

Untersuchung über die Trocknung fester Stoffe I.

Von Saburo Kamei

(Okt. 25, 1933)

Kapitel I. Allgemeine Vorbemerkungen betreffs der Trocknungsuntersuchungen.

1. Einleitung.
2. Der Mechanismus der Trocknung.
3. Literatur über die Trocknung.

Kapitel II. Die Versuchseinrichtungen.

1. Die Versuchsinstrumente.
2. Die Regulierung der Temperatur.
3. Die Regulierung der Feuchtigkeit.
4. Die Kalibration des Thermo- und Hygrometers.
5. Die Regulierung der Luftgeschwindigkeit.
6. Die Anfertigung der Federwaage.
7. Die Messung der Gewichtsabnahme bei der Trocknung.
8. Die Kalibration der Federwaage.
9. Die Methode bei Ausführung des Experimentes.

Kapitel III. Untersuchung über Die Trocknung von Ton.

1. Einleitung.
2. Die Probe und die Methode ihrer Behandlung.
3. Die Methode bei Ausführung des Experimentes.
4. Die Arten des Experimentes.
5. Untersuchung über den Einfluss von Temperatur, Feuchtigkeit und Geschwindigkeit der Luft auf die Trocknungsgeschwindigkeit.
6. Ergebnisse der Experimente.
7. Betrachtung der Versuchsergebnisse.
8. Die Periode der konstanten Trocknungsgeschwindigkeit.
9. Die Periode der verlangsamten Trocknungsgeschwindigkeit.
10. Zusammenfassung.

KAPITEL I.

ALLGEMEINE VORBEMERKUNGEN BETREFFS DER TROCKNUNGS-UNTERSUCHUNGEN.

1. Einleitung.

Je nach Landschaft und Lage hat jedes Land sein besonderes Klima. Unser Land, Japan, ist auf allen Seiten vom Meere umgeben. Die Regenmenge ist gross, und die Luft feucht, besonders im Sommer.

Der Unterschied zu den andern Ländern zeigt sich bei einer Zusammenstellung der Durchschnittstemperatur und -feuchtigkeit der letzten Jahre¹⁾ in den Weltstädten wie aus Tabelle I. ersichtlich wird. Abb. 1, 2 und 3 zeigen die Temperatur, die relative und absolute Feuchtigkeit in den einzelnen Monaten. Vergleicht man nun

Tokyo, Kyoto, Paris und London miteinander, so kann man keinen grossen Unterschied betreffs ihrer Winterdurchschnittstemperatur feststellen; die Feuchtigkeit ist in Tokyo sehr niedrig, in Kyoto mittel. Im Sommer dagegen ist aber die Durchschnittstemperatur jener zwei Städte sehr hoch, um ca. 10°C höher als in diesen zwei europäischen Städten. Auch die Feuchtigkeit ist dort um 10% höher als hier, d. h.: die relative Feuchtigkeit der zwei japanischen Grosstädte ist in jedem Monat sehr verschieden von der in Europas und Amerikas Städten.

Sie ist bei uns im Winter niedrig und im Sommer sehr hoch. Daher ist die Luft in der Winterzeit zu trocken, in der Sommerzeit dagegen ist sowohl die Feuchtigkeit als auch der Wärmegrad absonderlich hoch. Abb. 3 zeigt, wie es mit der Temperatur und der Feuchtigkeit im

Tabelle I.

I Mittlere Temperatur jedes Monates in °C.
 II Mittlere relative Feuchtigkeit jedes Monates in %.
 III Mittlere absolute Feuchtigkeit jedes Monates in kg. wasser/kg. trocker Luft.

Monat	Kyoto			Tokyo			New York			Paris			Berlin			London		
	I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III
Januar	2.6	78	.00355	3.0	64	.00299	-0.5	74	.00268	2.3	87	.00387	-0.7	86	.00308	3.6	85	0.00416
Februar	3.2	75	.00356	3.8	62	.00307	-0.8	71	.00252	3.6	81	.00396	0.3	83	.00320	4.3	82	.00421
März	6.3	73	.00430	6.9	67	.00411	3.1	70	.00330	5.9	77	.00442	2.9	78	.00363	5.5	79	.00497
April	12.3	73	.00643	12.7	73	.00665	9.5	68	.00500	9.9	69	.00521	7.7	69	.00449	8.1	75	.00501
Máy	16.6	73	.00968	16.5	76	.00897	16.0	70	.00787	13.0	72	.00668	12.7	65	.00592	12.0	73	.00635
Juni	21.0	78	.01212	20.5	81	.01221	21.1	72	.01120	16.5	74	.00864	16.7	64	.00755	15.2	73	.00785
Juli	25.2	79	.01595	24.1	83	.01564	24.0	72	.01346	18.3	75	.00984	18.1	68	.00880	16.9	73	.00875
August	26.2	77	.01648	25.5	82	.01687	23.0	74	.01302	17.7	77	.00971	17.4	69	.00853	16.7	76	.00898
September	22.2	80	.01341	22.0	83	.01375	19.4	76	.01069	14.7	81	.00844	13.9	75	.00740	14.1	80	.00794
Oktober	15.6	81	.00893	15.9	80	.00899	13.3	72	.00681	10.1	86	.00660	9.0	81	.00572	9.9	85	.00642
November	9.7	81	.00604	10.3	74	.00575	6.9	72	.00442	5.8	88	.00502	3.6	85	.00416	6.7	86	.00522
Dezember	4.6	79	.00414	5.3	66	.00363	1.3	72	.00298	2.7	88	.00403	0.5	87	.00340	4.9	86	.00461

1) (Rikanenpyδ, 1927-28)

Abb. 1

Mittlere Temperatur der einzelnen Monate in den Weltstädten

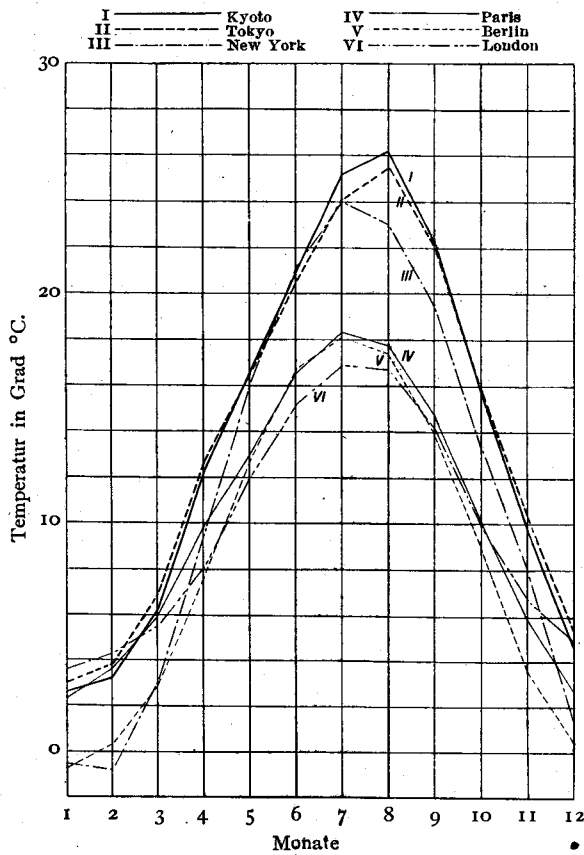


Abb. 3

Mittlere absolute Feuchtigkeit der einzelnen Monate in den Weltstädten

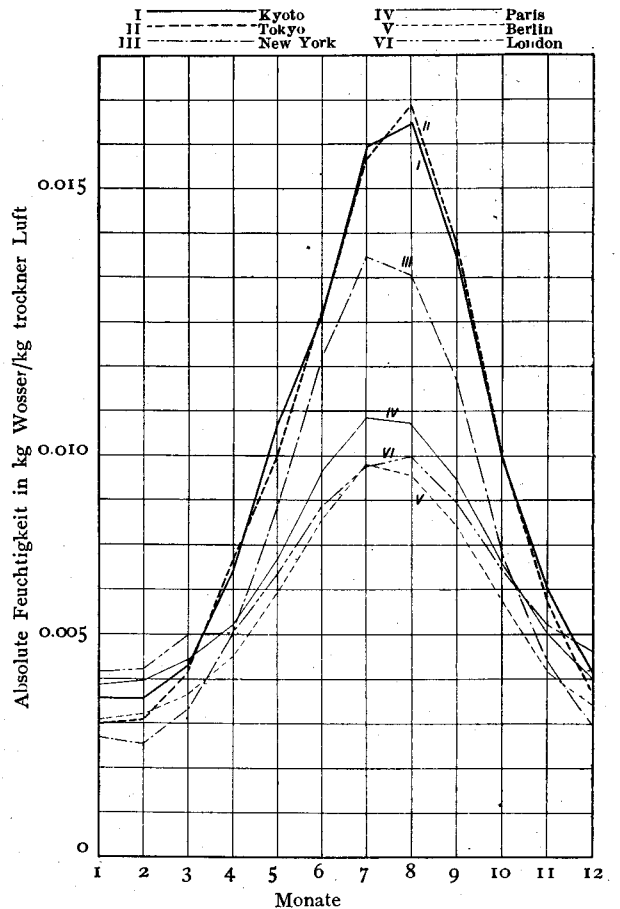
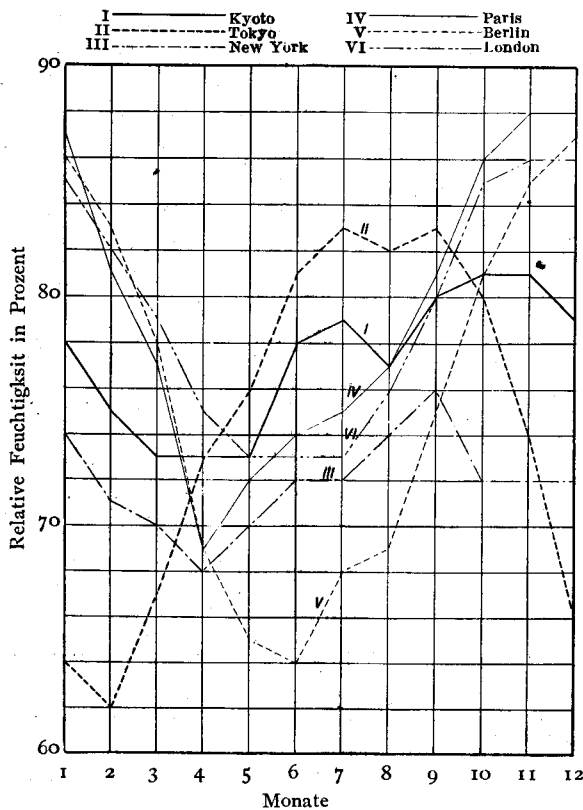


Abb. 2

Mittlere relative Feuchtigkeit der einzelnen Monate in den Weltstädten



Sommer bei uns bestellt ist.

Ein solches Klima wirkt natürlich nicht nur auf den Körperzustand des Menschen ein, sondern auch in hohem Masse störend auf die verschiedene Industrien. Infolge dieser Ungunst des Klimas können manche Industriezweige bei uns nicht den sonst wohl möglichen Aufschwung nehmen.

Dass die Trocknung der Rohstoffe, der Zwischenprodukte und der fertigen Erzeugnisse der wichtigste Prozess bei einer jeden chemischen Fabrikation ist, weiss man in Japan sehr wohl, und bemüht sich aus den obenangegebenen Gründen besonders, sie mit Erzielung höchstmöglicher Ausbeute durchzuführen.

Eine Trocknung; d. h. einen Stoff trocknen, ist ein ganz alltäglicher Vorgang und wird daher für einen einfachen Prozess gehalten. In Wirklichkeit ist es aber ziemlich schwer, eine Trocknung industriell mit guter Ausbeute in bezug auf Wärmemenge und Zeit durchzuführen.

Man kann allgemein die Faktoren, welche die Trocknung der festen Stoffe bewirken, in äussere und innere einteilen.

Die äusseren Faktoren beziehen sich nicht auf den Trockenkörper selbst; es sind Temperatur, Feuchtigkeit, Geschwindigkeit, Richtung der Tro-

ckenluft usw. Man kann sie verhältnismässig leicht erfassen.

Bei den inneren Faktoren handelt es sich um die physikalisch-chemischen Eigenschaften des Trockenkörpers, z. B. dessen Art, Bestandteile, Form, Dimension, Dichtigkeit, Feuchtigkeitsgehalt, Feuchtigkeits-gleichgewicht, Trockenzustand usw. Sei sind während des Trockenvorganges mehr oder weniger stark Veränderungen ausgesetzt. Betreffs dieser Veränderungen aber ist man sich über die Zusammenhänge noch nicht so klar und verfügt über keine so sicheren Erkenntnisse wie bei den äusseren Faktoren.

Ausserdem hat jeder Trockner seine spezielle Funktion und die einzelnen Trockenwirkungen unterscheiden sich stark voneinander. Wo man überhaupt den Trockenvorgang zu analysieren versucht, wird er sich meist sehr kompliziert zeigen; untersucht man aber einen Stoff näher, und kann seine Dimension, Form und Feuchtigkeit vor und nach dem Vorgange des Trocknens berechnen, ist es nicht so schwer, die besten Trocknungsbedingungen für den betreffenden Stoff festzustellen, die einem bestimmten Trockner am besten entsprechen. Weiter wird die Theorie, die sich für einen Stoff und seinen Trockner aufstellen lässt, schon mit geringer Veränderung auf einen andern Stoff oder einen andern Trockner Anwendung finden können.

Die Aufgabe dieser Untersuchung ist es nun den Mechanismus der Trocknung der verschiedenen Stoffe unter den mannigfachen Trocknungsbedingungen zu studieren, und die günstigsten Bedingungen für den entsprechenden Trockner zu berechnen zur Erreichung der grössten Produktivität bei grösstmöglicher Förderung des Trockenverfahrens.

2. Der Mechanismus der Trocknung.

Bei der Trocknung eines festen Körpers von einer gewissen Dicke muss das Wasser zunächst mit Hilfe eines besonderen Mechanismus vom Innern bis zur Oberfläche desselben diffundieren, um dort verdampfen und in die umgebende Luft entweichen zu können.

Im ersten Augenblick des Trockenvorganges erfolgt die Verdampfung an der Oberfläche des Körpers, der vor dem Vorgang einen überall gleichen Wassergehalt besass, und die in ihr enthaltene Feuchtigkeit wird dabei ebenfalls verringert. Also entsteht ein Konzentrationsunterschied in der Feuchtigkeit, d. h. der Konzentrationsgradient der Oberfläche und des Innern sind verschieden, wodurch das Wasser eine Diffusion von innen nach aussen erfährt und dann in die freie Luft entweicht.

Diese zwei Wirkungen: die Diffusion und die Oberflächenverdampfung dauern an bis der be-

handelte Körper mit der Trockenluft ins Feuchtigkeitsgleichgewicht gebracht ist, und damit die Trocknung beendet ist.

Die Diffusion des Wassers geschieht nicht immer in flüssigem Zustande, sondern aller Vermutung nach in einem gewissen Trockenstadium auch in Dampfform. Aus diesem Grund kann man bei dem Mechanismus der Lufttrocknung zwei Arten wie folgt unterscheiden:

I. Diffusion in Flüssigkeitsform.

Nachdem die Diffusion vom Innern des Körpers bis zur Oberfläche in Flüssigkeitsform erfolgt ist, entweicht die Feuchtigkeit aus der Oberfläche und der bei entstandene Wasserdampf diffundiert in die umgebende Luft.

II. Diffusion in Dampfform.

Nachdem die Verdampfung des Wassers an einer Stelle innerhalb des Körpers erfolgt ist, dringt der daraus entstandene Dampf bis zur Oberfläche hin durch und dann in die umgebende Luft.

Beim Verdampfen muss also das Wasser einen zweifachen Widerstand überwinden. Erstens den Widerstand gegen die Diffusion innerhalb des Körpers, zweitens den gegen die Oberflächenverdampfung bei der Diffusion von der Oberfläche des Körpers, durch die ihn umgebende Luftschicht bis in die freie Luft.

Dies sind die beiden Hauptwiderstände beim Verdampfen der Feuchtigkeit vom Innern des Körpers bis in die umgebende Luft. Bald ist die Diffusion, die den Hauptfaktor bei der Trocknung ausmacht, bald ist ihr Leistungsgrad von der Oberflächenverdampfung bedingt.

Vergleicht man den Widerstand bei der Diffusion und bei der Oberflächenverdampfung mit einander, so ergibt sich, dass bald der erstere, bald der letztere je nach dem Trockenzustand die Hauptrolle spielt. Der Mechanismus der Trocknung I und II kann in dieser Beziehung folgendermassen weiterhin eingeteilt werden:

I. Die Verdampfung erfolgt hauptsächlich an der Oberfläche des Körpers.

A. Der Widerstand gegen die Oberflächenverdampfung spielt die Hauptrolle, während der Widerstand gegen die Diffusion im Innern im Vergleich zu dem bei der Verdampfung gering ist.

B. Der Widerstand gegen die Diffusion im Innern spielt die Hauptrolle, während der Widerstand gegen die Oberflächenverdampfung im Vergleich zu der Diffusion gering ist.

II. Die Verdampfung erfolgt hauptsächlich im Innern des Körpers.

A. Der Widerstand gegen die Oberflächenverdampfung spielt die Hauptrolle, während der Widerstand gegen die Diffu-

sion im Innern im Vergleich zu dem bei der Verdampfung gering ist.

- B. Der Widerstand gegen die Diffusion im Innern spielt die Hauptrolle, während der Widerstand gegen die Oberflächenverdampfung im Vergleich zu der Diffusion gering ist.

Wird der Widerstand gegen die Diffusion im Innern grösser, so diffundiert das Wasser zuerst in flüssiger Form bis zu einem gewissen Punkte im Innern des Körpers, verdampft dort und diffundiert in Dampfform von diesem Punkte bis an die Oberfläche des Körpers, von wo es dann durch das trocknende Medium abgeführt wird. Diesen Vorgang wollen wir als Fall II bezeichnen, da in Wirklichkeit der Fall II A, wo der Widerstand gegen die Diffusion im Innern gering ist, nicht vorkommt. Wenn der Widerstand gegen die Diffusion im Gegensatz zu der Oberflächenverdampfung gering ist, so entsteht daraus naturgemäss der Fall I A, bei dem das Wasser in flüssiger Form bis zur Oberfläche diffundiert und im Dampfzustande von letzterer entweicht.

Jeder Trocknungsmechanismus von festen Körpern muss daher einem von diesen dreien, I A, I B und II B angehören. Hiernach sind die bei der Trocknung zu berücksichtigenden Bedingungen auszuwählen und je nach Bedarf zu verändern.

Aber selbst die Trocknung eines Körpers erfolgt von Anfang bis zu Ende des Vorganges nicht immer mit ein und derselben Gesetzmässigkeit innerhalb eines bestimmten von diesen drei Mechanismen, sondern sie kann im Laufe der Zeit auch von dem einem Mechanismus zu dem andern übergehen.

Wenn man z. B. einen Körper von beträchtlichem Feuchtigkeitsgehalt trocknet, so erfolgt zuerst die Verdampfung an der Oberfläche. In der ersten Stufe des Trockenvorganges gehört der Mechanismus zu dem I A-Prozess. Aber im Verlaufe der Trocknung wird der Feuchtigkeitsgehalt verringert, und der Mechanismus geht oft in einen andern, I B oder II B, über. Es mag sein, dass der Vorgang bei der Trocknung gleicher Körper von einem bestimmten Feuchtigkeitsgehalt an einen ungleichen Verlauf nimmt, weil die Trockenluftbedingungen verschieden sind.

Wenn der Feuchtigkeitsgehalt bei der Trocknung von Körpern, wie z. B. rohem Holz, Tonwaren oder Seife, an der Oberfläche verringert wird, so soll er durch die Diffusion im Innern ergänzt werden. Erfolgt aber die Oberflächenverdampfung zu schnell, so kann ihr die Diffusion nicht folgen, und nur die Oberfläche des Körpers

trocknet und kontrahiert, während das Innere noch feucht ist. Ueberdies entsteht an der Oberfläche nacheinander Krümmung, Spaltung oder Wellung, weil das Innere zur Kontraktion unfähig ist. Man muss also bei der Trocknung solch eines Körpers die Oberflächenverdampfung derart regulieren, dass die Diffusion ihr zu folgen vermag.

Da Faserstoffe wie Papier, Leder, Gewebe im Gegenteil gemäss ihrer Kapillarwirkung eine starke Diffusionskraft haben, kann man die Oberflächenverdampfung fördern, ohne Rücksicht auf die Diffusion nehmen zu müssen.

3. Literatur über die Trocknung.

Obgleich viel Literatur bezüglich der Trocknung und des Trockners vorliegt, gibt es doch sehr wenige theoretische Untersuchungen über die Trocknung und den Mechanismus der Trocknung selbst. Einige der wichtigsten von ihnen seien hier im folgenden angeführt:

E. A. Fischer²⁾ führte viele Experimente mit verschiedenen Feststoffen wie Gewebe, Ton, Erde, Sand usw. aus und berechnete die Trocknungsgeschwindigkeit, indem er in einem geschlossenen, dem Exiccator gleichenden Gefäss mit Schwefelsäure von bestimmter Konzentration die Probe aufhängte. Alsdann stellte er das Ergebnis der Experimente in graphischer Darstellung auf einem Papier von grossem Format dar und zwar gab er an: die Kurven des Feuchtigkeitsgrades (w) im Gegensatz zu der Trockenzeitdauer (θ). Indem er an die Kurven die Tangenten legte, erhielt er die Verdampfungsgeschwindigkeit $dw/d\theta$, die der zeitlichen Veränderung des Feuchtigkeitsgehaltes äquivalent ist, und zeichnete die Verdampfungszahl im Gegensatz zu dem Feuchtigkeitsgehalt auf. Aber es zeigte sich bald, dass die Verdampfungsgeschwindigkeit, die man auf die Weise aus der graphischen Darstellung erhielt stark fehlerhaft war. Ueberdies fehlten die Angaben über Temperatur und Feuchtigkeit in seiner Mitteilung.

Die Beobachtungen von D. C. Lindsay und Wadleigh³⁾ hatten bei der Trocknung von Ton stattgefunden; sie beweisen, dass die Verdampfungsgeschwindigkeit des Feuchtigkeitsgehaltes unter dem Einfluss des Wasserdampfdrucks des Körpers, des Partialdrucks des Wasserdampfes in der Luft, der Luftgeschwindigkeit und des physikalischen Zustandes des Körpers steht. Sie benutzten beim Experimentieren „Carrier Processing Cabinet“ und erfanden die graphische Trocknungsdarstellung des Tones.

R. S. Troop und F. Wheeler⁴⁾ berechneten die Trockengeschwindigkeit eines Zylinders aus

2) E. A. Fischer (Proc. Roy. Soc., 1923, **103**, 139; 1924, **105**, 571; J. Agric. Sci., 1923, **13**, 121; 1924, **14**, 126).

3) D. C. Lindsay and W. H. Wadleigh (J. Am. Cer. Soc., 1925, **8**, 677).

4) R. S. Troop and F. Wheeler (Trans. Eng. Cer. Soc., 1927, **27**, 231; British Clayworker, 1927, **36**, 208).

feuerfestem Ton, der sich in einem kupfernen, an einem Ende geschlossenen Hohlzylinder befand, aus dem andern, nämlich dem offenen Ende jenes Zylinders.

W. K. Lewis⁵⁾ hat theoretisch die empirischen Formeln der Trocknung aufgestellt, und versuchte an Hand derselben die verschiedenen Forschungsergebnisse betreffs der Trocknung nachzuprüfen. Die Formeln sind zwar etwas zu experimental, doch sehr nützlich.

W. H. Carrier⁶⁾ berichtete nach zahlreichen Experimenten, dass die Feuchtkugeltemperatur des verdampfenden Körpers durch die Ausstrahlungswärme aus den umgebenden, sich in der Trocknungskugeltemperatur befindenden Wänden an dem Anzeigefehler leidet, sich höher beobachten zu lassen, als sie wirklich ist, und dass sie unter dem starken Einfluss der Luftgeschwindigkeit über der Kugelfläche steht. Er hat den Einfluss der Luftgeschwindigkeit auf die Verdampfungszahl untersucht und entdeckte dabei, dass die Verdampfung bei 230 ft/min Luftgeschwindigkeit das Doppelte der natürlichen Konvektion beträgt, bei 460 ft/min das Dreifache derselben.

R. Rieke⁷⁾ hat den Trocknungszustand verschiedener Arten von deutschem Ton untersucht.

Es ist T. K. Sherwood,⁸⁾ der zuerst die Trocknung überhaupt streng methodisch behandelte.

Er untersuchte die Trocknung verschiedener homogener Körper und erforschte dabei den Mechanismus der Trocknung. Es ist bedauerlich, dass seiner Untersuchung die Feuchtigkeitsregulierung fehlt.

Weiterhin liegen noch Arbeiten vor über das Holz von Tiemann,⁹⁾ Tuttle¹⁰⁾ und Moll¹¹⁾ und über den Ton von Keen,¹²⁾ Washburn¹³⁾ Geller¹⁴⁾ und so weiter.

KAPITEL II.

DIE VERSUCHSEINRICHTUNGEN.

1. Die Versuchsapparate.

Wie erwähnt, haben die verschiedenen Bedingungen bezüglich Trockenstoff, Trockenluft oder Trockenapparat grossen Einfluss auf die Trocknung fester Körper.

Da das Trocknungsexperiment auch in Rücksicht auf alle diese Variablen nicht zu gleicher Zeit unternommen werden kann, hält man zuerst die

meisten Bedingungen konstant und ändert immer nur einige von ihnen der Reihe nach. Dann kann man von hier auf die allgemeinen Verhältnisse schliessen.

Die für ein Experiment geeignete Vorrichtung hat die Temperatur, Feuchtigkeit und Geschwindigkeit der Trockenluft, ganz so wie man es wünscht, zu regulieren und das Gewicht, die Temperatur und den Kontraktionsgrad der Trocknungsprobe ohne Einfluss auf den Verlauf der Trocknung zu messen.

Die Vorrichtungen, die von mehreren Forschern angewandt wurden, waren nicht ganz genügend. Man siehe diesbezüglich bei den Kapitel I-3 erwähnten Forschern nach.

E. A. Fischer²⁾ hat einen Exicator mit Schwefelsäure bestimmter Konzentration angewandt. R. S. Troop & F. Wheeler⁴⁾ haben die durch das Gefäss mit Schwefelsäure bestimmter Konzentration durchgegangene Luft zu einem kleinen Trockenkasten aus Kupfer geleitet, der in einen Thermostat eingetaucht war, um die Temperatur konstant zu halten. D. C. Lindsay & W. H. Wadleigh³⁾ haben „Carrier Processing Cabinet“ zur Anwendung gebracht. Das ist ein elektrischer Thermostat. Die Temperatur war dabei durch den Widerstand, die Luftgeschwindigkeit durch die Veränderung der Umdrehungszahl des Motors und die Feuchtigkeit durch die Wechselung der Wasser sprühdüsen zu regulieren. Obgleich man, da ein deutlicher Bericht fehlt, über das Versuchsergebnis sich nicht klar werden kann, lässt sich doch sagen, dass es ziemlich schwer sein muss, die allgültige Regulierung der Feuchtigkeit nur durch die Sprühdüsen in ihrer einfachen Versuchsapparatur zu verrichten.

T. K. Sherwood⁸⁾ verwandte den Tunnel-trockner. Er hat die Temperatur und die Geschwindigkeit fast nach der gleichen Methode wie Lindsay & Wadleigh reguliert, hat aber keinen Feuchtigkeitsregler verwandt.

„Carrier Processing Cabinet“ in der Abteilung chemisches Ingenieurwesen an der Universität Columbia, New York, wird als Apparat zur Befeuchtung und Entfeuchtung der Luft beim Experimentieren der Studenten verwandt. Dieser Apparat lässt sich auch als Trocknungsvorrichtung verwenden. Die Regulierung der Temperatur und Geschwindigkeit der Luft ist ungefähr dieselbe wie in dem vorgehenden Falle, die aber der

5) W. K. Lewis (J. Ind. Eng. Chem., 1921, 13, 427).

6) W. H. Carrier (J. Ind. Eng. Chem., 1921, 13, 432; Refrigerating Eng., 1925, 11, 241).

7) R. Rieke (Ber. Deutsch. Ker. Gesell., 1931, 12, 556).

8) T. K. Sherwood (J. Ind. Eng. Chem., 1929, 21, 12 & 976; 1930, 22, 132; 1932, 24, 307; Trans. Am. Inst. Chem., 1929, 25, 28).

9) H. D. Tiemann (J. Frank. Inst., 1919, 194, 27).

10) F. Tuttle (ditto, 1925, 200, 609).

11) F. Moll (V. D. I., 1930, 74, 343).

12) B. A. Keen (J. Agric. Sci., 1914, 6, 456).

13) Washburn (J. Am. Cer. Soc., 1918, 1, 25).

14) R. F. Geller (Trans. Am. Cer. Soc., 1921, 4, 288).

Feuchtigkeit ist etwas anders d. h.: um Luft von niedrigerem Feuchtigkeitsgehalt zu bekommen, benutzt man einen Soleluftkühler ein fünftonniger Kühlapparat gehört ausschliesslich zu dieser Vorrichtung. Es handelt sich also hier um Experimentierapparaturen in sehr grossartigem Massstabe.

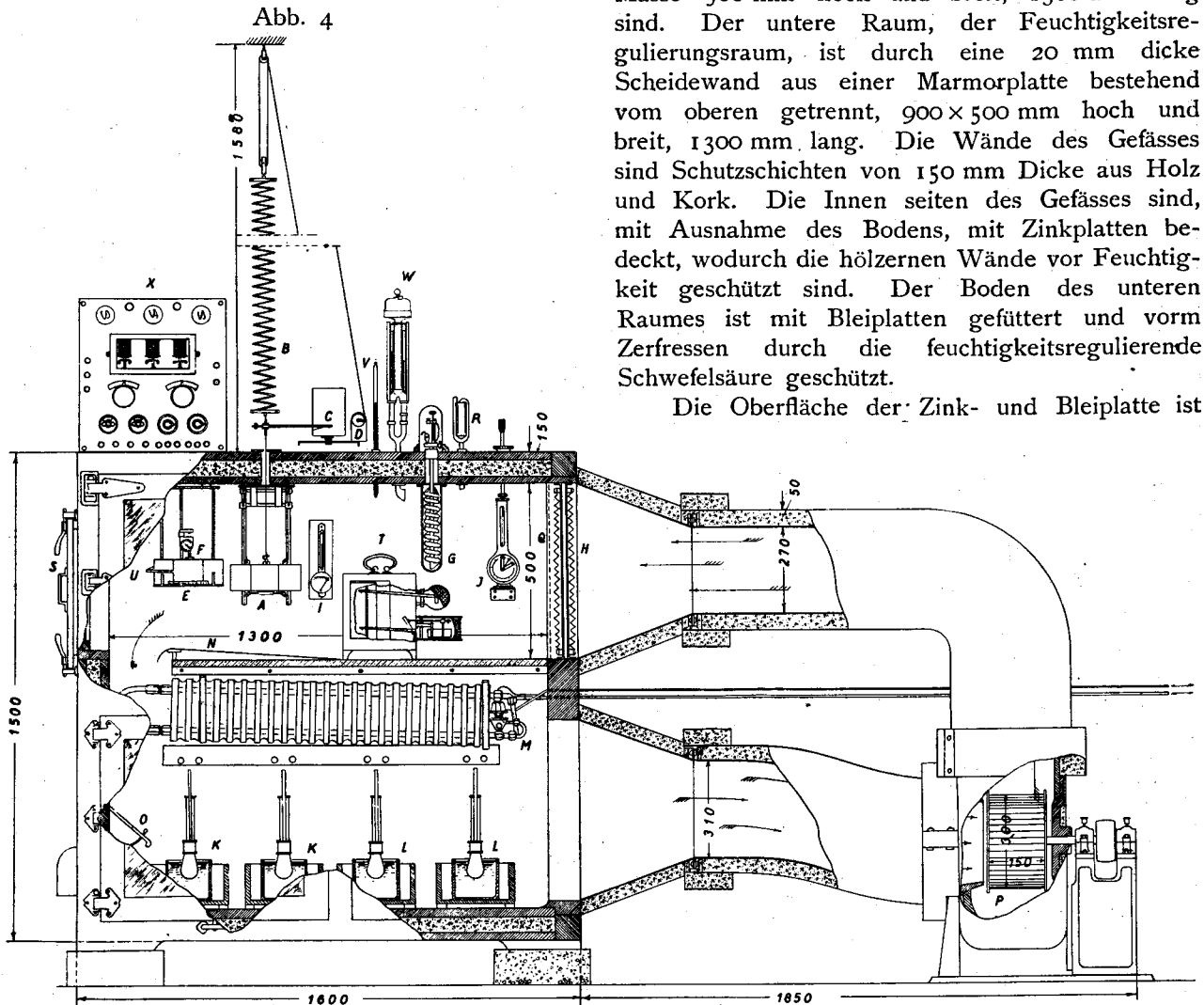
Der sogenannte Thermo- und Hygrostat, der von japanischen Werkstätten zum Verkauf gestellt wird, ist für die Methode berechnet, wo Schwefelsäure oder Sprühdüsen zur Verwendung gelangen oder man sich eines besonderen Absorptionsmittels bedient. Mit diesem Apparat lässt sich die Temperatur oder Feuchtigkeit in einem verhältnismässig engem Bereich konstant halten, in weiterem Bezirk aber lässt sie sich nicht je nach Belieben

regulieren. Man kann überdies diese Vorrichtung als Versuchsapparat für Trocknung in den Fällen nicht benutzen, wo die Luftgeschwindigkeit mit in Betracht kommt.

Bevor der Verfasser also mit der Untersuchung beginnen kann, muss zuerst ein vollkommener Apparat für die Trocknungsexperimente gefunden werden. Indem er die Vorrichtungen der obenangegebenen Forschern nachprüfte, verfertigte er einen Apparat mit einem besonderen Feuchtigkeitsregler, wie Abb. 4 und 5 zeigt. Am Anfang traten die Fehler einer nach dem andern hervor, und es kostete viel Zeit, sie abzustellen.

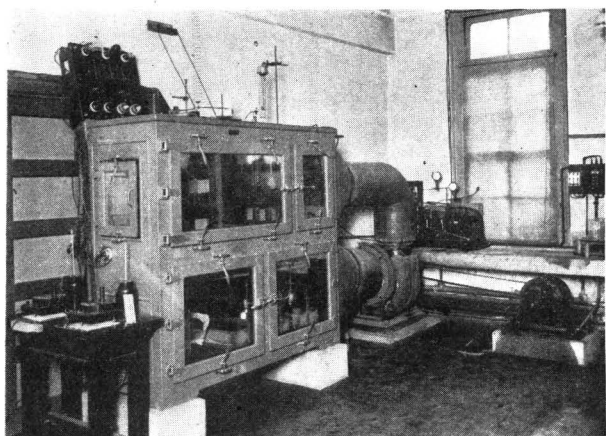
Der Thermo- und Hygrostat besteht aus zwei Räumen, dem oberen und dem unteren. Der obere Raum ist der Trockenraum, dessen innere Masse 500 mm hoch und breit, 1300 mm lang sind. Der untere Raum, der Feuchtigkeitsregulierungsraum, ist durch eine 20 mm dicke Scheidewand aus einer Marmorplatte bestehend vom oberen getrennt, 900 x 500 mm hoch und breit, 1300 mm lang. Die Wände des Gefässes sind Schutzschichten von 150 mm Dicke aus Holz und Kork. Die Innen seiten des Gefässes sind, mit Ausnahme des Bodens, mit Zinkplatten bedeckt, wodurch die hölzernen Wände vor Feuchtigkeit geschützt sind. Der Boden des unteren Raumes ist mit Bleiplatten gefüttert und vorm Zerfressen durch die feuchtigkeitsregulierende Schwefelsäure geschützt.

Die Oberfläche der Zink- und Bleiplatte ist



- | | | |
|--------------------------|--|--|
| A Probe | J. Feuchtigkeitsregler | R. Druckmesser |
| B Federwage | KK Gefäss mit der konzentrierten Schwefelsäure | S Seitentür |
| C Registriertrommel | LL Gefäss mit der verdünnten Schwefelsäure | T Registrierthermo- und hygrograph |
| D Kran | M Kühlapparat | U Thermoelement |
| E Zweite Probe | N & O Dämpfer | V Thermometer |
| F Zifferlehre | P Siroccoventilator | W Aspirationspsychrometer nach Assman. |
| G Temperaturregler | Q Punzierte Eisenplatte | X Relais |
| H Elektrischer Vorwärmer | | |
| I Hygrometer | | |

Abb. 5



weiterhin mit Japanlack und Emaille überzogen. Der obere Raum hat auf der Vorderseite zwei dreifache Glastüren, auf der Seite eine solche Tür der untere Raum nur auf der Vorderseite zwei derselben. Zwischen den Glasscheiben ist der Raum luftdicht, mit Gummipackung versehen.

P ist ein Siroccoventilator (300×150 mm), hält Verbindung mit einem elektrischen Motor von zwei Pferdestärken Gleichstrom und hat als Maximalbetrag eine Lüftungsfähigkeit von ca. $60 \text{ m}^3/\text{min}$. Die Trockenluft wird durch die untere Luftröhre zum Ventilator und dann durch die obere Luftröhre zum Trockenraum geleitet. Die obere und untere Luftröhre besteht aus einem Zylinder aus geschweisstem Eisen, ihr Durchmesser beträgt 270 mm bzw. 310 mm. Die Röhren und auch der Ventilator haben eine Schutzschicht aus Kork von 50 mm Dicke. An dem Eingang des Trockenraumes befinden sich der elektrische Vorwärmer, H und die punzierte Eisenplatte zum Vereinheitlichen der Luftgeschwindigkeit, Q. Die Luft, die den Trockenraum passierte verändert langsam ihren Weg durch die Dämpfer am linken Rand, N und O, und wird dem Feuchtigkeitsregulierungsraum zugeleitet. Sie ist dort richtig zu regulieren, gelangt dann durch die untere Röhre wieder zum Ventilator, um aufs neue den Kreislauf anzutreten.

Jeder Teil des Trockenapparates ist in Abb. 4, mit Bezeichnung versehen, dargestellt.

2. Die Regulierung der Temperatur.

Der Temperaturregler ist nach der bei Quecksilber und Toluol beobachteten Methode hergestellt, der dabei anzuwendende Umschalter ist das Relais nach Chino. Ein Wechselstrom von 220 Volt stellt die elektrische Quelle vor, und es ist möglich, durch zwei dreistufige Umschalter den elektrischen Strom, der zum Vorwärmer führt, innerhalb des breiten Bereiches auf $1,5$ bis $19,0$ Ampere nach Belieben zu verändern.

Die Temperatur des Apparates durch den

stärksten elektrischen Strom um 10°C höher als die Raumtemperatur zu steigern, kostet etwa 20 Minuten, um weitere 20°C höher etwa 40 Minuten. Nachdem die gehörige Temperatur erreicht ist, bedient man sich eines elektrischen Stromes, von $1,5$ Ampere, wenn die Differenz zwischen den Temperaturen des Apparates und des Raumes innerhalb 10°C bleibt; beträgt die Differenz $10\sim 20^\circ\text{C}$ bzw. $20\sim 30^\circ\text{C}$, so bedient man sich eines Stromes von $3,0$ bzw. $6,5$ Ampere. Die Temperatur ist auf diese Weise, trotz verschiedener Umstände, wie sie sich durch eine Differenz zwischen den Temperaturen des Apparates und des Raumes ergeben oder bei verschiedener Luftgeschwindigkeit, bei etwa $\pm (0,1-0,2)^\circ\text{C}$ konstant. Beim Experimentieren, wo die Temperaturdifferenz unter 5°C beträgt, oder die Temperatur des Apparates niedriger als die des Raumes ist, reguliert man die Temperatur mittels eines Kühlers.

Als Kühler, dessen Kühlmittel Methyl-Chlorid ist, diente der Typus 30 - A nach Servel & Co., Amerika. Die Veränderung des Dampfdrucks im Kühlrohr M, die unter dem Einfluss des Temperaturwechsels in dem Thermostaten sich vollzieht, wirkt auf den automatischen Umschalter und schaltet den elektrischen Strom des Motors in Verbindung mit den Kompressoren ein oder aus. Indem der Verfasser je nach den Umständen den Kühler und zugleich den Vorwärmer benutzt, erreicht er eine Regulierung der Temperatur und der Feuchtigkeit.

3. Die Regulierung der Feuchtigkeit.

In Abb. 4 bedeuten die Zeichen:

- I Haarhygrometer nach Lambrecht,
- W Aspirationspsychrometer nach Assmann,
- T Registrierthermo- und hygroph nach Fuess,
- J Haarhygrometer nach Riken.

J ist in diesem Experiment auch als Feuchtigkeitsregler anzuwenden. Die Regulierung der Feuchtigkeit hat gute Ergebnisse gezeigt, indem man die Luft für den gewünschten Dampfdruck durch zwei Arten von Schwefelsäure, konzentriert und verdünnt, an- oder entfeuchten lässt. Die Gefäße der Schwefelsäure sind aus Glas, würfelförmig $340 \times 140 \times 120$ mm; sie stehen in mit Blei gefütterten Kästen aus Asbestplatten und sind gut zu handhaben. Man benutzt vier Gefäße, zwei zum Anfeuchten, die anderen zwei zum Entfeuchten. In die Gefäße zum Entfeuchten tut man etwa je $3/4$ der Säure mit etwas niedrigerem Dampfdruck als der erforderliche Feuchtigkeitsgrad, d.h. mit hohem Konzentrationsgrad und in die Gefäße zum Anfeuchten etwa je $4/5$ der Säure mit etwas höherem Feuchtigkeitsgrad als eigentlich nötig, d.h. mit niedrigem Konzentrationsgrad.

Wenn man den Konzentrationsgrad der beim Experiment angewandten zwei Arten von Schwefelsäure und seine Beziehung zur Experimenttemperatur und -feuchtigkeit darstellt, so ergibt sich Tabelle 2. Die Beziehung zwischen dem Konzentrationsgrad, der Temperatur und der Feuchtigkeit der Schwefelsäure ist mit der Tabelle nach R. E. Wilson¹⁵⁾ zu vergleichen.

Obgleich die wichtigsten Stellen der Vorrichtung geprüft wurden, waren kleine Lücken an den Enden oder Verbindungsstellen unvermeidlich. Es spielt also in geringem Masse der Einfluss der

freien Luft auf die Temperatur und Feuchtigkeit des Trockenraumes mit eine Rolle. Zu einem Experiment auf ca. 20% Relativefeuchtigkeit bedarf es keiner Anfeuchtung, sondern nur durch Entfeuchtung bleibt die Feuchtigkeit konstant, während es bei hoher Temperatur und hoher Feuchtigkeit nötig ist, die Entfeuchungskraft zu verringern und die Anfeuchungskraft zu fördern.

Die in Tabelle 2 dargestellten Verhältnisse beruhen auf dem Experimente bei einer Luftgeschwindigkeit von 2,14 m/sec. Im Falle grosser Luftgeschwindigkeit muss man die zum Entfeuchten

Tabelle 2.

Trocknungsbedingungen bei der Luftgeschwindigkeit von 2.14 m/sek.		Konzentrierte Schwefelsäure.			Verdünnte Schwefelsäure.		
Temperatur in °C.	Rel. Feuchtigkeit in %.	Sp. Gewicht bei 25°C.	Konzentration in %.	Rel. Feuchtigkeit bei 25°C.	Sp. Gewicht bei 25°C.	Konzentration in %.	Rel. Feuchtigkeit bei 25°C.
20	20	1.628	71.6	4.0	1.486	59.2	18.0
"	40	1.397	50.3	36.0	1.370	47.2	42.0
"	60	1.300	40.0	57.0	1.274	37.5	62.0
"	80	1.206	28.7	78.0	1.175	25.0	83.0
30	20	1.628	71.6	4.0	1.475	58.5	20.0
"	40	1.390	50.0	37.0	1.370	47.2	42.0
"	60	1.294	39.4	58.0	1.272	36.9	63.0
"	80	1.206	28.7	78.0	1.170	24.2	84.0
40	20	1.560	63.8	11.0	1.465	57.2	22.0
"	40	1.380	49.0	38.5	1.363	46.8	43.0
"	60	1.290	38.9	59.0	1.270	36.5	64.0
"	80	1.206	28.7	78.0	1.170	24.2	84.0

verwendete Schwefelsäure etwas dünner machen, denn die Zunahme der Entfeuchungskraft der konzentrierten Schwefelsäure ist etwas grösser als die der Anfeuchungskraft der verdünnten Schwefelsäure durch die Steigerung der Luftgeschwindigkeit. Da die zum Anfeuchten dienende Schwefelsäure durch Verringerung des Wassers verdichtet werden soll, muss man rechtzeitig Wasser hinzugeben. Gleichfalls ist es für das Experiment nötig bei niedriger Feuchtigkeit, die konzentrierte Schwefelsäure im Gefässe für Schwefelsäure zum Entfeuchten zu erneuern.

Man legt in die Gefässe der zum Anfeuchten dienenden Schwefelsäure je zwei elektrische 32 Watt Karbonbirnen zur Erwärmung der Säure, durch deren Ein- oder Ausschaltung mittels des Feuchtigkeitsreglers das Anfeuchten reguliert wird. Obgleich der Verfasser zu Anfang auch für die Gefässe der zum Entfeuchten dienenden Schwefelsäure elektrische Birnen benutzte, schienen diese die Regulierung des Entfeuchtens fast eher zu hemmen; indem der Verfasser dieselben dann weglass, gelang es ihm sodann gute Ergebnisse zu erzielen.

Die Messung mittels eines Haarhygrometers nach Riken beruht auf der Funktion des Haares, wie Takeo Akahira¹⁶⁾ mitgeteilt hat. Die Veränderung der Feuchtigkeit ruft Ausdehnung und Schwindung des Haares hervor, welches dabei einen kleinen, an seinem Ende befestigten Zeiger nach rechts oder links bewegt. Zu beiden Seiten der Spitze des Zeigers befindet sich je ein kleiner Platinabschluss, und die Berührung des Zeigers bei dem rechten oder linken Abschluss, welche durch die Umdrehung des Zeigers erfolgt, öffnet oder schliesst den elektrischen, zum Relais leitenden Weg. Die obengenannten, elektrischen Karbonbirnen in den Gefässen der zum Anfeuchten dienenden Schwefelsäure werden, solange sie sich innerhalb dieses elektrischen Weges befinden, ein- und ausgeschaltet und vollziehen damit die Feuchtigkeitsregulierung.

In denselben elektrischen Weg wird noch der Widerstand eingeschaltet, um die Stromstärke der vorwärmenden Birnen zu vermehren oder zu vermindern. Bei der Feuchtigkeitsregulierung ist sowohl die Stärke des elektrischen Stromes als auch der Konzentrationsgrad der Schwefelsäure

15) R. E. Wilson (J. Ind. Eng. Chem., 1921, 13, 328).

16) T. Akahira (Bull. Inst. Phy. Chem. Research, Japan, 1924, 1, 121.)

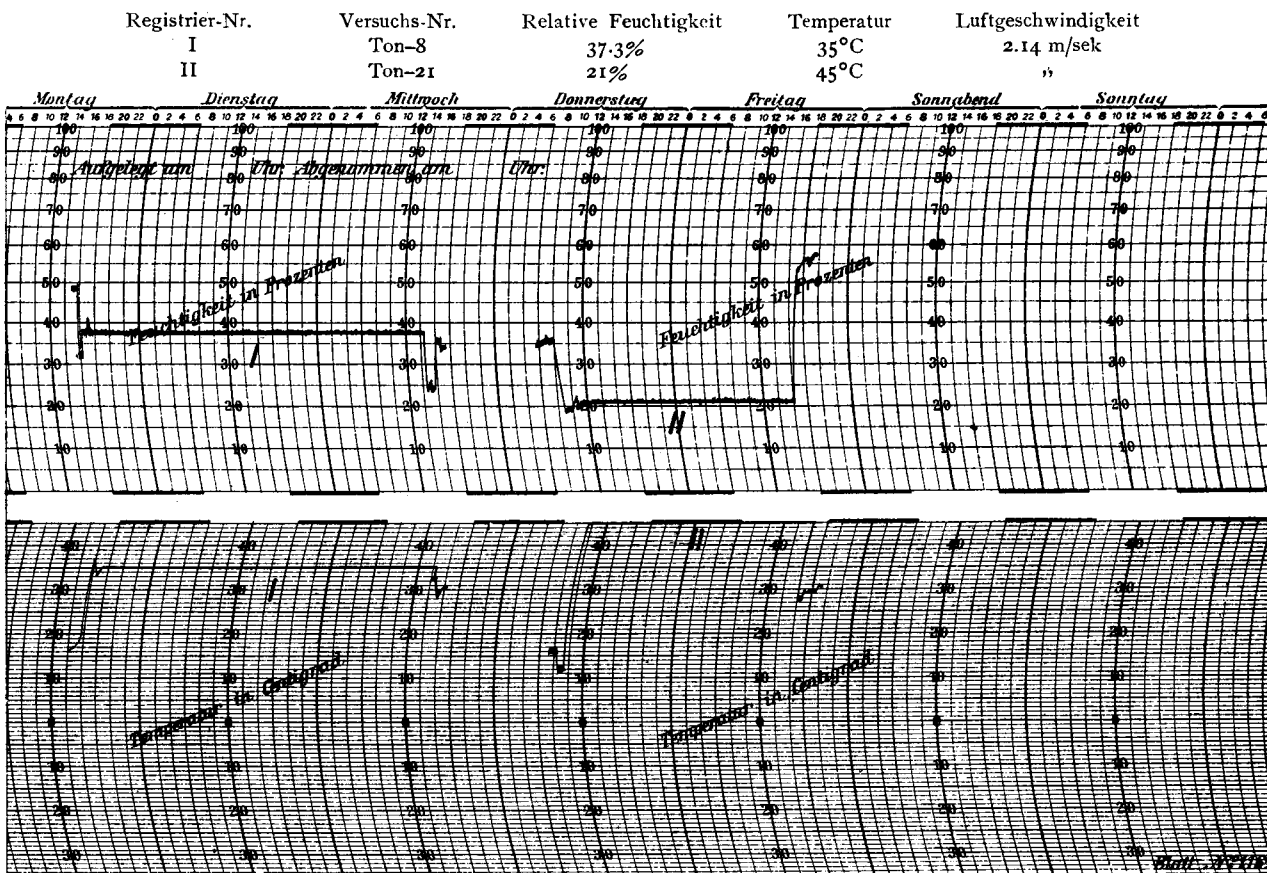
von grosser Wichtigkeit. Vermindert man die Stromstärke überhaupt, schwankt die Feuchtigkeit ein wenig und bleibt dann leicht konstant; während man beim Experiment mit hoher Feuchtigkeit die Stromstärke vermehren muss, um die Anfeuchtung zu fördern. Die Entfernung zwischen den zwei Platinabschlüssen, die den kleinen Zeiger des Feuchtigkeitsreglers begrenzen kann je nach Belieben breiter oder enger gestellt werden. Macht man die Entfernung so klein wie möglich,

so ist die Feuchtigkeitschwankung gering.

Die Feuchtigkeit ist in diesem Falle ungefähr bei $\pm (0,5 \sim 1,5)\%$ konstant, abgesehen von feinen Abstufungen infolge der Höhe der Temperatur und der Feuchtigkeit.

Wenn man, nebenbei bemerkt, das konstante Verhältnis von Temperatur und Feuchtigkeit mittels des Registrierthermo- und hygrographen experimentell darstellt, ergibt sich Abb. 6.

Abb. 6



4. Die Kalibrierung des Thermo- und Hygrometers.

Die Thermometer sind mittels des mit 1/10 Masseinteilung versehenen Normalthermometers im Thermostaten kalibriert, wobei es von Vorteil ist, mehrere von ihnen zu gleicher Zeit abzuwägen.

Für die Kalibrierung der Hygrometer gibt es noch keine bestimmte Methode, sondern man beschränkt sich darauf, sie nach dem Assmannschen Psychrometer gegen einige Feuchtigkeiten zu bestimmen. Der Kalibrationsapparat nach Lambrecht, mit dem das Zentrallaboratorium in der Ingenieurabteilung der Kaiserlichen Universität zu Kyoto ausgestattet ist, besteht darin, dass der zu kalibrierende Hygrometer und der Assmannsche Normalpsychrometer in der durch die Schwefelsäure bestimmter Konzentration durchgegangenen Luft nebeneinander stehen und jener nach diesem zu

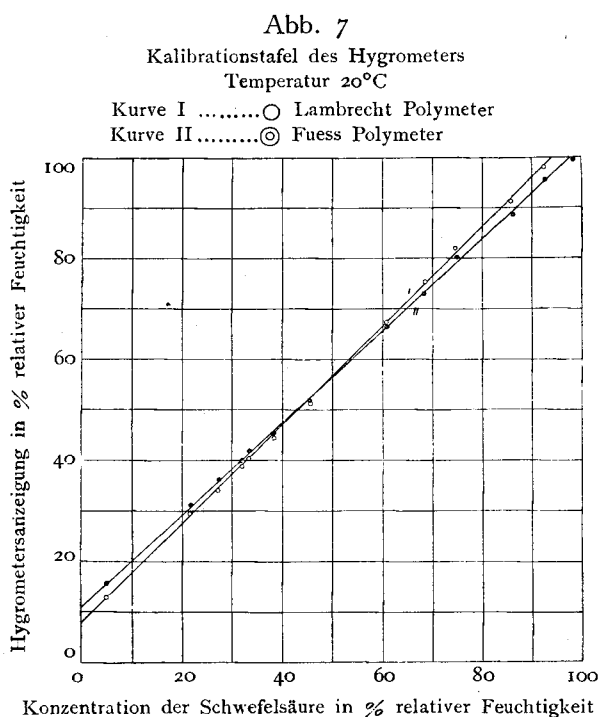
kalibrieren ist. Dieser Apparat vermag aber nur drei Arten von Feuchtigkeit zu regulieren, nämlich: reines Wasser, verdünnte und konzentrierte Schwefelsäure.

Die Hygrometer, die der Verfasser bei dem Trocknungsexperiment verwandte, sind „Lambrechts Polymeter“, „Fuess Polymeter“, „Fuess recording hygrometer“, „Assmanns Psychrometer“, „Tycos recording dry and wet bulb thermometer“ usw. Er kalibrierte sie mittels des oben angegebenen Kalibrationsapparates. Da es sich aber ergab, dass der Assmannsche Psychrometer im Apparat auf den etwas unterschiedenen Feuchtigkeitsgrad der Schwefelsäure bestimmter Konzentration reagierte, und überdies der Apparat nur auf drei Arten von Feuchtigkeiten anwendbar ist, hat der Verfasser später einen Versuch wie folgt aufgenommen.

Bezüglich der Messung des Feuchtigkeits-

gleichgewichtes von Körpern erreichte der Verfasser¹⁷⁾ eine bestimmte Feuchtigkeit durch eine gewisse Temperatur mittels der Schwefelsäure eines bestimmten Konzentrationsgrades. Nach derselben Einrichtung leitet der Verfasser die Luft bestimmter Feuchtigkeit und Temperatur, die durch drei Flaschen mit Schwefelsäure bestimmter Feuchtigkeit und Temperatur durchgegangen war, in die verschlossene weithalsige, 5 l enthaltende Flasche, worin der Hygrometer hängt. Hier findet man nun, dass der Hygrometer konstant anzeigt. Auf solche Weise wurde der Hygrometer, der dem Konzentrationsgrad der Schwefelsäure entsprechenden Feuchtigkeit der Luft gemäss, kalibriert.

Abb. 7 zeigt die Kalibration von „Lambrechts Polymeter“ and „Fuess Polymeter“ nach der letzten Methode.



5. Die Regulierung der Luftgeschwindigkeit.

Die grösste Leistung des Siroccoventilators beträgt 60 m³/min. Indem man durch Widerstand die Wirkung des Motors beschränkt, also die Umdrehung des mit ihm in Verbindung stehenden Ventilators auf 500~900 R. P. M. begrenzt, gelingt es, die Luftgeschwindigkeit im Trockenraum zu regulieren. Der elektrische Leitungswiderstand wird in 5 Stufen eingeteilt. Die Einschaltung des ganzen Widerstandes bezeichnet man als R. Vermindert man dann den Widerstand stufenweise auf A, B und C, so steht D auf Null. Um die Luftgeschwindigkeit noch geringer als R zu machen, wird der Eingang des unteren Luftrohrs mit gelochten Eisenplatten

überzogen. Diese Vergrößerung des Luftwiderstandes bezeichnet man als O. Bei einem Experiment, zu dem eine noch stärkere Luftgeschwindigkeit als D nötig ist, teilt man das Innere des Trockenraumes durch eine Scheidewand aus Zinkplatten und erhält so einen bis auf ein Viertel verengten Luftweg. Mit Hilfe des Geschwindigkeitsmessers hat der Verfasser die Luftgeschwindigkeit an der Stelle der Probe A unter den verschiedenen obenerwähnten Umständen gemessen. Die Beziehung zwischen der Umdrehung des Ventilators und der Geschwindigkeit der Luft ist in Tabelle 3 dargestellt.

Tabelle 3.

Bezeichnung des Widerstandes.	O	R	A	B	C	D
Umdrehung des Ventilators/min.	510	510	570	690	810	900
Luftgeschwindigkeit bei normalem Luftweg in m/sec.	0.5	2.144	2.51	3.12	3.69	4.00
Luftgeschwindigkeit bei $\frac{1}{4}$ verengtem Luftweg in m/sec.	—	3.29	4.04	5.06	6.08	6.60

6. Die Anfertigung der Federwage.

Ein Trocknungsversuch fester Körper erstreckt sich wenigstens auf einen Tag und eine Nacht, möglicherweise aber auf mehr als zwei Monate. Der Verfasser hat eine besondere Federwage erfunden, um bei einem solchen Experimente die Gewichtsabnahme der Trocknung ununterbrochen in einfacher Weise und zugleich ohne jede Störung des Experimentsverlaufes messen zu können.

Das Gewicht der Probe bei diesem Experiment beträgt ca. 500 g. Ist der mittlere Durchmesser der Feder 5 cm, so beträgt der Durchmesser des erforderlichen Klavierdrahtes (d):

$$d = \sqrt[3]{\frac{16}{\pi} \cdot \frac{Pr}{t}} = \sqrt[3]{\frac{16}{\pi} \frac{0,5 \times 2,5}{4000}} = 0,13 \text{ cm,}$$

wobei P : die Last in kg,

$2r$: den mittleren Durchmesser der Feder in cm,

t : die zulässige Schubspannung in kg/cm² bedeuten.

Der Verfasser bediente sich demnach eines leicht zu erstehenden Klavierdrahtes von dem Durchmesser $d=0,123$. (B.W.G. No. 18. $d=0,1245$)

Die Federwage wird so an der Decke des Laboratoriums aufgehängt wie Abb. 4 und 8 zeigt. In Anbetracht der Entfernung des Trockenraumes von der Decke beträgt die Dehnung der Federwage infolge Belastung 2 mm/g. Die entsprechende Anzahl der Windungen (n) der Feder beträgt:

$$n = \frac{f \cdot G \cdot d^4}{64 P r^3} = \frac{(100)(850,000)(0,113)^4}{(64)(0,50)(2,5)^3} \approx 36.$$

Es bedeuten f : Dehnung der Feder in cm,

G : Gleitmodul in kg/cm².

17) S. Kamei und T. Sedohara (J. Soc. Chem. Ind. Japan, 1932, 35, 148.)

Ausser dieser ersten Federwage wurde eine zweite Feder mit der 27 Windungen für Proben grösseren Gewichtes vorbereitet. Die Dehnung der zweiten Feder beträgt bei Beschwerung 1,5 mm/g. Eine gute Feder wird folgendermassen hergestellt: zuerst macht man den Klavierdraht durch Nachlassen geschmeidig, windet ihn mittels Umdrehens der Drehbank auf eine Eisenstange von dem entsprechenden Durchmesser und erhitzt ihn dann im elektrischen Ofen, wirft ihn ins Wasser zum Härten, und erhöht danach wieder die Temperatur zum Anlassen.

7. Die Messung der Gewichtsabnahme bei der Trocknung.

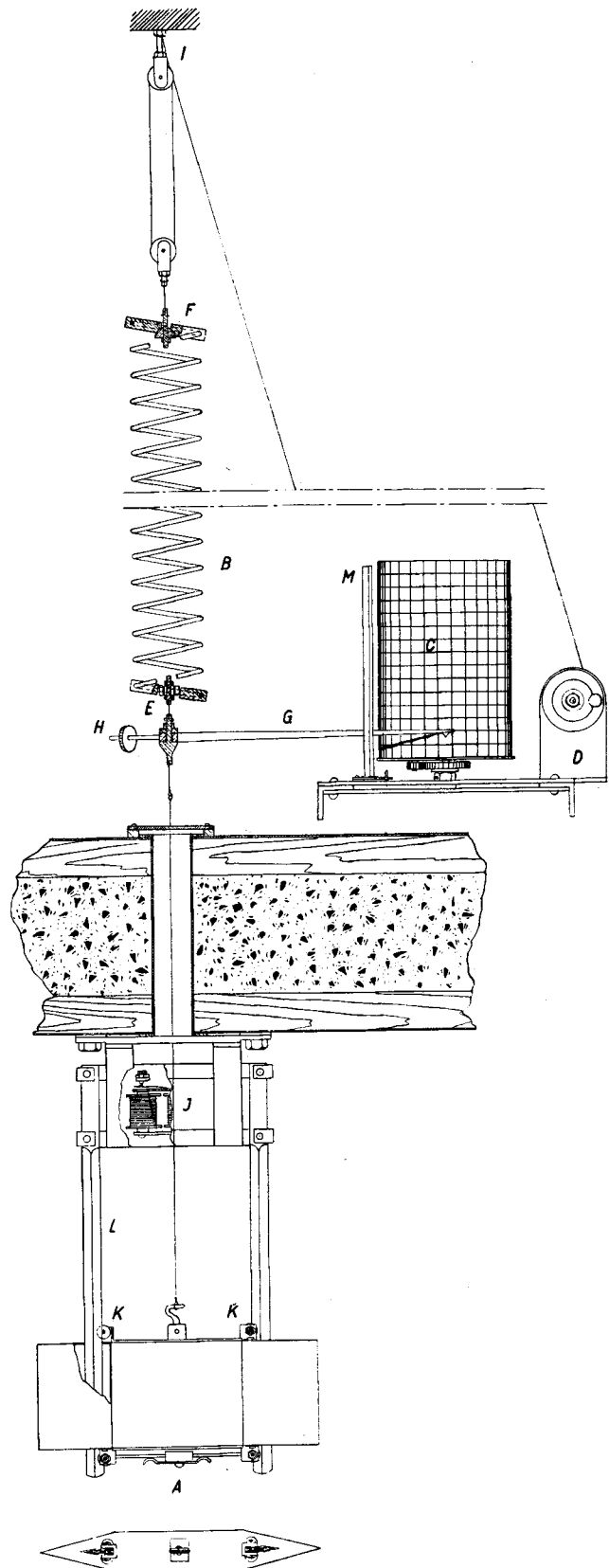
Der Behälter der Trocknungsprobe A in Abb. 8 ist an beiden Enden pyramidenförmig, damit der Luftdruck vermindert wird. Ich möchte ihn bequemlichkeitshalber als Boot bezeichnen, weil seine Form demselben sehr ähnlich ist. Der Raum in der Mitte des Bootes ist der Länge, Breite und Dicke nach $80 \times 100 \times 30$ mm; in ihm bereitet man die Probe vorsichtig vor.

Die pyramidenförmigen Enden zu beiden Seite des Bootes sind senkrecht durchbohrt; oben und unten befindet sich je eine Rolle K, die durch einen spitzen Zapfen gestützt ist, um das Boot ganz glatt rollen lassen zu können. Das Boot bewegt sich durch die vier Rollen auf und nieder die zwei senkrechten Gleitstangen L mit rautenförmigem Schnitt entlang und so eben geglätteten Oberflächen, dass das Rollen ganz ohne Reibung erfolgt. Zweck der senkrechten Gleitstangen ist, Boot vor einem Schwanken durch Luftdruck zu schützen und die Federwage fortwährend senkrecht hängen zu lassen. Um den Fehler zu beseitigen, der betreffs der Federwage durch eine geringe Reibung zwischen den Rollen und Stangen entstehen könnte, befestigt man weiterhin eine kleine elektrische Klingel J an dem oberen Teil der Stange und erlaubt damit den Stangen während des Verlaufes des Experimentes ganz kleine Schwingungen.

Das Boot hängt an einem dünnen Nickeldraht, der von dem Ende der Federwage durch ein auf der Oberseite des Trockenraumes befindliches Loch geht. Die Wage hat rechts einen 20 cm langen Arm aus dünnem Kupferband und an der Spitze des Armes eine mit Tinte gefüllte Feder. Die Registriertrommel C hat einen Durchmesser von 100 mm, eine Länge von 150 mm und eine für acht Tage ausreichende Windung, wobei sie täglich um je eine Windung vorrückt. Die Umfangsgeschwindigkeit beträgt 12 mm/Std.

Der Arm hält sich immer im Gleichgewicht, indem er auf dem anderen Ende ein Gewicht H trägt, welches die Wage indifferent halten soll. Er ist so konstruiert, dass er in der Horizontal-

Abb. 8



ebene sehr leicht drehbar ist und fortwährend auf der Trommel die Stelle des Zeigers, d. h. die Gewichtsabnahme der Probe, registrieren kann, ohne dass seine Spitze durch ein Schwanken der

Federwage von der Trommelfläche getrennt werden könnte. M schützt den Federarm vor dem Einfluss der Luftströmungen ausserhalb des Trockenraumes.

Der obere Teil der Federwage steht durch einen sehr kleinen Stahldraht in Verbindung mit dem kleinen Kran D. Federwage und Stahldraht sind oben durch ein Kugelgelenk, unten sind Federwage und Federarm oder Nickeldraht durch ein Universalgelenk verbunden. Die Federwage ist also vor etwaigen, aus verschiedenen Gründen möglichen einseitigen Senkungen mittels der Belastung geschützt.

8. Die Kalibration der Federwage.

Die Federwage muss vor Gebrauch genau geeicht sein. Da die Registriertrommel 15 cm hoch ist, kann man die Gewichtsabnahme ungefähr bis auf 70 g registrieren. Um die Bedingungen der Kalibration denen des Experimentes äquivalent zu machen, muss man wiederholt kalibrieren; man legt zuerst auf das Boot das mit der Probe gleichschwere tote Gewicht und siebenzig Platten aus Aluminium, die alle einzeln je ca. 1 g wiegen, sodann bewegt man den Kran langsam und bestimmt die erste Stelle des Zeigers auf der Registriertrommel 10 mm von unten. Wenn man alle Aluminiumplatten eine nach der andern wegnimmt, zieht sich die Feder mit der Abnahme des Gewichtes zusammen, sodass sich der Zeiger auf der Skala der Registriertrommel nach oben bewegt, von der die Gewichtsabnahme abzulesen ist. Wenn man dann dagegen die Platten eine nach der andern wieder auf das Boot legt, wird die Senkung des Zeigers mit der Zunahme des

Gewichtes registriert. Indem man das tote Gewicht ändert, muss man die Kalibration auf diese Weise wiederholt ausführen. Hat der Verfasser solche Kalibrationen bei den sechs Verhältnissen der Luftgeschwindigkeit, d.h. bei Null, R, A, B, C und D ausgeführt, so ergibt sich, dass die vorderen vier Verhältnisse, d.h. bei Luftgeschwindigkeit von Null bis 3,12 m/sec, sich einander fast gleich zeigen, die letzteren zwei bei Luftgeschwindigkeit von mehr als 3,69 m/sec ebenfalls. Werden die Resultate näher geordnet, so ergeben sich demzufolge zwei Arten von Kalibrationstafeln für den praktischen Gebrauch. Abb. 9 zeigt die Kalibrationstafel, wo das tote Gewicht auf der ersten Federwage 530,390 g beträgt; in Abb. 10 handelt es sich um dieselbe Federwage mit einem toten Gewicht von 279,716 g.

Abb. 9
Kalibrationstafel der Federwage
Totesgewicht: 530,390 g.
Kurve I Luftgeschwindigkeit: 0-3,12 m/sec
Kurve II " " 3,69-6,60 m/sec

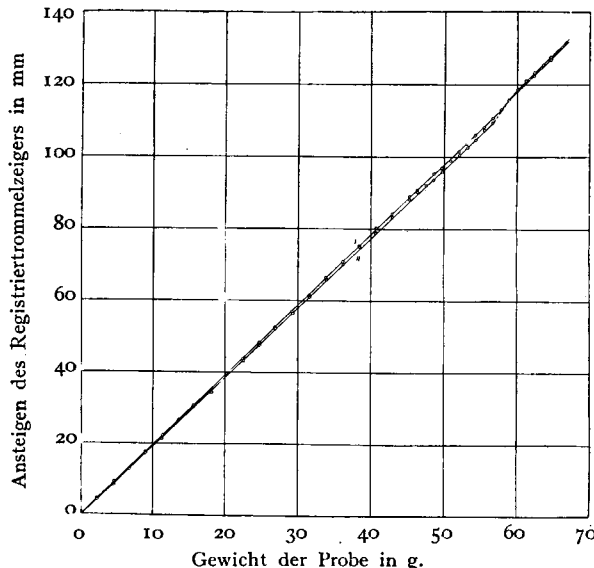
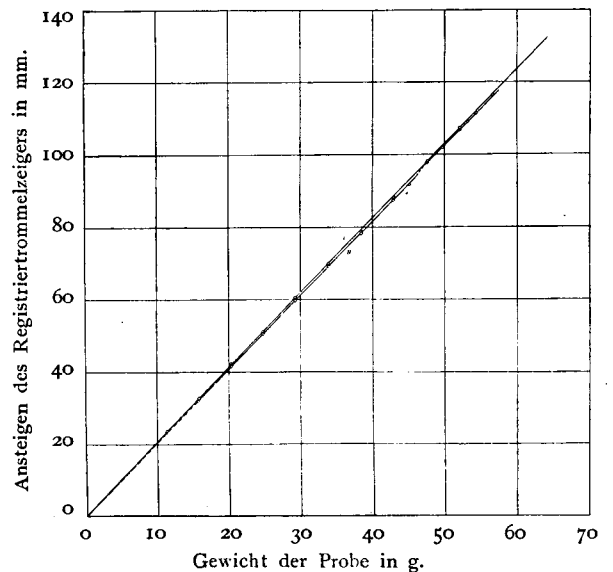


Abb. 10
Kalibrationstafel der Federwage
Totesgewicht: 279,716 g.

Kurve I Luftgeschwindigkeit: 0-3,12 m/sec
Kurve II " " 3,69-6,60 m/sec



9. Die Methode bei Austührung des Experimentes.

Die Grösse der zu untersuchenden Probe ist meistens der inneren Dimension des Behälters, des Bootes 80 × 100 × 30 mm, angepasst. Die Verdampfung erfolgt von zwei Seiten her der vorderen und der hinteren 80 × 100 mm², die anderen vier Seiten—oben und unten, rechts und links—sind mit Stanniol bedeckt und dadurch vor der Verdampfung geschützt.

Die linke Seitentür aus Glas, S in Abb. 4, hat auf der Innenseite einen besonderen offenen Gang für die Probe. Man fügt dieser Innenseite einen Eisenrahmen ein, der mit einer so kleinen Flügeltür versehen ist, dass man dahindurch vermittels wasserdichter Handschuhe, die man zu diesem Zwecke trägt, gerade noch die Probe

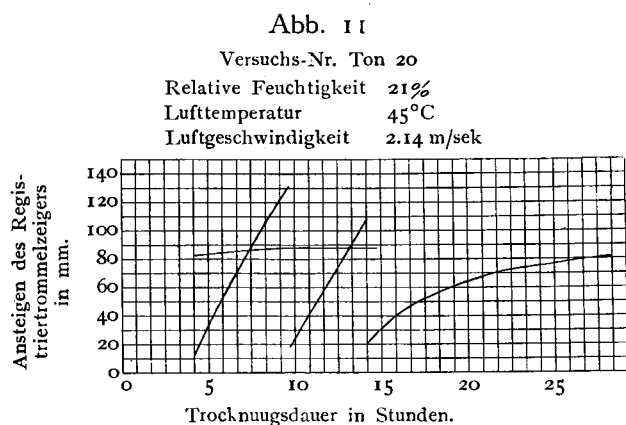
einführen kann. Die übrige Fläche des Rahmens ist mit durchsichtigem Zelluloid überzogen. Oeffnet man sodann die Türe, so kann man die Probe hineintun oder herausnehmen, ohne dass es auf die Trockenbedingungen irgendwelchen Einfluss hat.

Vor dem Experiment müssen Temperatur und Feuchtigkeit im Trockenraum reguliert werden. Man bereitet zugleich mit Sorgfalt die Probe vor. Nachdem die Trockenbedingungen des Trockenraumes genau nachgeprüft worden sind, öffnet man die Tür S und schiebt die Probe A durch den obengenannten, besondern Probengang ein. Dann bewegt man langsam den Kran, und bestimmt die Stelle des Zeigers auf der Registriertrommel 10 mm von unten.

E ist eine ebensolche Probe wie A, die zu gleicher Zeit, auf gleiche Art und Weise zubereitet worden ist. Man schaltet das Kupfer-konstantanthermoelement U an einer Stelle etwa 1 mm unter der verdampfenden Oberfläche der zweiten Probe ein, und misst die Temperaturveränderung der Probe mittels des Millivoltmeters, das ein Fabrikat der Hokushin-Elektrischen Werkstätten ist. Bei späteren Experimenten verbindet der Verfasser das Thermolement mit dem Registrierthermometer der Chino-Werkstätten.

F, das Zifferlehre, das sich ganz glatt bewegt, berechnet die schwindung der Probe.

Geht die Trocknung der Probe gut vonstatten, so verringert sich das Wasser um etwa 60 g, und der Zeiger erreicht das obere Ende der Registriertrommel; bewegt man den Kran, so verschiebt sich der Zeiger wieder nach unten. Je mehr die



Trocknung sich ihrem Ende nähert, umso langsamer steigt der Zeiger, und wenn er endlich vier bis fünf Stunden lang im Gleichgewicht bleibt, stellt man das Gebläse ab und nimmt die Probe heraus. Man misst darauf die Trockendimension der Probe genau und berechnet dann ihr Trockengewicht am elektrischen Thermostaten auf 100—150°C. Abb. 8 stellt ein Beispiel dafür dar, wie die Trocknung auf der Registriertrommel registriert war.

KAPITEL III.

UNTERSUCHUNG ÜBER DIE TROCKNUNG VON TON.

1. Einleitung.

Der Ton ist einer der wichtigsten Industrierohstoffe, bei dem die Trocknung industriell eine bedeutende Rolle spielt. Das Trocknen der Tonwaren ist sehr kostspielig, sie werden leicht durch Spaltung oder Wellung beschädigt, wenn man nicht grosse Sorgfalt anwendet, und schwere Verluste sind die Folge. Dies gilt vor allem für keramische Erzeugnisse von grosser Dicke.

Zwar liegen über die Trocknung des Tons zahlreiche Arbeiten vor, wie z. B. in dem Journal der Amerik. Keramischen Gesellschaft, neuerdings viele diesbezügliche Untersuchungen zu finden sind. Die meisten von ihnen aber beschäftigen sich mit praktischen Fragen oder solchen der Qualität, theoretische oder quantitative Untersuchungen gibt es wenige. Einige der wichtigsten von ihnen wurden schon in Kapitel I angeführt.

2. Die Probe und die Methode ihrer Behandlung.

Zu den Versuchen wurden Kaolin und Ton, die wir von der „Nippon-Tôki A. G.“ und der Staatlichen Porzellan-Versuchsanstalt, Japan geschenkt erhielten, verwendet. Tabelle 4 zeigt das Resultat der gesamten Analyse dieses Materials.

Tabelle 4.

Gesamtanalyse der bei den Versuchen verwandten Tonerden.

	Mino-Kaolin	Seikirei-Kaolin	Zettlitzer-Kaolin	Kibushi-Tonerde	Kawachi-Quarz	Kawachi-Feldspat
Glühverlust	13.72	13.78	13.20	12.04	0.18	0.38
SiO ₂	48.38	48.04	46.30	51.72	99.36	65.10
Al ₂ O ₃	35.28	35.14	37.91	33.17	0.32	19.46
Fe ₂ O ₃	0.87	0.70	0.84	1.06	0.08	0.14
TiO ₂	0.45	0.57	—	0.77	—	—
CaO	0.40	0.20	0.28	0.04	0.12	0.50
MgO	0.18	0.18	0.32	0.14	0.02	0.14
K ₂ O	0.37	0.47	0.47	0.83	Tr.	10.99
Na ₂ O	0.56	0.86	0.59	0.25	Tr.	3.43
Spezielle Bemerkungen	bei Aufschlammung		von der Literatur entnommen.	—	Druchgang durch ein seidenes Sieb von 2500 Maschen/cm ²	

Die Analysen wurden von M. Akatsuka hergestellt.

Um die Probe auszuführen, wässert man zuerst den Ton so gut, bis er den grössten Viskositätsgrad erlangt hat, knetet ihn durch die dem Masticator gleichende Knetmaschine fünf bis sechs Male und lässt ihn dann eine Nacht luftdicht verschlossen liegen, damit das Wasser ins Innere

der Tonkörperchen diffundiere. Nachdem man diesen Ton am folgenden Tag wieder einige Male geknetet hat, bringt man eine Probe von entsprechender Dimension mit der allergrössten Sorgfalt in den Proberahmen, d. h. in das Boot. Da vier Seiten der Probe—oben und unten, rechts und links—mit Stanniol bedeckt sind, erfolgt die Verdampfung nur aus den beiden der Windrichtung parallelen Flächen, der vorderen und hinteren. Eine Verdampfung von Wassers durch Stanniol hindurch gibt es überhaupt nicht, wie nachstehend erwähnt wird. Man bereitet zu gleicher Zeit zwei gleichartige Proben vor; die eine zum Messen des Gewichtes, die andere zum Messen der Kontraktion und Temperatur. Geht die Trocknung der Probe gut vonstatten, so bildet sich ein Zwischenraum zwischen der Probe und dem Rahmen, da das Stanniol aber immer noch an den Oberflächen der Probe haftet, sind alle Seiten ausser den beiden Parallelfächen vor Verdampfung geschützt.

3. Die Methode bei Ausführung des Experimentes.

Über sie wurde im allgemeinen schön in Kapitel II 7 gesprochen.

4. Die Arten des Experimentes.

Es sind viele Einzelfragen, die bezüglich der Trocknung der Tonarten zu untersuchen wichtig sind. Bei den Experimenten handelte es sich für den Verfasser um die klärung folgender Punkte, wie sie hier der Reihe nach mitgeteilt werden:

1. Einfluss der Temperatur, Feuchtigkeit und Geschwindigkeit der Trockenluft auf die Trocknungsgeschwindigkeit.
2. Beziehung zwischen der Trocknungsgeschwindigkeit und dem Mischungsverhältnisse von Quarz und Feldspat mit Kaolin.
3. Beziehung zwischen der Trocknungsgeschwindigkeit und den Arten der in Kaolin enthaltenen Flüssigkeiten.
4. Beziehung zwischen der Trocknungsgeschwindigkeit und der Korngrösse des in Kaolin eingemischtein Quarzes.
5. Beziehung zwischen der Trocknungsgeschwindigkeit und der Dicke der Probe.
6. Beziehung zwischen der Trocknungsgeschwindigkeit und der Form der Probe.
7. Beziehung zwischen der Trocknungsgeschwindigkeit und der Richtung der Luft.

5. Untersuchung über den Einfluss von Temperatur, Feuchtigkeit und Geschwindigkeit der Luft auf die Trocknungsgeschwindigkeit.

An der „Kibushi-Tonerde“ ist dieser Einfluss der Reihe nach, wie Tabelle 5 zeigt, untersucht worden.

Die bei diesem Versuch benutzte Probe ist vor der Trocknung der Länge, Breite und Dicke

Tabelle 5.
Versuchsbedingungen der Kibushi-Tonerde.

Versuchsnummer.	Lufttemperatur in °C.	Relative Feuchtigkeit in %.	Luftgeschwindigkeit in m/sek.
1	15	18.7	2.14
2	15	32.0	3.12
3	15	18.7	4.00
4	25	18.7	2.14
5	35	18.7	"
6	15	37.3	"
7	25	37.3	"
8	35	37.3	"
9	45	37.3	"
10	35	53.7	"
11	45	53.7	"
12	35	75.8	"
13	45	75.8	"
14	25	75.8	"
15	25	53.7	"
16	15	53.7	"
17	15	75.8	"
18	15	21.0	"
19	25	21.0	"
20	35	21.0	"
21	45	2.0	"
22	25	53.7	3.12
23	25	53.7	2.51
24	25	53.7	4.00
25	25	53.7	3.69

nach 80 × 100 × 30 mm; die beiden, verdampfenden Flächen, die vordere und die hintere, betragen daher 2 (80 × 100) mm². In Anbetracht der Vorrichtung hatte sich während des Experiments die Temperatur zwischen 15 bis 45°C, die Feuchtigkeit zwischen 18 und 75%, die Luftgeschwindigkeit bei 2—4 m/sec gehalten. Bei den späteren Experimenten zeigten sich diese Faktoren alle in noch weithöherem Masse veränderlich.

Die Trockendauer schwankt zwischen 30 und 120 Stunden; Temperatur, Feuchtigkeit und Geschwindigkeit sind während der Trockenzeit fast konstant. Die Verdampfungsgeschwindigkeit des Wassers beträgt zu Anfang des Experimentes 5 bis 12 g/std., bleibt während des Anfangs des Versuchs konstant und nimmt dann über die Grenze des festgesetzten Feuchtigkeitsgehaltes hinaus zu, um zum Schluss des Vorganges unter 0.01 g/std., zu sinken. Wenn der Zeiger auf der Registriertrommel endlich im Gleichgewicht bleibt, ist der behandelte Ton mit der Trockenluft ins Feuchtigkeitsgleichgewicht gebracht, und das Experiment ist damit beendet.

Das Thermoelement, das man in die verdampfende Oberfläche der zweiten Probe eingeschaltet hat, um die Temperaturveränderung der Probe zu messen, steht zu Anfang fast konstant

und zeigt etwa auf die Feuchtkugeltemperatur der Trockenluft, sowie aber die Verdampfungsgeschwindigkeit verringert wird, steigt die Temperatur und erreicht schliesslich die Trockenkugeltemperatur der Trockenluft.

Die Kontraktion der Probe nimmt einen mit der Veränderung der beiden oben angegebenen Momente zusammenhängenden Verlauf: die Probe kontrahiert ununterbrochen geradlinig, bis einerseits die Verringerung der Verdampfungsgeschwindigkeit bei der ersten Probe, andererseits die Temperatursteigerung des Thermoelements bei der zweiten Probe einsetzt, wonach die Kontraktion fast aufhört. Nach dem Versuche steckt man die Probe in einen mit Deckel versehenen Kasten aus Aluminium misst die Trockendimension genau und berechnet dann ihr Trockengewicht am elektrischen Thermostaten auf 100 bis 105°C.

6. Ergebnisse der Experimente.

Tabelle 6 stellt das Versuchs- und Berechnungsergebnis von dem 21. Versuche dar; die anderen Ergebnisse sind aus Abb. 13—23 zu erschen.

In Tabelle 6 bedeuten Spalte 1 die Zeitdauer in Stunden, Spalte 2 das Ansteigen des Zeigers der Federwage auf der Registriertrommel in mm/std., Spalte 3 die Gewichtsabnahme in g/std., die man durch Vergleich mit der Kalibrationstafel der Federwage erhalten hat.

Spalte 4 bedeutet die Länge, Spalte 5 die Breite der durch die Trocknung kontrahierten Probe in cm, und Spalte 6 den verdampfenden Flächenraum, d. h. 2 (Länge × Breite). Spalte 7 ist die Trocknungsgeschwindigkeit in g/cm².std., Spalte 8 die am Thermoelement abgelesene Tem-

Tabelle 6.

Versuchnummer 21.

Lufttemperatur 45°C; Relative Feuchtigkeit 21%.

Luftgeschwindigkeit 2.14 m/sek; Gewicht des wasserfreien Materials. 212.20 g.

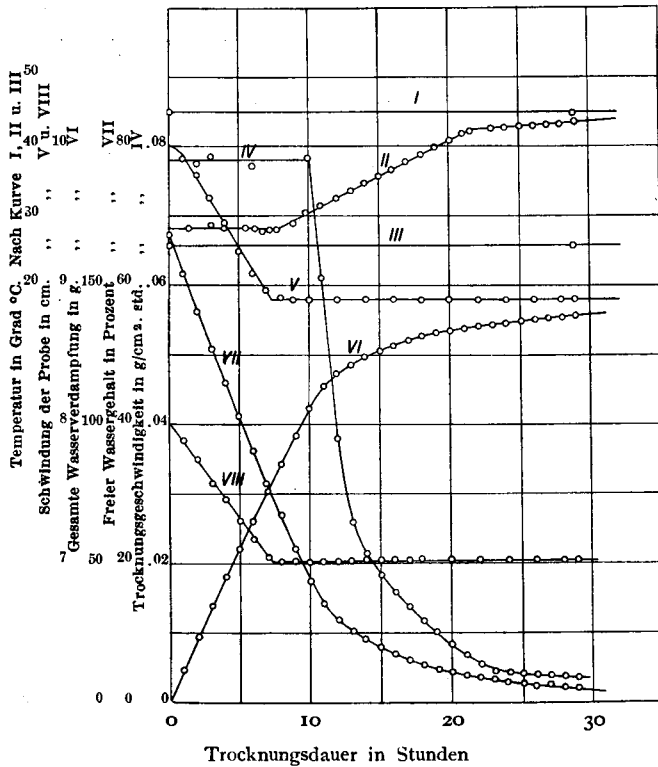
Zeitdauer in Stunden.	Ansteigen des Registrier- trommel- zeigers in mm/std.	Gewichts- abnahme in g/std.	Schwindung der Probe in cm.		Trocknungs- oberfläche in cm ² .	Trocknungs- geschwindig- keit in g/cm ² . std.	Temperatur der Probe. °C.	Freier Wassergehalte.		Wärme- übergangs- koeffizient in Cal/cm ² .sec at.
			Höhe	Breite				in g.	in %.	
0			8.00	10.00			20.8	143.123	67.40	
1	23.4	11.934	7.893	9.91	156.46	0.07630	28.2	131.189	61.78	0.000 730
2	23.1	11.781	7.745	9.795	151.74	.07772	"	119.408	56.25	740
3	22.2	11.322	7.572	9.64	145.86	.07880	"	108.086	50.85	753
4	20.6	10.506	7.455	9.46	141.00	.07455	"	97.580	46.00	714
5	19.8	10.098	7.310	9.25	135.30	.07462	"	87.482	41.20	714
6	"	"	7.175	9.09	130.46	.07732	"	77.384	36.47	740
7	"	"	7.050	8.97	126.64	.07983	"	67.286	31.70	764
8	"	"	7.010	8.915	125.00	.08075	"	57.188	26.93	771
9	19.6	9.996	7.012	8.90	124.82	.08010	29.5	47.192	22.24	841
10	19.2	9.792	7.010	"	124.78	.07832	30.5	37.400	17.62	866
11	15.0	7.650	7.013	"	124.84	.06128	31.8	29.750	14.00	744
12	9.3	4.743	7.016	"	124.88	.03802	32.6	25.007	11.77	492
13	6.4	3.264	7.020	"	124.96	.02612	33.6	21.743	10.24	366
14	5.3	2.703	7.024	"	125.02	.02165	34.7	19.040	8.97	336
15	4.5	2.295	7.027	"	125.08	.01837	35.9	16.745	7.88	323
16	3.9	1.989	7.028	"	125.10	.01590	36.8	14.756	6.94	310
17	3.4	1.734	7.030	"	125.14	.01386	37.8	13.022	6.13	308
18	2.9	1.479	"	"	"	.01182	38.9	11.543	5.43	310
19	2.5	1.275	"	"	"	.01017	39.9	10.268	4.83	317
20	2.1	1.071	"	"	"	.00856	41.0	9.197	4.33	341
21	1.7	0.867	"	"	"	.00692	42.0	8.330	3.03	365
22	1.4	0.714	"	"	"	.00571	42.6	7.616	3.59	378
23	1.1	0.561	"	"	"	.00448	42.7	7.055	3.32	310
24	1.0	0.510	"	"	"	.00436	42.8	6.545	3.08	314
25	"	"	"	"	"	.00424	43.0	6.035	2.84	337
26	"	"	"	"	"	.00412	43.1	5.525	2.60	343
27	"	"	"	"	"	.00400	43.2	5.015	2.36	352
28	"	"	"	"	"	.00388	43.3	4.505	2.12	362
29	"	"	"	"	"	.00376	43.4	3.995	1.88	373

Abb. 12

Versuchs-Nr. 21.

Lufttemperatur: 45°C
 Relative Feuchtigkeit: 21%
 Luftgeschwindigkeit: 2.14 m/sek.

- Kurve I Trockenkugeltemperatur.
- „ II Temperatur der Probe.
- „ III Feuchtkugeltemperatur.
- „ IV Trocknungsgeschwindigkeit.
- „ V Schwindung der Breite der Probe.
- „ VI Gesamte Wasserverdampfung.
- „ VII Freier Wassergehalt.
- „ VIII Schwindung der Höhe der Probe.



peratur der Probe in °C. Spalte 9 bedeutet den freien Wassergehalt, d. h. den gesamten Wassergehalt ohne den Gleichgewichtswassergehalt, und Spalte 10 zeigt den Prozentsatz des freien Wassergehaltes im Verhältnisse zum Trockengewicht. Spalte 11 schliesslich gibt den Wärmeübertragungskoeffizienten zwischen der Luft und der Trockenprobe in $\text{cal/cm}^2 \cdot \text{sek} \cdot \Delta t$, wobei Δt den Temperaturunterschied zwischen beiden bedeutet.

Abb. 12 stellt die in Tabelle 6 erhaltenen Resultate dar. Hierbei zeichnete man die Trocknungszeit als Abszisse und die folgenden Einzelheiten als Ordinaten auf, nämlich: die Trocknungsgeschwindigkeit, das gesamte verdampfte Wassergewicht, die Temperatur der Probe, die

Abb. 14

Kurven-Nr.	Versuchs-Nr.	Temperatur	} Relative Feuchtigkeit 21% } Luftgeschwindigkeit 2.14 m/sek.
I	21	45°C	
II	20	35	
III	19	25	
IV	18	15	

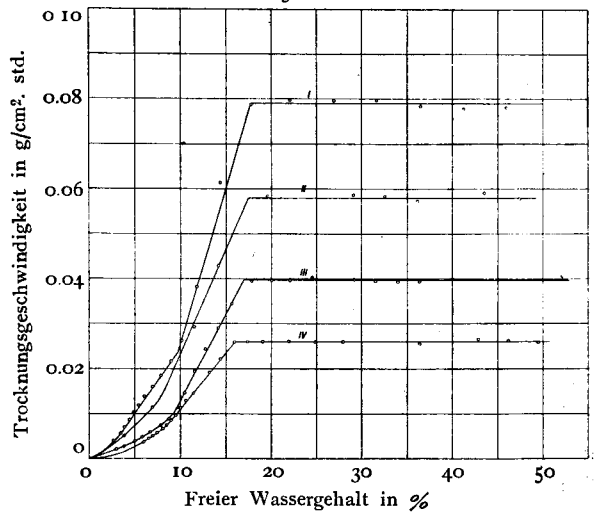


Abb. 13

Kurven-Nr.	Lufttemperatur	} Relative Feuchtigkeit: 18.7% } Luftgeschwindigkeit: 2.14 m/sek
I	35°C	
II	25°C	
III	15°C	

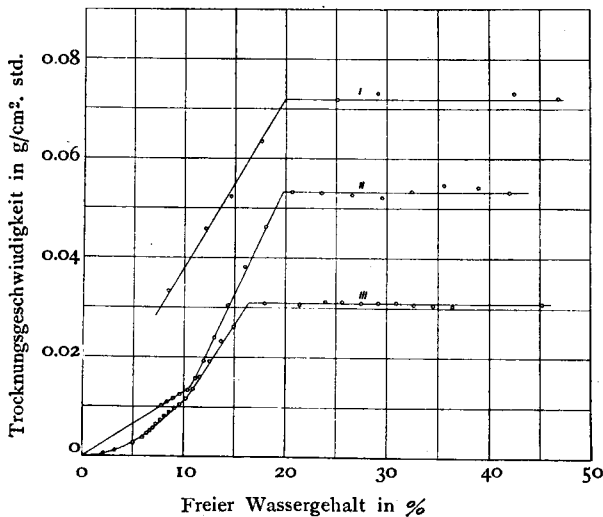
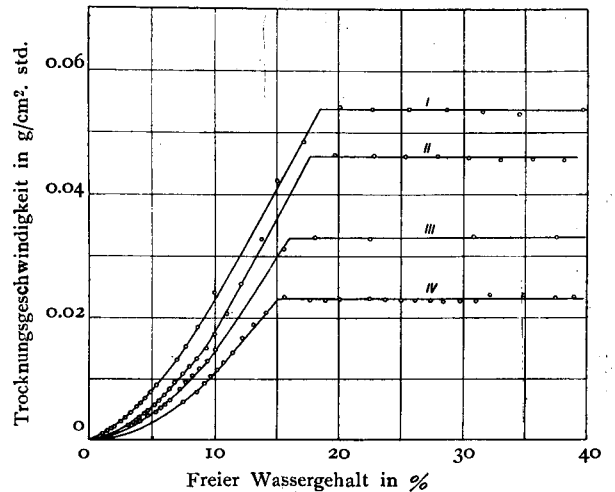


Abb. 15

Kurven-Nr.	Versuchs-Nr.	Lufttemperatur	} Relative Feuchtigkeit 37.3% } Luftgeschwindigkeit 2.14 m/sek.
I	9	45°C	
II	8	35	
III	7	25	
IV	6	15	



Trocken-oder Feuchtkngeltemperatur der Luft und die Kontraktion der Probe.

Abb. 13 bis 23 stellen graphisch die Beziehung zwischen der Trocknungsgeschwindigkeit und dem freien Wassergehalt bei dem 1. bis 25. Trocknungsexperiment dar. Jeder trocknende Festkörper wird mit einer gewissen Luft ins Feuchtigkeitsgleichgewicht gebracht, d. h.: das Minimum an

Feuchtigkeitsgehalt, das die Probe mit einer bestimmten Trockenluft zu erreichen vermag, ist durchaus nicht Null, sondern äquivalent dem Feuchtigkeitsgleichgewicht. Es handelt sich also bei der Feuchtigkeit, die man durch das Trockenverfahren aus der Probe beseitigen kann, um den sogenannten freien Feuchtigkeitsgehalt.

Man wird gute Ergebnisse erzielen bei Vergleichung der Trocknungsgeschwindigkeiten, der Bestimmung der Anfangspunkte der Trockenkurven oder der Beobachtung noch weiterer Beziehungen, wenn man nicht den gesamten Wassergehalt, sondern den freien Wassergehalt als Abszisse nimmt.

Abb. 13—17 zeigen die Beziehung zwischen

Abb. 16

Kurven-Nr.	Versuchs-Nr.	Temperatur
I	11	45°C
II	10	35
III	15	25
IV	16	15

Rel. Feuchtigkeit 53.7%
Luftgeschwindigkeit 2.14 m/sek.

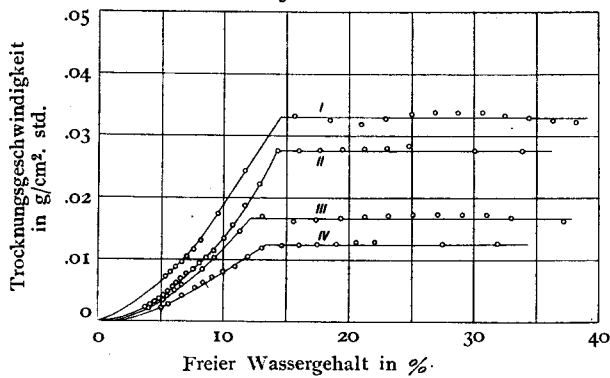


Abb. 17

Kurven-Nr.	Versuchs-Nr.	Lufttemperatur
I	13	45°C
II	12	35
III	14	25
IV	17	15

Relative Feuchtigkeit 75.8%
Luftgeschwindigkeit 2.14 m/sek.

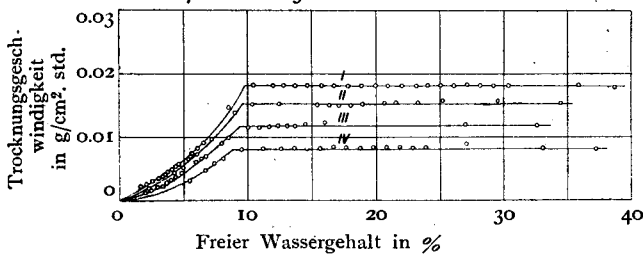


Abb. 18

Kurven-Nr.	Versuchs-Nr.	Relative Feuchtigkeit
I	1	18.7%
II	18	21.0
III	6	37.3
IV	16	53.7
V	17	75.7

Lufttemperatur 15°C
Luftgeschwindigkeit 2.14 m/sek.

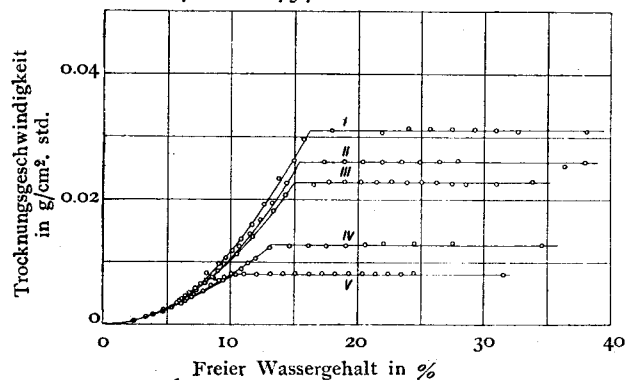


Abb. 19

Kurven-Nr.	Versuchs-Nr.	Relative Feuchtigkeit
I	4	18.7%
II	19	21.0
III	15	53.7
IV	14	75.8

Temperatur 25°C
Luftgeschw. 2.14 m/sek.

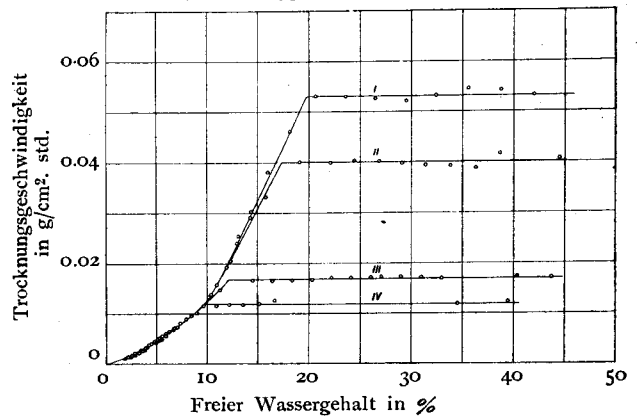


Abb. 20

Kurven-Nr.	Versuchs-Nr.	Relative Feuchtigkeit
I	5	18.7%
II	20	21.0
III	8	37.3
IV	10	53.7
V	12	75.8

Temperatur 35°C
Luftgeschw. 2.14 m/sek.

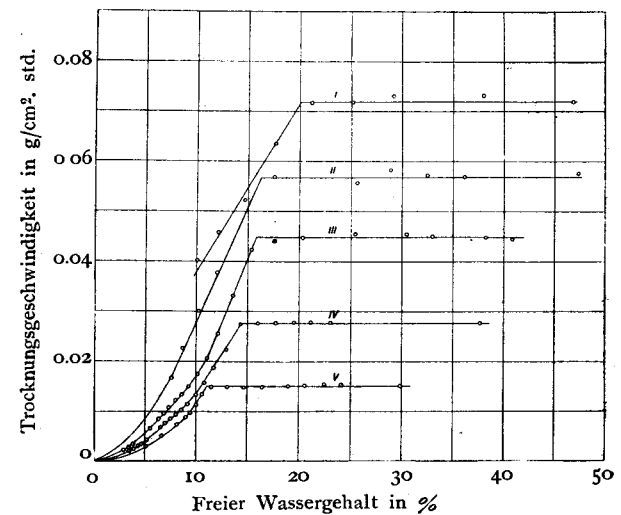


Abb. 21

Kurven-Nr.	Versuchs-Nr.	Relative Feuchtigkeit	Lufttemperatur 45°C. Luftgeschwindigkeit 2.14 m/sek.
I	21	21%	
II	9	37.3	
III	11	53.7	
IV	13	75.8	

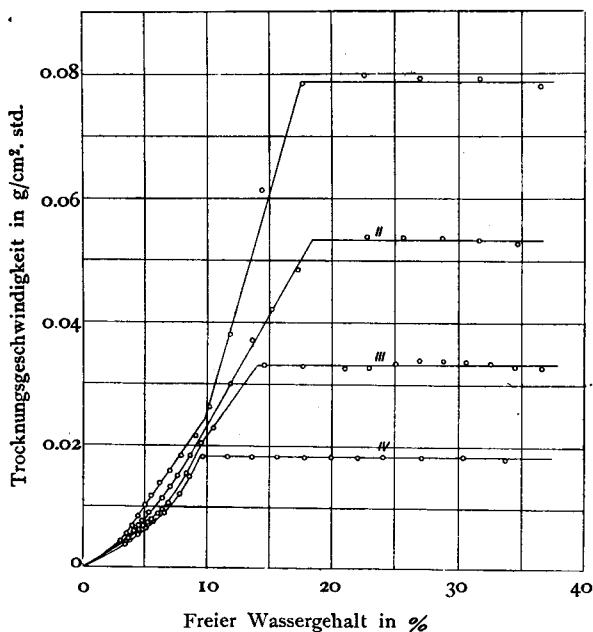
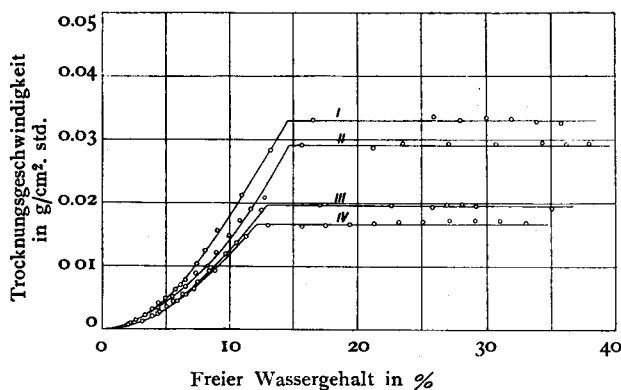


Abb. 22

Kurven-Nr.	Versuchs-Nr.	Luftgeschw.	Temperatur 25°C Feuchtigkeit 53.7%
I	15	2.14 m/sek	
II	23	2.51 "	
III	25	3.69 "	
V	24	4.00 "	



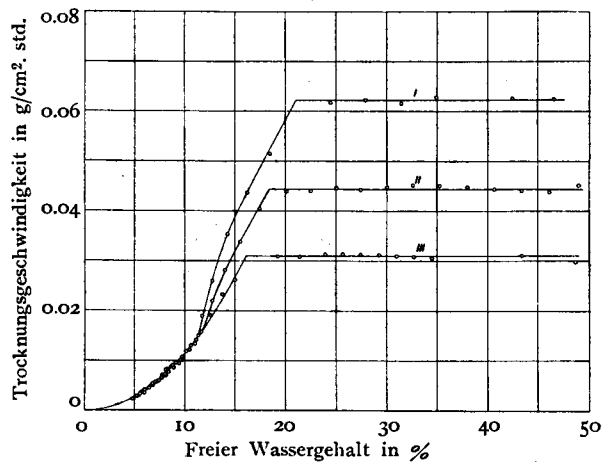
der Lufttemperatur und der Trocknungsgeschwindigkeit, wobei man die Feuchtigkeit und die Geschwindigkeit der Luft konstant, aber die Temperatur veränderlich lässt.

Abb. 18—21 stellen die Beziehung zwischen der relativen Feuchtigkeit und der Trocknungsgeschwindigkeit dar, wobei die Temperatur und die Geschwindigkeit der Luft konstant bleiben, die Feuchtigkeit aber veränderlich ist.

Abb. 22 und 23 drücken ebenfalls den Einfluss der Luftgeschwindigkeit auf die Trocknungsgeschwindigkeit aus.

Abb. 23

Kurven-Nr.	Versuchs-Nr.	Relative Feuchtigkeit	Luftgeschwindigkeit	Lufttemperatur 15°C
I	3	18.7	4.00 m/sek	
II	2	23.0	3.12 "	
III	1	18.7	2.14 "	



7. Betrachtung der Versuchsergebnisse.

Während der Wassergehalt der Probe gross, und ihre Oberfläche mit einer Feuchtigkeitsschicht bedeckt ist, ist die Verdampfung der Feuchtigkeit aus der Oberfläche des festen Körpers ebenso stark wie die Verdampfung aus der freien Oberfläche einer Flüssigkeit ohne den festen Körper.

Bei der adiabastischen Lufttrocknung wird die Probe durch die Wärmeleitung durch die an der Oberfläche des Körpers befindliche Luftschicht erwärmt, wodurch eine stärkere Verdampfung stattfindet.

Wenn aber die Probe erwärmt wird, wird der Temperaturunterschied zwischen der Probe und der Luft kleiner, dann folgt eine Verringerung der Wärmeübertragung. Schliesslich muss auf diese Weise das dynamische Gleichgewicht erreicht werden bei einer Temperatur, bei der der Wärmeeintrag aus der Probe infolge Verdampfung gerade ausgeglichen wird durch die Wärmezufuhr, die die Probe in Form von fühlbarer Wärme aus der Luft erhält.

Die Oberfläche des festen Körpers kühlt sich bis auf die Feuchtkugeltemperatur der Trockenluft ab und wird ins Temperaturgleichgewicht gebracht, indem sie sich ähnlich verhält wie die freie wasser Oberfläche in der Feuchtkugeltemperatur der Luft.

Unter diesen Umständen bleibt auch die Trocknungsgeschwindigkeit konstant. Der horizontale Verlauf der Trocknungskurven auf Abb. 13—23 bezeugt dies.

Bei Betrachtung aber der verschiedenen Resultate bemerkt man, dass die Trocknungsgeschwindigkeit nicht bis zum Schluss beständig ist, sondern jenseits der Grenze eines gewissen Feuchtigkeitsgehaltes nimmt sie auf einmal ab. Diese Grenze ist bei einem bestimmten Stoffe und unter

einer bestimmten Trockenbedingung stets dieselbe. Die Trocknungsgeschwindigkeit vermindert sich plötzlich geradlinig jenseits dieser Grenze, proportional dem Wassergehalt, bis der Stoff mit der Trockenluft ins Feuchtigkeitsgleichgewicht gebracht ist, und damit die Trocknung beendet ist. Dafür zeugen auf Abb. 13—23 die Kurven, die von den linken Enden der Horizontallinien in steil abfallenden Neigungswinkeln auf die Nullpunkte zulaufen.

Die erste, d. h. die horizontale Periode der Trocknungskurve nennt man die Periode konstanter Trocknungsgeschwindigkeit, die letztere abfallende Periode die der verlangsamten Trocknungsgeschwindigkeit, und der Feuchtigkeitsgehalt, der sich an der Grenze zwischen diesen beiden Perioden befindet, bezeichnet man als den kritischen Wassergehalt.

Wenn aber der Wassergehalt einer Probe eigentlich unter dem kritischen Prozentsatz ist, so tritt nicht die Periode konstanter Trocknungsgeschwindigkeit ein, sondern direkt die Periode verlangsamter Trocknungsgeschwindigkeit. Oder wenn man bei einer gewissen Probe den Wassergehalt nicht vollkommen beseitigen darf, gewissermassen ihn über dem kritischen Wassergehalt stehen lassen muss, so findet die Trocknung nur mit konstanter Trocknungsgeschwindigkeit statt, und nicht mit verlangsamter.

Die hier erwähnte Verschiedenheit der Trocknungsgeschwindigkeit zeigt sich auch auf Abb. 10, wo sie im Gegensatz zu der Trocknungszeit dargestellt ist.

Abb. 10 drückt weiterhin noch folgende verschiedene Beziehungen aus. Die Temperatur der Probe ist zu Anfang des Verfahrens konstant und etwas höher als die Feuchtkugeltemperatur der Luft; wenn der Wassergehalt der Probe aber nach einiger Zeit bis zu einem gewissen Grade sank, steigt die Temperatur allmählich und erreicht zuletzt die Trockenkugeltemperatur. Dieser Feuchtigkeitsgrad, bei dem die Temperatur anfängt sich zu ändern, ist fast äquivalent dem kritischen Wassergehalt.

Die Kontraktion der Probe erfolgt zu Anfang geradlinig im Verhältnis zur Verringerung des Feuchtigkeitsgehaltes, und hört bei einem gewissen Wassergehalte auf. Die Probe zieht sich danach fast nicht mehr zusammen. Der Feuchtigkeitsgehalt, bei dem die Kontraktion aufhört ist immer etwas grösser als der kritische Wassergehalt.

Die gesamte verdampfte Wassermenge nimmt während der Periode konstanter Trocknungsgeschwindigkeit geradlinig gewaltig zu, bei dem kritischen Wassergehalt beginnt sie sich zu vermindern, wobei sich die Kurve allmählich in eine Horizontale verwandelt. Der freie Wassergehalt dagegen vermindert sich schnell zu Anfang des

Trockenvorganges, und jenseits der Grenze des kritischen Wassergehaltes wird die Neigung der Kurve immer flacher, bis sie endlich den Nullpunkt erreicht.

8. Die Periode der konstanten Trocknungsgeschwindigkeit.

Die Verdampfung der Feuchtigkeit während der Periode konstanter Trocknungsgeschwindigkeit gehört zum Trockenmechanismus I A, indem sie nämlich einen Fall von Oberflächenverdampfung darstellt. An der Oberfläche des festen Körpers befindet sich immer eine verhältnismässig ruhig bleibende Luftschicht, und erst nachdem die aus Körper verdampfende Feuchtigkeit durch diese Luftschicht hindurchgedrungen ist, geht sie in die Luftmasse ein und wird sofort durch Konvektion oder sonstige Luftzüge abgeführt.

Andererseits gelangt die zur Verdampfung gehörige Wärmemenge, wie erwähnt, durch die Leitung eben dieser Luftschicht bis zum Körper, und die Oberfläche des Körpers kühlt sich beinahe auf die Feuchtkugeltemperatur der Trockenluft ab. Wenn die Temperatur (Trockenkugel) der Luft hier z. B. 45°C , die relative Feuchtigkeit 21% ist, so beträgt die entsprechende Feuchtkugeltemperatur $25,8^{\circ}\text{C}$. Die Temperatur des festen Körpers bei der Periode konstanter Trocknungsgeschwindigkeit beträgt unter denselben Bedingungen $28,2^{\circ}\text{C}$, wie Abb. 10 zeigt. Sie ist also um $2,4^{\circ}\text{C}$ höher als die Feuchtkugeltemperatur. Dies hat seine Ursache darin, dass die adiabatische Trocknung nicht bis zum letzten Grade durchgeführt wird, aber ausser der Uebertragung von Luft kann noch eine kleine Menge Wärme bis an den Körper gebracht werden. Das heisst: der Rahmen, der die Probe trägt, und die umgebenden Wände des Trockenraumes sind zweifellos der Trockenluft bezüglich der Temperatur gleich, also der Trockenkugeltemperatur, und da die Einrichtung eine etwas höhere Temperatur als die Probe hat, die sich in der Feuchtkugeltemperatur befindet, wird ihre Wärme durch die Leitung von dem Rahmen, durch die Ausstrahlung von den Wänden des Trockenraumes auf die Probe übertragen, und die Temperatur der Probenoberfläche steigt hierbei höher als die Feuchtkugeltemperatur der Luft, der Wasserdampfdruck vergrössert sich zugunsten einer Förderung der Trocknungsgeschwindigkeit.

Der Einfluss dieser Erscheinung auf das Trockenverfahren ist jedoch verhältnismässig gering, da der Unterschied zwischen den Trocken- und Feuchtkugeltemperaturen zumeist klein ist.

Während die Oberfläche des festen Körpers noch viel Feuchtigkeit enthält, wird die Innenseite der sich mit dem Körper berührenden Luftschicht mit Wasserdampf gesättigt und zeigt den der

Feuchtkugeltemperatur entsprechenden Wasserdampfdruck p_w . Beträgt der Partialdruck des Wasserdampfdruckes in der Luft p_a , so ergibt sich als Gradient des Wasserdampfdruckes $p_w - p_a$ zwischen der Oberfläche des Körpers und der freien Luft, und der Wasserdampf diffundiert demzufolge von der Oberfläche des Körpers durch die stationäre Luftschicht bis in die freie Luft. In diesem Falle ist es ganz gleich, wie die Wärme von der Oberfläche des Körpers durch die Luftschicht in die Luft übertragen wird.

Wenn w den Wassergehalt der Probe, θ die Zeitdauer, A die verdampfenden Oberflächen bedeuten, so beträgt die Trocknungsgeschwindigkeit in g/cm^2 . std.:

$$\frac{dw}{A d\theta} = k_w (p_w - p_a) \quad (1)$$

Aus dieser Formel kann man ersehen, dass die Trocknungsgeschwindigkeit proportional zu dem Gradienten des Druckes ausser- und innerhalb der Luftschicht ($p_w - p_a$) ist und umgekehrt proportional zu der Dicke der Luftschicht. Letztere ist hierbei im Trocknungskoeffizienten k_w enthalten, und k_w ist umgekehrt proportional der Dicke der Luftschicht, da k_w eine Funktion von der Massengeschwindigkeit der Luft v nach der Formel,

$$k_w = av^n \quad (2)$$

ist, worin a und n die Konstante bedeuten.

Da bei der oben angegebenen Formel der Wert auf der rechten Seite konstant bleibt, bis der Wassergehalt unter bestimmten Trockenbedingungen den kritischen Punkt erreicht, so ist die Trocknungsgeschwindigkeit beständig, d. h. die konstante Trocknungsgeschwindigkeit ist:

$$\frac{dw}{A d\theta} = k. \quad (3)$$

Wenn man solch eine Trockenbedingung anwendet, bei der sich irgendeiner der Koeffizienten auf der rechten Seite der ersten Formel vergrößert, so vermag man gewiss die Trocknungsgeschwindigkeit zu beschleunigen. Erhöht man z. B. die Temperatur der Trockenluft, so vergrößert sich der der Feuchtkugeltemperatur entsprechende Wasserdampfdruck p_w , während die Feuchtkugeltemperatur selbst mit der Temperatur der Luft im Gleichgewicht steht. Verringert man dagegen die Feuchtigkeit der Luft, so wird der Partialdruck des Wasserdampfes p_a in der Luft kleiner. Vergrößert man andererseits die Luftgeschwindigkeit, so vermindert sich die Dicke der Luftschicht, d. h. der Widerstand gegen die Diffusion des Wasserdampfes. Auf solche Weise wird der Trocknungskoeffizient k_w grösser, und die Trocknungsgeschwindigkeit $\frac{dw}{A d\theta}$ nimmt in sich beschleunigender Weise in allen Fällen zu. Die Ergebnisse des Experimentes entsprechen ebenfalls diesen Verhältnissen.

Abb. 13—17 stellen die Ergebnisse des Experimentes dar, bei dem man die Feuchtigkeit und die Geschwindigkeit der Luft konstant, hingegen ihre Temperatur veränderlich lässt; während der Periode konstanter Trocknungsgeschwindigkeit steigert sich die Trocknungsgeschwindigkeit im gleichen Masse in dem die Temperatur ansteigt. Abb. 21 zeigt das Verhalten der Trocknungsgeschwindigkeit zu der Temperatur während der Periode konstanter Trocknungsgeschwindigkeit und zeugt damit klar für die oben erwähnte Tatsache.

Abb. 18—21 drücken die Ergebnisse des Experimentes aus, bei dem man die Temperatur und die Geschwindigkeit der Luft konstant, aber die Feuchtigkeit inkonstant macht. Die Befunde beweisen daher, dass die Trocknungsgeschwindigkeit während der Periode konstanter Trocknungsgeschwindigkeit sich bei verringernder Feuchtigkeit vergrößert.

Die Beziehung der Trocknungsgeschwindigkeit zu der Feuchtigkeit während der Periode konstanter Trocknungsgeschwindigkeit lässt sich auf Abb. 25 erkennen. Macht man die Temperatur und die Geschwindigkeit der Luft konstant, so vergrößert sich die Trocknungsgeschwindigkeit fast geradlinig mit der Abnahme der Feuchtigkeit.

Abb. 24

Kurven-Nr.	Relative Feuchtigkeit	} Luftgeschwindigkeit 2.14 m/sek.
I	18.7%	
II	21.0	
III	37.3	
IV	53.7	
V	75.8	

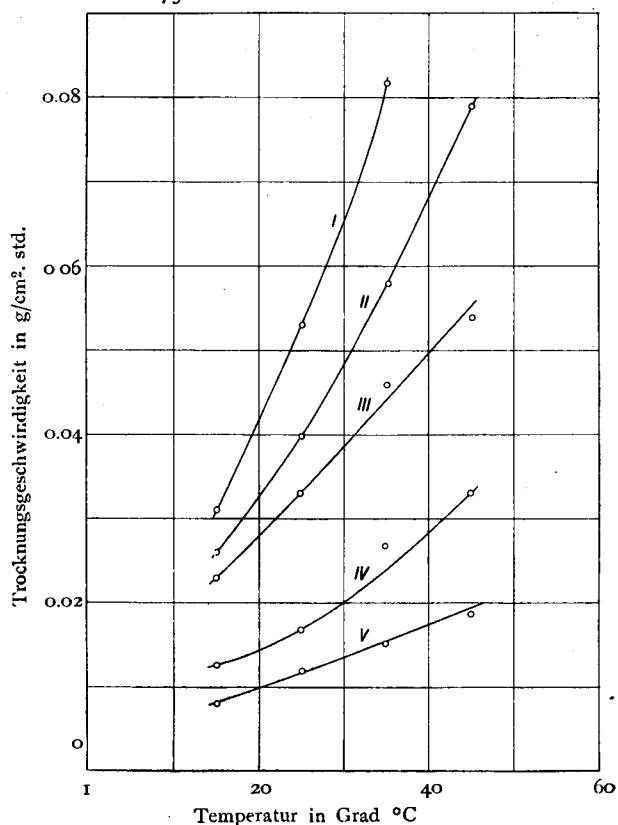
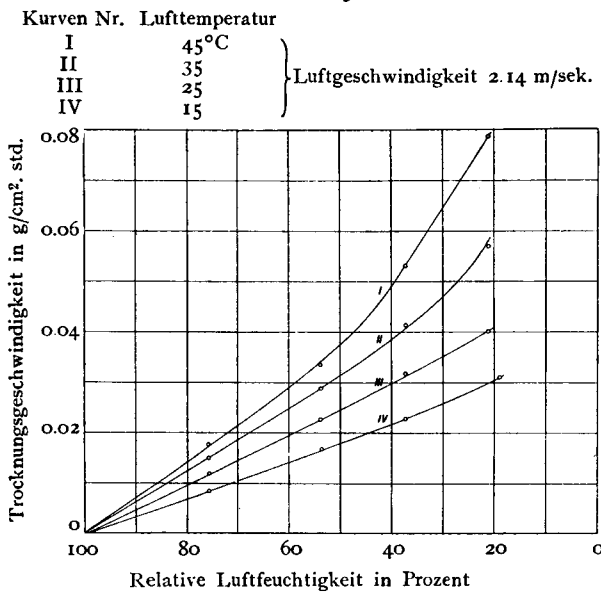


Abb. 25

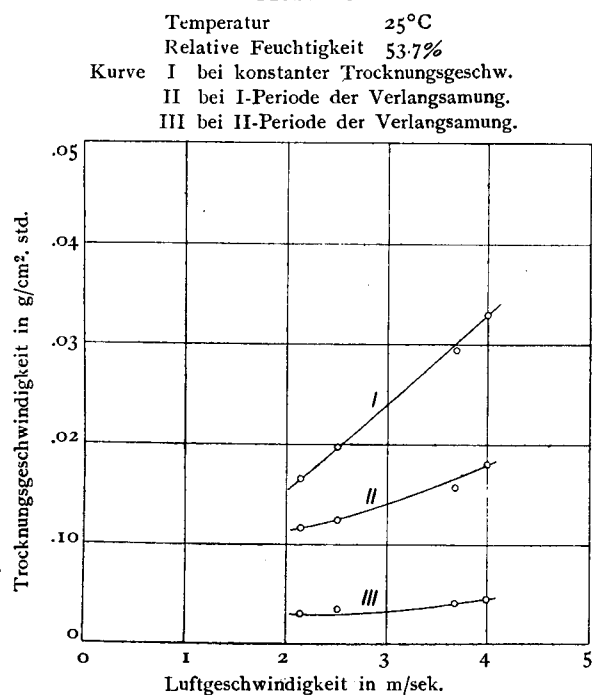


Man kan dabei bemerken, dass alle die Verlängerungen dieser Kurven auf einen Sättigungspunkt, wo die Verdampfung der Feuchtigkeit nicht erfolgen soll, gerichtet sind.

Man betrachte das Versuchsergebnis bei 15°C. Wie erwähnt, ist die Beziehung zwischen der Trocknungsgeschwindigkeit und der Feuchtigkeit geradlinig, und mit der Verringerung der Feuchtigkeit bis zu dem Prozentsatz 90→80→70→60→.....% vergrößert sich die Trocknungsgeschwindigkeit gemäss der arithmetischen Progression.

Abb. 22 drückt ebenfalls die Beziehung zwischen der Trocknungsgeschwindigkeit und der Luftgeschwindigkeit aus. Indem man die Tem-

Abb. 26



peratur und die Feuchtigkeit der Luft beständig hält vergrößert sich schnell die Trocknungsgeschwindigkeit mit der Zunahme der Luftgeschwindigkeit. Ueber die Luftgeschwindigkeit möchte der Verfasser später noch weitere Untersuchungen machen, indem er dieselben für einen weiteren Bereich veränderlich lässt. Abb. 26 zeigt sehr klar das Verhalten der Trocknungsgeschwindigkeit zu der Luftgeschwindigkeit.

Wie oben erwähnt, stehen Temperatur, Feuchtigkeit und Geschwindigkeit der Luft in engem Verhältnisse zu der Trocknungsgeschwindigkeit; wenn auch nur einen von diesen Faktoren verändert wird, so wird die Trocknungsgeschwindigkeit dadurch sofort beeinflusst. Verändert man zwei zugleich von ihnen, so ist die Wirkung eine doppelte, und natürlich weit stärker als im ersteren Falle, wie es in Abb. 23 sich darstellt.

Z. B.: Bei dem 6. Versuche, welcher unter den Trockenbedingungen von 15°C, 57,3% und 2,14 m/sek steht, beträgt die Trocknungsgeschwindigkeit 0,023 g/cm². std.; bei dem 1. Versuche, wo man nur die Feuchtigkeit bis auf 18,7% veränderte, beträgt dieselbe 0,031, damit eine geringe Zunahme aufweisend; wenn man aber, wie beim 3. Versuche, die Feuchtigkeit bis auf 18,7% und zugleich die Luftgeschwindigkeit bis auf 4,0 m/sek vergrößert, so beträgt dann die Trocknungsgeschwindigkeit 0,062.

Der kritische Punkt des Wassergehaltes befindet sich je nach der Art des festen Stoffes gewöhnlich innerhalb eines bestimmten Bereiches; wenn man die Trocknungsbedingung konstant hält, stellt er sich als ein bestimmter Wert dar. Je schneller die Trocknung verläuft, umso grösser ist der kritische Wassergehalt, geht die Trocknung langsam vor sich vermindert sich derselbe. Bei der „Kibushi-Tonerde“ hat er den weiten Spielraum von 9 bis 12%; es mag in diesem Falle sein, dass dieselbe Probe infolge der unterschiedlichen Trocknungsbedingungen einen ungleichen kritischen Wassergehalt enthält.

9. Die Periode der Verlangsamten Trocknungsgeschwindigkeit.

Die Trocknung fester Stoffe mit verlangsamter Trocknungsgeschwindigkeit stellt sich deutlich in zwei Teilen dar der erste Teil folgt direkt dem kritischen Punkt des Wassergehaltes und ist noch dem Trocknungsmechanismus IA zuzurechnen. Die Beziehung zwischen der Trocknungsgeschwindigkeit und dem Wassergehalt ist mittels der linken abfallenden Geraden ausgedrückt.

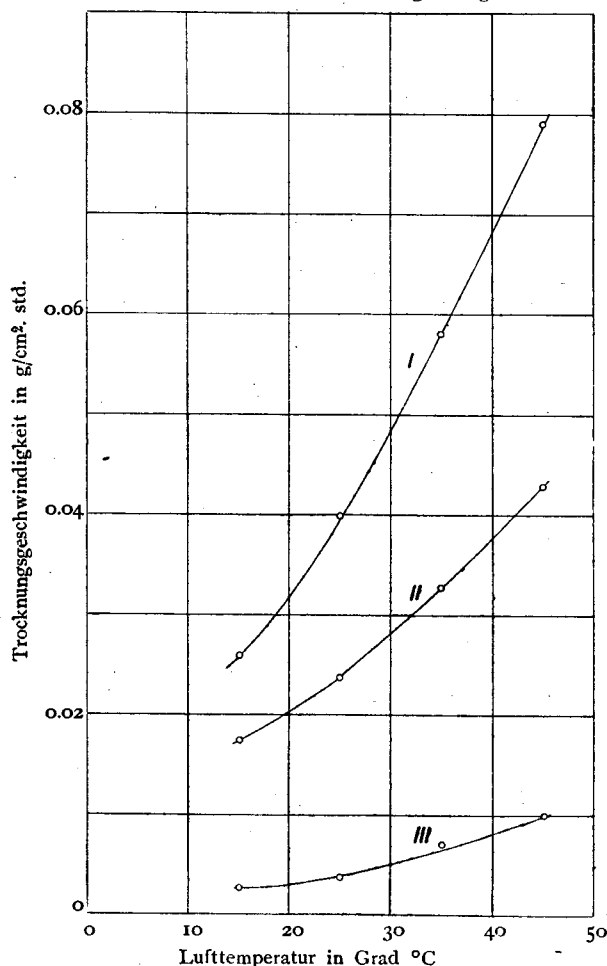
Die Abnahme der Trocknungsgeschwindigkeit im ersten Teil der Verlangsamung trotz der Konstanz der herrschenden Trocknungsbedingungen ist sehr leicht dadurch zu erklären, dass die wirksame Oberfläche infolge des Auftretens von immer

größer werdenden, bereits getrockneten Oberflächen-
teilen immer mehr abnimmt; d. h. dass die Größe
A in Gleichung (1) gleichförmig abnimmt und
kleiner als die Gesamtfläche wird, wodurch also
 $\frac{dw}{d\theta}$ verringert wird.

Für die Berechnung ist es am einfachsten,
eine Verminderung der wirksamen Oberfläche
proportional zum freien Feuchtigkeitsgehalt des zu
trocknenden Materials vorauszusetzen.

Abb. 27

Relative Luftfeuchtigkeit 21%
Luftgeschwindigkeit 2.14 m/sek.
Kurve I bei konstanter Trocknungsgeschwindigkeit.
" II bei I-Periode der Verlangsamung.
" III bei II-Periode der Verlangsamung.



Unter dieser Voraussetzung¹⁸⁾ wird

$$\frac{dw}{d\theta} = k' \cdot A' (p_s - p_a) \quad (4)$$

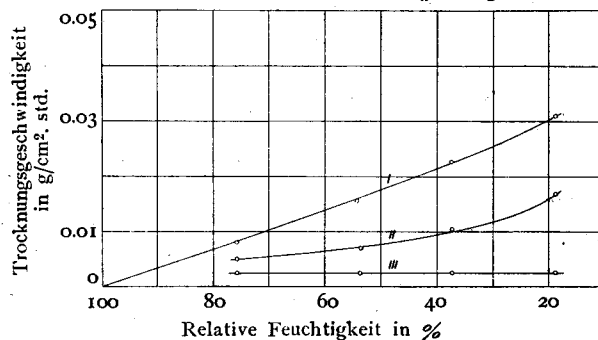
und $A' = m \cdot F, \quad (5)$

worin m eine Konstante, F den freien Feuchtig-
keitsgehalt und A' die bei der Trocknung wirksame
Oberfläche, welche nicht mehr konstant ist,
darstellen.

Diese Voraussetzung ist mittels des Experi-

Abb. 28

Lufttemperatur 15°C
Luftgeschwindigkeit 2.14 m/sek.
Kurve I bei konstanter Trocknungsgeschwindigkeit.
" II bei I-Periode der Verlangsamung.
" III bei II-Periode der Verlangsamung.

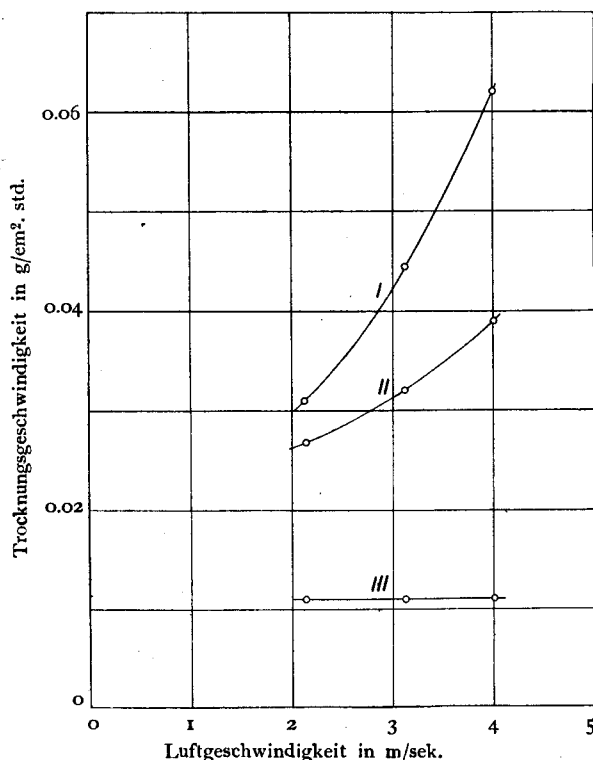


mentes sorgfältig nachgeprüft worden. Der zweite
Teil der verlangsamten Trocknungsgeschwin-
gkeit ist entweder als Kurve nach oben, oder,
wie in der ersten Periode, als Gerade dargestellt,
und nähert sich langsam in beiden Fällen dem
Nullpunkt.

Dabei wird der Fall eintreten, dass die Ver-
dampfung nicht mehr der ausschlaggebende Faktor
ist, sondern die Diffusion der Feuchtigkeit durch

Abb. 29

Lufttemperatur 15°C
Relative Feuchtigkeit 18.7, 20.3 u. 18.7%
Luftgeschwindigkeit 2.14, 3.12 u. 4.00 m/sek.
Kurve I bei konstanter Trocknungsgeschwindigkeit.
" II bei I-Periode der Verlangsamung.
" III bei II-Periode der Verlangsamung.



18) W. K. Lewis (J. Ind. Eng. Chem., 1921, 13, 427.)

den Feststoff massgebend wird, d. h. er gehört zum Trocknungsmechanismus IB oder II.

Über den zweiten Teil der Verlangsamung wird der Verfasser nachher noch genauer berichten.

Unter gewissen Umständen aber stellt sich öfters die Trocknung bei den zwei Teilen der verlangsamten Trocknungsgeschwindigkeit als eine fortlaufende leicht gekrümmte Kurve nach oben dar, wobei wahrscheinlich entweder die Luftgeschwindigkeit sehr gross, oder die Temperatur sehr hoch oder die Feuchtigkeit sehr niedrig ist. In solchem Falle geht die Trocknung schnell vorstatten, ohne dass sich der erste Teil beobachten lässt.

Man prüfe die Beziehung der Trocknungsgeschwindigkeit zur Temperatur, Feuchtigkeit und Geschwindigkeit der Trockenluft während der Periode verlangsamter Trocknungsgeschwindigkeit. Im ersten Teil der Periode wird die Trocknung in noch geringerem Grade durch solche Bedingungen der Trockenluft beeinflusst als in der Periode konstanter Trocknungsgeschwindigkeit. Auf Abb. 27—29 stellt Kurve I den Einfluss solcher Bedingungen auf die Trocknungsgeschwindigkeit bei der Periode konstanter Trocknungsgeschwindigkeit dar, während Kurve II die Trockenkurve des ersten Teiles verlangsamter Trocknungsgeschwindigkeit ist. Die Neigung von Kurve II ist auf jeder Abbildung weit flacher als die von Kurve I—was für die Richtigkeit obiger Prüfung spricht.

Im zweiten Teil verlangsamter Trocknungsgeschwindigkeit wirken die Luftbedingungen sehr wenig ein. Dafür zeugt die Kurve III auf Abb. 27—29 sie zeigt sich ausser in Abb. 27 fast horizontal. Aus Abb. 27 ergibt sich, dass die Einwirkung der Temperatur auch zu dieser Zeit anhält und die Viskosität des Wassers zu vermindern und die Trocknungsgeschwindigkeit zu beschleunigen vermag.

Aus den obigen Verhältnissen kann man sehen, dass es ganz unrationell ist, bei der industriellen Trocknung fester Stoffe während des

ganzen Trockenvorgangs unveränderliche Bedingungen anzuwenden, was Veranlassung gibt zur Benutzung bald einer unnötig grossen bewegenden Kraft, bald einer unnötig grossen Wärmemenge. Die Trockenbedingungen müssen den Umständen gemäss verändert werden. Da aber dieser Punkt der Endzweck der vorliegenden Untersuchung ist, möchte der Verfasser hierzu später noch eine ausführliche Darstellung in Zahlen geben.

10. Zusammenfassung.

1. Ein geeigneter Versuchsapparat für die Trocknungsexperimente mit einem besonderen Feuchtigkeitsregler und einer besonderen Federwage ist verfertigt worden.

2. Es wird der Versuch bezüglich der Einwirkung von Temperatur, Feuchtigkeit und Geschwindigkeit der Luft auf die Trocknung der Tone beschrieben.

3. Die Trocknungsgeschwindigkeit der Probe ist am Anfang beständig und vermindert sich dann über die Grenze eines gewissen Wassergehaltes hinaus plötzlich. Die erstere Periode heisst die Periode konstanter Trocknungsgeschwindigkeit, die letztere die Periode verlangsamter Trocknungsgeschwindigkeit und der Grenzfeuchtigkeitsgehalt zwischen den beiden Perioden der kritische Wassergehalt.

4. Während der Periode konstanter Trocknungsgeschwindigkeit haben Temperatur, Feuchtigkeit und Geschwindigkeit der Trockenluft auf die Trocknungsgeschwindigkeit grossen Einfluss.

5. Die Periode verlangsamter Trocknungsgeschwindigkeit wird in zwei Teile geschieden: der erste Teil ist von den Luftbedingungen ziemlich beeinflusst, der zweite aber bleibt von ihnen ganz unberührt.

6. Die Temperatur der Probe ist am Anfang konstant, sie steigt jenseits der Grenze des kritischen Wassergehaltes; die Kontraktion der Probe erfolgt am Anfang geradlinig, und hört über den kritischen Wassergehalt hinaus ganz auf.