Quadratischer Balken			Zylinder				Kugel		
Wasserdicht geschützte Oberfläche	oben und unten			oben und unten			oben und unten				keine		
Zeitdauer in Tagen	Gewichtsabnahme in g/Tag	Trocknungsgeschwindigkeit in g/Tag cm²	Freier Wassergehalt in g	%	Gewichtsabnahme in g/Tag	Trocknungsgeschwindigkeit in g/Tag cm²	Freier Wassergehalt in g	%	Gewichtsabnahme in g/Tag	Trocknungsgeschwindigkeit in g/Tag cm²	Freier Wassergehalt in g	%	Gewichtsabnahme in g/Tag	Trocknungsgeschwindigkeit in g/Tag cm²	Freier Wassergehalt in g	%
0	0		21.06	52.30	0		19.71	45.50	0		19.18	46.00	0		21.65	52.60
0.5	6.34	0.0990	17.89	44.40	7.20	0.0794	16.09	37.12	6.44	0.0816	15.96	38.30	7.30	0.0930	18.00	43.76
1	2.26	.0353	16.76	41.60	2.78	.0305	14.70	33.92	2.62	.0331	14.65	35.18	3.26	.0415	16.37	39.80
2	1.42	.0222	15.34	38.10	1.82	.0200	12.88	29.72	1.66	.0210	12.99	31.18	1.97	.0250	14.40	35.00
3	1.07	.0167	14.27	35.40	1.27	.0139	11.61	26.80	1.23	.0156	11.76	28.20	1.38	.0176	13.02	31.67
4	0.88	.0138	13.39	33.20	.94	.0103	10.67	24.60	.94	.0119	10.82	25.99	1.05	.0134	11.97	29.10
5	.75	.0117	12.64	31.40	.79	.0087	9.88	22.80	.71	.0090	10.11	24.27	.87	.0111	11.10	27.00
6	.63	.0098	12.01	29.80	.61	.0067	9.27	21.40	.62	.0079	9.49	22.77	.64	.0082	10.46	25.41
7	.56	.0088	11.45	28.40	.53	.0058	8.74	20.19	.53	.0069	8.96	21.51	.63	.0080	9.83	23.93
8	.46	.0072	10.99	27.25	.46	.0051	8.28	19.10	.45	.0057	8.51	20.42	.53	.0068	9.30	22.63
9	.43	.0067	10.56	26.19	.41	.0045	7.87	18.17	.43	.0055	8.08	19.40	.45	.0057	8.85	21.55
10	.38	.0059	10.18	25.25	.35	.0038	7.52	17.35	.32	.0041	7.77	18.62	.40	.0051	8.45	20.58
11	.32	.0050	9.86	24.47	.32	.0035	7.20	16.62	.32	.0041	7.44	17.84	.35	.0045	8.10	19.70
12	.28	.0044	9.58	23.80	.27	.0030	6.93	15.99	.27	.0034	7.17	17.20	.30	.0038	7.80	18.98
13	.25	.0039	9.33	23.17	.24	.0026	6.69	15.42	.24	.0030	6.93	16.62	.30	.0038	7.50	18.26
14	.25	.0039	9.08	22.57	.23	.0025	6.46	14.90	.23	.0029	6.70	16.08	.27	.0034	7.23	17.60
15	.24	.0038	8.84	21.95	.22	.0024	6.24	14.40	.23	.0029	6.47	15.52	.25	.0032	6.98	16.99

Würfel, Zylinder, quadratischer Balken ab, indem sie bei der Kugel am grössten ist.

Wieder werden die viererlei Proben, d h. Würfel. quadratischer Balken, Zylinder und Kugel, miteinander verglichen, indem die beiden Endflächen der ersten drei Körperarten wasserdicht geschützt wurden. Wie man sieht, nimmt dann, in diesem Falle die Trocknungsdauer nach der Reihe: Würfel, Kugel, Zylinder, quadratischer Balken ab. Sie ist also beim Würfel am grössten.

Tabelle 42 und 43 stellen die Ergebnisse der Versuche 13 und 14 der Seife dar; in Tabelle 44 sind die theoretischen und experimentellen Werte von $\lambda\theta$, die den ebengenannten zwei Tabellen und dazu noch Abb. 49 entnommen sind, in Vergleich zueinander gestellt.

Die 7 theoretischen Kurven in Abb. 49 sind in zwei Gruppen mit, bzw. ohne, wasserdichten Schutz an den Endflächen und auf Abb. 50 bzw. 51 gezeichnet. Diesen zwei Abbildungen sind weiter die entsprechenden experimentellen Kurven beigefügt und mit den theoretischen verglichen.

Da die Ergebnisse in beiden Bildern gut miteinander übereinstimmen, hat sich also die obere theoretische Überlegung bestätigt, und die Diffusionsformel ist somit für die verschiedenen Probenformen praktisch verwendbar. Die aus Tabelle 44 gefundenen Durchschnittswerte von λ halten sich je nach der Probenform in dem Bereiche von 0.0218 bis 0.0348. Mit Hilfe dieses Schaubildes kann man in ganz einfacher Weise sowohl die Trocknungsdauer als auch den Wassergehalt der verschiedenen Probenformen graphisch feststellen.

Abb. 52 stellt die Beziehungen zwischen der Trocknungsgeschwindigkeit und dem freien Wassergehalt in der Probe ohne geschützte Oberfläche im Versuche 13 und 14 dar. Hier nimmt die Trocknungsgeschwindigkeit nach der Reihe: Zylinder, quadratischer Balken, Würfel und Kugel ab, bei der Kugel ist sie also am kleinsten. Haben diese vier Proben ein annähernd gleiches Volumen, aber ungleiche Oberflächengrösse und Dicke, so ergibt sich auch eine entsprechend verschiedene Trocknungsgeschwindigkeit in allen Proben.

Abb. 53 bietet die Beziehung zwischen Trocknungsgeschwindigkeit und freiem Wassergehalt in Versuch 13, wobei jede Probe ausser der Kugel an ihren beiden Endflächen gegen Wasser bedeckt war. Die Trocknungsgeschwindigkeit vermindert sich der Reihe nach in quadratischem Balken, Zylinder, Kugel und Würfel. Am kleinsten ist sie beim Würfel.

In der zweiten verlangsamten Periode steht sie allgemein in umgekehrtem Verhältnisse zur Probendicke und hängt überdies von der Form ab, wie aus Formel (38) bis (45) ersichtlich ist.

Die Grösse der Trocknungsgeschwindigkeit in den oberen beiden Abbildungen zeigt zugleich in entsprechender Ordnung die Länge der Trocknungsdauer in Abb. 49 bis 51 an, mit andern Worten, für die grösste Trocknungsgeschwindigkeit ist die Trocknungsdauer am kleinsten und umgekehrt.

Abb. 54 bis 56 zeigen nun die Trocknungsgeschwindigkeit und auch die gesamte verdampfte Wassermenge im Verhältnis zur Trocknungsdauer

Tabelle 43.

Versuch 14 der Seife.
Probe: Velvetseife.
Trocknungsbedingungen: 40°C, 30% und 2.14 m/sek.
(Keine geschützte Oberfläche).

	Nr. 14–*A*				Nr. 14–*B*				Nr. 14–*C*			
	Würfel				Quadratischer Balken				Zylinder			
Zeitdauer in Tagen	Gewichtsabnahme in g/Tag	Trocknungsgeschwindigkeit in g/Tag cm²	Freier Wassergehalt in g	Freier Wassergehalt in %	Gewichtsabnahme in g/Tag	Trocknungsgeschwindigkeit in g/Tag cm²	Freier Wassergehalt in g	Freier Wassergehalt in %	Gewichtsabnahme in g/Tag	Trocknungsgeschwindigkeit in g/Tag cm²	Freier Wassergehalt in g	Freier Wassergehalt in %
0	0		19.46	43.80	0		19.49	43.90	0		18.68	43.98
0.5	6.98	0.0728	15.97	36.00	8.00	0.0745	15.49	34.85	7.50	0.0790	14.93	35.18
1	2.64	.0275	14.65	33.00	2.60	.0242	14.19	31.95	2.70	.0285	13.58	31.98
2	1.62	.0169	13.03	29.35	1.75	.0163	12.44	28.02	1.70	.0179	11.88	27.97
3	1.16	.0121	11.87	26.73	1.20	.0112	11.24	25.35	1.19	.0125	10.69	25.18
4	.83	.0087	11.04	24.98	.89	.0083	10.35	23.32	.88	.0093	9.81	23.08
5	.74	.0077	10.30	23.20	.71	.0066	9.64	21.72	.77	.0081	9.04	21.27
6	.60	.0063	9.70	21.83	.59	.0055	9.05	20.40	.59	.0060	8.47	19.92
7	.51	.0052	9.17	20.68	.50	.0047	8.55	19.27	.50	.0053	7.97	18.77
8	.45	.0047	8.74	19.68	.43	.0040	8.12	18.29	.44	.0046	7.53	17.73
9	.38	.0040	8.36	18.82	.37	.0034	7.75	17.47	.36	.0038	7.17	16.87
10	.34	.0035	8.02	18 06	.31	.0029	7.44	16.77	.34	.0036	6.83	16.08
11	.31	.0032	7.71	17.35	.29	.0027	7.15	16.11	.28	.0030	6.55	15.42
12	.28	.0029	7.43	16.73	.25	.0023	6.90	15.55	.27	.0028	6.28	14.78
13	.28	.0029	7.15	16.10	.23	.0021	6.67	15.02	.22	.0023	6.06	14.26

Abb. 52.

Versuch 13 und 14 der Seife.

Kurve	Probenform	Probenvolum	Verdampfungsoberfläche
I	Zylinder	63.2 cm³	95.5 cm²
II	Quadratischer Balken	64.8	107.4
III	Würfel	64.0	96.0
IV	Kugel	65.5	78.5

Trocknungsbedingungen: 40°C, 30% und 2.14m/sek.

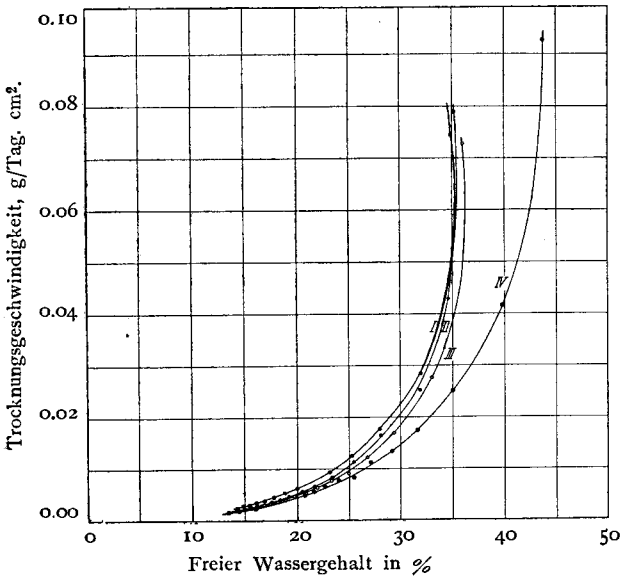
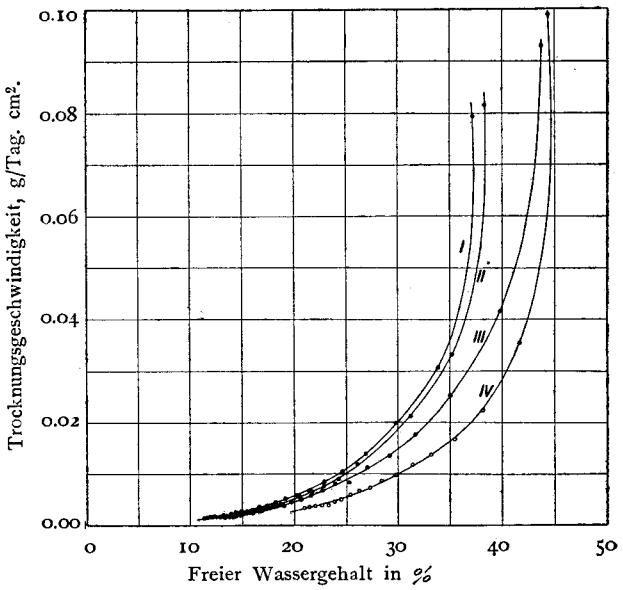


Abb. 53.

Versuch 13 der Seife.

Kurve	Probenform	Verdampfungsoberfläche
I	Quadratischer Balken	91.2 cm²
II	Zylinder	78.8
III	Kugel	78.5
IV	Würfel	64.0

Trocknungsbedingungen: 40°C, 30% und 2.14 m/sek.



in Versuch 13 und 14. Selbstverständlich ist die gesamte Verdampfungswassermenge, wie diese Bilder erkennen lassen, mit zunehmender Oberfläche sowie Trocknungsgeschwindigkeit, auch in entsprechendem Grade grösser.

4. *Trocknungsversuche von Proben gleicher Gestalt aber ungleicher Dicke.*

Zu diesen Versuche benutzte ich Proben in der Form von rechtwinkligen Hexaedern, mit gleicher Höhe und Breite, aber verschiedener Stärke wie folgt.

Höhe	Breite	Dicke	Gesamte Verdampfungsoberfläche
cm	cm	cm	cm²
8	5	6	236
8	5	3	152
8	5	2	132

Über Versuche mit eben solchen Proben bei wasserdicht geschützten Seitenflächen habe ich schon in meiner vorigen Arbeit berichtet. Hier handelt es sich darum um Proben ohne geschützte Oberfläche, wo folglich die Verdampfung an der gesamten Oberfläche stattfindet. Der freie Wassergehalt während des Trocknungsvorganges kann in diesem Fall aus Formel (39) berechnet werden. Abb. 43 zeigt die Beziehung zwischen der Trocknungsgeschwindigkeit und dem freien Wassergehalt und Abb. 57 stellt die Trocknungsgeschwindigkeit und gesamte verdampfte Wassermenge im Verhältnis zur Trocknungsdauer dar.

Zusammenfassung.

1. Unter den verschiedenen Formen der Seifenproben, von welchen jede aber eine gleiche Dicke hat, ist die Trocknungsgeschwindigkeit in der zweiten Periode verlangsamter Trocknungsgeschwindigkeit am grössten bei der Kugel, darauf folgt der Zylinder und dann die Platte.

2. Unter den Seifenproben verschiedener Form aber mit gleichem Volumen ist die Trocknungsgeschwindigkeit in der zweiten Periode verlangsamter

Tabelle 44.

Theoretische und experimentelle Werte $\lambda\theta$ sowie der Wert λ für verschiedene Probenformen.

Versuch	Probenform	Wasserdicht geschützte Oberfläche	θ	0	(0.5)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Durchschnittswert
13-*A*	Würfel	oben und unten	v/v_0	1.00	(.850)	.796	.726	.678	.636	.601	.570	.544	.522	.501	.483	
			$(\lambda\theta)_{theor.}$	0	(.022)	.038	.067	.097	.129	.160	.189	.215	.241	.266	.291	
			λ	0	(.044)	.038	.0335	.0323	.03225	.032	.0315	.0307	.03013	.02955	.0291	**.0319**
			$(\lambda\theta)_{exp.}$	0	(.0159)	.0319	.0638	.0957	.1276	.1593	.1914	.2233	.2552	.2871	.3190	
13-*B*	Quadratischer Balken	oben und unten	v/v_0	1.00	(.816)	.745	.653	.589	.541	.501	.471	.444	.420	.400	.382	
			$(\lambda\theta)_{theor.}$	0	(.017)	.031	.058	.086	.110	.136	.158	.180	.200	.218	.238	
			λ	0	(.034)	.031	.029	.0287	.0275	.0272	.0263	.0256	.025	.0242	.0238	**.0268**
			$(\lambda\theta)_{exp.}$	0	(.0134)	.0268	.0536	.0804	.1072	.1340	.1608	.1876	.2144	.2412	.268	
13-*C*	Zylinder	oben und unten	v/v_0	1.00	(.832)	.765	.678	.613	.565	.528	.495	.467	.444	.422	.402	
			$(\lambda\theta)_{theor.}$	0	(.012)	.027	.057	.089	.118	.143	.168	.190	.209	.230	.249	
			λ		(.024)	.027	.0285	.0297	.0295	.0286	.028	.0271	.0261	.0256	.0249	**.0275**
			$(\lambda\theta)_{exp.}$	0	(.0137)	.0275	.055	.0825	.110	.1375	.165	.1925	.220	.2475	.275	
13-*D*	Kugel	keine	v/v_0	1.00	(.832)	.757	.666	.603	.554	.514	.483	.455	.431	.410	.392	
			$(\lambda\theta)_{theor.}$	0	(.017)	.037	.074	.111	.144	.177	.207	.237	.264	.291	.315	
			λ		(.034)	.037	.037	.037	.036	.0354	.0345	.0339	.033	.0323	.0315	**.0348**
			$(\lambda\theta)_{exp.}$	0	(.0174)	.0348	.0696	.1044	.1392	.174	.2088	.2436	.2784	.3132	.348	
14-*A*	Würfel	keine	v/v_0	1.00	(.822)	.753	.670	.610	.570	.529	.498	.472	.449	.429	.412	
			$(\lambda\theta)_{theor.}$	0	(.014)	.026	.049	.073	.092	.113	.134	.153	.173	.190	.205	
			λ		(.028)	.026	.0245	.0243	.023	.0226	.0223	.0219	.0216	.0211	.0205	**.0228**
			$(\lambda\theta)_{exp.}$	0	(.0111)	.0226	.0456	.0634	.0912	.1116	.1368	.1596	.1824	.2052	.228	
14-*B*	Quadratischer Balken	keine	v/v_0	1.00	(.793)	.727	.638	.577	.531	.494	.464	.439	.416	.398	.382	
			$(\lambda\theta)_{theor.}$	0	(.015)	.027	.048	.070	.091	.110	.128	.144	.160	.173	.186	
			λ		(.030)	.027	.024	.0233	.0225	.022	.0213	.0206	.020	.0192	.0186	**.0218**
			$(\lambda\theta)_{exp.}$	0	(.0109)	.0218	.0436	.0654	.0872	.109	.1308	.1526	.1744	.1962	.218	
14-*C*	Zylinder	keine	v/v_0	1.00	(.800)	.727	.636	.572	.525	.484	.453	.427	.403	.384	.366	
			$(\lambda\theta)_{theor.}$	0	(.012)	.026	.055	.083	.108	.133	.153	.173	.194	.211	.229	
			λ		(.024)	.026	.0275	.0277	.027	.0266	.0255	.0247	.0243	.0234	.0229	**.0256**
			$(\lambda\theta)_{exp.}$	0	(.0128)	.0256	.0512	.0768	.1024	.128	.1536	.1792	.2048	.2304	.256	

Abb. 54.

Versuch 14 der Seife.
(Ohne wasserdicht geschützte Oberfläche)

Kurve	Probenform	Verdampfungsoberfläche
I	Quadratischer Balken	107.4 cm²
II	Zylinder	95.5
III	Würfel	96.0

a: Gesamte verdampfte Wassermenge.
b: Trocknungsgeschwindigkeit.
Trocknungsbedingungen: 40°C, 30% und 2.14 m/sek.

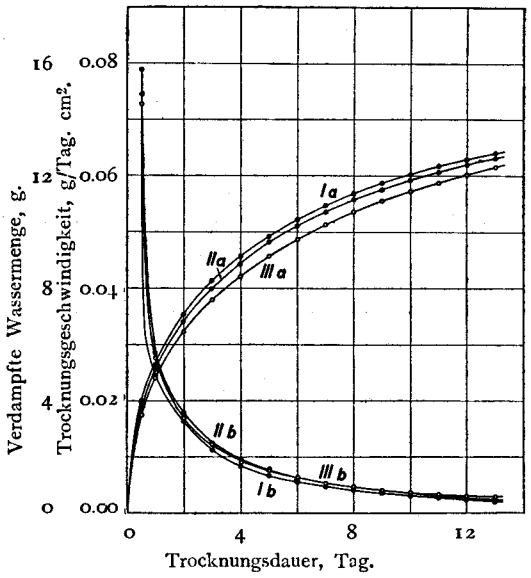
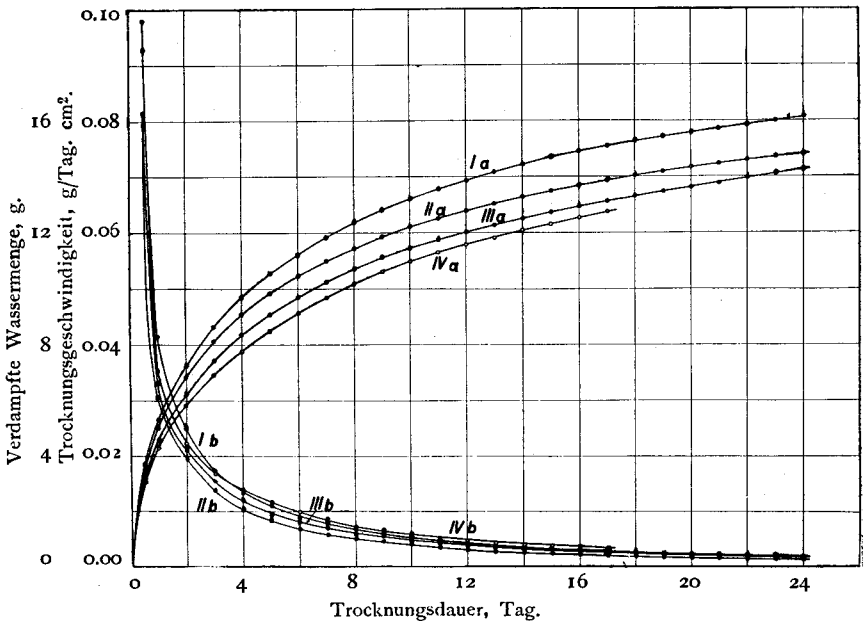


Abb. 55.

Versuch 13 der Seife.
(Mit wasserdicht geschützter Oberfläche.)

Kurve	Probenform	Geschützte Obefläche	Verdampfungsoberfläche
I	Kugel	keine	78.5 cm²
II	Quadratischer Balken	oben und unten	91.2
III	Zylinder	oben und unten	78.8
IV	Würfel	oben und unten	64.0

a: Gesamte verdampfte Wassermenge.
b: Trocknungsgeschwindigkeit.
Trocknungsbedingungen: 40°C, 30% und 2.14 m/sek.



Trocknung beim Zylinder am grössten; sie vermindert sich in der Reihenfolge: quadratischer Balken, Würfel und Kugel. Diese Versuchsergebnisse bezeugen also eine gute Übereinstimmung mit den aus dem Schaubild λ theoretisch gefundenen Werten.

3. In den Seifenproben des rechtwinkligen Hexaeders verändert sich die Trocknungsgeschwindigkeit annähernd umgekehrt proportional der Probendicke, sowohl mit als auch ohne wasserdichten Seitenschutz.

V. Die empirische Formel für die Trocknung fester Stoffe in der zweiten Periode verlangsamter Trocknungsgeschwindigkeit.

Die Diffusionsformel in der zweiten Periode der verlangsamten Trocknungsgeschwindigkeit ist durch eine unendliche Reihe mit komplizierten exponentialen Funktionen ausgedrückt. Bei der Anwendung dieser Formeln muss vor allem der Wert des Diffusionskoeffizienten λ festgestellt werden. Da dieser Koeffizient überdies in Wirklichkeit nicht immer konstant ist und dazu der den vorhandenen Bedingungen entsprechende Wert gewöhnlich sich in der Literatur nicht angegeben findet, muss man ihn speziell für sich experimentell ermitteln. Aus diesem Grund hat die Forschung der Trocknung bisher gesucht, eine einfachere empirische Formel zu finden. Nach W. K. Lewis[1] bietet die folgende Formel eine verhältnismässig gute Übereinstimmung mit dem Experiment für die Innendiffusion:

$$\left(1-\frac{v}{v_0}\right)^n=\frac{C\theta}{X^2} \quad \ldots\ldots(44),$$

worin n und C die Konstante bedeuten und n annähernd 2 ist.

T. K. Sherwood[2] berichtet auf Grund seiner Versuche mit Tonerde, dass die Formel

$$\log v/v_c=-B\frac{\theta'}{X} \quad \ldots(45)$$

eine gute Übereinstimmung mit dem Experiment in der Verlangsamungsperiode zeigt, worin $B=0.36$ ist.

Hier bedeutet V_c den Grenzwassergehalt und θ' gibt die von dem Grenzpunkt berechnete Trocknungsdauer an.

1) W. K. Lewis: J. Ind. Eng. Chem. 1921, 13, 427.

2) T. K. Sherwood: J. Ind. Eng. Chem. 1929, 21, 976.

Abb. 56.

Versuch 13 und 14 der Seife.
(Ohne wasserdicht geschützte Oberfläche)

Kurve	Versuch	Probenform	Verdampfungsoberfläche
I	13	Kugel	78.5 cm²
II	14	Quadratischer Balken	107.4
III	14	Zylinder	95.5
IV	14	Würfel	96.0

a: Gesamte verdampfte Wassermenge.
b: Trocknungsgeschwindigkeit.

Trocknungsbedingungen: 40°C, 30% und 2.14 m/sek.

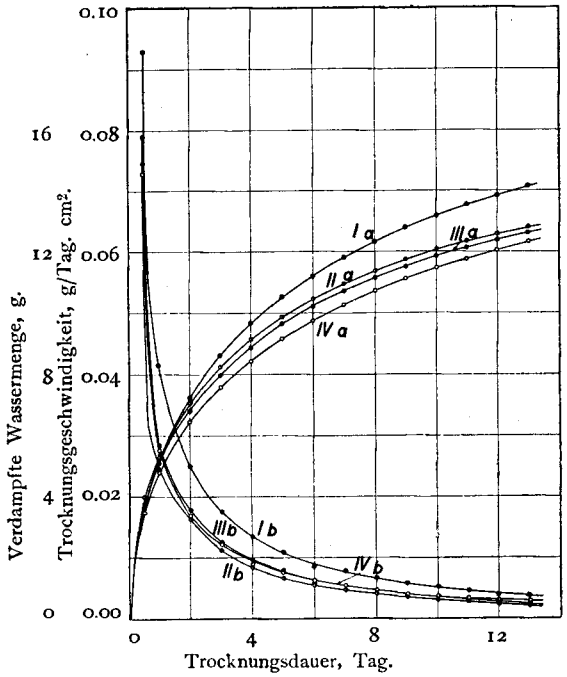


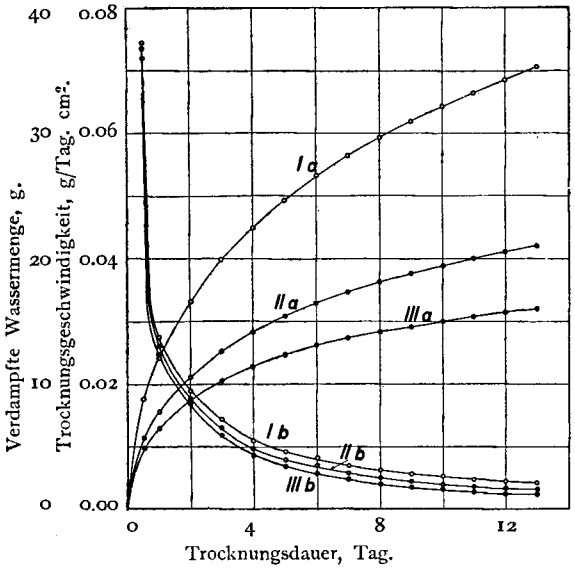
Abb. 57.

Versuch 16 der Seife.
Hexaeder mit verschiedener Dicke.

Kurve	Probengrösse	Verdampfungsoberfläche
I	5×8×6 cm	236 cm²
II	5×8×3	158
III	5×8×2	132

a: Gesamte verdampfte Wassermenge.
b: Trocknungsgeschwindigkeit.

Trocknungsbedingungen: 40°C, 30% und 2.14 m/sek.



Nimmt man dann nur das erste Glied der Diffusionsformel, so erhält man

$$\frac{v}{v_c}=\left(\frac{8}{\pi^2}\right)e^{-\left(\frac{\pi}{2}\right)^2\frac{\lambda\theta'}{X^2}}.$$

Hieraus wird durch einige Umwandlungen schliesslich:

$$\log\frac{v}{v_c}=-C\frac{\theta'}{X^2}\quad\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots(46),$$

worin C eine Konstante darstellt.

Um zu ermitteln, wie diese empirischen Formeln sich den Versuchsresultaten annähern, sind Abb. 58 bis 60 aus den Ergebnissen von Versuch 94–A der Tonerde und den 4–A der Seife gezeichnet. Die Abb. 58 zeigt die Beziehungen zwischen $(1-v/v_0)$ und θ/X^2 auf dem logarithmischen Millimeterpapier, indem die Kurve I dem Versuch 94–A und Kurve II dem Versuch 4–A entsprechen. Wenn die Formel (44) zu Recht gilt, so muss natürlich die Kurve hier geradlinig sein.

Diese zwei Kurven sind jedoch in Wirklichkeit nur in den vorderen und hinteren Teilen geradlinig, während sie sich in der Mitte biegen; es ist also klar, dass die Formel bei diesem Versuche nicht anwendbar ist.

Abb. 58.

Formel (44) nach Lewis.
Kurve I : Tonerde.
„ II : Seife.

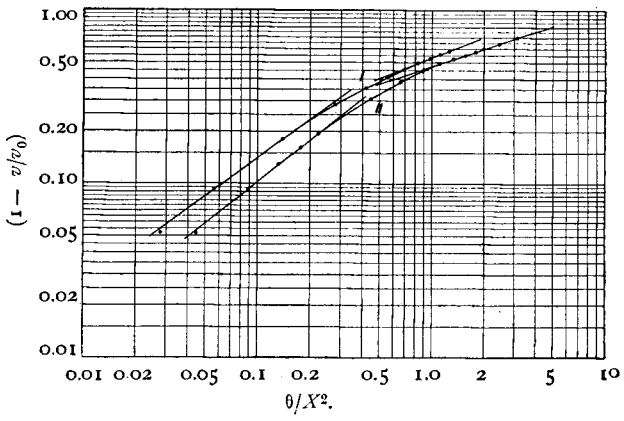


Abb. 59.

Probe: Tonerde.
Kurve I Formel (45) nach Sherwood.
„ II „ (46) d.h. erstes Glied der Diffusionsformel.

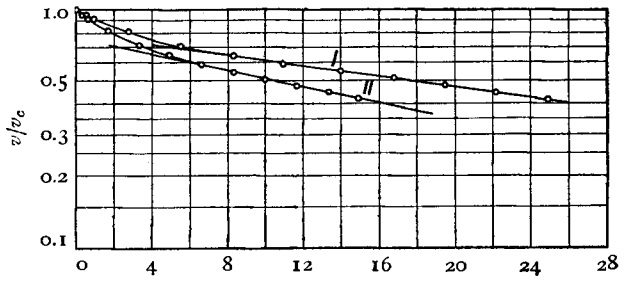


Abb. 59 und 60 stellen die Versuchsergebnisse von 94-A der Tonerde bzw. 4-A der Seife bei halblogarithmischem Massstab dar.

Darin zeigt die Kurve I die Beziehung von v/v_c und θ'/X in der Formel (45) und die Kurve II von v/v_c und θ'/X^2 in der Formel (46). Falls die Formeln (45) und (46) richtig sind, müssen diese Kurven geradlinig sein. Während nun die anfänglichen Teile sich etwas krümmen, ist die übrige Kurve fast gerade. Deshalb können diese zwei Formeln zu dem Experiment in der zweiten Periode annähernd verwendet werden.

Nach angestrengter Überlegung fand ich folgende Formel:

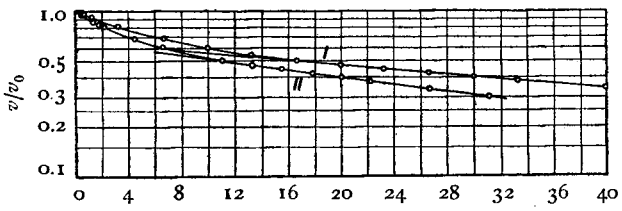
$$\frac{v_0}{v} = m\frac{\theta}{X^2} + a, \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (47)$$

worin a und m die Konstante bedeuten. Wenn die zweite Periode auf die Konstante oder die erste verlangsamte Periode folgt, muss der Anfangswassergehalt nicht v_0 sondern v_c sein und die Zeit von der Grenzzeit an gerechnet werden. Abgesehen davon, dass diese Formel ohne ein logarithmisches Glied sehr einfach ist, bezeugt sie ausserdem noch eine sehr gute Übereinstimmung mit dem Experiment in der zweiten Periode verlangsamter Trocknungsgeschwindigkeit. Abb. 61 zeigt die Versuche 94-A, 94-C und 94-D der Tonerde, Abb. 62 die Versuche 4-A, 4-B und 4-C

Abb. 60.

Probe: Seife.

Kurve I Formel (45) nach Sherwood.
„ II „ (46) d.h. erstes Glied der Diffusionsformel.



θ/X bei Kurve I und θ/X^2 bei Kurve II.

Abb. 61.

Formel (47) nach Kamei.
Probe: Tonerde.

Kurve	Versuch	Probendicke, X
I	94-*A*	6 cm
II	94-*C*	3
III	94-*D*	1

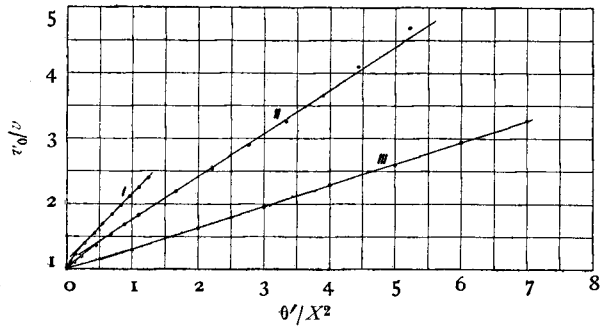
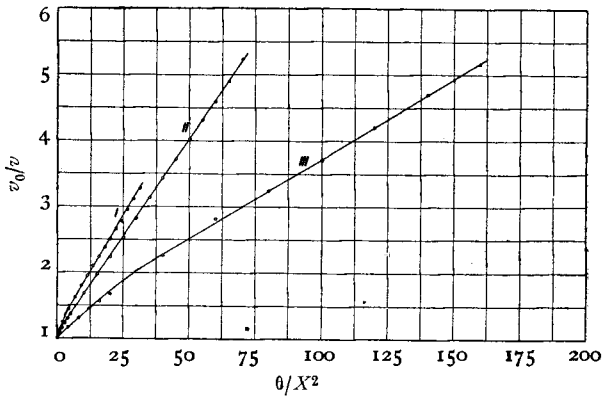


Abb. 62.

Formel (47) nach Kamei.
Probe: Seife.

Kurve	Versuch	Probendicke, $2X$
I	4-*A*	3 cm
II	4-*B*	2
III	4-*C*	1



der Seife sowie Abb. 63 die Versuche 2 uud 4 des Holzes. Darin ist die Beziehung zwischen v_c/v und θ/X^2 im gewöhnlichen Descartesschen Massstab ausgedrückt.

Aus den Abbildungen ersieht man, dass die Beziehungen zwischen v_c/v und θ/X^2 nach den ersten wenigen Stunden ganz gerade sind. Die Abbildung im Descartesschen und nicht im logarithmischen Massstab bietet eine grössere Einfachheit und Leichtigkeit sowohl was die Anfertigung als auch die Anwendung der Kurven betrifft.

In der Formel (47) ist die Zeit θ proportional dem Quadrat der Probendicke X^2. Sind die Konstantenwerte von a und m experimentell bestimmt, so kann man für die bestimmte Dicke X die Trocknungsdauer θ, die nötig ist, um den Wassergehalt bis auf v zu vermindern oder im andern Fall den Wassergehalt v nach der Trocknungsdauer θ ganz leicht finden.

Bei dem oberen Versuche stellen sich die Konstantenwerte von Tonerde, Seife und Holz wie folgt dar:

Versuch 94 der Tonerde (Abb. 61)

A. Kurve I ($X=6$)

$$\frac{v_c}{v} = 1.03\frac{\theta'}{X^2} + 1.121 \qquad (a)$$

B. Kurve II ($X=3$)

$$\frac{v_c}{v} = 0.662\frac{\theta'}{X^2} + 1.092 \qquad (b)$$

C. Kurve III ($X=1$)

$$\frac{v_c}{v} = 0.327\frac{\theta'}{X^2} + 0.978 \qquad (c)$$

Versuch 4 der Seife (Abb. 62)

A. Kurve I ($X=1.5$)

$$\frac{v_0}{v} = 0.0585 \frac{\theta}{X^2} + 1.160 \qquad \text{(d)}$$

B Kurve II ($X = 1.0$)

$$\frac{v_0}{v} = 0.0591 \frac{\theta}{X^2} + 1.080 \qquad \text{(e)}$$

C. Kurve III ($X = 0.5$)

$$\frac{v_0}{v} = 0.0243 \frac{\theta}{X^2} + 1.300 \qquad \text{(f)}$$

Versuch 2 und 4 des Zypressenholzes (Abb. 63)

Versuch 2 Kurve I ($X = 1.5$)

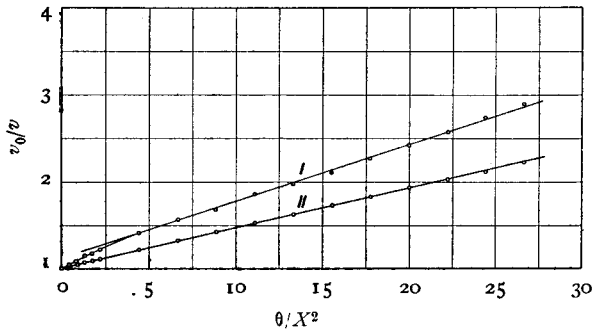
$$\frac{v_0}{v} = 0.065 \frac{\theta}{X^2} + 1.125 \qquad \text{(g)}$$

Versuch 4 Kurve II ($X = 1.5$)

Abb. 63.

Formel (47) nach Kamei.
Probe: Zypressenholz.

Kurve	Versuch	Feuchtigkeitsgrad
I	2	40 %
II	4	80



$$\frac{v_0}{v} = 0.046 \frac{\theta}{X^2} + 1.021 \qquad \text{(h)}$$

Mit einigen Beispielen sei hier die Anwendungsmethode dieser Formel erläutert.

1. Versuch mit Zypressenholz $v_0 = 0.417$ g/cm³ oder $w_0 = 11.70\%$ und $X = 1.5$cm. Wie hoch ist der Wassergehalt nach 50 stündiger Trocknung?

Aus der Formel (g) ergibt sich:

$$v = 0.417/(0.065 \frac{50}{1.5^2} + 1.125)$$

$$= 0.162 \text{ oder } w = 44.60\%$$

(Vergleichsweise $w_{exp} = 44.70\%$)

2. Versuch mit Tonerde, $v_c = 0.2389$ oder $w_c = 15.77\%$ und $X = 6$cm. Wieviele Stunden sind erforderlich, um den Wassergehalt zu $v = 0.10$ oder $w = 6.69\%$ einzutrocknen?

Aus der Formel (a) ergibt sich:

$$\theta' = \frac{6^2}{1.03} \left(\frac{0.2389}{0.1000} - 1.121 \right)$$

$$= 44.4$$

(Vergleichsweise $\theta'_{exp} = 55$)

Noch einfacher aber können diese Beziehungen aus der oberen Abbildung gewonnen werden.

Zusammenfassung.

Die bisher berichteten empirischen Formeln in der zweiten Periode der verlangsamten Trocknungsgeschwindigkeit wurden untersucht. Der Verfasser fand eine sehr einfache und bequeme empirische Formel, welche eine verhältmässig gute Übereinstimmung mit dem Experiment bietet.

(Eingegangen am 6. April 1937).