

Untersuchung über die Trocknung fester Stoffe II.

Von Saburo Kamei.

Inhalt.

- I. Der Grund für die verlangsamte Trocknungsgeschwindigkeit.
- II. Die Feuchtkugel- und Proben temperatur.
- III. Die Trocknung von Ton.
 1. Beziehung zwischen der Trocknungsgeschwindigkeit und der Richtung der Luft.
 2. Beziehung zwischen der Trocknungsgeschwindigkeit und dem Mischungsverhältnis von Quarz und Feldspat mit Kaolin.
 3. Beziehung zwischen der Trocknungsgeschwindigkeit und der Korngrösse des mit Kaolin gemischten Quarzes.
4. Beziehung zwischen der Trocknungsgeschwindigkeit und den Arten der Tonerde.
5. Beziehung zwischen der Trocknungsgeschwindigkeit und der Dicke der Probe.
6. Beziehung zwischen der Trocknungsgeschwindigkeit und den in Kaolin enthaltenen Flüssigkeitsarten.
7. Trocknung der Tonproben.
8. Oberflächenkoeffizient des Tones bei der Trocknung.
9. Kritischer Wassergehalt des Tones bei der Trocknung.
- IV. Die Trocknung der Papierstoffe.
- V. Die Trocknung der Seife.
- VI. Die Trocknung des Holzes.

I. Der Grund für die verlangsamte Trocknungsgeschwindigkeit.

Bei der Trocknung fester Stoffe bemerkt man, dass die Trocknungsgeschwindigkeit nicht bis zum Schluss beständig ist, sondern jenseits der Grenze eines gewissen Feuchtigkeitsgehaltes auf einmal abnimmt. Folgende Tatsachen könnten möglicherweise den Grund für die Verlangsamung der Trocknungsgeschwindigkeit abgeben.

- a. Die Erniedrigung des Dampfdruckes auf Grund des verringerten Wassergehaltes der Probe.

Es ist eine bekannte Tatsache, dass der Dampfdruck der Probe, infolge der Verminderung ihres Wassergehaltes, sinkt. Wäre jedoch die Erniedrigung des Dampfdruckes der einzige Grund für die Herabsetzung der Trocknungsgeschwindigkeit,

so müssten der kritische Punkt der Dampfdrucksenkung und der Verlangsamung der Trocknungsgeschwindigkeit zusammenfallen. Bei dem Versuche mit Tonerde und Papierstoff beginnt aber die Verlangsamung der Trocknungsgeschwindigkeit viel schneller als die Verminderung des Dampfdruckes, wie in Abb. 1 gezeigt ist. Infolgedessen ist die Dampfdruckerniedrigung nicht der einzige Grund für die Verlangsamung der Trocknungsgeschwindigkeit.

- b. Das Verschwinden des Kontraktionswassers und die Kontraktion der Probe.

Die Oberfläche der Probe wird durch die Kontraktion, die der verdampften Menge des Kontraktionswassers gleich ist, kleiner. Die Trocknungskontraktion der Tonerde hört über den kritischen Punkt hinaus ganz auf, die des Holzes dagegen beginnt erst an diesem Punkt und dauert bis zum Ende der Trocknung. Daher kann auch die Kontraktion nicht der einzige Grund der verlangsamten Trocknungsgeschwindigkeit sein.

- c. Die Verkleinerung der wirksamen Oberfläche infolge des Auftretens von immer grösser werdenden, bereits trockenen Oberflächenteilen.

Bei der Verminderung des Wassergehaltes trocknet ein kleiner Teil der Oberfläche. W. K. Lewis¹⁾ zeigt, dass die feuchte und wirksame Oberfläche dem Wassergehalt der Probe proportional ist, welches auch eine der Ursachen der verlangsamten Trocknungsgeschwindigkeit ist.

- d. Die Übergänge beim Trocknungsmechanismus.

Im Verlaufe der Trocknung verringert sich der Feuchtigkeitsgehalt und der Trocknungsmechanismus geht oft von I_A in einen andern, I_B oder II , über. Wird der Widerstand, infolge eines verringerten Wassergehaltes der Probe, gegen die Diffusion im Innern grösser, so diffundiert das Wasser zuerst in flüssiger Form bis zu einer gewis-

Abb. 1.

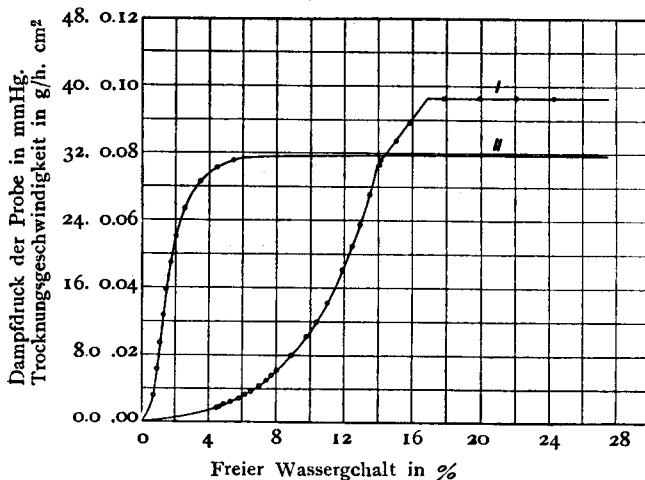
Versuchsnummer 94 C

Probe: Minokaolin: Kawachifeldspat = 5 : 5

Trocknungsbedingungen (30°C, 30%, 2.14 m/sek.)

Kurve I. Trocknungsgeschwindigkeit

„ II. Dampfdruck der Probe.



1) Walker, Lewis and McAdams: Principle of Chem. Eng. p. 518.

sen Stelle im Innern des Körpers, verdampft dort und diffundiert in Dampfform von dieser Stelle bis an die Oberfläche des Körpers; dann wird es von dort durch das trocknende Medium abgeführt.

Bei dem Mechanismus I_B verdampft das Wasser noch an der Oberfläche, obwohl der Widerstand gegen die Diffusion gross ist. Daher wird die zur Verdampfung nötige Wärme in diesem Falle durch die Oberflächenluftschicht dem Körper übertragen und die Wärmeübergangszahl bleibt unverändert. Aber bei dem Mechanismus II muss die Wärme bis zum verdampfenden Punkte im Innern des Körpers übertragen werden, wodurch die Wärmeübergangszahl kleiner wird. Abb. 2 und 3 zeigen diese Beziehungen zwischen Trocknungsgeschwindigkeit und Wärmeübergangszahl.

Die Trocknungsgeschwindigkeit bei Mechanismus I_A wird von der Dicke der Probe nicht beeinflusst, aber die von I_B und auch II stehen im umgekehrten Verhältnis zu der Probendicke.

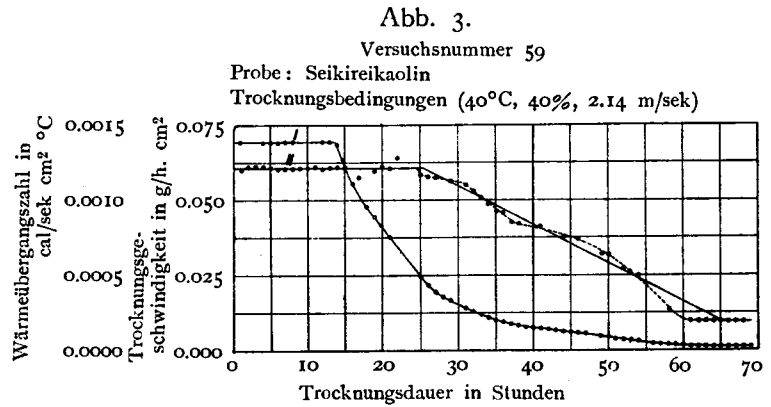
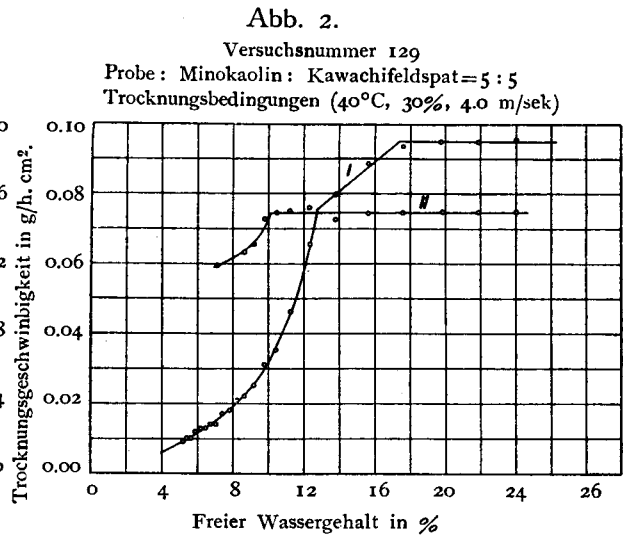
Durch folgende charakteristische Eigenschaften kann man die verschiedenen Stufen verlangsamer Trocknungsgeschwindigkeit von einander unterscheiden.

Trocknungsmechanismus	Die erste Periode verlangsamer Trocknungsgeschw.		Die zweite Periode verlangsamer Trocknungsgeschw.	
	I_A	I_B	I_B	II
Verdampfungsstelle	Oberfläche des Körpers	Oberfläche des Körpers	Oberfläche des Körpers	Körperinneres
Hauptfaktor der Trocknung	Oberflächenverdampfung	Innendiffusion	Innendiffusion	Innendiffusion
Wärmeübergangszahl	unverändert	unverändert	unverändert	verkleinert
Probendicke und Trocknungsgeschwindigkeit	kein Einfluss	umgekehrt proportional	umgekehrt proportional	umgekehrt proportional

II. Die Feuchtkugel- und Probentemperatur.

Die Temperatur der Probe, obwohl mit genügend Wasser gefeuchtet, ist doch ein wenig höher, als die Feuchtkugeltemperatur der Luft. Abb. 4 z.B. zeigt, dass die Probentemperatur 30.1°C ist, während die Feuchtkugeltemperatur 27.9°C beträgt. Der Grund der Temperaturerhöhung liegt vielleicht darin, dass die Wärme durch den Behälter der Probe übertragen und von der Wand des Trockners strahlt, wobei Behälter sowie Trockner, beide Trockenkugeltemperatur aufweisen.

Diese Beziehungen wurden experimentell genau nachgeprüft. Feststehende Tatsache ist, dass die Temperatur der Feuchtkugel fällt, wenn die über der Kugel strömende Luft an Geschwin-



digkeit zunimmt. Eine ganz ähnliche Erscheinung findet sich bei der Trocknung fester Stoffe. Je schneller die Geschwindigkeit der Luft wird, desto stärker sinkt die Temperatur der Probe, wie die folgenden, mit Tonerden gemachten Versuche zeigen.

Versuchsnummer	Luftgeschwindigkeit m/sek	Probentemperatur $^\circ\text{C}$
119	0.50	28.4
120	1.01	27.9
121	1.49	27.1
122	2.15	26.7
Feuchtkugeltemperatur		2.52

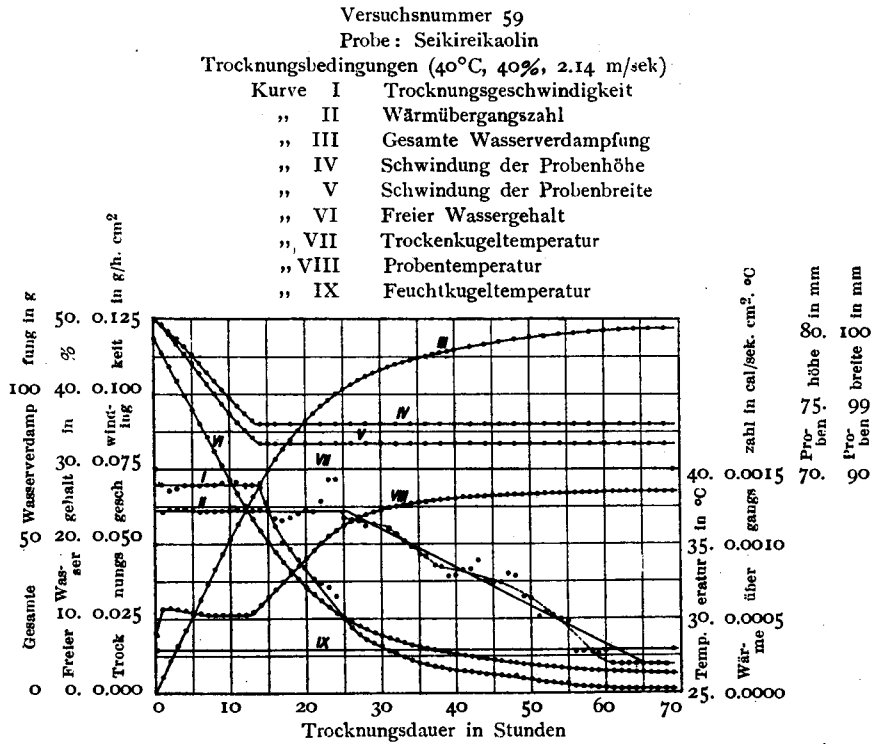
III. Die Trocknung von Ton.

1. Beziehung zwischen der Trocknungsgeschwindigkeit und der Richtung der Luft.

Ausser der Geschwindigkeit der Luft hat die Richtung derselben einen grossen Einfluss auf die Trocknungsgeschwindigkeit fester Stoffe. Letztere Beziehung wurde hier an dem Tone untersucht.

Zu den Versuchen wurden Mino-Kaolin und Kawachi-Feldspat verwandt. Über die Methode bei Ausführung des Experimentes wurde schon in der

Abb. 4.



letzten Mitteilung gesprochen. Die Probe dieses Versuches ist der Länge, Höhe und Dicke nach $5 \times 8 \times 3$ cm; da fünf Seiten der Probe—oben und unten, rechts und links und auch hinten—mit Stanniol bedeckt sind, erfolgt die Verdampfung nur aus einer zu der Luft in bestimmter Richtung aufgestellten Oberfläche.

Gemäss der Flüssigkeitsdynamik strömt die Flüssigkeit in Wirbeln, und keine parallelen Stromfäden sind mehr vorhanden, wenn die Geschwindigkeit der Flüssigkeit den kritischen Wert übersteigt. Nach Reynolds ist der kritische Wert für Luft bei der vom Verfasser gebrauchten Versuchsapparatur und -temperatur auf ca. 0.3 m/sek berechnet. Also ist es fast unmöglich, eine Luftströmung, die eine genau bestimmte Richtung an der Oberfläche der festen Stoffe innehält, zu erhalten. Aber bei dem Tunneltrockner des Verfassers strömt die Luft, obgleich sie sich in turbulenter Strömung befindet, doch im ganzen in der Längsrichtung des Tunnels.

Die Probe wurde gegen diese Luftströmung in den Richtungen von 180, 90, 45 bzw. 0²⁾ Grad aufgestellt und die Beziehung zwischen der Trocknungsgeschwindigkeit und der Richtung der Luft untersucht.

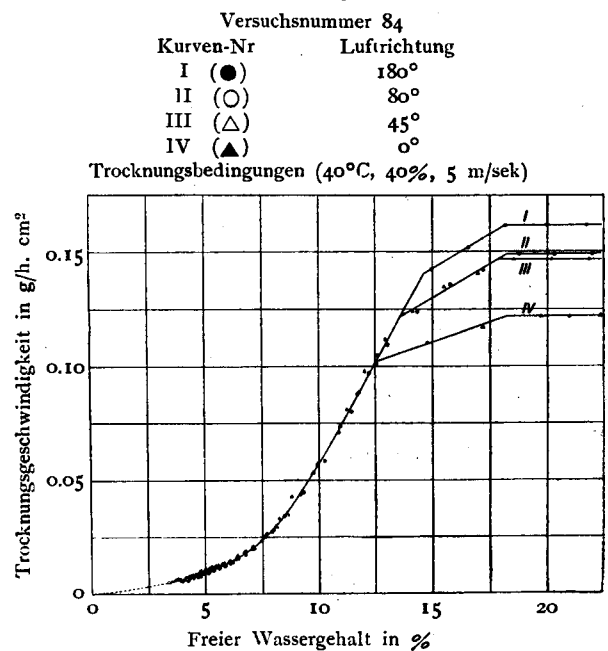
Tabelle 1 stellt das Versuchs- und Rechnungsergebnis von dem 102. Versuche dar.

In Abb. 5, 6 und 7 findet man die Versuchsergebnisse von Versuch 84, 102 bzw. 115 dargestellt. Dabei gab man die Trocknungsgeschwin-

digkeit als Ordinate und den freien Wassergehalt als Abszisse wieder.

Aus der Zeichnung ersieht man, dass die Luft den grössten Einfluss bei der Richtung von 180° und den kleinsten bei der Richtung von 0° hat. In einer Richtung von 90° und 45° ist die Einwirkung der Luft mittelstark und in beiden Fällen fast die gleiche.

Abb. 5.



2) Die Luft stösst an die Rückseite der verdampfenden Oberfläche der Probe-

Tabelle 1. Versuchsnummer 102.

Probe : Mino-Kaolin : Kawachi-Feldspat = 5 : 5
 Probenmasse : 8 × 5 × 2 cm. Lufttemperatur : 30°C.
 Relative Feuchtigkeit : 60%. Luftgeschwindigkeit : 4 m/sek.

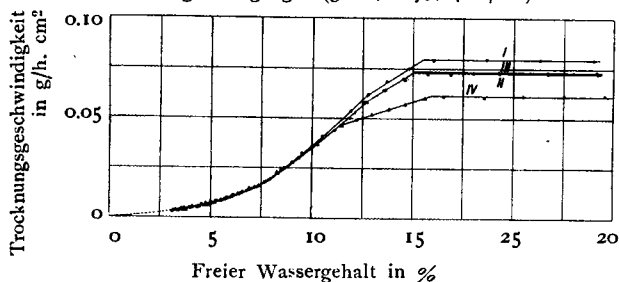
Probe	Richtung der Luft	Gewicht des wasserfreien Materials
A	180°	118.08
B	90°	118.305
C	45°	119.31
D	0°	120.53

Zeitdauer in h.	Gewichtabnahme in g/h				Trocknungsgeschwindigkeit in g/cm ² . h.				Freier Wassergehalt in g							
													in %			
	A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D
0									31.51	31.55	31.78	32.12	26.68	26.65	26.60	26.63
1	3.17	2.90	2.92	2.48	.0793	.0725	.0730	.0620	28.34	28.65	28.86	29.64	24.00	24.23	24.20	24.70
2	3.16	2.89	2.92	2.47	.0790	.0723	.0730	.0618	25.18	25.76	25.94	27.17	21.35	21.75	21.75	22.62
3	3.16	2.89	2.91	2.47	.0790	.0723	.0728	.0618	22.02	22.87	23.03	24.70	18.67	19.33	19.30	20.52
4	3.10	2.89	2.84	2.35	.0775	.0723	.0710	.0588	18.92	19.98	20.19	22.35	16.03	16.88	16.90	18.54
5	2.72	2.77	2.74	2.43	.0680	.0693	.0685	.0608	16.20	17.21	17.45	19.92	13.72	14.54	14.62	16.53
6	2.13	2.31	2.30	2.27	.0533	.0578	.0575	.0568	14.07	14.90	15.15	17.65	11.88	12.60	12.70	14.64
7	1.61	1.72	1.85	2.05	403	430	463	513	12.46	13.18	13.30	15.60	10.55	11.13	11.13	12.94
8	1.28	1.38	1.43	1.80	320	345	358	450	11.18	11.80	11.87	13.80	9.48	9.98	9.95	11.46
9	0.96	1.09	1.12	1.44	240	273	280	360	10.22	10.71	10.75	12.36	8.66	9.06	9.01	10.25
10	.76	.86	.90	1.19	190	215	225	298	9.46	9.85	9.85	11.17	8.01	8.32	8.25	9.27
11	.65	.71	.70	.98	163	178	175	245	8.81	9.14	9.15	10.19	7.46	7.72	7.66	8.46
12	.55	.59	.60	.74	138	148	150	185	8.26	8.55	8.55	9.45	7.00	7.23	7.16	7.84
13	.51	.52	.52	.61	128	130	130	153	7.75	8.03	8.03	8.84	6.57	6.78	6.73	7.34
14	.43	.45	.47	.58	108	113	118	145	7.32	7.58	7.56	8.26	6.20	6.41	6.33	6.86
15	.39	.40	.39	.48	.0098	100	.0098	120	6.93	7.18	7.17	7.78	5.87	6.07	6.01	6.46
16	.33	.35	.35	.43	83	.0088	88	108	6.60	6.83	6.82	7.35	5.59	5.77	5.71	6.10
17	.32	.32	.32	.38	80	80	80	.0095	6.28	6.51	6.50	6.97	5.32	5.50	5.45	5.79
18	.31	.28	.28	.34	78	70	70	85	5.97	6.23	6.22	6.63	5.06	5.26	5.21	5.50
19	.26	.28	.27	.31	65	70	68	78	5.71	5.95	5.95	6.32	4.84	5.03	4.99	5.25
20	.24	.24	.23	.30	60	60	58	75	5.47	5.71	5.72	6.02	4.64	4.83	4.79	5.00
21	.22	.21	.22	.27	55	53	55	68	5.25	5.50	5.50	5.75	4.45	4.65	4.61	4.77
22	.21	.21	.20	.22	53	53	50	55	5.04	5.29	5.30	5.53	4.27	4.47	4.44	4.59
23	.19	.18	.20	.22	48	45	50	55	4.85	5.11	5.10	5.31	4.11	4.32	4.27	4.41
24	.18	.18	.18	.19	45	45	45	48	4.67	4.93	4.92	5.12	3.96	4.17	4.12	4.25
25	.17	.17	.17	.19	43	43	43	48	4.50	4.76	4.75	4.93	3.82	4.02	3.98	4.09
26	.15	.16	.16	.18	38	40	40	45	4.35	4.60	4.59	4.75	3.69	3.89	3.85	3.94
27	.15	.15	.14	.17	38	38	35	43	4.20	4.45	4.45	4.58	3.56	3.76	3.73	3.80
28	.14	.15	.14	.17	35	38	35	43	4.06	4.30	4.31	4.41	3.44	3.64	3.62	3.66
29	.13	.15	.14	.16	33	38	35	40	3.93	4.15	4.17	4.25	3.33	3.51	3.50	3.53
30	.13	.14	.14	.25	33	35	35	63	3.80	4.01	4.03	4.00	3.22	3.39	3.38	3.32
31	.11	.14			28	35			3.69	3.87			3.13	3.27		

Abb. 6.

Versuchsnummer 120
 Kurven-Nr. Luftichtung
 I (●) 180°
 II (○) 90°
 III (△) 45°
 IV (▲) 0°

Trocknungsbedingungen (30°C, 60%, 4 m/sek)

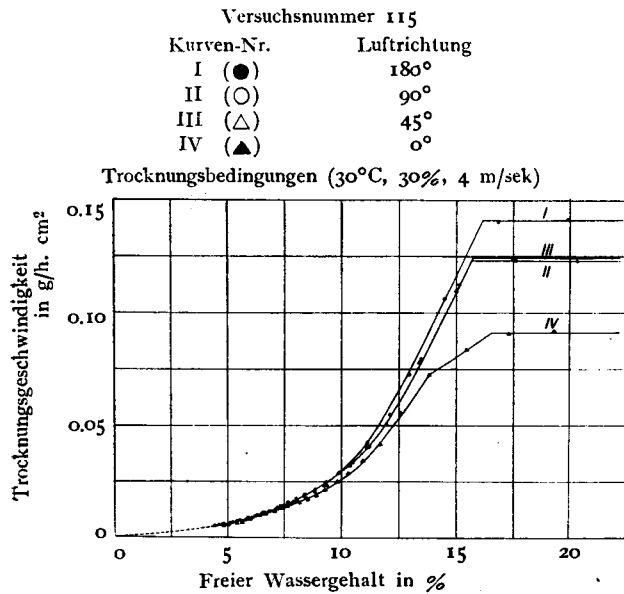


Wie nach den vorhergehenden Untersuchungen leicht zu erwarten ist, wird die Trocknung in der Periode konstanter Trocknungsgeschwindigkeit und auch im ersten Teil der Periode verlangsamer Trocknungsgeschwindigkeit durch die Richtung der Luft beträchtlich beeinflusst. Im zweiten Teil verlangsamer Trocknungsgeschwindigkeit wirken dagegen die Luftbedingungen sehr wenig oder gar nicht ein.

Während noch niemand die Beziehung zwischen der Trocknungsgeschwindigkeit fester Stoffe und Richtung der Luft untersuchte, hat W. H. Carrier³⁾ den Einfluss der Luftgeschwindigkeit undrichtung zur Verdampfungsgeschwindigkeit aus dem freien Wasserspiegel folgendermassen bestimmt : die Richtung der Luft senkrecht zur Wasserober-

3) Ind. Eng. Chem., 1921, 13, 432.

Abb. 7.



fläche hat doppelt so grossen Einfluss auf die Verdampfung wie parallel. Auf Grund dieser Erklärung müsste man denken, dass durch die Aufrührung mittels der Luftströmung senkrecht zur Oberfläche die Oberflächenverdampfung besonders gefördert wird. Bei der Trocknung fester Stoffe zeigte sich aber im Gegenteil ein ganz anderer Mechanismus der Wasserverdampfung, nämlich der ohne Aufrührung des Wasserspiegels, wobei überdies die Oberflächenverdampfung fester Stoffe durch die innere Diffusion stets mehr oder weniger beeinflusst wird.

Verdampft das Wasser an der Oberfläche des festen Körpers, so findet eine Diffusion des Wassers von innen nach aussen statt.

Ein stark auf die Oberfläche wirkender Luftdruck würde sich bis ins Innere des festen Körpers erstrecken und die Diffusion im Innern beherrschen.

Aus diesem Grund übt der zur Oberfläche parallele Wind einen grösseren Einfluss auf die Innendiffusion und folglich auch die davon abhängige Oberflächenverdampfung oder Trocknungsgeschwindigkeit als der in einem Winkel von 90° oder 45° gerichtete Wind.

Die Verschiedenheit zwischen den Trocknungsgeschwindigkeiten der verschiedenen Lufrichtungen ist aber gar nicht gross. Bei den obigen Versuchen beträgt der Unterschied nur 10 bis 30%.

2. Die Beziehung zwischen der Trocknungsgeschwindigkeit und dem Mischungsverhältnis von Quarz und Feldspat mit Kaolin.

Bei der Zubereitung der Tonmassen, setzt man dem Ton eine bestimmte Menge Magerungsmittel zu, wie Quarz oder Feldspat, um die Plastizität zu regulieren, die Trocknungs- und Feuerungsschwindungen zu verringern, und Trocknungsrisse zu

verhindern. Bei der Mischung mit den Magerungsmitteln, müssen die Porosität der Tonwaren vermehrt und ihre Trocknungsgeschwindigkeit beschleunigt werden.

Hier ist die Beziehung zwischen der Trocknungsgeschwindigkeit und dem Mischungsverhältnisse von Quarz sowie Feldspat mit Kaolin untersucht worden.

Mischungsverhältnisse :

Für den Versuch, setzt der Verfasser dem Mino-Kaolin, Kawachi-Quarz und Kawachi-Feldspat in folgenden Trockengewichtprozenten zu :

Tabelle 2.

Versuchsnummer	Mino-Kaolin %	Kawachi-Quarz %	Kawachi-Feldspat %
29	100	—	—
34	90	10	—
35	80	20	—
36	70	30	—
37	60	40	—
38	50	50	—
39	40	60	—
40	30	70	—
41	20	80	—
42	80	—	20
43	60	—	40
44	50	—	50
45	40	—	60
46	20	—	80
47	60	20	20

Alle Experimente wurden unter folgenden Trocknungsbedingungen durchgeführt :

- Lufttemperatur : 40°C
- Relative Luftfeuchtigkeit : 40%
- Luftgeschwindigkeit : 2.14 m/sek

Die Ergebnisse des Experimentes.

Abb. 8 und 9 stellen die Beziehung zwischen der Trocknungsgeschwindigkeit und dem freien Wassergehalt von 29-41 bzw. 42-46 Versuchen dar.

Wie in der vorliegenden Mitteilung schon erwähnt wurde, ist die Trocknungsgeschwindigkeit, während der Periode konstanter Trocknungsgeschwindigkeit unter gleichen Trocknungsbedingungen unabhängig von den Materialarten und ihren Eigenschaften.

Im Bereich des Versuchsfehlers (d.h. ± 0.002 g/cm². h.) fallen die horizontalen Teile der Abb. 8 und 9 aufeinander, was zeigt, dass die konstanten Trocknungsgeschwindigkeiten der Mischungen Kaolin und Quarz oder Kaolin und Feldspat in dem Verhältnisse von 0 bis 80% ganz gleich sind.

Bei dem kritischen Wassergehalt vermindert sich die Trocknungsgeschwindigkeit plötzlich. In

den leicht diffundierbaren Materialien, diffundiert das Wasser ganz schnell bis zur Oberfläche; diese bleibt sehr lange feucht, während dieses Prozesses herrscht die Periode der konstanten Trocknungsgeschwindigkeit.

In Abb. 8 hat das Kaolin ohne Quarz einen kritischen Wassergehalt von 23.4% und das mit 80% Quarz einen kritischen Wassergehalt von 11.8%, was in Tabelle 3 nochmals genau gezeigt

ist. In der ersten Periode verlangsamer Trocknungsgeschwindigkeit, welche dem Trocknungsmechanismus I angehört, bildet die oberflächliche Verdampfung den Hauptfaktor, wogegen der Widerstand der inneren Diffusion sehr gering ist.

Deshalb kann die innere Struktur der verschiedenen Mischungsverhältnisse von Kaolin und Quarz in dieser Periode keinen Einfluss auf die Trocknungsgeschwindigkeit haben.

Abb. 8.

Kurven-Nr.	Versuchs-Nr.	Kaolin : Quarz
I	41	20 : 80
II	40	30 : 70
III	39	40 : 60
IV	38	50 : 50
V	37	60 : 40
VI	36	70 : 30
VII	35	80 : 20
VIII	34	90 : 10
IX	29	100 : 0

Trocknungsbedingungen (40°C, 40%, 2.14 m/sek.)

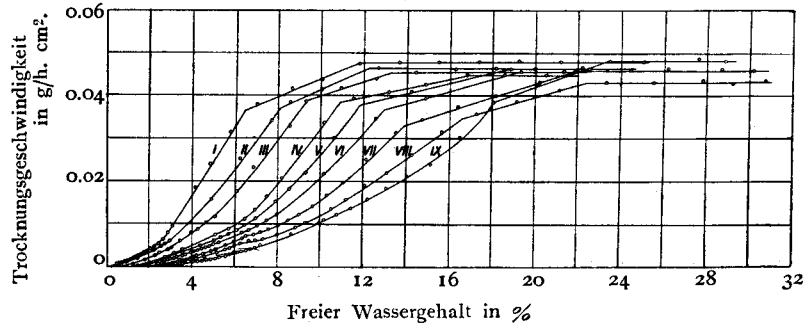
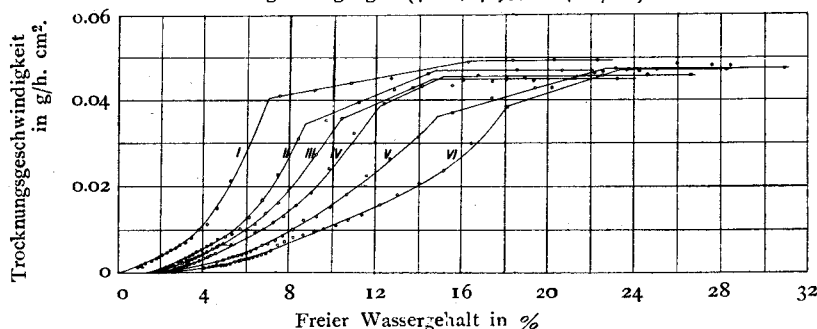


Abb. 9.

Kurven-Nr.	Versuchs-Nr.	Kaolin : Feldspat
I	46	20 : 80
II	45	40 : 60
III	44	50 : 50
IV	43	60 : 40
V	42	80 : 20
VI	29	100 : 0

Trocknungsbedingungen (40°C, 40%, 2.14 m/sek.)



Die Trocknungskurven, wie sie Abb. 8 und 9 zeigen, sind in der ersten Periode verlangsamer Trocknungsgeschwindigkeit fast alle einander parallel, was ein Beweis für die oben genannte Erscheinung ist. In der zweiten Periode verlangsamer Trocknungsgeschwindigkeit, welche dem Trocknungsmechanismus I_b oder II angehört, spielt die innere Diffusion die Hauptrolle, wogegen der

Widerstand der oberflächlichen Verdampfung sehr gering ist.

Deshalb üben die inneren Strukturen der verschiedenen Gemische von Kaolin und Quarz oder von Kaolin und Feldspat in dieser Periode einen grossen Einfluss auf die Trocknungsgeschwindigkeit. Je höher der Prozentsatz an Quarz oder Feldspat im Kaolin, d.h. je gröber und poröser die Struktur

Tabelle 3.

Versuchsnummer.	Kaolin : Quarz Mischungs- verhältnis in %	Anfangs- Wassergehalt in %	Kritischer Wassergehalt in %	Trocknungsdauer bis zum kritischen Wassergehalt in h (a)	Trocknungsdauer bis 4% Wasser- gehalt in h. (b)	b-a
29	100 : 0	51.50	23.4	9.½	50	41.½
34	90 : 10	45.38	22.5	9.½	48	38.½
35	80 : 20	40.45	22.0	8.0	42	34.0
36	70 : 30	35.17	19.8	7.0	32	25.0
47	60 : 40	32.80	18.8	6.½	28	21.½
38	50 : 50	28.58	16.8	6.0	23	17.0
39	40 : 60	26.23	13.3	6.½	17	10.½
40	30 : 70	22.61	12.2	5.½	15	9.½
41	20 : 80	23.19	11.8	6.0	12	6.0

ist, desto grösser ist die Trocknungsgeschwindigkeit in dieser Periode.

Nach der Tabelle 3 kann man den Unterschied betreffs des kritischen Wassergehaltes und der Trocknungsdauer bei den verschiedenen Gemischen mit einander vergleichen.

Die Trocknungsdauer von dem kritischen Wassergehalt an bis zu 4% Wassergehalt ist in dem Bereiche von 6 bis 41.5 Stunden umgekehrt proportional der Quarzmenge im Kaolin.

und Quarz konstant beibehalten, aber die Korngrösse des mit Kaolin gemischten Quarzes wie folgt verändert.

Die Feinheiten des Quarzes.

Probennummer	Sieb mit Maschenweite in cm ²
16200
2 6200-3500
33500-1550
41550- 560
5 560- 190
6 190- 62

Abb. 10.

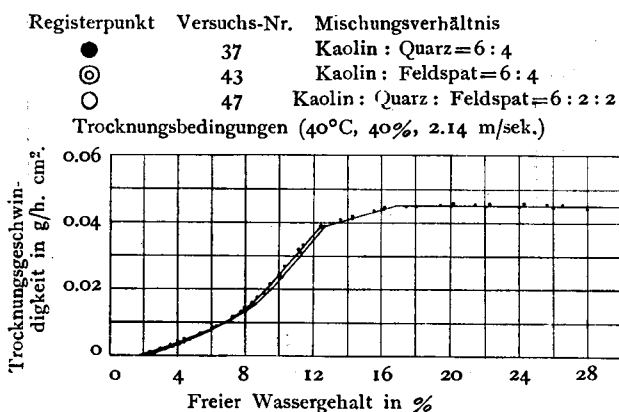


Abb. 10. zeigt die Trocknungsgeschwindigkeiten folgender Gemische:

- Kaolin : Quarz=6 : 4
- Kaolin : Feldspat=6 : 4
- Kaolin : Quarz : Feldspat=6 : 2 : 2

Die drei Trocknungskurven fallen zusammen, also haben Quarz und Feldspat einen ganz gleichen Einfluss auf die Trocknungsgeschwindigkeit des Kaolins.

3. Beziehung zwischen der Trocknungsgeschwindigkeit und der Korngrösse des mit Kaolin gemischten Quarzes.

Über die Beziehung zwischen der Trocknungsgeschwindigkeit und dem Mischungsverhältnisse von Quarz sowie Feldspat wurde berichtet. Hier wurde das Mischungsverhältnis 2 : 8 von Kaolin

Abb. 11 und 12 bieten die Ergebnisse der Experimente. Je kleiner die Feinheit des Quarzes ist, desto langsamer ist die Trocknungsgeschwindigkeit. Aber der Einfluss der Korngrösse des Quarzes auf die Trocknungsgeschwindigkeit ist nicht so gross, wie der des Mischungsverhältnisses. Abb. 13 zeigt die Trocknungsgeschwindigkeit des in Kaolin nicht eingemischten reinen Quarzes von verschiedener Korngrösse, wobei sich ein ganz anderes Resultat als bei dem Kaolin vermischten Quarz ergibt. Demnach ist die konstante Trocknungsgeschwindigkeit des Quarzes kleinster Korn-

Abb. 11.

Kurven-Nr.	Versuchs-Nr.	Korngrösse des Quarzes	Maschenweite in cm ²
IV	116-A	< 6200	
III	-B	3500-1550	
II	-C	1500-560	
I	-D	190-62	

Probe: Minokaolin : Kawachi Quarz=2 : 8
 Trocknungsbedingungen (40°C, 40%, 2.14 m/sek.)

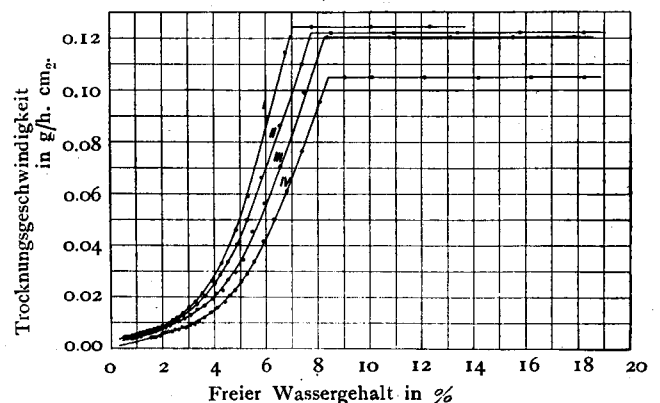


Abb. 12.

Kurven-Nr.	Versuchs-Nr.	Korngröße des Quarzes
I	128-D	190-62
II	128-B und C	560-190
III	128-A	1550-560
		6200-3500

Maschenweite in cm²
 Probe: Minokaolin : Kawachi Quarz = 2 : 8
 Trocknungsbedingungen (40°C, 30%, 2.14 m/sek.)

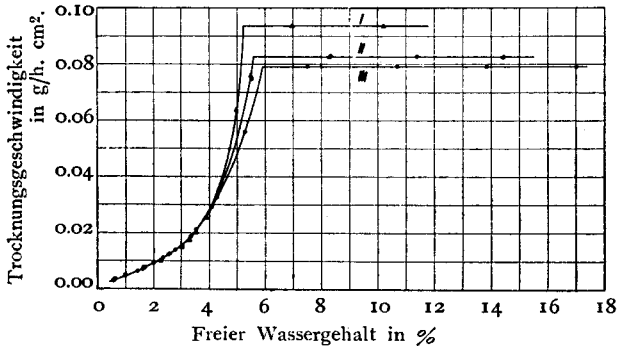


Abb. 13.

Kurven-Nr.	Versuchs-Nr.	Korngröße des Quarzes
I	133-C	290-62
II	-B	1550-560
III	-A	6200-3500

Maschenweite in cm²
 Probe: Kawachi Quarz
 Trocknungsbedingungen (40°C, 40%, 2.14 m/sek.)

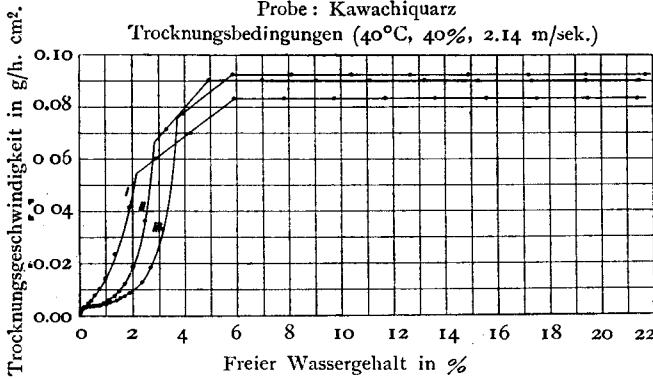


Abb. 14.

Kurven-Nr.	Versuchs-Nr.	Probe
I	26	Zettlitzkaolin
II	33	Seikireikaolin
III	29	Minokaolin

Trocknungsbedingungen (40°C, 40%, 2.14 m/sek)

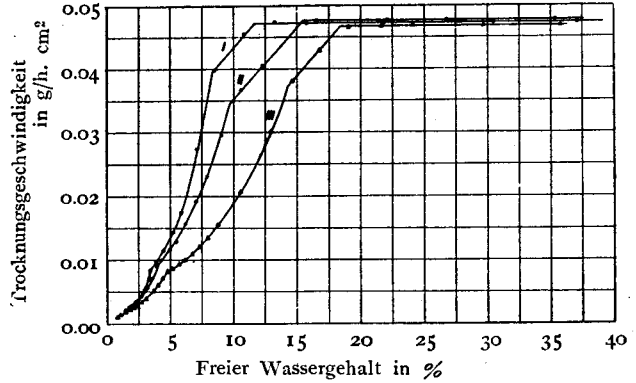


Abb. 15.

Kurven-Nr.	Versuchs-Nr.	Probe
I	31	Zettlitzkaolin
II	32	Seikireikaolin
III	30	Minokaolin

Trocknungsbedingungen (40°C, 60%, 2.14 m/sek)

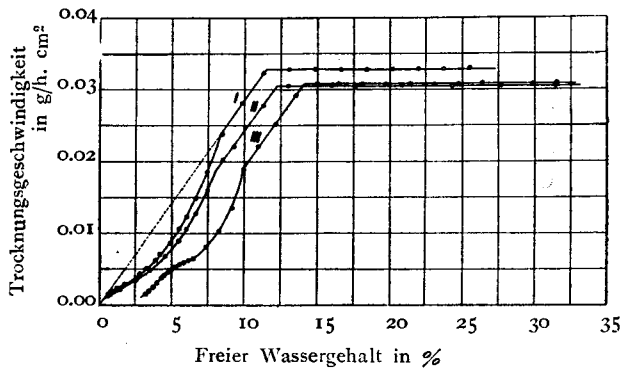
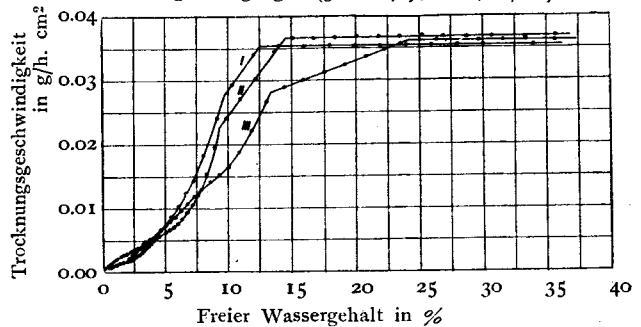


Abb. 16.

Kurven-Nr.	Versuchs-Nr.	Probe
I	28	Zettlitzkaolin
II	65	Seikireikaolin
III	67	Minokaolin

Trocknungsbedingungen (30°C, 40%, 2.14 m/sek)



größe am grössten. Bei verlangsamer Periode aber zeigen die beiden Fälle ein gleiches Resultat.

Für das reziproke Verhalten bei der konstanten Trocknungsgeschwindigkeit mit oder ohne Kaolin ist folgende Erklärung vielleicht zutreffend. Die Oberfläche der aus grossen Körnern bestehenden Probe ist so uneben, dass die vorspringenden Teile bald nach Beginn der Trocknung getrocknet sind und das Austreten des Wassers durch diese Teile von Innen her zweifellos sehr schwer ist. Bei der mit Kaolin gemischten Probe sind dagegen die vertieften Teile mit Kaolin ausgefüllt und die Oberfläche ist eben.

In der verlangsamen Periode, wo die innere Diffusion den Hauptfaktor der Trocknung ausmacht, übt die Unebenheit fast keinen Einfluss und die Trocknungsbeschaffenheit des Quarzes mit oder ohne Kaolin ist ganz gleich.

4. Beziehung zwischen der Trocknungsgeschwindigkeit und den Arten der Tonerde.

Die bei den Versuchen verwandten Tonerden sind Zettlitz-Kaolin, Mino-Kaolin und Seikirei-

Kaolin. Diese Kaoline sind von sehr ähnlicher Zusammensetzung und Feinheit, doch ist die Trocknungsbeschaffenheit, besonders in der verlangsamen Periode, nicht immer ganz dieselbe, wie Abb. 14, 15 und 16. Der kritische Wasser-

gehalt ist 11.70% bei Zettlitz-Kaolin, 15.50% bei Seikirei-Kaolin und 18.50% bei Mino-Kaolin. Man kann also sagen, dass jedes Kaolin seine charakteristische Trocknungskurve besitzt.

5. *Beziehung zwischen der Trocknungsgeschwindigkeit und der Dicke der Probe.*

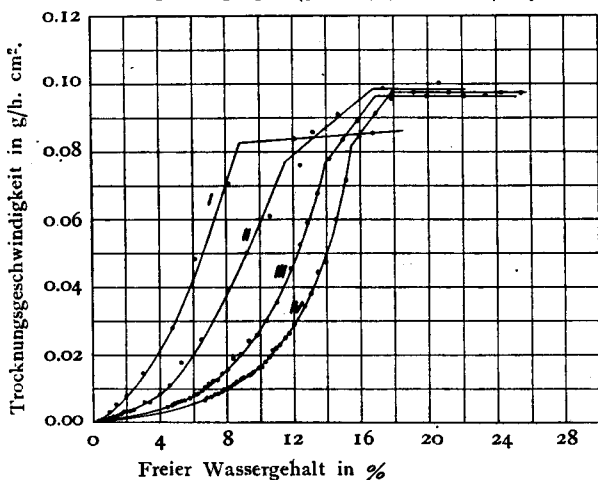
Die Erfahrung zeigt uns, dass die Trocknungszeit desto länger dauert, je dicker die Probe ist. Doch eine genaue Erklärung hierfür fehlt noch. Es wurde darum die Beziehung zwischen der Trocknungsgeschwindigkeit in den konstanten sowie auch verlangsamten Perioden und der Dicke der Probe untersucht.

Abb. 17 zeigt die Versuchsergebnisse, wobei man die Dicke der Probe in vierfacher Weise veränderte nämlich Material von 6, 3, 1 bzw. 0.5 cm Dicke benutzte, aber alle anderen Bedingungen konstant liess.

Abb. 17.

Kurven-Nr.	Versuchs-Nr.	Probendicke
IV	94-A	6 cm
III	-C	3
II	-D	1
I	-E	0.5

Probe: Minokaolin: Kawachifeldspat = 5 : 5
Trocknungsbedingungen (30°C, 30%, 2,14 m/sek)



Während der konstanten Periode sind die Trocknungsgeschwindigkeiten der 4 Arten Proben unabhängig von der Dicke der Probe. Doch die Trocknungsgeschwindigkeit der verlangsamten Periode ist umso grösser, je dünner die Probe ist. In der zweiten Periode der Verlangsamung ist die Trocknungsgeschwindigkeit umgekehrt proportional der Dicke der Probe.

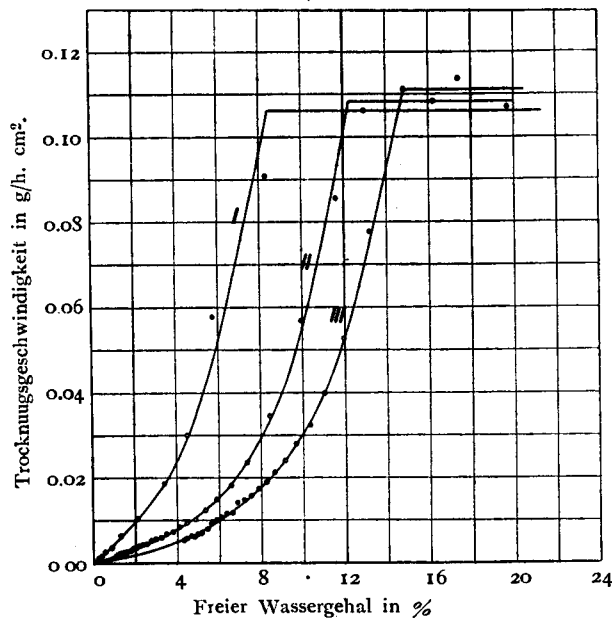
Abb. 18 zeigt ein weiteres Resultat bei Versuchen mit einer grösseren Luftgeschwindigkeit.

Auf Grund dieser Versuche kann man sagen, dass die Trocknungszeit der konstanten Periode proportional der Probendicke, und die der ver-

Abb. 18.

Kurven-Nr.	Versuchs-Nr.	Probendicke
III	118-A	7 cm
II	-B	3
I	-C	1

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



langsamten Periode proportional dem Quadrat derselben ist.

6. *Beziehung zwischen der Trocknungsgeschwindigkeit und den in Kaolin enthaltenen Flüssigkeitsarten.*

Über die Trocknung, nämlich über den Wasserverdampfungsprozess fester Stoffe hat der Verfasser schon mehrere Mitteilungen veröffentlicht. Aber der Trocknungsmechanismus von anderen Flüssigkeiten als Wasser bei festem Stoffe ist bis jetzt noch von keinem Forscher untersucht worden. Trotzdem ist die Verdampfung von Alkohol, Benzol, Benzin und anderen Flüssigkeiten aus der Oberfläche von Zelluloid, Bakelit, Gummi usw. sehr bedeutsam.

In der Absicht, den Mechanismus, wenn auch nicht völlig, zu erklären, studierte der Verfasser die Verdampfung der folgenden 14 Flüssigkeiten aus Kaolin: Methylalkohol, Äthylalkohol, Benzol, Benzin, Toluol, Xylol, essigsaures Äthyl, essigsaures Amyl, Aceton, Tetrachlorkohlenstoff, Amylalkohol, Anilin, Nitrobenzol und Terpentinöl.

Die Verdampfung von Wasser aus dem freien Wasserspiegel wurde schon von W. H. Carrier, J. W. Hinchley und G. W. Himus und anderen Forschern untersucht. Über die Verdampfung von Flüssigkeiten ausser Wasser aus der freien Oberfläche aber gibt es nur eine Mitteilung von T. B. Hine⁴⁾. Er stellt einen mit zu verdampfender

4) Phy. Review, 1924, 24, 79.

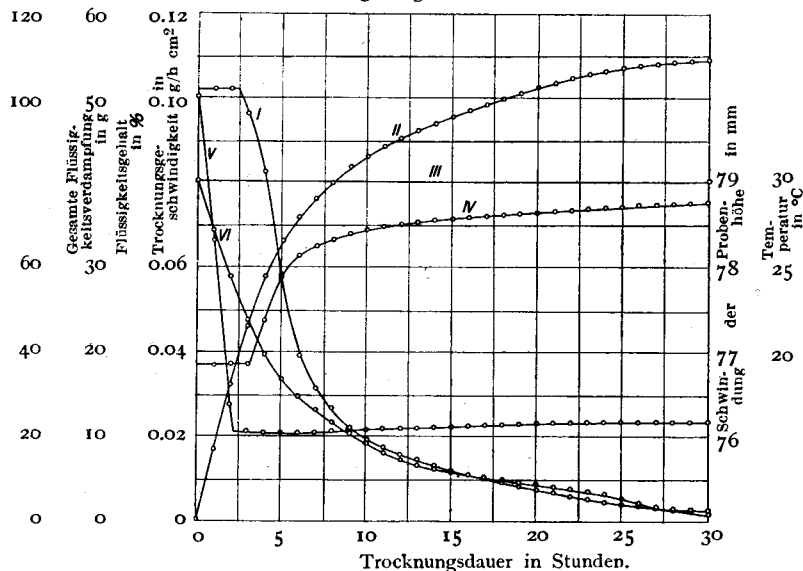
Tabelle 4.

Versuchsnummer 48.
 Trocknung von Äthylalkohol.
 Lufttemperatur 30°C. Relative Feuchtigkeit 40%.
 Luftgeschwindigkeit 1.02 m/sek, Probemasse $8 \times 10 \times 3$ cm,
 Gewicht des wasserfreien Materials 278.77 g.

Zeitdauer in h.	Ansteigen des Registrier- trommel- zeigers in mm/h.	Gewichts- abnahme in g/h.	Trocknungsge- schwindigkeit in g/h. cm ² .	Schwindung der Probe in cm		Trocknungs- oberfläche in cm ²	Temp. der Probe in °C	Flüssigkeitsgehalt	
				Breite	Höhe			in g	in %
0				10.00	8.000			111.78	40.12
1	19.3	15.610	0.1020	9.788	7.830	153.20	19.1	95.22	34.13
2	18.4	14.800	.1018	9.500	7.635	145.00	19.2	79.94	28.66
3	17.2	13.898	.0962	"	7.603	144.46	"	66.10	23.69
4	14.7	11.878	.0823	"	7.602	144.44	21.8	54.22	19.44
5	10.2	8.242	.0571	"	7.601	144.42	24.5	45.98	16.48
6	6.9	5.575	.0386	"	7.602	144.44	25.6	40.40	14.49
7	5.2	4.202	.0291	"	7.603	144.46	26.1	36.20	12.97
8	4.8	3.878	.0268	"	7.604	144.48	26.6	32.32	11.58
9	3.9	3.151	.0218	"	7.605	144.50	26.9	28.36	10.17
10	3.2	2.586	.0179	"	7.606	144.52	27.1	25.78	9.24
11	2.7	2.182	.0151	"	7.607	144.54	27.3	23.59	8.45
12	2.4	1.939	.0134	"	7.608	144.56	27.5	21.66	7.77
13	2.2	1.778	.0123	"	"	"	"	19.88	7.13
14	2.1	1.697	.0117	"	7.609	144.59	27.6	18.18	6.51
15	2.0	1.616	.0112	"	7.610	144.60	27.7	16.56	5.93
16	1.9	1.535	.0106	"	7.611	144.61	27.8	15.03	5.39
17	1.8	1.454	.0101	"	7.612	144.62	27.9	13.58	4.87
18	1.7	1.374	.0095	"	7.613	144.64	28.0	12.20	4.38
19	1.6	1.293	.0090	"	"	"	28.1	10.91	3.91
20	1.5	1.212	.0084	"	7.614	144.65	"	9.70	3.48
21	1.4	1.131	.0078	"	"	"	28.2	8.57	3.07

Abb. 19.

Versuchsnummer 48
 Seikirei-Kaolin : Äthylalkohol.
 Lufttemperatur 30°C, Luftgeschwindigkeit 1.01 m/sek.
 Kurve I Trocknungsgeschwindigkeit.
 " II Gesamte Flüssigkeitsverdampfung.
 " III Lufttemperatur.
 " IV Temperatur der Probe.
 " V Schwindung der Probe.
 " VI Flüssigkeitsgehalt.



Flüssigkeit gefüllten Teller innerhalb des langen Tunnels auf und beobachtet die Gewichtsabnahme durch Verdampfung des Tellerinhaltes ausserhalb des Tunnels. Für die gebrauchten vier Flüssigkeiten, nämlich Chlorbenzol, Metaxylol, Nitrobenzol und Toluol erhielt er das folgende Ergebnis

$$W = 0.354 + 0.792 u,$$

worin W die Verdampfungsgeschwindigkeit in $g\text{-mol/h. cm}^2 \text{ mmHg}$, u die Luftgeschwindigkeit in $m\text{/sek}$ bedeuten. Die Verdampfung der Flüssigkeit aus der freien Flüssigkeitsoberfläche durch die Luft ist nämlich proportional dem Molekulargewicht M dieser Flüssigkeit. W. K. Lewis und W. G. Whitman⁵⁾ wiesen nach, dass die Diffusionsgeschwindigkeit der Gase $(1/M)^n$ proportional sei, worin

$$n = 0 \text{ bis } 1 \text{ ist.}$$

Der Trocknungsmechanismus bei den oben genannten vierzehn Flüssigkeiten aus Seikirei-Kaolin oder Mino-Kaolin wurde untersucht. Das Kaolin wird, nach Trocknung im elektrischen Thermostat unter Erhitzung bis auf $100\text{--}105^\circ\text{C}$ und nach Kühlung dann im Exsiccator, mit einer der oben genannten Flüssigkeiten gemischt und über Nacht luftdicht stehen gelassen. Nachdem man diesen Ton am folgenden Tag wieder einige Male unter Zusatz einer kleinen Menge Flüssigkeit geknetet hat, bringt man den Ton in den Proberahmen.

Der mit Flüssigkeit-ausser-Wasser-geknetete Ton färbt sich dunkelbraun und ist sehr brüchig, besonders nach der Trocknung.

Tabelle 4 zeigt das Versuchs- und Berechnungsergebnis des 48. Versuches. Abb. 19 stellt graphisch die in Tabelle 4 enthaltenen Resultate dar.

Abb. 20.

Kurven-Nr.	Versuchs-Nr.	Flüssigkeitsart	Lufttemperatur 30°C	Luftgeschwindigkeit 1.01 m/sek.
I	60	Xylol		
II	49	Methylalkohol		
III	48	Athylalkohol		
IV	50	Benzin		
V	61	Essigsaures Amyl		

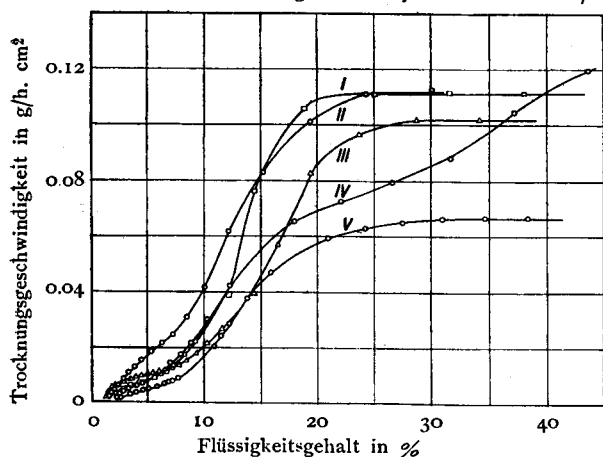


Abb. 20 und 21 zeigen die Resultate von dem 48.-63. Versuche. Die Flüssigkeiten, um die es sich in Abb. 20 handelt, verdampfen meistens etwas langsam und haben deutlich konstante und auch verlangsamte Trocknungsperioden. Die in

Abb. 21.

Kurven-Nr.	Versuchsnummer	Flüssigkeitsart	Lufttemperatur 30°C	Luftgeschwindigkeit 1.01 m/sek.
I	51	Benzol		
II	63	Tetrachlorkohlenstoff		
III	62	Essigsaures Athyl		
IV	52	Toluol		
V	53	Aceton		

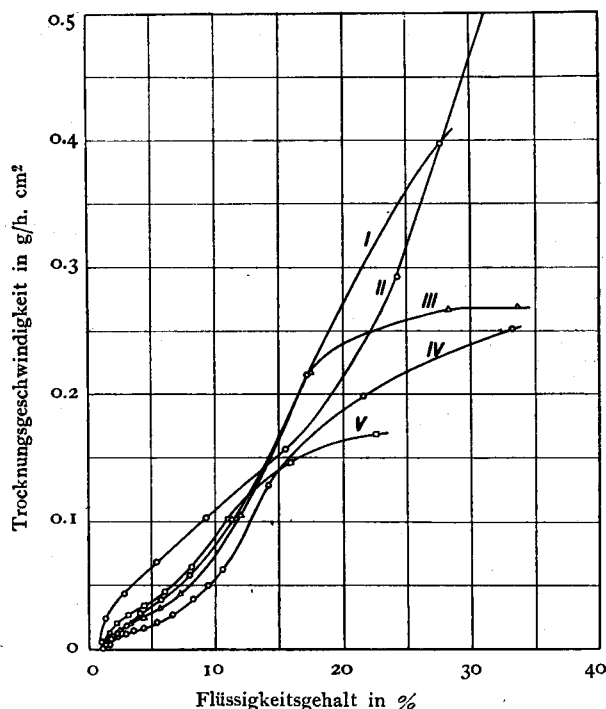
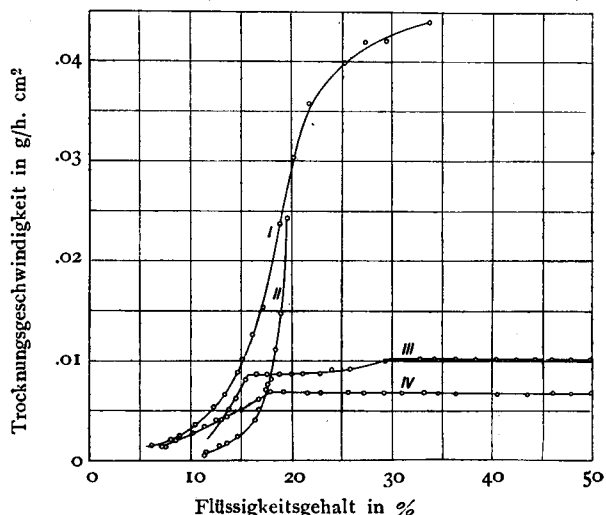


Abb. 22.

Kurven-Nr.	Versuchsnummer	Flüssigkeitsart	Lufttemperatur 30°C	Luftgeschwindigkeit 1.01 m/sek.
I	108	Amylalkohol		
II	106	Terpentinöl		
III	105	Anilin		
IV	107	Nitrobenzol		



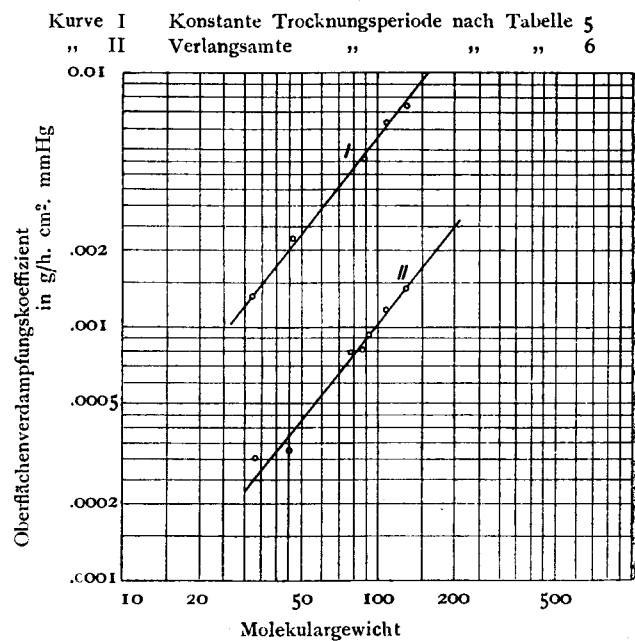
5) Ind. Eng. Chem. 1924, 16, 1215.

Abb. 21 dargestellten verdampfen dagegen sehr lebhaft und zeigen keine konstante Periode. Zwei von den in Abb. 22 wiedergegebenen Flüssigkeiten der 105.-108. Versuche verdampfen aussergewöhnlich langsam und zeigen eine sehr lange konstante Trocknungsperiode.

Aus diesen Resultaten kann man schliessen, dass alle Flüssigkeiten abgesehen von Wasser auch die zwei Trocknungsperioden, konstante und verlangsante, wie das Wasser zeigen. Die in Abb. 22 dargestellten haben eine sehr grosse Verdampfungsgeschwindigkeit und befinden sich, wenn sie geformt sind, schon nach dem kritischen Punkt in der verlangsamen Periode.

Weil diese Flüssigkeiten auch zwei Trocknungsperioden und sehr ähnliche Trocknungskurven zeigen, könnte ein ganz gleiches Formular zur Berechnung der Trocknungsgeschwindigkeit dieser Flüssigkeit gebraucht werden. Die Konstanten in der Gleichung aber müssen sorgfältig experimentell bestimmt werden. Der Verfasser vermutet, dass irgendeine Beziehung zwischen der Trocknungsgeschwindigkeit dieser Flüssigkeiten und ihrem Molekulargewichte bestehen muss. Er versuchte die Beziehung der Trocknungsgeschwindigkeit mit M^n oder $(1/M)^n$ in Descarteschem oder in logarithmischem Masstab auszudrücken. Die Kurve I in Abb. 23 zeigt die Beziehung zwischen dem in Tabelle 5 enthaltenen Oberflächenverdampfungskoeffizienten in der konstanten Periode und dem Molekulargewicht der Flüssigkeiten. Abgesehen von einigen Ausnahmen, stellt sie fast eine Gerade

Abb. 23.



dar. Lassen sich nicht mehrere Flüssigkeiten, ohne konstante Periode in Abb. 21, in derselben Weise vergleichen? Tabelle 6 enthält die Trocknungsgeschwindigkeit und den Oberflächenverdampfungskoeffizienten von 9 verschiedenen Flüssigkeiten, die in der verlangsamen Trocknungsperiode 10% Flüssigkeitsgehalt haben. Auch diese Beziehung stellt sich in Kurve II graphisch als eine Gerade dar. Zufällig verlaufen Kurve I und II parallel.

Tabelle 5.

Versuchsnummer	Flüssigkeitsart	Molekulargewicht	Trocknungsgeschwindigkeit in g/h. cm ²	Temperatur der Probe in °C	Sättigungsdruck in mmHg	Oberflächenverdampfungskoeffizient in g/h. cm ² mmHg
49	Methylalkohol	32	0.1117	18.0	85.50	.00131
48	Äthylalkohol	46	.1015	20.0	44.00	.00231
60	Xylol	107	.1104	24.4	17.50	.00632
61	Essigsäures Amyl	130	.0740	26.1	10.00	.0074
62	Essigsäures Äthyl	88	.2662	16.2	59.00	.00452

Tabelle 6.

Versuchsnummer	Flüssigkeitsart	Molekulargewicht	Trocknungsgeschwindigkeit bei dem 10% Flüssigkeitsgehalt in g/h. cm ²	Stunden vom Anfang	Temperatur der Probe in °C	Sättigungsdruck in mmHg	Oberflächenverdampfungskoeffizient in g/h. cm ² mmHg
49	Methylalkohol	32	0.041	6	24.75	125.5	.000327
48	Äthylalkohol	46	.0205	9	26.90	66.0	.000311
60	Xylol	107	.026	8	27.60	22.0	.0013
61	Essigsäures Amyl	130	.0168	13	28.30	12.0	.0014
62	Essigsäures Äthyl	88	.075	3.5	25.20	94.5	.000793
63	Tetrachlorkohlenstoff	154	.12	4	25.75	118.0	.001018
53	Aceton	58	.092	—	—	—	—
51	Benzol	78	.083	6	27.45	105.5	.000787
52	Toluol	92	.057	4	26.70	61.0	.000935

Den Dampfdruck der verschiedenen Flüssigkeiten wurde nach Landolt-Bernstein: Phy-tech. Tabellen, 1923, 5 Aufl. und International Critical Tables festgestellt. Weil im Verkauf befindliches Xylol ein Gemisch von Meta-, Ortho- und Para-Isomeren sein soll, ist ein Teil des Xylols bei 134-141°C rektifiziert worden, um die einzelnen Bestandteile in Prozent bestimmen zu können. Der Sättigungsdruck des Gemisches ist dann nach dem Raoult'schen Gesetz berechnet worden.

Weil der Oberflächenverdampfungskoeffizient und das Molekulargewicht, wie sie in Abb. 23 gezeigt sind, ein Geradenverhältnis im logarithmischen Massstab darstellen, können sie mit folgender Gleichung ausgedrückt werden.

$$a = \frac{I}{A} \cdot \frac{dw}{d\theta} \cdot \frac{I}{p_w - p} = aM^n \dots\dots\dots(1),$$

worin *a* und *n* die Konstanten bei konstanter Luftgeschwindigkeit bedeuten.

Kurve I $a = 0.000055 M^{1.28} \dots\dots\dots(2_a)$
 Kurve II $a = 0.0000286 M^{1.28} \dots\dots\dots(2_b)$

Die Gleichung für die konstante Periode wird nämlich z.B. bei 20°C, 40% und 1.01 m/sek, nach Gl. (1) und (2_a) in die folgende übergeführt:

$$\frac{dw}{d\theta} = aAM^n(p_w - p)$$

$$a = 0.0000155AM^{1.28}(\Delta p) \text{ g/h. cm}^2 \dots\dots\dots(3)$$

Also ist die Trocknungsgeschwindigkeit der verschiedenen aus der Oberfläche des Kaolins verdampfenden Flüssigkeiten proportional $M^{1.28}$.

7. Trockenschwindigkeit der Tonproben.

R. F. Geller⁶⁾ berichtete, dass die Trockenschwindigkeit des Tons von der Zusammensetzung und dem Wassergehalt abhängig sei, aber nicht von der Trockenzeit. Nach dem Versuche von E. F. Line⁷⁾ schliesst die Trockenschwindigkeit des Tons an einem bestimmten Punkt, und die verdunstete Wassermenge d.h. das Schwindungswasser ist gleich der Raumschwindung. A. E. R. Westman⁸⁾ führte folgende Formel für die lineare Trockenschwindigkeit in Abhängigkeit von der Raumschwindung ein:

$$a = 100 \left(1 - \sqrt[3]{1 - \frac{b}{100}} \right) \dots\dots\dots(4)$$

oder

$$\frac{b}{100} = 1 - \left(1 - \frac{a}{100} \right)^3, \dots\dots\dots(4a),$$

worin *a* die lineare Schwindung und *b* die Raumschwindung in Prozent bedeuten. Nach C. E. Fulton⁹⁾ beträgt die lineare Schwindung der zu

0-75% Schamotte vermischten Tonerden zwischen 7.7-1.2%. R. Rieke¹⁰⁾ berichtete, dass die aus der linearen Schwindung berechnete Raumschwindung immer kleiner als die verdunstete Wassermenge ist.

Hier sind nun die Trockenschwindungsversuche mit der zweiten Probe des Trocknungsexperimentes des Verfassers ausgeführt worden.

Zur Messung der Schwindung wurde die Zifferlehre mit 1/100 cm Skala benützt.

Die Trockenschwindigkeit der verschiedenen Materialien wurde folgenderweise untersucht.

Abb. 24.

Kurven-Nr.	Versuchs-Nr.	Lufttemperatur	Feuchtigkeitsgrad	Luftgeschwindigkeit
I	10	35°C	53.7	2.13 m/sek
II	24	25	53.7	4.00
III	21	45	21.0	2.14
IV	25	25	53.7	3.69
V	22	25	53.7	3.12
VI	20	35	21.0	2.14

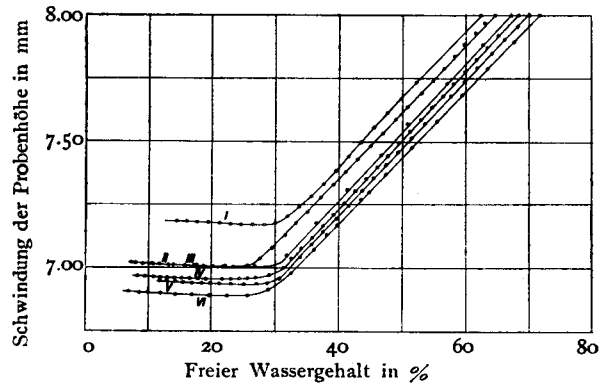
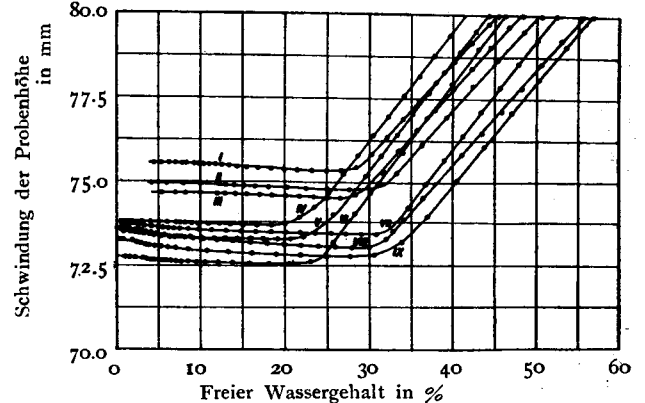


Abb. 25.

Kurven-Nr.	Versuchs-Nr.	Probe	Lufttemp.	Feuchtigkeitsgrad.
I	67	Minokaolin	30°C	40%
II	29	"	40	40
III	30	"	40	60
IV	65	Seikirei-Kaolin	30	40
V	32	"	40	60
VI	33	"	40	40
VII	31	Zettlitz-Kaolin	40	60
VIII	28	"	30	40
IX	27	"	40	40



6) Trans. Am. Cer. Soc., 1921, 4, 288.

7) Trans. Am. Cer. Soc., 1908, 10, 146.

8) J. Am. Cer. Soc., 1928, 11, 715.

9) Trans. Am. Cer. Soc., 1915, 17, 408.

10) Ber. Deutsch. Ker. Gesell., 1931, 12, 556.

Abb. 24 Kibushi-Tonerde.

Abb. 25 Zettlitz-Kaolin, Mino-Kaolin und Seikirei-Kaolin.

Abb. 26 Mischung von Quarz mit Kaolin.

Aus sämtlichen Kurven geht hervor, dass die Schwindungsgrenze sich als ganz scharfer Knickpunkt, d.h. kritischer Wassergehalt, im Verlauf der

Trockenschwindung markiert. Von der Schwindungsgrenze ab bleibt bei sämtlichen Materialien die Schwindung konstant. Eingehende Versuche haben nach weiterer Trocknung eine sehr geringe Ausdehnung ergeben. Diese Ausdehnung erfolgt vielleicht durch den Anstieg der Temperatur der Probe nach dem kritischen Punkte.

Die maximalen Schwindungen des gleichen Materials sind nach dem steigenden Anmachewassergehalt geordnet, die Kurven aber für verschiedene Zusammensetzungen von Ton und Quarz nach dem steigenden Anmachewassergehalt und Quarzgehalt zugleich.

Abb. 26.

Kurven-Nr.	Versuchs-Nr.	Minokaolin : Kawachi-Quarz
I	41	2 : 8
II	40	3 : 7
III	39	4 : 6
IV	38	5 : 5
V	37	6 : 4
VI	36	7 : 3
VII	35	8 : 2
VIII	34	9 : 1

Trocknungsbedingungen (40°C, 40%, 2.41 m/sek)

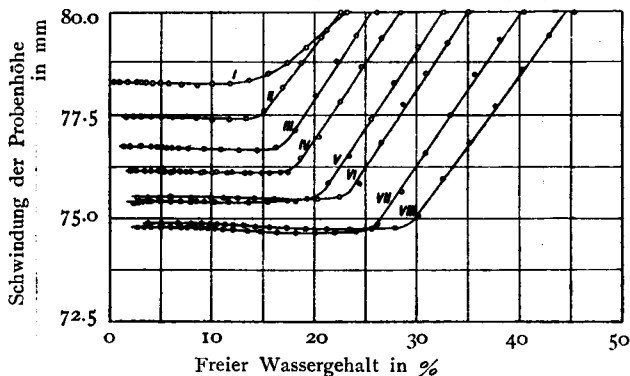


Abb. 27.

Kurven-Nr.	Versuchs-Nr.	Probe	Lufttemp.	Feuchtigkeitsgrad
I	67	Mino-Kaolin	30°C	40%
II	29	"	40	04
III	30	"	40	60
IV	65	Seikirei-Kaolin	30	40
V	32	"	40	60
VI	33	"	40	40
VII	31	Zettlitz-Kaolin	40	60
VIII	28	"	30	40
IX	27	"	40	40

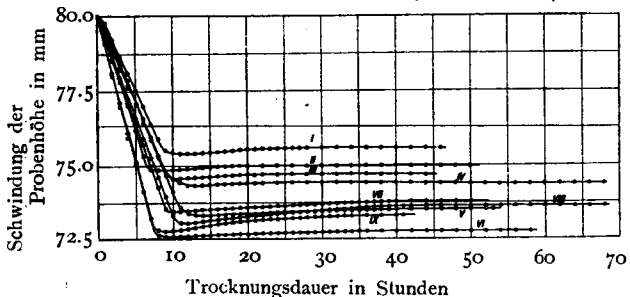
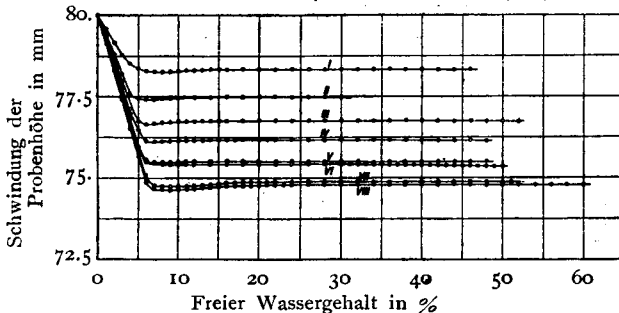


Abb. 28.

Kurven-Nr.	Versuchs-Nr.	Mino-Kaolin : Kawachi-Quarz
I	41	2 : 8
II	40	3 : 7
III	39	4 : 6
IV	38	5 : 5
V	37	6 : 4
VI	36	7 : 3
VII	35	8 : 2
VIII	34	9 : 1

Trocknungsbedingungen (40°C, 40%, 2.14 m/sek)



In Abb. 27 und 28 sind die Trockenschwindungen mit der Zeit als Abszisse dargestellt.

Von Anfang bis zum kritischen Punkt wird die lineare Abmessung der Probe mit der folgenden Gleichung ausgedrückt.

$$L = L_c + k(w - w_c), \dots \dots \dots (5)$$

worin L_c und w_c die Länge bzw. den Wassergehalt der Probe im kritischen Punkt, L und w die Länge bzw. den Wassergehalt in den beliebigen Zeitpunkten bis zum kritischen Punkt und k den Schwindungskoeffizienten bedeuten.

Nach den Abbildungen wurden die Werte k wie folgt berechnet.

Kibushi-Tonerde : $L = L_c + 0.0262 (w - w_c)$
 Mino-Kaolin : $L = L_c + 0.0276 (w - w_c)$

Tabelle 7.

Versuchsnummer	Probe	$\frac{a}{100}$	$\frac{b}{100}$	Raumschwindung 240. $\frac{b}{100}$ cm ³	Wassergehalt %		Trockengewicht g	Verdampfte Wassermenge g
					Plastizität	Kritischer Punkt		
20	Kibushi-Tonerde	0.137	0.357	85.8	71.7	29.5	203.39	87.5
31	Zettlitz-Kaolin	0.082	0.227	54.5	52.3	30.8	252.92	54.3
33	Seikirei-Kaolin	0.0926	0.253	60.7	46.2	24.0	275.43	61.2

Seikirei-Kaolin : $L=L_c+0.0328 (w-w_c)$
 Zettlitz-Kaolin : $L=L_c+0.0308 (w-w_c)$
 Mischung von Quarz mit Kaolin : $L=L_c+0.0378 (w-w_c)$

Um die Raumschwindung mit der verdunsteten Wassermenge zu vergleichen, wurde Tabelle 7 aufgestellt. Danach sind diese zwei Mengen fast einander gleich.

8. Der Oberflächenkoeffizient oder Grenzschichtkoeffizient des Tonen bei der Trocknung.

Der Koeffizient der Oberflächenverdampfung wird von der Massengeschwindigkeit der Luft und von der Richtung der Luftströmung beeinflusst.

Im allgemeinen kann a (g/h. cm². mmHg) durch die folgende empirische Exponentialfunktion der Massengeschwindigkeit ausgedrückt werden.¹¹⁾

$a = a v^n$ für Ton (6)

$a = b + c v^m$ für Papierstoff und Holz, ... (6a)

worin v die Massengeschwindigkeit der Luft und a, b, c, n und m die Konstante sind; infolgedessen ist für konstante Trocknungsbedingungen auch a eine Konstante.

Also ist a den Versuchsergebnissen nach für ein bestimmtes Material und für konstante Trocknungsbedingungen fast konstant; für ein anderes Material aber wie Tabelle 8 zeigen diese Werte einen Unterschied von etwa 20%.

Tabelle 8.

Oberflächenkoeffizient
 Probenmasse : 8 x 10 x 3 cm

Versuchsnummer	Probe	Lufttemperatur °C	Feuchtigkeitsgrad %	Trocknungsgeschwindigkeit g/h. cm ²	Proben-temperatur °C	Dampfdruck-unterschied mmHg	Oberflächenkoeffizient α g/h. cm ² . mmHg	Mittelwert
18	Kibushi-Tonerde	15	21	0.0260	7.9	5.307	0.00490	0.00478
19	"	25	"	0.0398	15.97	5.200	.00473	
20	"	35	"	.0579	22.80	8.850	.00484	
21	"	45	"	.0790	29.30	15.100	.00511	
6	"	15	37.3	.0228	9.90	4.377	.00521	
16	"	"	53.7	.0128	11.50	3.300	.00388	
17	"	"	75.8	.0080	13.20	1.679	.00477	
27	Zettlitz-Kaolin	40	40	.0472	29.5	8.773	.00538	0.00565
28	"	30	40	.0354	21.0	5.950	.00595	
31	"	40	60	.0314	33.5	5.601	.00561	
32	Seikirei-Kaolin	40	60	.0305	33.5	5.601	.00544	0.00536
33	"	"	40	.0475	30.0	9.674	.00492	
65	"	30	"	.0367	21.4	6.413	.00572	0.00573
29	Mino-Kaolin	40	"	.0470	29.0	7.893	.00596	
30	"	"	60	.0309	33.5	5.601	.00552	
139	"	60	8.19	.1604	32.8	25.063	.00640	
140	"	70	6.67	.1869	37.0	31.500	.00593	
141	"	80	6.37	.2230	43.2	42.850	.00520	
142	"	90	4.05	.2790	45.4	52.060	.00535	
34	Minokaolin : Feldspat 9 : 1	40	40	.0429	30.6	10.784	.00399	0.00423
35	8 : 2	"	"	.0457	30.9	11.353	.00402	
36	7 : 3	"	"	.0453	31.0	11.545	.06393	
37	6 : 4	"	"	.0476	30.8	11.162	.00426	
38	5 : 5	"	"	.0446	30.9	11.353	.00393	
39	4 : 6	"	"	.0453	30.8	11.162	.00407	
40	3 : 7	"	"	.0463	30.5	10.597	.00436	
41	2 : 8	"	"	.0477	29.6	8.952	.00531	
							Gesamter Mittelwert	0.00515

9. Der kritische Wassergehalt des Tonen bei der Trocknung.

Es ist schon darauf hingewiesen worden, dass der kritische Wassergehalt eines Materials für eine

bestimmte Trocknungsbedingung einen fast bestimmten Wert zeigt. Doch hängt der kritische Wassergehalt sowohl von den Trocknungsbedingungen als auch von dem Material ab. Im allgemeinen ist die von innen nach aussen statt-

11) Siehe Seite 103, 114.

findende Diffusion umso grösser je schneller die Trocknung vorsichgeht.

Wird der Wassergehalt des festen Körpers geringer, so gestaltet sich die Innendiffusion allmählich schwieriger. Je schneller also die Oberflächenverdampfung erfolgt d.h. die Trocknungsgeschwindigkeit ist, desto stärker folgt ihr die Diffusion und desto höher ist der kritische Wassergehalt.

Tabelle 9.

1. Kritischer Wassergehalt und Lufttemperatur
 Probe: Kibushi-Tonerde
 Probendicke 3.0 cm, Feuchtigkeitsgrad 37.4%,
 Luftgeschwindigkeit 2.14 m/sek.

Versuchsnummer	Lufttemperatur °C	Trocknungsgeschwindigkeit g/h. cm ²	Kritischer Wassergehalt %
6	15	0.023	15.20
7	25	0.033	16.10
8	35	0.046	17.70
9	45	0.054	18.60

Probe: Mino-Kaolin: Feldspat=5:5
 Probendicke 3.0 cm, Luftgeschwindigkeit 0.3 m/sek.

Versuchsnummer	Lufttemperatur °C	Trocknungsgeschwindigkeit g/h. cm ²	Kritischer Wassergehalt %
118	40	0.043	9.9
140	70	0.187	27.9
141	80	0.223	29.4
142	90	0.279	30.0

2. Kritischer Wassergehalt und Feuchtigkeitsgrad
 Probe: Kibushi-Tonerde
 Probendicke 3.0 cm, Lufttemperatur 35°C,
 Luftgeschwindigkeit 2.14 m/sek.

Versuchsnummer	Feuchtigkeitsgrad %	Trocknungsgeschwindigkeit g/h. cm ²	Kritischer Wassergehalt %
5	18.7	0.072	20.10
20	21.0	0.057	16.30
8	37.3	0.045	15.20
10	53.7	0.028	14.30
12	75.8	0.015	11.00

3. Kritischer Wassergehalt und Luftgeschwindigkeit
 Probe: Mino-Kaolin: Feldspat=5:5
 Probendicke 3.0 cm, Lufttemperatur 40°C,
 Feuchtigkeitsgrad 30%.

Versuchsnummer	Luftgeschwindigkeit m/sek.	Trocknungsgeschwindigkeit g/h. cm ²	Kritischer Wassergehalt %
119	0.50	0.043	9.8
120	1.007	.053	10.7
121	1.489	.071	12.1
122	2.150	.084	12.3
124	5.159	.150	14.7
125	7.100	.187	14.7
126	9.200	.220	13.4

4. Kritischer Wassergehalt und Probendicke
 Probe: Mino-Kaolin: Feldspat=5:5
 Lufttemperatur 30°C, Feuchtigkeitsgrad 30%

Versuchsnummer	Probendicke cm	Luftgeschwindigkeit m/sek.	Trocknungsgeschwindigkeit g/h. cm ²	Kritischer Wassergehalt %
94-A	6	2.14	0.0967	17.75
-B	3	"	.0960	16.95
-D	1	"	.0975	16.75
-E	0.5	"	—	8.80
118-A	6	4.00	.111	14.80
-B	3	"	.108	12.12
-C	1	"	.106	8.40

5. Kritischer Wassergehalt und Zusammensetzung der Probe.
 Lufttemperatur 40°C, Feuchtigkeitsgrad 40%,
 Luftgeschwindigkeit 2.14 m/sek.

Versuchsnummer	Mino-Kaolin: Feldspat	Trocknungsgeschwindigkeit g/h. cm ²	Kritischer Wassergehalt %	Zweiter ¹²⁾ kritischer Wassergehalt %
29	10:0	0.048	23.40	18.10
34	9:1	.043	22.50	16.58
35	8:2	.046	22.00	13.90
36	7:3	.045	19.80	13.00
37	6:4	.048	18.80	11.88
38	5:5	.045	16.80	10.90
39	4:6	.045	13.30	9.32
40	3:7	.046	12.20	8.08
41	2:8	.048	11.80	6.48

geschwindigkeit ist, desto stärker folgt ihr die Diffusion und desto höher ist der kritische Wassergehalt.

Tabelle 9 zeigt die Versuchsergebnisse den kritischen Wassergehalt betreffend, welcher von der Luftfeuchtigkeit, Luftgeschwindigkeit, Probendicke und auch Dichtigkeit des Materials abhängt.

Zusammenfassung.

1. Der Grund für die Verlangsamung der Trocknungsgeschwindigkeit ist möglicherweise,

- die Erniedrigung des Dampfdruckes,
- das Verschwinden des Kontraktionswassers,
- die Verkleinerung der wirksamen Oberfläche,
- der Übergang beim Trocknungsmechanismus.

2. Der Grund der Probentemperaturerhöhung liegt in der Wärmeübertragung durch den Behälter und der Wärmestrahlung von der Wand des Trockners.

3. Für die Trocknungsgeschwindigkeit hat die Luft den grössten Einfluss bei der Richtung von 180° und den kleinsten bei der von 0°. In einer Richtung von 90° und 45° ist die Einwirkung der Luft mittelstark und in beiden Fällen fast die gleiche.

12) Der Feuchtigkeitsgehalt, der sich an der Grenze zwischen den zwei Arten der verlangsamten Periode befindet, wird von dem Verfasser zweiter kritischer Wassergehalt genannt.

4. Der Einfluss der Magerungsmittel auf die Trocknungsgeschwindigkeit ist in der konstanten Trocknungsperiode und auch in der ersten Periode verlangsamer Trocknungsgeschwindigkeit nicht auffallend, aber in der zweiten Periode verlangsamter Trocknungsgeschwindigkeit macht er sich stark bemerkbar.

5. Die Trocknungsdauer verkürzt sich umgekehrt proportional zu der Menge des Magerungsmittels.

6. Auf die Trocknungsgeschwindigkeit des Kaolins üben Quarz und Feldspat ganz denselben Einfluss.

7. In der zweiten Periode der Verlangsamung ist die Trocknungsgeschwindigkeit umgekehrt proportional der Dicke der Probe, während sie in der konstanten Periode unabhängig von der Probendicke ist.

8. Alle Flüssigkeiten abgesehen von Wasser zeigen auch die zwei Trocknungsperioden, konstante und verlangsamte, wie das Wasser.

9. Die Oberflächenverdampfungskoeffizienten der verschiedenen aus der Oberfläche des Kaolins verdampfenden Flüssigkeiten sind proportional $M^{1.28}$. Die Gleichung für die konstante Periode wird nämlich, z.B. bei 30°C, 40% und 1.01 m/sek, in die folgende übergeführt:

$$dw/d\theta = 0.0000155 A M^{1.28} (\Delta p)$$

10. Vom Anfang bis zum kritischen Punkt wird die lineare Abmessung der Probe mit der folgenden Gleichung ausgedrückt:

$$L = L_c + k (w - w_c)$$

IV. Die Trocknung der Papierstoffe.

Die innere Diffusion bei Trocknung der Fasserstoffe wie Papier, Papierstoff, Gewebe usw. ist, gemäss ihrer Kapillarwirkung, sehr gross. Man kann also die Oberflächenverdampfung fördern, ohne Rücksicht auf die Diffusion nehmen zu müssen. Der Trocknungsmechanismus des Papierstoffes ist deshalb etwas anders als der des Tons oder der Seife.

Als Probe wurde der Sulfitpapierstoff für die Kunstseidenfabrikation gebraucht. Man zerkleinert die Platte der Papierstoffe mit einer rohen Feile, kocht sie mit Wasser in einem 5 Liter haltigen Aluminiumkessel für eine Stunde und wiederholt das Kochen mit erneuertem Wasser. Nach dem Kochen wäscht man den zerkleinerten Papierstoff viele Male mit einer genügenden Menge Wasser, entzieht das überflüssige Wasser dem Stoffe durch ein 50 maschiges Sieb und formt dann die Probe in der dem Boot entsprechenden Dimension. Die Methode bei Behandlung der Probe und die Ausführung des Experimentes sind fast dieselben wie bei dem Ton.

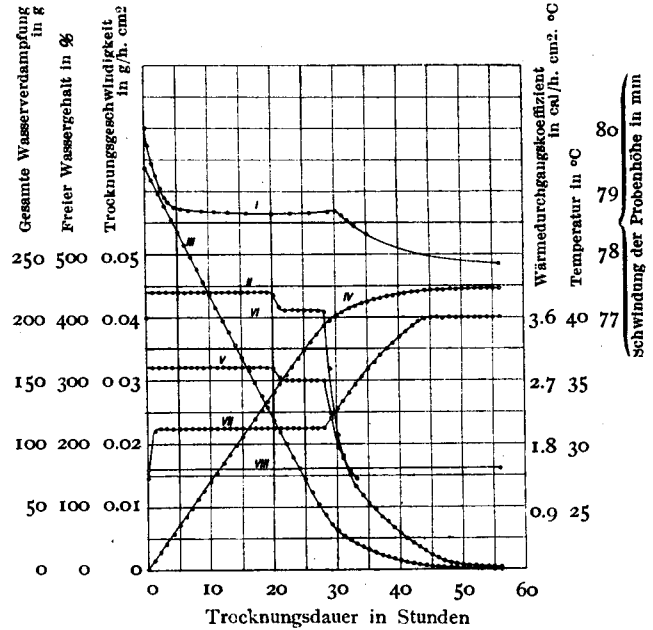
Tabelle 10 stellt das Versuchs- und Berechnungs-

Abb. 29.

Versuchsnummer 1.

Lufttemperatur 40, relative Feuchtigkeit 40%
Luftgeschwindigkeit 1.01 m/sek.

- Kurve I Schwundung der Höhe der Probe
- „ II Trocknungsgeschwindigkeit
- „ III Freier Wassergehalt
- „ IV Gesamte Wasserverdampfung
- „ V Wärmedurchgangskoeffizienten
- „ IV Trockenkugeltemperatur
- „ VII Probetemperatur
- „ VIII Feuchtkugeltemperatur



resultat vom I. Versuche dar. Abb. 29 zeigt das in Tabelle 20 erhaltene Resultat, wobei die Zeit als Abszisse dargestellt ist. Ausser der Schwundung zeigen mehrere Kurven ganz ähnliche Verhältnisse, wie sie uns von den Tonerden in der früheren Mitteilung her bekannt sind.

Kurve V zeigt die Änderung des Wärmedurchgangskoeffizienten mit zunehmender Zeit. Während der konstanten Trocknungsperiode bleibt auch die Kurve unverändert, aber bei dem kritischen Punkte geht sie plötzlich herunter. Der Wärmedurchgangskoeffizient H wird, wenn die Wärme aus der Luft zu einer verdampfenden Stelle innerhalb des festen Stoffes übertragen wird, mit folgender Gleichung ausgedrückt:

$$H = \frac{1}{1/h_a + x/h_s} \dots \dots (\text{cal/h. cm}^2. \text{ } ^\circ\text{C}), \dots \dots (7)$$

worin h_a , der Wärmeübergangskoeffizient an der Oberfläche in $\text{cal/h. cm}^2. \text{ } ^\circ\text{C}$: h_s , der Wärmeleitkoeffizient fester Stoffe in $\text{cal/h. cm}^2. \text{ } ^\circ\text{C/cm}$: x , die Tiefe der Schicht unter der Oberfläche in cm, wo die Verdampfung vorsichgeht.

Während das Wasser an der Oberfläche fester Stoffe verdampft, ist x null und muss H den grössten konstanten Wert h_a zeigen. Verdampft das Wasser unter der Oberfläche, muss die zur Verdampfung erforderliche Wärme nicht nur durch

Tabelle 10.

Versuchsnummer I.

Probe: Sulfit-Papierstoff, Probenmasse: $8 \times 10 \times 2$ cm,

Trockengewicht: 34.70 g,

Gleichgewichtswassergehalt: 5.23%,

Lufttemperatur: 40°C, Feuchtigkeitsgrad: 40%,

Luftgeschwindigkeit: 10 m/sek.

Zeitdauer in h.	Ansteigen des Registrier- trommel- zeigers in mm/h.	Gewichts- abnahme in g/h.	Trocknungsge- schwindigkeit in g/h. cm ²	Höhe der Probe in mm	Freier Wassergehalt		Temp. der Probe in °C	Sättigungs- druck p_w in mm/Hg	Oberflächen- verdampfungs- koeffizient α in g/h. cm ² . mmHg	Wärmedurch- gangskoeffi- zient in cal/h. cm ² . °C
					in g	in %				
0				80.00	223.533	636.80	27.3			
1	13.80	7.038	0.0440	79.44	216.495	617.30	31.0	33.695	0.00389	2.827
2	"	"	"	79.17	209.457	597.00	31.2	34.082	0.00368	2.892
3	"	"	"	78.92	202.419	577.00	"	"	"	"
4	"	"	"	78.79	195.381	557.30	"	"	"	"
5	"	"	"	78.73	188.343	537.00	"	"	"	"
6	"	"	"	78.71	181.305	516.60	"	"	"	"
7	"	"	"	78.70	174.267	496.80	"	"	"	"
8	"	"	"	78.69	167.229	477.00	"	"	"	"
9	"	"	"	"	160.191	456.20	"	"	"	"
10	"	"	"	78.68	153.153	436.40	"	"	"	"
11	"	"	"	"	146.115	415.60	"	"	"	"
12	"	"	"	78.67	139.077	395.80	"	"	"	"
13	"	"	"	"	132.039	376.00	"	"	"	"
14	"	"	"	78.66	125.001	356.20	"	"	"	"
15	"	"	"	"	117.963	336.40	"	"	"	"
16	"	"	"	78.65	110.925	316.00	"	"	"	"
17	13.70	6.980	0.0436	"	103.938	296.30	"	"	0.00365	2.861
18	"	"	"	"	96.951	276.20	"	"	"	"
19	"	"	"	"	89.964	256.40	"	"	"	"
20	"	"	"	78.64	82.977	236.60	"	"	"	"
21	13.10	6.681	0.0417	"	76.296	217.30	"	"	0.00349	2.737
22	12.90	6.579	0.0411	"	69.717	198.70	"	"	0.00344	2.700
23	"	"	"	78.65	63.138	179.90	"	"	"	"
24	"	"	"	"	56.559	161.20	"	"	"	"
25	"	"	"	"	49.980	142.40	"	"	"	"
26	"	"	"	"	43.401	123.80	"	"	"	"
27	12.80	6.528	0.0408	78.66	36.873	105.20	"	"	0.00341	2.350
28	"	"	"	78.67	30.345	86.45	"	"	"	"
29	10.00	5.100	0.0319	"	25.245	72.00	32.0	35.663	0.00236	2.200
30	6.70	3.417	0.0213	78.69	21.828	62.25	32.7	37.099	0.00133	1.685
31	5.70	2.907	0.0182	78.55	18.920	53.90	33.4	38.584	0.00111	1.594
32	4.70	2.397	0.0150	78.535	16.524	47.15	34.0	39.898	0.00094	1.440
33	3.80	1.938	0.0121	78.46	14.586	41.55	34.7	41.480	0.00063	1.310
34	3.70	1.887	0.0118	78.385	12.699	36.20	35.3	42.880	0.00057	
36	3.30	1.683	0.0105	78.26	9.333	25.66	36.4	45.549	0.00045	
38	2.50	1.275	0.0080	78.17	6.681	19.03	37.5	48.364	0.000305	
40	1.80	0.918	0.0057	78.09	4.794	13.66	38.4	50.774	0.000199	
43	1.10	0.561	0.0035	78.005	2.550	7.27	39.7	54.446	0.000108	
46	0.60	0.306	0.0019	77.945	1.377	3.92	40.0	55.324	0.000057	
49	0.20	0.102	0.0005	77.88	0.918	2.62	"	"	0.000018	
52	"	"	"	77.86	0.612	1.74	"	"	"	
55	0.10	0.051	0.0003	77.85	0.458	1.32	"	"	0.000009	
56	"	"	"	"	0.408	1.16	"	"	"	

die Oberflächenluftschicht, sondern auch durch eine gewisse Dicke der Stoffschicht übertragen werden. Also entsteht dadurch eine Erhöhung des Wärmeübergangswiderstandes und eine Verminderung des Wärmedurchgangskoeffizienten, welches die Erklärung für den plötzlichen Abfall der H -Kurve bei dem kritischen Punkt bietet.

Als numerisches Beispiel berechnet man H aus Tabelle 10 von Versuchsnummer 1 folgendermassen:

25 Stunden nach Anfang ist $H_1 = h_a = 2.70$

33 Stunden nach Anfang ist

$$H_2 = 1 / (1/h_a + x/h_s) = 1.31$$

und h_s für den Papierstoff¹³⁾ = 0.417

Nun wird Gl. (7)

$$1.31 = \frac{1}{1/2.70 + x/0.417}$$

$$\therefore x = 0.164 \text{ cm}$$

Also herrscht die Verdampfung nach fünf Stunden verlangsamter Trocknung, von der Oberfläche des festen Stoffes aus gerechnet, in einer Tiefe von 0.16 cm.

Andererseits muss der verdampfte Wasserdampf innerhalb fester Stoffe nicht nur durch eine Stoffschicht von gewisser Dicke, sondern auch durch die Oberflächenluftschicht diffundieren. Die Verdampfung nämlich geht in einer Tiefe der Oberfläche vor sich, wo die Diffusionsgeschwindigkeit des Wasserdampfes von dort in die Luft mit der des Wassers aus dem Innern bis zu dieser Stelle fast gleich ist. Bezeichnet man mit a den Diffusionskoeffizienten des Dampfes durch die Oberflächenluftschicht in $g/h \cdot cm^2 \cdot mmHg$ und mit λ den Diffusionskoeffizienten durch die fast trockene Stoffschicht in $g/h \cdot cm^2 \cdot mmHg/cm$, so erhält man die folgende Beziehung für den Gesamtkoeffizienten der Dampfdiffusion K :

$$K = \frac{1}{1/a + x/\lambda} \dots g/h \cdot cm^2 \cdot mmHg \dots (8)$$

Aus der Tabelle 10 ersieht man:

25 Stunden nach Anfang ist $K_1 = a = 0.00344$

33 Stunden nach Anfang ist

$$K_2 = 1 / (1/a + x/\lambda) = 0.00063$$

Nun wird Gl. (8)

$$0.00063 = \frac{1}{1/0.00344 + 0.164/\lambda}$$

$$\therefore \lambda = 0.000127$$

Trockenschwindigkeit: Die Trockenschwindigkeit des Papierstoffes ist ganz anders wie die des Tones. Wie Kurve I zeigt, ist die Kontraktion in den anfänglichen 4 oder 5 Stunden sehr auffällig, hört dann bis zum kritischen Punkt auf und fängt bald wieder etwas langsamer an.

Abb. 30.

Kurven-Nr.	Versuchs-Nr.	Feuchtigkeitsgrad	Proben-temperatur	Lufttemperatur 40 °C Luftgeschwindigkeit 1.01 m/sek
I	9	20%	26.0 °C	
II	1	40	31.2	
III	7	60	35.5	
IV	8	80	38.0	

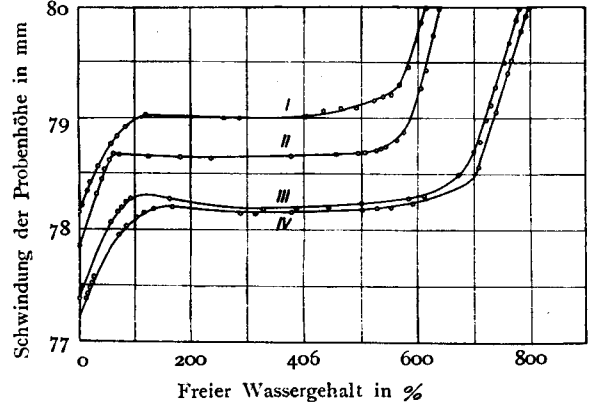


Abb. 31.

Kurven-Nr.	Versuchs-Nr.	Lufttemperatur in °C	Proben-temperatur in °C	Feuchtigkeitsgrad 40% Luftgeschwindigkeit 1.01 m/sek
I	11	20	16	
II	10	30	23.5	
III	1	40	31.2	
IV	9	50	41.5	

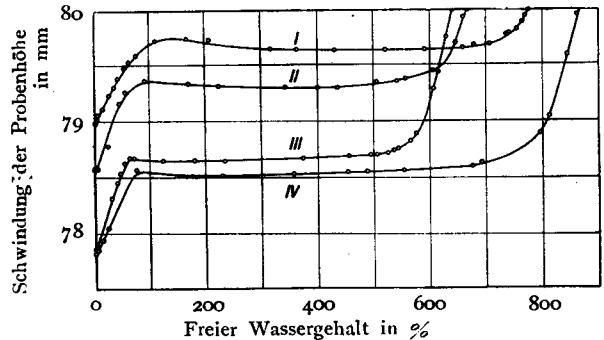


Abb. 32.

Kurven-Nr.	Versuchs-Nr.	Lufttemperatur in °C	Feuchtigkeitsgrad 40% Luftgeschwindigkeit 1.01 m/sek
I	11	26	
II	10	30	
III	1	40	
IV	9	50	

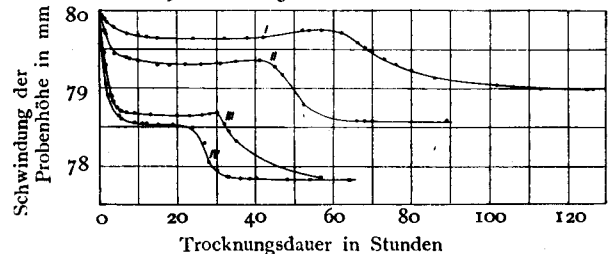


Abb. 30 und 31 stellen graphisch die Beziehung zwischen der Trockenschwindigkeit und dem freien Wassergehalt dar, die erstere die bei verschiedener Feuchtigkeit und die letztere die bei verschiedener

13) W. H. McAdams: Heat Transmission, 1933.

Temperatur. Je grösser die relative Feuchtigkeit, je höher die Lufttemperatur oder je höher die Probetemperatur ist, desto grösser wird die anfängliche Schwindung.

Abb. 32 zeigt die Beziehung in Abb. 31, die Stunden als Abscisse dargestellt. Aber die Schwin-

dung des Papierstoffes ist eigentlich gar nicht gross, d. i. 1 bis 2.2% gegenüber 10% bei Ton.

Einfluss von Lufttemperatur und Feuchtigkeit.

Abb. 33 und 34 drücken Einfluss der Lufttemperatur bzw. Feuchtigkeit auf die Trocknungsgeschwindigkeit aus. Die Kurven fallen bei dem kritischen Feuchtigkeitsgehalt, der nach den Trocknungsbedingungen 80-130% ausmacht, in der zweiten Periode verlangsamer Trocknung ab.

Abb. 35 mit der Temperatur und Abb. 36 mit der Feuchtigkeit als Abscisse zeigen die Beziehung zwischen der Trocknungsgeschwindigkeit und der Temperatur bzw. Feuchtigkeit, in den verschiedenen Trocknungsperioden.

Abb. 33.

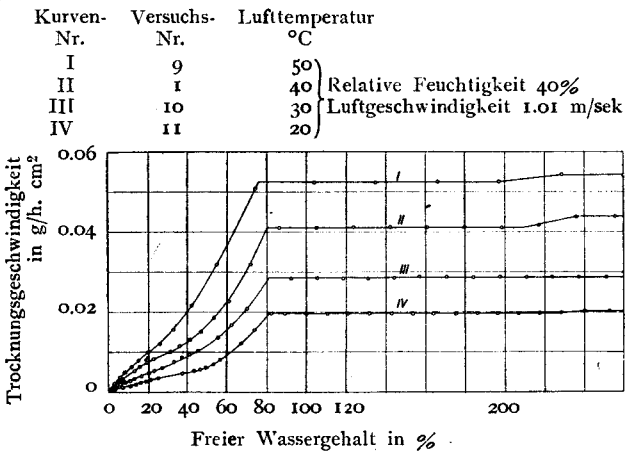


Abb. 34.

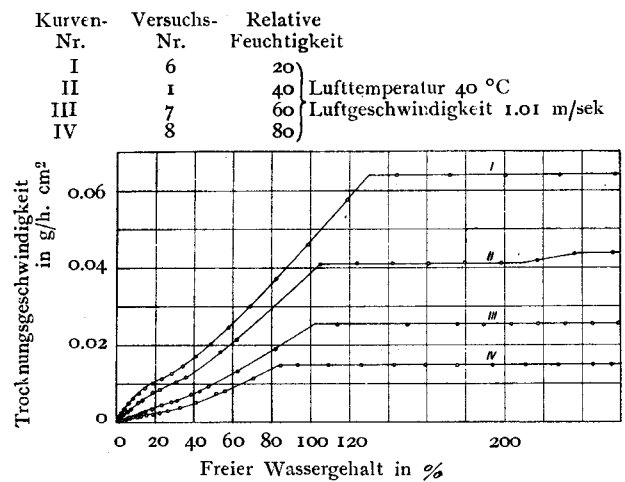


Abb. 35.

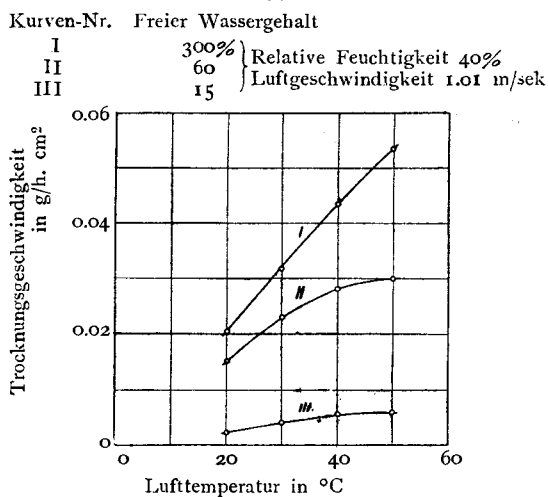


Abb. 36.

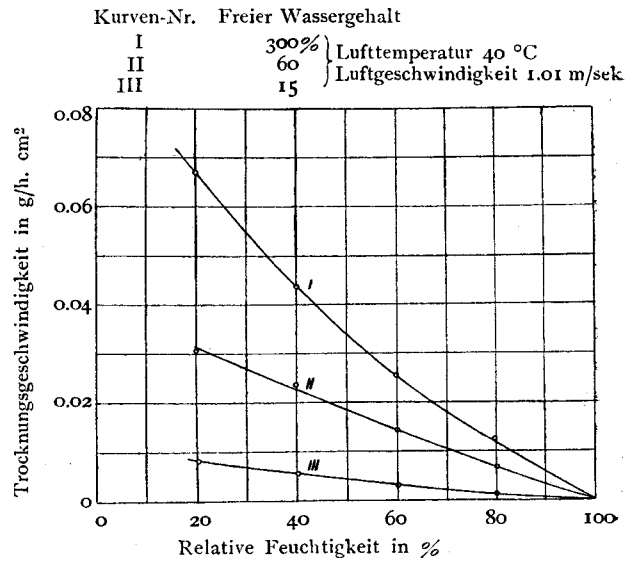
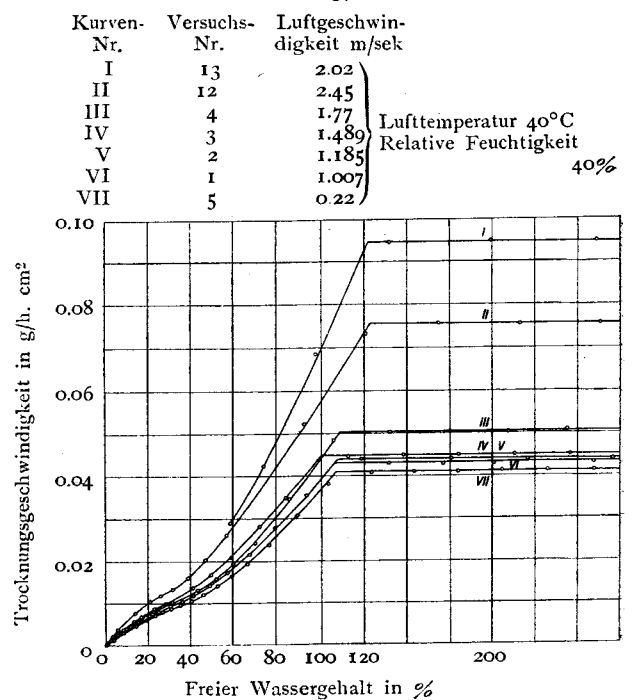
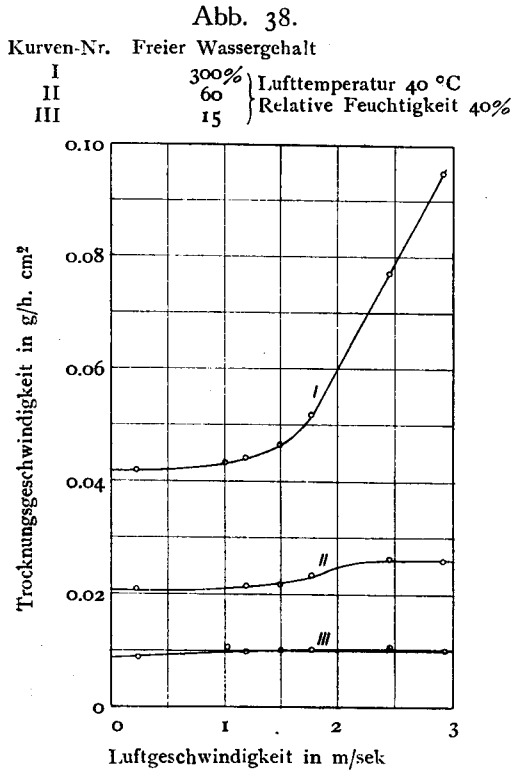


Abb. 37.



Einfluss der Luftgeschwindigkeit. Abb. 37 stellt die Beziehung der Trocknungsgeschwindigkeit und der Luftgeschwindigkeit dar; Abb. 38 zeigt dieselbe Beziehung, aber die Luftgeschwindigkeit als Abszisse.



Auf dem Paalerstoff, der eine grosse Innendiffusion besitzt, übt also die Luftgeschwindigkeit einen sehr grossen Einfluss.

In der I. Mitteilung dieser Untersuchung hat der Verfasser schon dargelegt, dass die konstante Trocknungsgeschwindigkeit durch die folgende Gleichung aufgezeigt wird:

$$\frac{dw}{d\theta} = aA(p_w - p) \dots\dots\dots(9),$$

Es bedeuten w den Wassergehalt der Probe, θ die Zeitdauer, A die verdampfenden Oberflächen, p_w den der Probertemperatur entsprechenden Wasserdampfdruck, p den Partialdruck des Wasserdampfes in der Luft, a den Oberflächenkoeffizienten, welche durch die Gleichung (6) und (6a) ausgedrückt werden.

Die Ergebnisse der Berechnungen aus den Versuchen, die sich mit dem Einfluss der Luftgeschwindigkeit beschäftigten, sind in Tabelle 11 niedergelegt.

Die Luftgeschwindigkeit als Abszisse, die Trocknungsgeschwindigkeit und der Oberflächenkoeffizient als Ordinaten, ist Kurve I bzw. II in logarithmischem Massstab dargestellt. An Hand der Kurven beobachtet man, dass die Luftgeschwindigkeit unter 1.0 m/sek, fast keinen Ein-

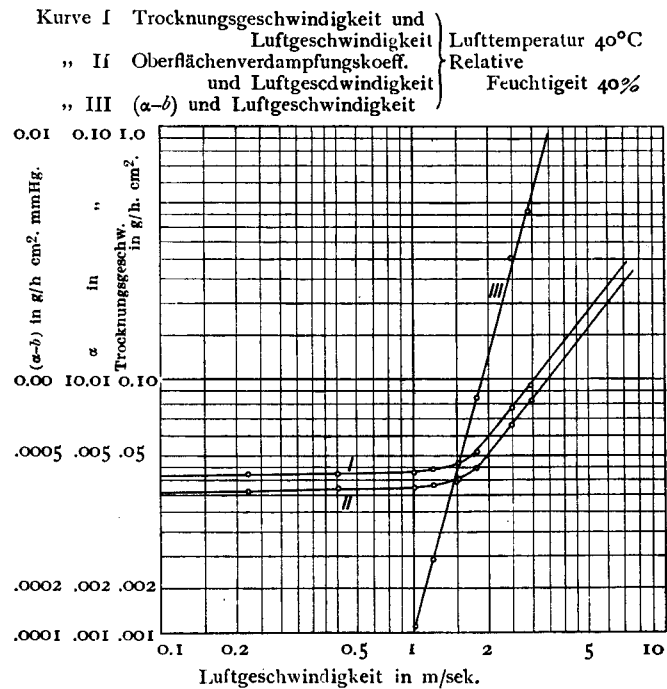
Tabelle 11.

Luftgeschwindigkeit und Oberflächenkoeffizient bei konstanter Trocknungsgeschwindigkeit.
Lufttemperatur 40°C; relative Feuchtigkeit 40%; Probertemperatur 31 °C; Dampfdruckgradient $p_w - p = 11.561$ mmHg.

Ver-suchs-nummer	Luftgeschw. in m/sek	Trocknungsgeschw. in g/h. cm ²	Oberflächenkoeff. in g/h cm. mmHg	$\alpha-b$
13	2.92	0.0950	0.00825	0.004626
12	2.45	0.0770	0.00665	0.003026
4	1.77	0.0517	0.00447	0.000846
3	1.489	0.0465	0.00402	0.000396
2	1.185	0.0442	0.00382	0.000196
1	1.007	0.0432	0.00373	0.000106
5	0.22	0.0415	0.00358	
14	0.22	0.0426	0.00368	0.000006

fluss auf die Trocknungsgeschwindigkeit und den Oberflächendiffusionskoeffizienten während der konstanten Trocknungsgeschwindigkeit des Papierstoffes hat, dass die aber diesen Wert übersteigende einen sehr grossen Einfluss übt.

Abb. 39.



In Abb. 39 bietet die Gl. (6) nicht das Verhältnis einer Geraden, da die Trocknung ohne Luftgeschwindigkeit doch vonstatten geht. Aber diese Gleichung findet ihre Anwendung für die Trocknung, wenn die Luftgeschwindigkeit über ca. 1 m/sek ist. In diesem Fall ist $a=0.00218$ und $n=1.245$ und die Gl. (6) wird

$$a = 0.00218 u^{1.245}$$

Als noch eine geeignete Gleichung für den Oberflächendiffusionskoeffizienten des Papierstoffes dachte sich der Verfasser die folgende aus:

$$u = b + cu^m \dots\dots\dots(6a).$$

Hierin bedeuten b , c und m die Konstanten. Wenn u null ist, wird u gleich b . Der Wert b ist graphisch als 0.003624 bestimmt worden. Nun wird Gl. (6a)

$$(u-b) = cu^m$$

Der Wert $(u-b)$ als Abscisse stellt die Geschwindigkeit u in Kurve III, Abb. 39 dar. Diese Abbildung zeigt eine Gerade, wobei die Konstanten

$$c = 0.0001047 \text{ und } m = 3.66 \text{ sind.}$$

Also ergibt sich Gl. (6a)

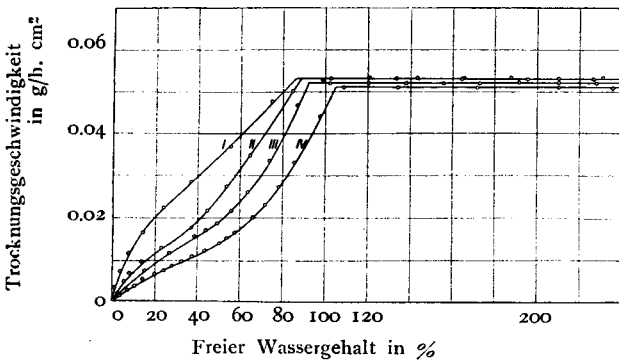
$$u = 0.003624 + 0.0001047 u^{3.66}$$

Einfluss der Probendicke.

Abb. 40 zeigt den Einfluss der Probendicke auf die Trocknungsgeschwindigkeit. Die Trocknungsgeschwindigkeit während der konstanten Trocknungsperiode ist unabhängig von der Probendicke. Im Bereich des Versuchsfehlers decken sich die Geschwindigkeiten. In der zweiten verlangsamtsten Trocknungsperiode macht sich der Einfluss der Probendicke sehr bemerkbar. Die Trocknung nimmt zu, je dünner die Probe ist, wie die Diffusionsgleichung zeigt.

Abb. 40.

Kurven-Nr.	Versuchs-Nr.	Probendicke	Lufttemperatur 40°C Luftgeschwindigkeit 1.01 m/sek Relative Feuchtigkeit 40%
I	17	1.0 cm	
II	18	1.5	
III	17	2.0	
IV	16	3.0	



Zusammenfassung.

1. Der kritische Wassergehalt hält sich je nach den Trocknungsbedingungen des Papierstoffes in dem Bereich von 80 bis 130%.
2. In der zweiten Periode verlangsamt Trocknung verdunstet das Wasser innerhalb des Papierstoffes.
3. Die Trocknungskontraktion des Papierstoffes tritt zuerst zu Anfang der Trocknung auf, hört dann einmal auf und erscheint nach dem kritischen Punkt von neuem.
4. Der Einfluss der Lufttemperatur und der Feuchtigkeit auf die Trocknungsgeschwindigkeit ist ganz derselbe wie bei der Trocknung der Tonerden.

5. Die Luftgeschwindigkeit hat einen grossen Einfluss auf die Trocknungsgeschwindigkeit des Papierstoffes. Der Oberflächenkoeffizient ist durch die folgende Gleichung sehr gut ausgedrückt:

$$u = 0.003624 + 0.0001047 u^{3.66}$$

6. Bei der konstanten Trocknung übt die Probendicke fast keinen Einfluss, bei der verlangsamten Trocknung dagegen erscheint die Trocknungsgeschwindigkeit umgekehrt proportional zu der Probendicke.

V. Die Trocknung der Seife.

Der Seife eignet ein sehr grosser Widerstand gegen die Innendiffusion des Wassers, sie stellt daher ein Material mit einem sehr langweiligen Trocknungsprozess vor.

Bei der Trocknung fester Stoffe gibt es drei Trocknungsstufen, d.h. die drei normalen Trocknungsgeschwindigkeiten der konstanten, ersten und zweiten verlangsamtsten Trocknung. Aber bei der Seife beobachtet man nur eine Trocknungsstufe und zwar die der zweiten verlangsamtsten Trock-

Tabelle 12.

Versuchsnummer 4-A

Probe: Velvet-Seife-I, Probenmasse: 5 x 8 x 3 cm,
Lufttemperatur: 50°C, Feuchtigkeitsgrad: 20%,
Luftgeschwindigkeit: 2.14 m/sek, Trockengewicht: 75.30 g.

Zeitdauer in Tagen	Gewichtsabnahme in g/Tag	Trocknungsgeschwindigkeit in g/Tag. cm²	Freier Wassergehalt in		Probentemperatur in °C
			g	%	
0			42.90	56.97	27.8
1	5.03	0.0630	38.87	50.29	48.9
2	3.56	0.0445	34.31	45.57	"
3	1.95	0.0244	32.36	42.98	48.95
4	1.61	0.0201	30.75	40.84	49.0
5	1.40	0.0175	29.35	38.98	"
6	1.21	0.0151	28.14	37.37	"
7	1.09	0.0136	27.05	35.92	"
8	0.98	0.0123	26.07	34.62	"
9	.89	0.0101	25.18	33.44	49.02
10	.79	0.00988	24.39	32.39	49.03
11	.73	0.00913	23.66	31.42	49.05
12	.67	0.00838	22.99	30.53	49.07
13	.64	0.00800	22.35	29.68	49.08
14	.59	0.00738	21.76	28.90	49.09
15	.55	0.00688	21.21	28.17	49.10
16	.50	0.00625	20.71	27.50	"
17	.47	0.00588	20.24	26.88	"
18	.44	0.00550	19.80	26.30	"
19	.41	0.00513	19.39	25.75	49.11
20	.39	0.00488	19.00	25.23	49.12
21	.37	0.00463	18.63	24.74	49.14
22	.35	0.00438	18.28	24.28	"
23	.33	0.00413	17.95	23.84	"
24	.31	0.00388	17.64	23.43	"
25	.29	0.00362	17.35	23.04	"
28	.26	0.00325	16.54	21.97	49.20
33	.21	0.00263	15.39	20.44	49.39
38	.18	0.00225	14.46	19.18	49.55
43	.158	0.00198	13.64	18.08	49.70
48	.144	0.00180	12.89	17.11	49.79
53	.133	0.00166	12.20	16.19	49.86
58	.126	0.00157	11.57	15.35	49.94
63	.120	0.00150	10.96	14.54	50.00
68	.110	0.00138	10.49	13.92	"
73	.100	0.00125	9.85	13.08	"
77	"	"	9.45	12.55	"

Tabelle 13.

Versuchsnummer 4-B

Probe: Velvet-Seife-I, Probenmasse; $5 \times 8 \times 2$ cm,
Lufttemperatur: 50°C , Feuchtigkeitsgrad: 20%,
Luftgeschwindigkeit: 2.14 m/sek, Trockengewicht: 50.95 g.

Zeitdauer in Tagen	Gewichtsabnahme in g/Tag	Trocknungsgeschwindigkeit in g/Tag. cm^2	Freier Wassergehalt in		Proben-temperatur in $^\circ\text{C}$
			g	%	
0			27.34	53.70	27.0
1	4.35	0.0544	22.99	45.12	49.0
2	3.42	.0428	19.57	38.40	49.07
3	1.75	.0219	17.82	34.99	49.30
4	1.37	.0171	16.45	32.29	49.42
5	1.11	.0139	15.34	30.10	"
6	0.93	.0116	14.41	28.28	"
7	0.76	.0095	13.65	26.78	"
8	0.70	.00875	12.95	25.41	"
9	0.58	.00725	12.37	24.28	"
10	0.51	.00638	11.86	23.28	"
11	0.48	.00600	11.38	22.34	"
12	0.40	.00500	10.98	21.54	"
13	0.37	.00463	10.61	20.81	"
14	0.35	.00438	10.26	20.12	"
15	0.32	.00400	9.94	19.51	"
16	0.30	.00375	9.64	18.93	"
17	0.28	.00350	9.36	18.36	"
18	0.26	.00325	9.10	17.88	"
19	0.25	.00313	8.85	17.38	"
20	0.24	.00300	8.61	16.90	"
21	0.23	.00288	8.38	16.46	"
22	0.22	.00275	8.16	16.01	"
23	0.21	.00263	7.95	15.61	"
24	0.20	.00250	7.75	15.22	"
25	0.19	.00238	7.56	14.84	49.43

28	0.16	.00200	7.05	13.84	49.46
33	0.14	.00175	6.31	12.39	49.49
38	0.11	.00138	5.70	11.19	49.51
43	0.09	.00113	5.21	10.21	49.54
48	0.08	.00100	4.79	9.40	49.56
53	0.06	.00075	4.44	8.71	49.59
58	"	"	4.14	8.13	50.00
63	0.05	.000625	4.09	8.03	"
68	"	"	3.64	7.14	"
73	0.04	.00050	3.50	6.87	"
77	"	"	3.26	6.40	"

nungsgeschwindigkeit, ohne die zwei vorhergehenden Stadien.

Also spielt die Innendiffusion des Wassers stets die Hauptrolle bei der Trocknung, während der Widerstand gegen die Oberflächenverdampfung im Vergleich zu der Diffusion gering ist. Vielleicht trocknen Zelluloid und Bakelit in ganz ähnlicher Weise wie Seife.

Zu den Versuchen wurden Velvet-Seife und Mitsuwa-Seife, welche die besten japanischen Toiletenseifen sind, verwendet. Zur Durchführung der Probe benützte ich ganz dieselbe Methode wie bei Tonerden. Da die Trocknung sehr langsam vonstatten geht, wiegt man die Probe mit der physikalischen Wage alle 1-2 Stunden einmal am ersten Tag und später nur einmal pro Tag. Die Trocknung nimmt sehr lange Zeit in Anspruch, manchmal über zwei Monate.

Abb. 41.

- Trocknungsexperiment der Seife Nr. 4-A
 Kurve I Trocknungsgeschwindigkeit
 " II Freier Wassergehalt
 " III Gesamte Wasserverdampfung
 " IV Trockenkugeltemperatur
 " V Probentemperatur
 " VI Feuchtkugeltemperatur

Probe: Velvet-Seife I
 Probenmasse: $5 \times 8 \times 3$ cm
 Trockengewicht: 75.30 g

Lufttemperatur 50°C , Feuchtigkeitsgrad 20%

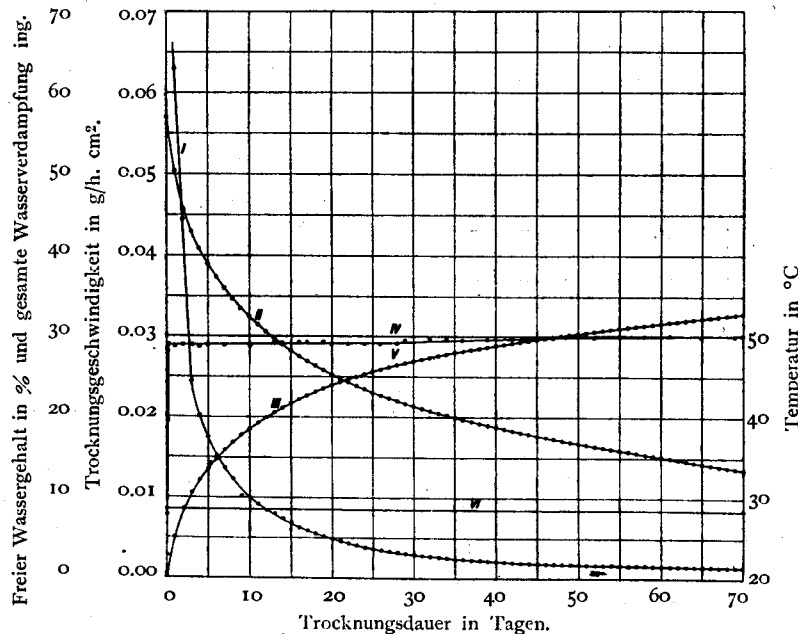


Abb. 42.

Trocknungsexperiment der Seife Nr. 4-B.

- Kurve I Trocknungsgeschwindigkeit
- „ II Freier Wassergehalt
- „ III Gesamte Wasserverdampfung
- „ IV Trockenkugeltemperatur
- „ V Probentemperatur
- „ VI Feuchtkugeltemperatur

Probe: Velvet-Seife I

Probenmasse: $5 \times 8 \times 3$ cm, Trockengewicht: 50.95 g

Lufttemperatur, 50°C

Feuchtigkeitsgrad, 20%

Luftgeschwindigkeit 2.14 m/sek.

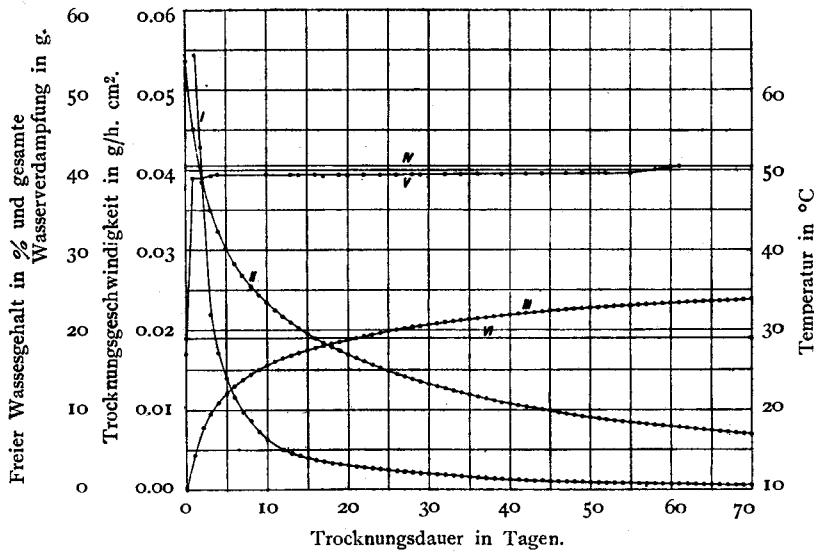
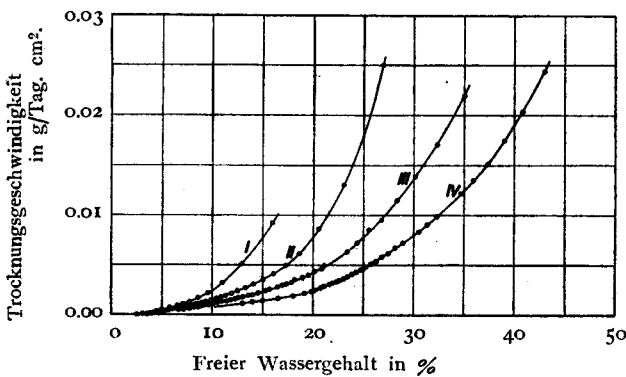


Abb. 43.

- | Kurven-Nr. | Versuchs-Nr. | Probendicke |
|------------|--------------|-------------|
| I | 4-D | 0.5 cm |
| II | „-C | 1 |
| III | „-B | 2 |
| IV | „-A | 3 |

Probe: Velvet-Seife I

Lufttemperatur 50°C , Feuchtigkeitsgrad 20%



Die Tabellen 12 und 13 geben die Versuchs- und Rechnungsergebnisse der 4-A und -B Versuche, welche auf den Abb. 41 und 42 graphisch dargestellt sind.

Die Befunde sind ganz abweichend von den bei Tonerden beobachteten, wie man aus diesen Abbildungen ersieht. Es gibt nämlich keine horizontale oder konstante Trocknungsperiode, sondern nur die zweite verlangsamte Periode. Keinen geraden Teil bemerkt man bei den Kurven der gesamten Verdampfung sowie des freien Wassergehalts. Die Temperatur der Probe zeigt von Anfang an einen fast der Trockenkugeltemperatur gleichen Wert, wofür die sehr langweilige Verdampfung zeugt.

Abb. 43 drückt den Einfluss der Probendicke auf die Trocknungsgeschwindigkeit aus. Die Trocknungsgeschwindigkeit der zweiten Verlangsamungsperiode R, ist umgekehrt proportional der

Tabelle 14.

Freier Wassergehalt %		25		20		15	
Versuchsnummer	Probendicke 2X cm	R	RX	R	RX	R	RX
4-A	3	0.0047	0.0071	0.0025	0.0038	0.0014	0.0021
-B	2	0.0078	0.0078	0.0043	0.0042	0.0023	0.0023
-C	1	0.0163	0.0081	0.0078	0.0039	0.0036	0.0018
-D	0.5	—	—	0.0165	0.0041	0.0078	0.0020

Abb. 44.

Kurven-Nr. Versuchs-Nr. Probendicke
 I 4-A 3 cm
 II "B 2
 III "C 1
 IV "D 0.5

Probe: Velvet-Seife I
 Lufttemperatur 50°C, Feuchtigkeitsgrad 20%

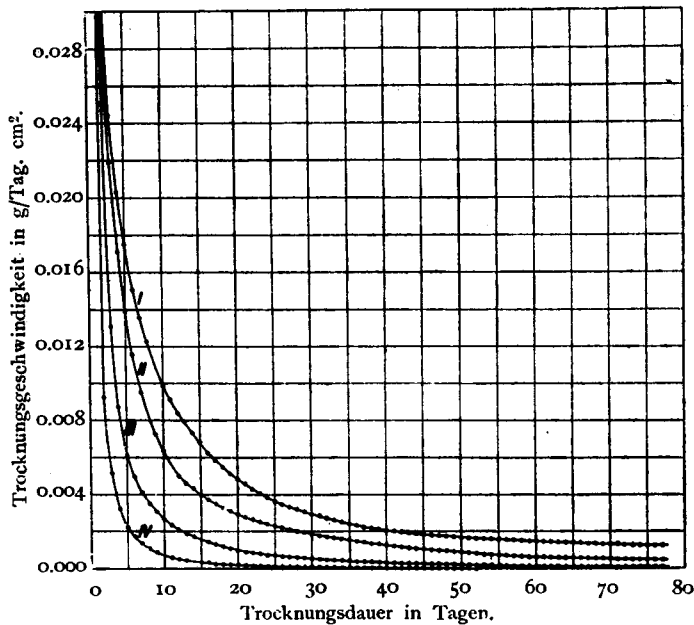


Abb. 45.

Kurven-Nr. Versuchs-Nr. Probendicke
 I 4-B 2 cm
 II 4-A 3

Probe: Velvet-Seife I
 Lufttemperatur 50°C
 Feuchtigkeitsgrad 20%

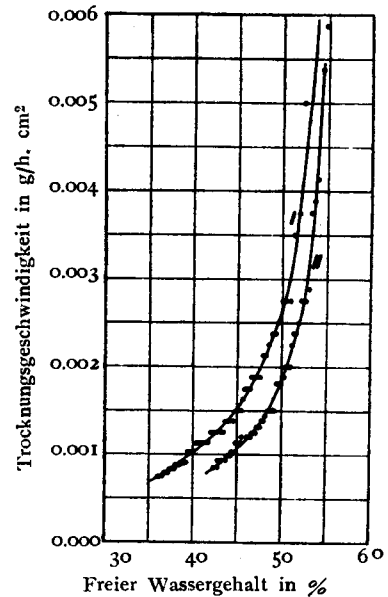


Tabelle 15.

Versuchsnummer 8-A

Probe: Velvet-Seife-I, Lufttemperatur: 50°C,
 Feuchtigkeitsgrad: 30%, Luftgeschwindigkeit: 0.51 m/sek,
 Trocknungsoberfläche: 57.3 cm², Probendicke: 0.20 cm,
 Trockengewicht: 4.982 g.

Zeitdauer in h.	Gewichts- abnahme in g/h	Trocknungs- geschwindigkeit in g/h. cm².	Freier Wassergehalt in	
			g	%
0			1.906	38.25
1	0.70	0.01222	1.206	24.22
2	0.19	.00332	1.016	20.40
3	0.11	.00192	0.906	18.20
4	0.09	.00157	.816	16.48
5	0.07	.00122	.746	14.98
6	0.06	.00105	.686	13.77
7	0.05	.00087	.636	12.77
8	0.04	.00070	.596	11.97
9	0.03	.00052	.566	11.37
10	"	"	.536	10.77
11	0.02	.00035	.516	10.37
12	"	"	.496	9.97
13	0.015	.00026	.481	9.67
14	"	"	.466	9.36
15	0.02	.00035	.446	8.96
16	0.01	.00017	.436	8.76
17	"	"	.426	8.56
18	"	"	.416	8.36
19	"	"	.406	8.16
20	"	"	"	"
21	"	"	"	"
22	0.03	.00052	.376	7.56
23	0.015	.00026	.361	7.25
24	"	"	.346	6.95
25	0.01	.00017	.336	6.75
30	0.005	.00009	.291	5.85
35	"	"	.266	5.34
40	"	"	.236	4.74
45	0.002	.00004	.224	4.50

Tabelle 16.

Versuchsnummer 8-D

Probe: Velvet-Seife-I, Lufttemperatur: 50°C,
 Feuchtigkeitsgrad: 30%, Luftgeschwindigkeit: 0.51 m/sek,
 Trocknungsoberfläche: 48.7 cm, Probendicke: 0.11 cm,
 Trockengewicht: 2.759 g.

Zeitdauer in h.	Gewichts- abnahme in g/h	Trocknungs- geschwindigkeit in g/h. cm²	Freier Wassergehalt in	
			g	%
0			0.903	32.75
1	0.37	0.00759	0.533	19.33
2	.09	.00185	0.443	16.07
3	.05	.00103	0.393	14.24
4	"	"	0.343	12.43
5	.03	.00062	0.313	11.35
6	"	"	0.283	10.25
7	.02	.00041	0.263	9.53
8	"	"	0.243	8.80
9	"	"	0.223	8.08
10	.01	.00025	0.213	7.72
11	"	"	0.203	7.36
12	"	"	0.193	6.99
13	"	"	0.183	6.63
14	"	"	0.173	6.27
15	.005	.00010	0.163	6.09
16	"	"	0.163	5.90
17	"	"	0.158	5.73
18	"	"	0.153	5.54
19	"	"	0.148	5.36
20	.003	.00006	0.145	5.25
21	.002	.00004	0.143	5.18
22	"	"	0.141	5.11
23	.004	.00008	0.137	4.96
24	"	"	0.133	4.82
25	.003	.00006	0.130	4.71
30	.001	.00003	0.113	4.09
35	.005	.00010	0.098	3.55
40	0	0	0.093	3.37

Probendicke X . Infolgedessen müssen die Produkte RX die Konstante sein, wie die Tabelle 14 zeigt.

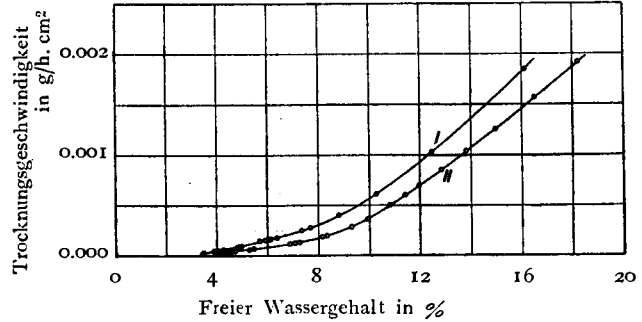
Abb. 44 drückt weiterhin die obere Beziehung mit der Zeit als Abszisse aus. Im ersten Augenblick erscheint die Beziehung zwischen der Trocknungsgeschwindigkeit und Dicke der Probe in Abb. 43 und 44 umgekehrt. Der Grund liegt darin, dass die viel-zurückgebliebenes-Wasserhaltige dickere Probe immer die grössere Trocknungsgeschwindigkeit zeigt. Es muss daher, wie schon oft erwähnt, bei Vergleich die Trocknungsgeschwindigkeit auf dem freien Wassergehalt als Abszisse eingezeichnet werden.

Auf Abb. 43 ist die Trocknungsgeschwindigkeit in $g/Tag. cm^2$, auf Abb. 45 statt dessen in $g/h. cm^2$ gezeichnet, um den anfänglichen Zustand der Trocknung deutlich herauszustellen.

Die Tabellen 15 und 16 zeigen die mit den sehr dünnen Proben gemachten Versuchsergebnisse der 8-A und -D Versuche, welche auf Abb. 46 graphisch wiedergegeben sind.

Abb. 46.

Kurven-Nr. Versuchs-Nr. Probendicke
 I 8-D 0.11 cm
 II 8-A 0.20
 Probe: Velvet-Seife I
 Lufttemperatur 50°C
 Feuchtigkeitsgrad 30%
 Luftgeschwindigkeit 0.51 m/sek



Die Beziehung bei Versuch 3 und 8 zwischen der Trocknungsgeschwindigkeit und der Dicke der Probe ist nochmals in der Tabelle 17 ausgedrückt. Abb. 47-A, -B und -C mit der Temperatur,

Tabelle 17.

Freier Wassergehalt %		20		15		10	
Versuchsnummer	Probendicke $2X$ cm	R	RX	R	RX	R	RX
3-A	3.0	0.0037	0.0111	0.0020	0.0060	0.0010	0.0030
-B	2.0	.0053	.0106	.0026	.0055	.0013	.0026
-C	1.0	.0093	.0093	.0047	.0047	.0017	.0017
-D	0.5	.0175	.0088	.0075	.0038	.0023	.0012
8-A	0.2	.0552	.0110	.0305	.0061	.0089	.0018
-D	0.11	.0672	.0073	.0379	.0042	.0127	.0014

Abb. 47-A.

Kurven-Nr. Versuchs-Nr. Lufttemperatur
 I 1-A 40°C } Feuchtigkeitsgrad 40%
 II 2-A 50°C } Luftgeschwindigkeit 0.5 m/sek
 Probe: Velvet-Seife I
 Probenmasse: $5 \times 8 \times 3$ cm.

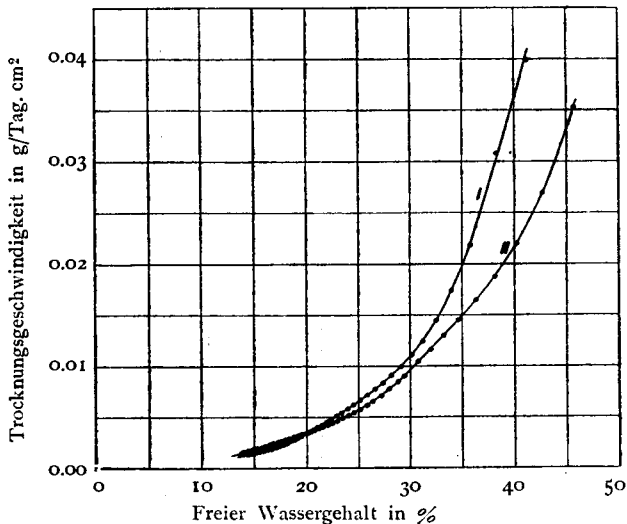


Abb. 47-B.

Kurven-Nr. Versuchs-Nr. Lufttemperatur
 II 1-B 40°C
 I 2-B 50°C
 Probe: Velvet-Seife I
 Probenmasse: $5 \times 8 \times 2$ cm
 Feuchtigkeitsgrad 40%, Luftgeschwindigkeit 2.14 m/sek

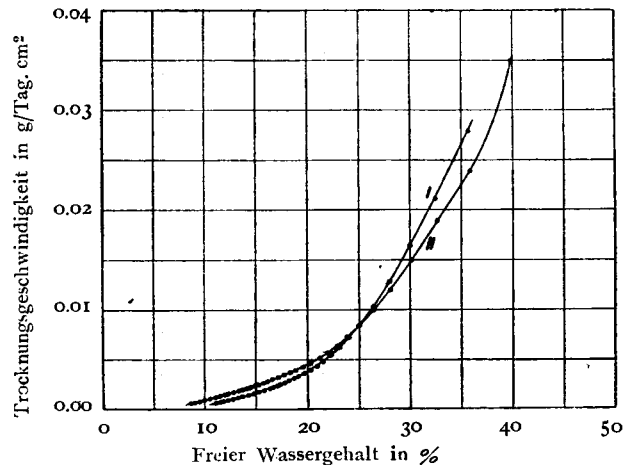


Abb. 47-C.

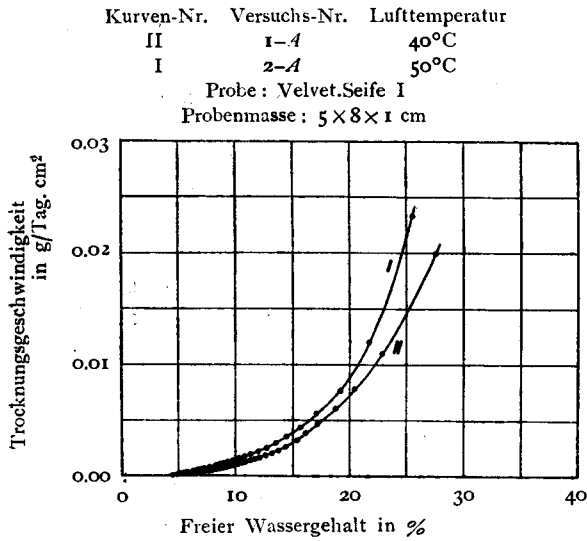


Abb. 48-B.

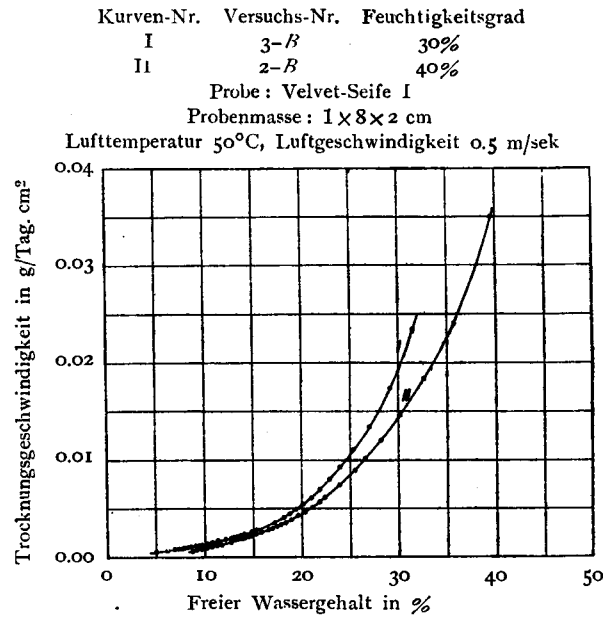


Abb. 48-A, -B, -C und -D mit der Feuchtigkeit und Abb. 49-A, -B und -C mit der Luftgeschwindigkeit als Abszisse zeigen die Beziehung zwischen der Trocknungsgeschwindigkeit und der Temperatur, Feuchtigkeit bzw. Luftgeschwindigkeit in der zweiten verlangsamtsten Trocknungsperiode.

Zusammenfassung.

1. Seife zeigt von Anfang an die zweite verlangsamtste Trocknungsperiode, weder die konstante noch erste verlangsamtste Periode.
2. Die Temperatur der Probe hält von Anbeginn fast einen der Trockenkugeltemperatur gleichen Wert aus.
3. Die Trocknungsgeschwindigkeit der Seife ist umgekehrt proportional der Dicke der Probe.

Abb. 48-A.

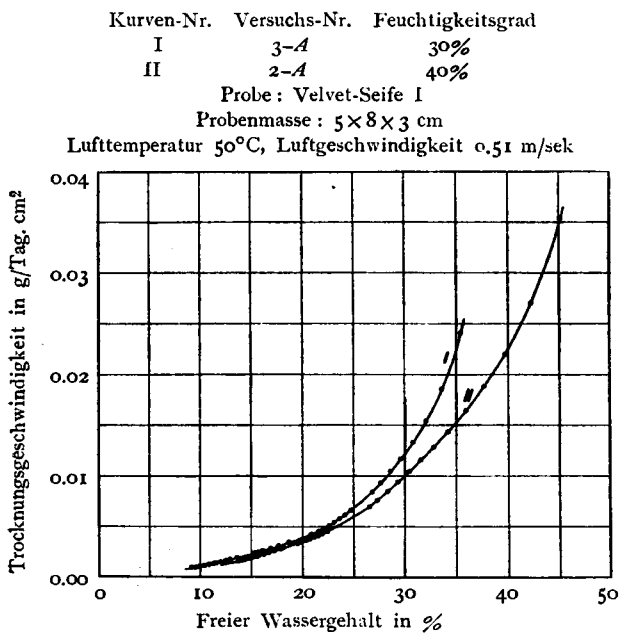


Abb. 48-C.

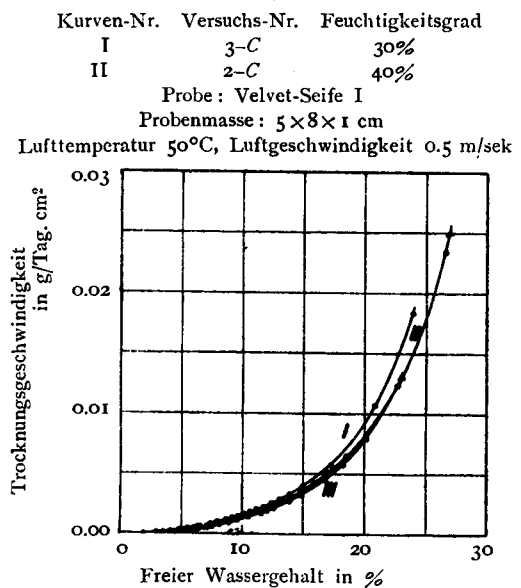


Abb. 48-D.

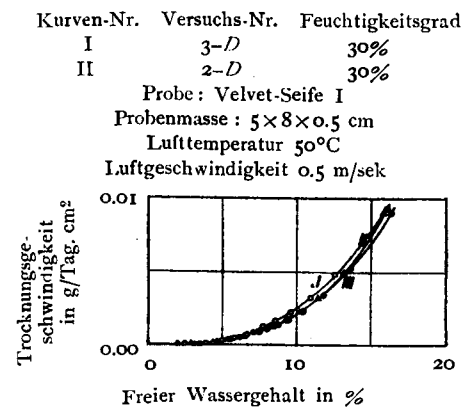


Abb. 49-A.

Kurven-Nr. Versuchs-Nr. Luftgeschwindigkeit
 I 7-B 4.0 m/sek
 II 4-B 2.14
 Probe: Velvet-Seife I
 Probenmasse: 5×8×2 cm
 Lufttemperatur 50°C, Feuchtigkeitsgrad 20%

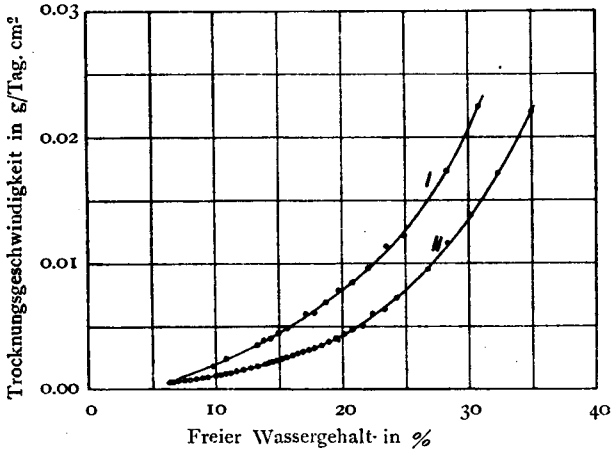


Abb. 49-B.

Kurven-Nr. Versuchs-Nr. Luftgeschwindigkeit
 I 7-B 4.0 m/sek
 II 4-B 2.14
 Probe: Velvet-Seife I
 Probenmasse: 5×8×1 cm
 Lufttemperatur 50°C
 Feuchtigkeitsgrad 20%

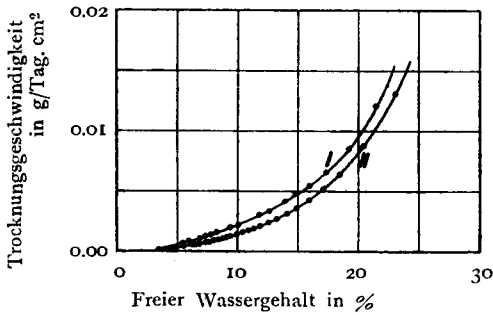
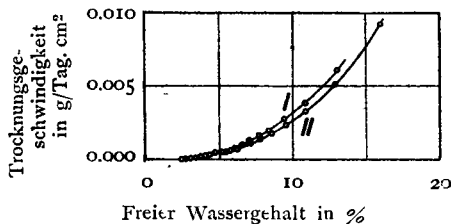


Abb. 49-C.

Kurven-Nr. Versuchs-Nr. Luftgeschwindigkeit
 I 7-D 4.0 m/sek
 II 4-D 2.14
 Probe: Velvet-Seife I
 Probenmasse: 5×8×0.5 cm
 Lufttemperatur 50°C
 Feuchtigkeitsgrad 20%



VI. Trocknung des Holzes.

Braucht man grünes Holz als Werkstoff, so ist wegen der Nachrocknung mit einer Krümmung, Spaltung oder Wellung desselben zu rechnen. Es ist daher sehr wichtig, das Holz vor dem Gebrauch richtig zu trocknen.

Nach T. D. Tieman¹⁴⁾ sitzt die Feuchtigkeit im Holz als

1. in den Zellräumen freies und
2. von den Zellwänden absorbiertes Wasser.

Beim Trocknen verschwindet nur das Wasser aus den Zellräumen, und erst dann beginnen die

Tabelle 18.

Versuchsnummer 2.

Probe: Zypressenholz, Probenmasse: 7.95×9.7×3.0 cm,
 Lufttemperatur: 30°C, Feuchtigkeitsgrad: 40%,
 Luftgeschwindigkeit: 1.42 m/sek, Trockengewicht: 84.04 g,
 Gleichgewichtswassergehalt: 6.82%.

Zeitdauer in h	Gewichtsabnahme in g/h	Trocknungsgeschwindigkeit in gh/. cm ²	Freier Wassergehalt in g %	Schwindung in %
0			96.421 114.70	0
1	3.712	0.02439	92.709 110.30	0.012
2	3.518	.02312	89.191 106.10	0.026
3	3.564	.02343	85.627 101.90	0.039
4	3.069	.02018	82.558 98.30	0.052
5	2.871	.01888	79.687 94.85	0.063
6	2.673	.01757	77.014 91.60	0.074
7	2.277	.01496	74.737 88.95	0.084
8	2.425	.01595	72.312 86.00	0.093
9	1.980	.01301	70.332 83.65	0.102
10	1.831	.01202	68.501 81.51	0.111
11	1.683	.01107	66.818 79.50	0.120
12	1.534	.01008	65.284 77.60	0.128
13	1.138	.00748	64.146 76.40	0.134
14	1.386	.00911	62.760 74.60	0.141
15	1.237	.00813	61.523 73.20	0.148
16	1.039	.00684	60.484 71.98	0.153
17	0.990	.00651	59.494 70.80	0.159
18	0.841	.00553	58.653 69.80	0.164
19	1.287	.00846	57.366 68.28	0.170
20	1.039	.00684	56.327 67.00	0.175
21	0.990	.00651	55.337 65.85	0.180
22	0.891	.00585	54.446 64.77	0.183
23	"	"	53.555 63.25	0.188
24	0.693	.00456	52.862 62.40	0.190
25	0.940	.00613	51.922 61.75	0.193
30	0.594	.00390	48.804 58.07	0.208
35	0.643	.00423	45.687 54.40	0.218
40	"	"	42.470 50.50	0.228
45	0.445	.00292	39.799 47.35	0.239
50	0.346	.00227	37.573 44.70	0.249
55	0.396	.00260	35.297 42.00	0.260
60	0.198	.00130	33.218 39.55	0.270
65	0.396	.00260	31.289 37.23	0.281
70	0.297	.00195	29.756 35.38	0.300
80	0.346	.00227	26.344 31.35	0.354
90	0.247	.00162	23.278 27.71	0.419
100	0.297	.00195	20.507 24.38	0.494
110	0.198	.00130	18.084 21.52	0.577
120	0.148	.00098	16.404 19.50	0.658
130	0.198	.00130	14.277 16.97	0.736
140	0.099	.00065	13.042 15.53	0.814
150	0.148	.00098	11.512 13.70	0.897
160	0.099	.00065	10.424 12.40	0.982
170	"	"	9.734 11.58	1.069
180	"	"	8.744 10.40	1.166
190	0.049	.00032	8.004 9.52	1.266
200	"	"	7.364 8.76	1.368
208	"	"	6.972 8.29	1.470

14) J. Frank. Inst., 1919, 194, 27.

Tabelle 19.

Versuchsnummer 19.

Probe: Kiefernholz, Probenmasse: 7.7 × 9.8 × 3.0 cm,
Lufttemperatur 40°C, Feuchtigkeitsgrad: 40%,
Luftgeschwindigkeit: 2.14 m/sek, Trockengewicht: 83.87 g,
Gleichgewichtswassergehalt: 6.65%.

Zeitdauer in h	Gewichtsabnahme in g/h	Trocknungsgeschwindigkeit in g/h. cm ²	Freier Wassergehalt in g		Schwindung in %
			g	%	
0			165.953	197.7	0
1	7.272	0.04818	158.681	189.0	"
2	"	"	151.409	180.4	"
3	"	"	144.137	171.8	"
4	"	"	136.865	163.0	"
5	"	"	129.573	154.4	"
6	"	"	122.321	145.8	"
7	"	"	115.049	137.2	0.0065
8	6.868	.04508	108.181	128.9	0.013
9	6.787	.04503	101.394	120.9	0.026
10	6.302	.04177	95.092	113.3	0.039
11	6.222	.04128	88.870	106.0	0.065
12	6.060	.04022	82.819	98.8	0.078
13	5.737	.03707	77.073	91.8	0.104
14	5.090	.03384	71.983	85.74	0.130
15	4.929	.03280	67.054	79.90	0.156
16	4.606	.03067	62.446	74.40	0.169
17	4.444	.02953	58.004	69.12	0.195
18	4.121	.02743	53.883	64.22	0.221
19	3.959	.02630	49.924	59.45	0.247
20	3.394	.02255	46.530	55.40	0.273
21	2.990	.01993	43.540	51.85	0.299
22	2.343	.01558	41.197	49.15	0.325
23	2.262	.01505	39.935	46.38	0.351
24	1.858	.01236	37.077	44.29	0.377
25	1.616	.01074	35.461	42.25	0.403
26	1.535	.01022	33.926	40.38	0.429
27	1.293	.00861	32.633	38.89	0.455
28	1.212	.00806	31.421	37.46	0.494
29	1.131	.00752	30.290	36.10	0.520
30	1.050	.00698	29.240	34.86	0.546

35	0.889	.00613	24.471	29.21	0.728
40	"	.00571	20.026	23.89	0.961
45	0.808	.00528	15.986	19.07	1.351
50	0.566	.00409	12.512	14.93	1.937
55	0.404	.00280	10.087	11.98	2.612
60	0.323	.00230	8.310	9.91	3.142
65	0.242	.00186	6.776	8.07	3.495
70	"	.00148	5.566	6.63	3.740
75	0.162	.00113	4.676	5.57	3.940
78	"	.00072	4.190	4.99	4.040

Zellwände auszutrocknen. In der ersten Stufe zeigen die physikalischen Eigenschaften des Holzes keine Veränderung, aber in der zweiten schwindet das Holz und die Festigkeit wird erhöht. F. Kollmann¹⁵⁾ berichtete, dass das Holzschwindmass beim Trocknen in der Längsrichtung in der Regel sehr klein ist und meistens vernachlässigt werden kann, während das Schwindmass quer zur Faser tangential durchschnittlich etwa doppelt so gross als radial ist.

Zu den Versuchen wurden Kiefern, Zedern und Zypressen aus Kyoto¹⁶⁾ verwendet.

Die Hölzer wurden über drei Monate ins Wasser gelegt, um einen gleichförmigen Wassergehalt zu erreichen, und dann in den richtigen Massen, meistens 8 × 10 × 3 cm, zurechtgeschnitten.

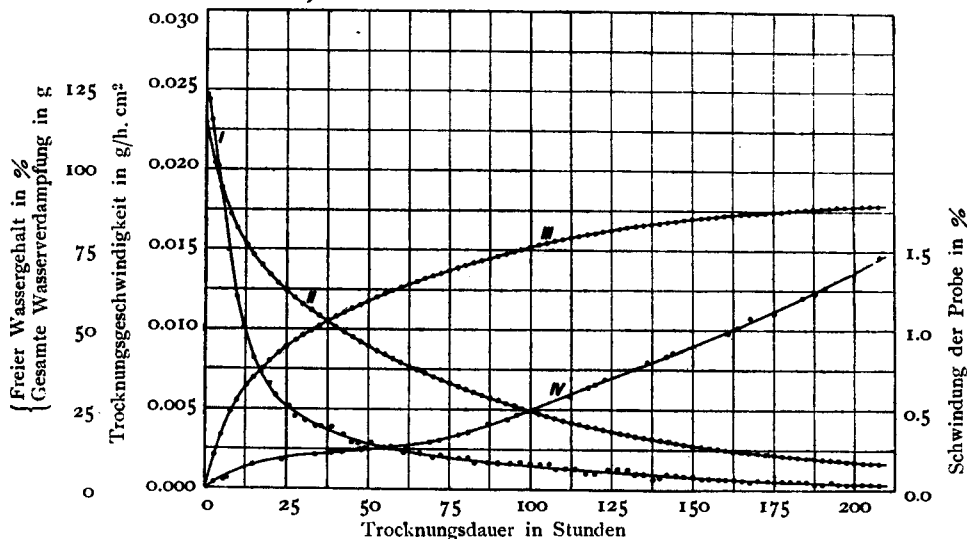
Dabei wurde vorsichtig so verfahren, dass die verdampfende Oberfläche tangential zu den Jahresringen gerichtet war.

Die Radial- sowie Längsschnittflächen wurden mit Stanniol bedeckt und dadurch vor der Verdampfung geschützt, weil aus dem langen Holz

Abb. 50.

Versuchsnummer 2.

Kurve I Trocknungsgeschwindigkeit } Lufttemperatur 30°C
 " II Freier Wassergehalt } Feuchtigkeitsgrad 40%
 " III Gesamte Wasserverdampfung } Luftgeschwindigkeit 1.42 m/sek
 " IV Schwindung der Probe
 Probenmasse: 7.95 × 9.7 × 3.0 cm
 Trockengewicht: 84.040 g



15) V. D. I. 1932, 72, 473.

16) J. Soc. Chem. Ind., Japan 1932, 35, 57 B.

Abb. 51.
Versuchsnummer 19.

Probe : Kiefernholz

Kurve I	Trocknungsgeschwindigkeit	} Lufttemperatur 40°C, Feuchtigkeitsgrad 40%, Luftgeschwindigkeit 2.14 m/sek.
" II	Freier Wassergehalt	
" III	Gesamte Wasserverdampfung	
" IV	Schwindung der Probe	
" V	Trockenkugeltemperatur	
" VI	Probentemperatur	
" VII	Feuchtkugeltemperatur	

Probenmasse : 7.7 × 9.8 × 3.0 cm,
Trockengewicht : 83.870 g.

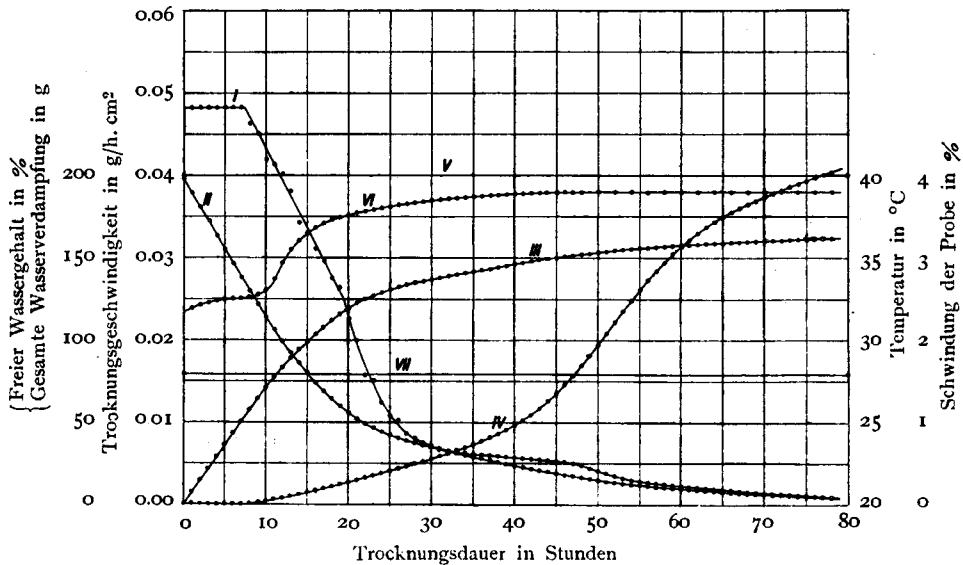
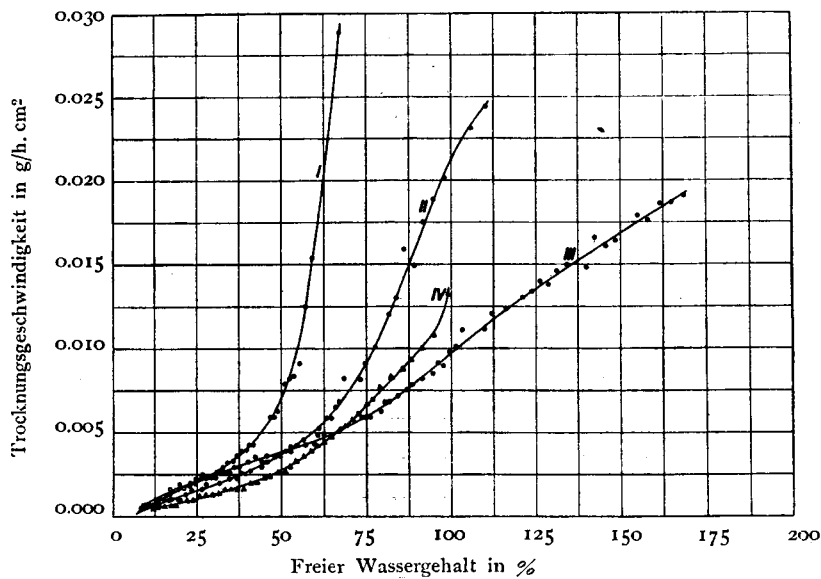


Abb. 52.

Kurven-Nr.	Versuchsnummer	Feuchtigkeitsgrad
I	1	20
II	2	40
III	2	60
IV	4	80

Lufttemperatur 30°C,
Luftgeschwindigkeit 1.42 m/sek.



der grösste Teil des Wassers quer zur Faser oder zum Jahresringe fließen muss, um dann an der Oberfläche zu verdunsten.

Die Tabellen 18 und 19 stellen die Versuchs-

und Rechnungsergebnisse der 3 Versuche mit Zypressen und des 19. Versuches mit Kiefer dar, welche auf den Abb. 50 und 51 graphisch wiedergegeben sind.

Abb. 53.

Kurven-Nr.	Versuchsnummer	Lufttemperatur
I	7	50°C
II	6	40
III	3	30
IV	5	20

} Feuchtigkeitsgrad 60,
Luftgeschwindigkeit 1.42 m/sek.

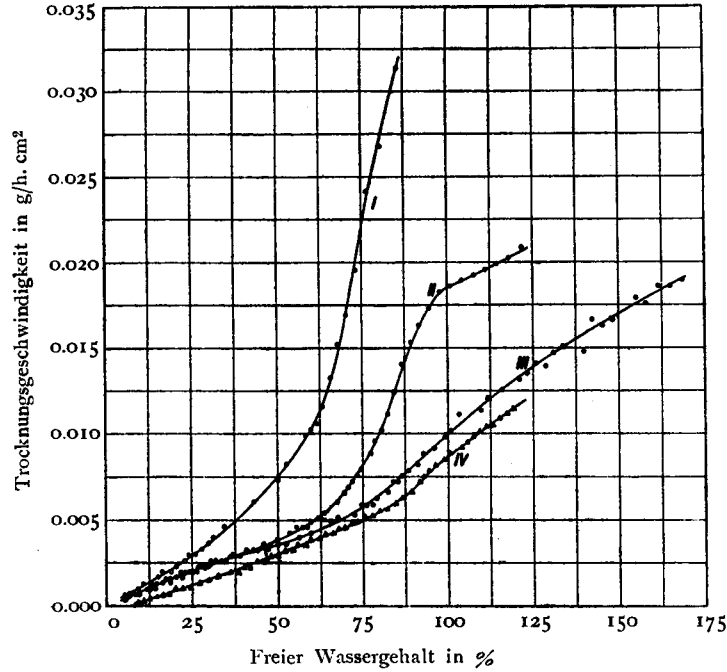
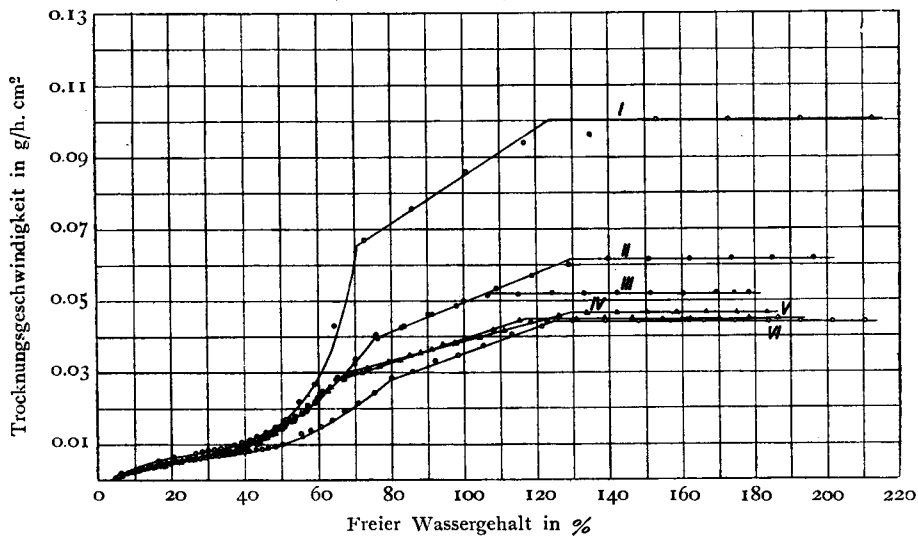


Abb. 54.

Kurven-Nr.	Versuchsnummer	Luftgeschwindigkeit
I	18	6.14 m/sek
II	16	4.00
III	15	3.12
IV	15	2.51
V	15	2.14
VI	17	0.63

} Lufttemperatur 40°C,
Feuchtigkeitsgrad 40%.

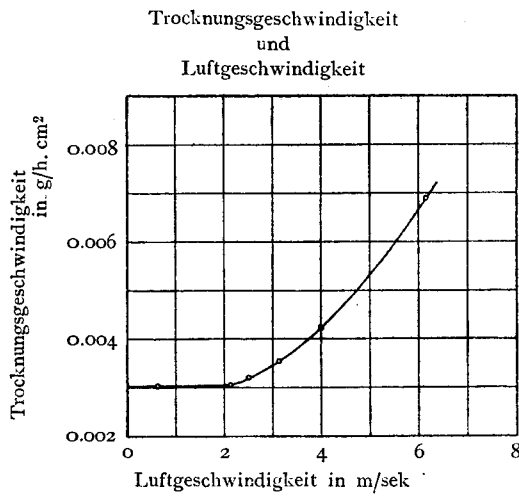


Der Trocknungsvorgang bei dem Zypressenholz, wie Abb. 50 zeigt, ist ähnlicher Natur wie der der Seife. Es gibt demnach beim Trocknen der Zypresse z.B. keine konstante Trocknungsperiode, sondern nur die zweite verlangsamte Periode.

Die Trocknung des undichten Kiefernholzes zeigt, entgegen dem dichten Zypressenholz eine ganz andere charakteristische Kurve, welche die drei Stufen der Trocknungsgeschwindigkeit, ebenso wie Ton und Papierstoff, aufweist.

Abb. 52 mit der Feuchtigkeit und Abb. 53

Abb. 55.



mit der Temperatur als Abszisse zeigen die Beziehung zwischen der Trocknungsgeschwindigkeit und der Feuchtigkeit, bzw. Temperatur der Luft, in der zweiten verlangsamteten Periode beim Trocknen des Zypressenholzes.

Die Beziehung zwischen der Trocknungsgeschwindigkeit und der Luftgeschwindigkeit bei der Trocknung von Kiefernholz ist in Abb. 54 veranschaulicht. Hält man die Temperatur und die Feuchtigkeit der Luft beständig, vergrößert sich die Trocknungsgeschwindigkeit schnell mit der Vergrößerung der Luftgeschwindigkeit.

Der Grenzschichtkoeffizient α ist durch die folgende Gleichung sehr gut ausgedrückt:

$$\alpha = b + cu^m.$$

Wenn u Null ist, wird α gleich b , welcher Wert graphisch nach Abb. 55 wie folgt bestimmt wurde:

$$\alpha_{u=0} = b = 0.0030.$$

Die Ergebnisse der Berechnungen aus den Versuchen, die sich mit dem Einfluss der Luftgeschwindigkeit beschäftigten, sind in Tabelle 20 niedergelegt und in Abb. 56 graphisch dargestellt. Der Wert $(\alpha - b)$ als Abszisse stellt die Geschwindigkeit u in Kurve II dar, welche eine Gerade zeigt, wobei die Konstanten

Tabelle 20.

Probe: Kiefernholz-I, Probenmasse: $8 \times 10 \times 3$ cm,
Lufttemperatur: 40°C , Feuchtigkeitsgrad: 40%,
Probentemperatur: 32.5°C ,
: $p_w - p = 36.633 - 55.324 \times 0.40 = 14.553$.

Ver- suchs- nummer	Luft- geschwin- digkeit m/sek	Trocknungs- geschwindigkeit g/h. cm ²	Oberflächen- koeffizient. α g/h. cm ² . mmHg	$\alpha - b$
17	0.64	0.0440	0.00302	0.00002
13	2.14	.0450	.00309	.00009
14	2.51	.0468	.00323	.00023
15	3.12	.0517	.00355	.00055
16	4.00	.0615	.00423	.00123
18	6.14	.1003	.00690	.00390

Abb. 56.

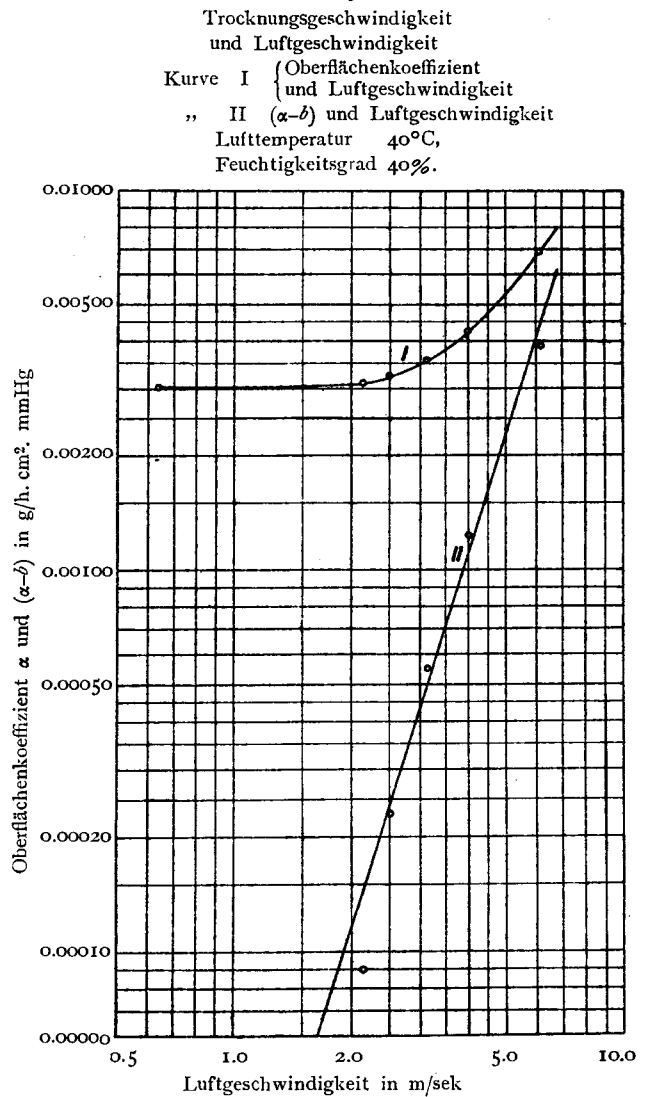
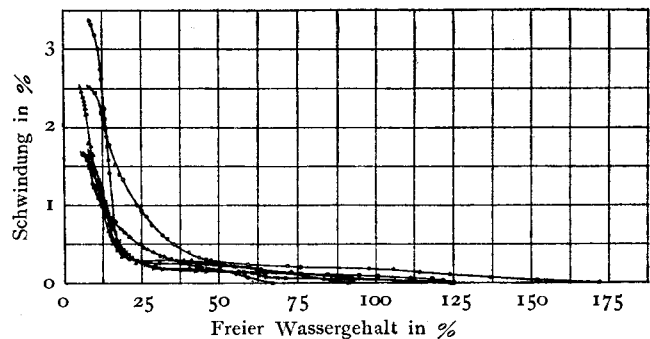


Abb. 57.

Tangentiale Schwindung des Zypressenholzes
Versuchsnummer 1~7



$$c = 0.000\ 012$$

$$m = 3.25$$

sind. Also ergibt sich die Gleichung

$$\alpha = 0.0030 + 0.000\ 012 u^{3.25}$$

Der Wert $m = 3.20$ nähert sich sehr dem des Papierstoffs $m = 3.65$.

Abb. 58.

Tangentiale Schwindung des Kiefernholzes
Versuchsnummer 13~19

Kurven-Nr.	Versuchsnummer	Luftgeschwindigkeit
I	17	0.64 m/sek
II	15	3.12
III	16	4.00
IV	19	2.14
V	11	"
VI	14	2.51

} Lufttemperatur 40°C,
} Feuchtigkeitsgrad 40%.

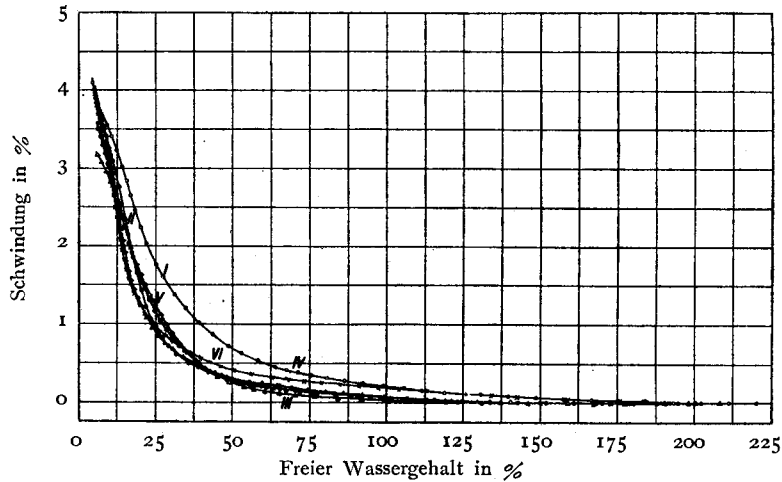


Abb. 57 und 58 mit dem freien Wassergehalt als Abszisse stellen die Trockenschwindung der Zypresse bzw. Kiefer dar. Abb. 59 zeigt diese Trockenschwindung des Kiefernholzes mit der Trocknungsdauer als Abszisse. Holz schwindet erst nach dem Sinken der Feuchtigkeit unter den Fasersättigungspunkt. Es zeigt also am Anfang bei grossem Feuchtigkeitsgehalt kein Schwinden. Dann beginnt dieses langsam und wird bei einer Feuchtigkeit von 20-30% sehr heftig. Das Schwinden bei Feuchtigkeitsabgabe und das Quellen bei Feuchtigkeitsaufnahme ist die unangenehmste Eigenschaft des Holzes. Überdies dauert das

Schwinden bis zum Ende der Trocknung.

Die bisher erwähnten Ergebnisse betreffs der tangentialen Schnittfläche sind für die Holz-trocknung am wichtigsten. Will man jedoch das Holz in Brettform trocknen, so müssen die Trocknungs- und Schwindungseigenschaften nicht nur der tangentialen, sondern auch der radialen und der Längsschnittflächen berücksichtigt werden.

Abb. 59.

Kurven-Nr.	Versuchsnummer	Luftgeschwindigkeit
I	17	0.64 m/sek
II	15	3.12
III	16	4.00
IV	18	6.14
V	13	2.14
VI	14	2.51

} Lufttemperatur 40°C,
} Feuchtigkeitsgrad 40%.

Probe: Kiefernholz

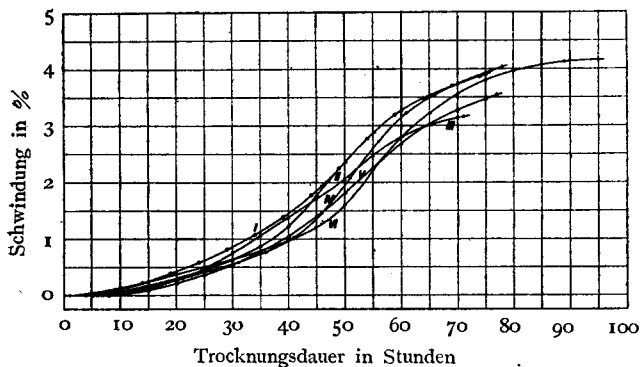


Abb. 60.

Probe	Versuchsnummer	Die verdampfende Oberfläche
I	23	Tangentialer Längsschnitt
II	25	Querschnitt
III	24	Radialer Längsschnitt

Probe: Kiefernholz

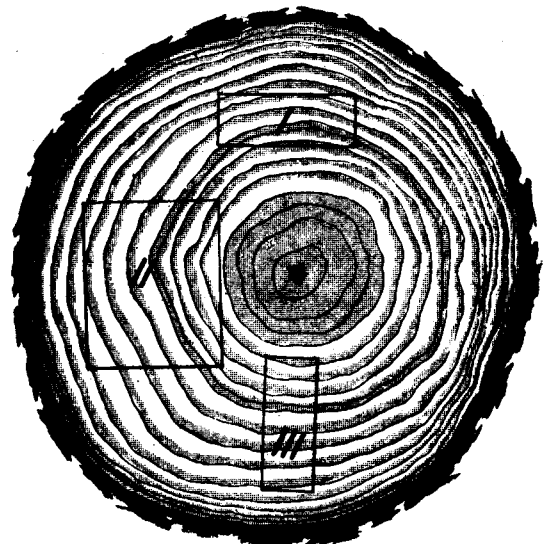


Abb. 61.

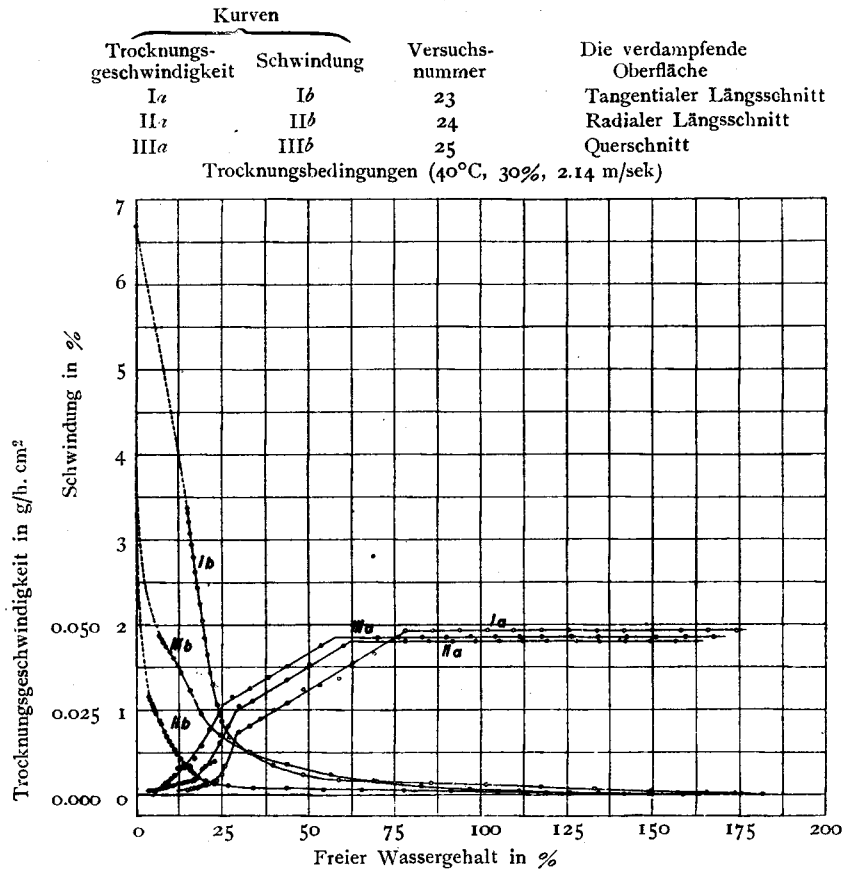


Tabelle 21.

Schwindmasse des Kiefernholzes von grünem bis zu völlig trockenem Zustand.

1. Nach dem Trocknen im Trockner
Schwindmasse v. H. in der Richtung

Versuchsnummer	tangential	radial	längs
23	4.32	3.29	0.336
24	3.72	2.53	.103
25	3.21	3.64	.336
Durchschnitt	3.72	3.23	0.258

2. Nach dem völligen Trocknen
Schwindmasse v. H. in der Richtung

Versuchsnummer	tangential	radial	längs
23	6.67	4.93	0.748
24	5.68	3.29	0.103
25	5.64	4.01	0.671
Durchschnitt	5.66	4.08	0.501

Diese Versuche wurden mit Kiefernholz in folgender Weise ausgeführt und in Abb. 60 und 61 wiedergegeben.

Versuchsnummer 23 Die verdampfende Oberfläche Tangentialer Längsschnitt (tangential zum Jahresringe)

24 Radialer Längsschnitt (radial und in Längsrichtung)
25 Querschnitt (quer zur Längsrichtung).

Die Trocknungsgeschwindigkeiten der drei Schnittflächen sind in der konstanten Periode fast gleich, in der verlangsamten Periode quer zur Längsrichtung (Nr. 25) am grössten, radial und in Längsrichtung (Nr. 24) mittel und tangential zum Jahresringe am niedrigsten.

Die Schwindmasse sind tangential zum Jahresringe am grössten, bei Radialrichtung mittel und in Längsrichtung am kleinsten, wie Tabelle 20 zeigt.

Zusammenfassung.

1. Die Trocknung des Zypressenholzes zeigt nur die zweite verlangsamte Periode, aber das Kiefernholz weist die drei Stufen der Trocknungsgeschwindigkeit auf.

2. Holz zeigt am Anfang bei grossem Feuchtigkeitsgehalt kein Schwinden, dann beginnt dieses langsam und dauert bis zum Ende der Trocknung.

3. Der Oberflächenkoeffizient für das Kiefernholz ist durch die folgende Gleichung ausgedrückt.

$$a = 0.0039 + 0.000012 u^{3.25}$$