

# Verdunstung und Wärmeübergang beim Getreidetrocknen

VON DER  
EIDGENÖSSISCHEN TECHNISCHEN  
HOCHSCHULE IN ZÜRICH

ZUR ERLANGUNG  
DER WÜRDE EINES DOKTORS DER  
TECHNISCHEN WISSENSCHAFTEN

GENEHMIGTE  
PROMOTIONSARBEIT

VORGELEGT VON  
**Walter Müller**

Dipl. Ing.  
aus Birmenstorf

Referent: Herr Prof. Dr. G. Eichelberg  
Korreferent: Herr Prof. H. Quiby



Zürich 1943  
Dissertationsdruckerei AG, Gebr. Leemann & Co.  
Stockerstr. 64

Leer - Vide - Empty

## Inhaltsübersicht

	Seite
Vorwort . . . . .	5
Einleitung . . . . .	6
Bezeichnungen . . . . .	8
I. Wärme- und Stoffaustausch beim Trocknen und Kühlen	9
1. Wärme- und Stoffbilanz . . . . .	9
2. Verdunstungsgleichung . . . . .	13
II Versuche . . . . .	15
1. Meßverfahren . . . . .	17
2. Versuchseinrichtung . . . . .	18
3. Meßgenauigkeit und Eichung . . . . .	18
4. Versuchsauswertung . . . . .	19
5. Vorversuche . . . . .	20
a) Einfluß der Lufttemperatur und der Gutsfeuchtigkeit	21
b) Einfluß der Anfangsfeuchtigkeit . . . . .	26
c) Einfluß der Luftgeschwindigkeit . . . . .	29
d) Einfluß der Weizenart . . . . .	30
e) Einfluß des Wiederbefeuchtens . . . . .	32
f) Unterbruch der Trocknung . . . . .	33
6. Hauptversuche . . . . .	33
a) Manitobaweizen . . . . .	34
b) Europäischer Landweizen . . . . .	37
7. Resultate . . . . .	38
8. Rechnungsbeispiel . . . . .	40
Zusammenfassung . . . . .	50
Literaturübersicht . . . . .	51

Leer - Vide - Empty

## Vorwort

Die vorliegende Arbeit ist in der Praxis entstanden, aus dem Bedürfnis heraus, für die Konstruktion von Getreidetrocknungs- und Konditionierungsanlagen geeignete Unterlagen zu beschaffen.

Beim Entwerfen von Trockenanlagen stößt man bei Unkenntnis der Wärmeübergangs- und der Verdunstungszahlen auf Schwierigkeiten, die man meistens vermittelt empirischer Behelfe zu umgehen trachtet.

Anhand des  $i-x$ -Diagrammes ist es wohl möglich, unter bestimmten Bedingungen für einen verlangten Trockeneffekt und eine vorgeschriebene Erwärmung des Gutes die zur Trocknung erforderliche Wärme und Luftmenge zu ermitteln. Es gelingt aber nicht, daraus Angaben über den zeitlichen Verlauf der Trocknung und die Dimensionen der Anlage abzuleiten. Bezüglich der Trockendauer und der Austausch-Oberflächen muß vielmehr auf Versuchserfahrungen abgestellt werden. Dazu genügt, wie sich zeigen läßt, die Ermittlung der Verdunstungszahl in Funktion der Betriebsbedingungen, und so beschränkt sich der experimentelle Teil der vorliegenden Arbeit auf die Messung dieser Verdunstungszahl. Die Ergebnisse ermöglichen, wie anhand eines Zahlenbeispiels gezeigt wird, die Bemessung der Trockner.

Die Arbeit ist durch meine Tätigkeit im Versuchslaboratorium der Firma Gebr. Bühler, Uzwil, angeregt worden und dort durch die weitgehende Unterstützung der Firma entstanden, wofür derselben mein aufrichtiger Dank gebührt.

Die wertvolle Mithilfe von Herrn Prof. Dr. G. Eichelberg bei der Bearbeitung der gewonnenen Versuchsergebnisse möchte ich an dieser Stelle ebenfalls aufs beste verdanken.

## Einleitung

Zum Trocknen von Getreide werden meistens vertikal gestellte Schachttrockner verwendet. Der Trockenvorgang geschieht dabei in der Weise, daß die Körner in kontinuierlichem langsamem Strom, lose geschüttelt, den Schacht von oben nach unten durchlaufen und im Gegen- oder Querstrom dazu von warmer, trockener Luft umspült werden. Die Luft dient dabei zugleich als Wärme- und als Feuchtigkeitsträger.

Die Trocknung zerfällt in 3 Abschnitte, nämlich:

1. Aufwärmen des Trockengutes bis zum Taupunkt.
2. Trocknen bis zum hygroskopischen Gleichgewicht, welches dadurch charakterisiert ist, daß — nachdem die Oberflächenfeuchtigkeit verdunstet ist — der Flüssigkeitstransport aus dem Innern des Gutes einsetzt.
3. Trocknen unterhalb des hygroskopischen Zustandes, also Herausdampfen der innern Gutsfeuchtigkeit.

Man geht bei dieser Einteilung von der durch die Erfahrung weitgehend bestätigten Annahme aus, daß sich das feuchte Gut vor dem Einsetzen der Trocknung, also längs einer Linie  $x = \text{konstant}$ , auf die vorgeschriebene zulässige Temperatur erwärmt. Die Luft gibt dabei fühlbare Wärme an das Gut ab. Eine Begründung dieser Annahme läßt sich darin erblicken, daß sich das oberflächlich feuchte Gut wie das Feuchtthermometer eines Psychrometers verhält.

Der Taupunkt stellt den Gleichgewichtszustand für den Wärme- und Feuchtigkeitsaustausch während des 2. Abschnittes dar. Die Temperatur des Gutes bleibt solange auf diesem Niveau unverändert. Die Taupunkttemperatur ist allein durch den Zustand  $(t_1, x_1)$  der in den Trockner eintretenden Luft bestimmt.

Im letzten Trockenabschnitt steigt die Gutstemperatur über diejenige des Taupunktes hinaus, und zwar nach den Gesetzmäßigkeiten des Wärmeüberganges und der Verdunstung.

Dieser Teil des Trockenprozesses ist demjenigen der Kühltrocknung ähnlich, mit dem Unterschied allerdings, daß hier das Gut aus der Luft Wärme erhält und Feuchtigkeit an sie abgibt, während dort das Gut sowohl Wärme als auch Feuchtigkeit an die Kühlluft übermittelt. Die Gesetze, welche die Verdunstungskühlung bestimmen, lassen sich folglich auch auf den 3. Trockenabschnitt anwenden, sofern das Vorzeichen für den Wärme-

transport umgekehrt wird. Zu ihrer Verwendung ist aber die Kenntnis der Verdunstungszahl notwendig, wozu die nachstehenden Versuchsergebnisse dienen sollen.

Der Berechnungsgang auf Grund dieser Versuchsergebnisse sei im folgenden kurz skizziert:

Die Wärme- und Feuchtigkeitsbilanz des 1. und 2. Trockenabschnittes wird anhand des  $i-x$ -Diagrammes ermittelt.

Gestützt auf das Lewis'sche Gesetz, welches dann allgemein verwendbar ist, wenn für  $C_p$  der Zustand in der Grenzschicht über dem Gut eingesetzt wird, kann mit Hilfe der Verdunstungszahl auch ein Trockenprozeß verfolgt werden, welcher sich bis in den 3. Abschnitt hinein erstreckt. Für den im hygrokopischen Gebiet liegenden Endzustand hat man nur den dort wirklich vorhandenen Luftzustand über dem Gut einzusetzen. Im  $i-x$ -Diagramm liegt dieser Zustandspunkt aber nicht wie für feuchtes Gut auf der Linie  $\varphi = 1$ , sondern irgendwo bei  $\varphi_g < 1$  im Innern des Diagrammes auf der zum Trockenluftzustand gehörenden Taulinie.  $\varphi_g$  findet man auf Grund des für jedes Gut charakteristischen  $\varphi-x$ -Diagrammes (siehe Text, Seite 25). Damit kann schließlich zwischen Anfangs- und Endzustand des Trockenverlaufes eine mittlere Verdunstungszahl errechnet werden. Diese Mittelwertbildung genügt für die beim Getreidetrocknen und Konditionieren auftretenden Trockeneffekte vollauf. Für exaktere Untersuchungen des 3. Abschnittes kann auf die Analogie mit der Kühltrocknung eingegangen werden.

Zur Bestimmung der totalen Trockendauer und der Abmessungen bedient man sich der empirisch gefundenen Beziehung über die Verdunstungszahl. Dazu sind die Zustandsbedingungen für Gut und Luft gemäß den 3 Trockenabschnitten zu Grunde zu legen. Interessiert ebenfalls der zeitliche Ablauf des Trockenprozesses, so verhilft dazu die Wärmebilanz.

$$- G_L di = G_T d\dot{i} = k_v [C_{p_g}(t - t) - i_{d_t}(x_g - x)] v dZ$$

Für die Kühltrocknung ist der Rechnungsgang grundsätzlich der gleiche wie für die Trocknung. Es tritt dabei allerdings noch eine weitere Schwierigkeit hinzu, da über den Endzustand der Luft nichts auszusagen ist. Dazu müssen die Gesetze des Wärme- und Feuchtigkeitsaustausches herbeigezogen werden. Mit Hilfe der Verdunstungszahl gelingt es, alle zur Dimensionierung des Kühlers nötigen Größen durch einfache Rechnung zu gewinnen (siehe Rechnungsbeispiel).

Die den nachstehend beschriebenen Versuchsergebnissen vorangehende theoretische Betrachtung vermittelt eine für den Zweck dieser Untersuchung geeignet erscheinende Zusammenfassung der trockentechnischen Grundlagen. Sie soll ferner das Bindeglied zwischen den Versuchen und der praktischen Rechnung darstellen.

## Bezeichnungen

$Q$	WE/h	Übertragene Wärme
$Q_F$	"	Fühlbarer Wärmeanteil
$Q_L$	"	Dampfwärmeanteil
$Q_T$	"	Wärmeanteil des Trockengutes
$Q_D$	"	Wärmeanteil zum Verdampfen des Wassers
$i$	WE/Kg	Wärmeinhalt der Luft
$i_g$	"	Wärmeinhalt der Luft bezogen auf den Gutzustand
$i_{d_t}$	"	Wärmeinhalt des Dampfes bei der Lufttemperatur $t$
$i_{w_t}$	"	Wärmeinhalt des Wassers bei der Guttemperatur $t$
$i$	"	Wärmeinhalt des feuchten Gutes
$C_{pL}$	WE/Kg °C	Spez. Wärme der trockenen Luft
$C_{pg}$	"	Spez. Wärme der feuchten Luft $C_{pg} = C_{pL} + x_g C_{pd}$
$C_{pd}$	"	Spez. Wärme des Dampfes
$C_T$	"	Spez. Wärme des trockenen Gutes
$C_f$	"	Spez. Wärme des feuchten Gutes $C_f = C_T + x \cdot C_w$
$C_w$	"	Spez. Wärme des Wassers
$t$	°C	Temperatur der Luft
$\tau$	"	Taupunkttemperatur der Luft
$t$	"	Temperatur des Gutes
$x$	Kg/Kg	Absolute Feuchtigkeit der Luft
$x_g$	"	Absolute Feuchtigkeit der Luft bezogen auf den Gutzustand
$x''$	"	Absolute Feuchtigkeit der Luft bezogen auf den Taupunkt
$\varphi$	%	Relative Feuchtigkeit der Luft
$f$	%	Relative Feuchtigkeit des Gutes
$x$	Kg/Kg	Absolute Feuchtigkeit des Gutes $x = \frac{f}{1-f}$
$\alpha$	WE/m <sup>2</sup> h °C	Wärmeübergangszahl bezogen auf die Kornoberfläche
$\alpha_v$	WE/m <sup>3</sup> h °C	Wärmeübergangszahl bezogen auf das Kornvolumen
$k$	Kg/m <sup>2</sup> h	Verdunstungszahl bezogen auf die Kornoberfläche
$k_v$	Kg/m <sup>3</sup> h	Verdunstungszahl bezogen auf das Kornvolumen
$P$	Kg/m <sup>2</sup>	Partialdruck des Dampfes bei der Temp. $t$
$P''$	"	Partialdruck des Dampfes bezogen auf den Sättigungszustand der Luft
$\mathfrak{P}$	"	Partialdruck des Dampfes bezogen auf die Grenzschicht über dem Gut
$V$	m <sup>3</sup>	Kornvolumen (von den Körnern wirklich eingenommenes Volumen)
$v$	m <sup>3</sup> /h	Stündl. Durchsatz an Kornvolumen $v = \frac{V}{Z}$
$V_0$	m <sup>3</sup>	Schüttvolumen
$Z$	h	Durchlaufzeit durch den Trockner



$F$	$m^2$	Kornoberfläche
$G_L$	Kg/h	Trockenluftmenge
$G_T$	"	Trockensubstanz
$W$	"	Verdunstete Wassermenge.

# I. Wärme- und Stoffaustausch beim Trocknen und Kühlen

## 1. Wärme- und Stoffbilanz

Der Trockenvorgang besteht aus einem Wärme- und einem Stoffaustausch.

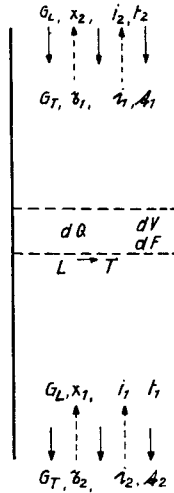


Abb. 1

Gemäß Abb. 1 kann man sich dazu einen vereinfachten, kontinuierlichen Rieseltrockner vorstellen. Das Trockengut durchläuft den Trockner von oben nach unten und gelangt dabei vom feuchten Zustand  $i_1, x_1, t_1$  in den trockenen  $i_2, x_2, t_2$ . Im Gegenstrom dazu durchquert die Luft das Gut und verändert dabei ihren Zustand von  $i_1, x_1, t_1$  in  $i_2, x_2, t_2$ . Greift man einen Teilabschnitt des Trockners mit dem Volumen  $dV$  bzw. mit der Kornoberfläche  $dF$  heraus, so gilt für den Energieaustausch unter Vernachlässigung der Verluste

$$- G_L di = G_T d i \quad (1)$$

Die Luft gibt im Wärmeaustausch die fühlbare Wärme  $dQ_F = \alpha(t-t) dF$  an das Trockengut ab. Sie nimmt andererseits im Stoffaustausch mit dem Dampfanteil  $G_L dx$  den Wärmehalt  $dQ_L = G_L \cdot i_{d_t} \cdot dx$  auf.

Es gilt also für die Abnahme des Wärmehaltes:

$$-G_L di = dQ_F - dQ_L = \alpha(t-t) dF - G_L \cdot i_{d_t} \cdot dx \quad (2)$$

Ersetzt man die Wärmeübergangszahl  $\alpha$  gemäß dem Lewis'schen Gesetz durch:

$$\alpha = k \cdot C_{p_g} \quad (3)$$

und die verdampfte Wassermenge, gemäß Verdunstungsgesetz, durch:

$$G_L \cdot dx = k(x_g - x) dF \quad (4)$$

so wird:

$$-G_L \cdot di = k[C_{p_g}(t-t) - i_{d_t}(x_g - x)] dF \quad (5)$$

Unter Benützung der Gleichungen:

$$C_{p_g} = C_{p_L} + x_g C_{p_d}$$

$$i_{d_t} = C_{p_d} \cdot t + r_0 \quad (2)$$

$$i = C_{p_L} \cdot t + x \cdot i_{d_t}, \quad i_g = C_{p_L} \cdot t + i_{d_t} \cdot x_g = C_{p_L} \cdot t + x_g [i_{d_t} - C_{p_d}(t-t)]$$

geht Gleichung (5) über in:

$$G_L \cdot di = k(i_g - i) dF \quad (6)$$

Führt man an Stelle der Kornoberfläche  $F$  das bei Massengütern besser bestimmbare Kornvolumen  $V$  in die Rechnung ein und definiert  $k \cdot dF = k_v \cdot dV$ ; bedeutet ferner  $Z$  die Durchlaufzeit,  $\frac{V}{Z} = v$  die Durchsatzgeschwindigkeit an Kornvolumen, so lautet die Gleichung (6)

$$\boxed{G_L \cdot di = k_v(i_g - i) v \cdot dZ} \quad (7)$$

<sup>1)</sup> Das Lewis'sche Gesetz ist, wie Kirschbaum nachgewiesen hat (Forschung auf dem Gebiet des Ingenieurwesens 1936, S. 109), solange exakt gültig, als das Gut feuchten Charakter besitzt. Es darf auch dann weiterhin benützt werden, wenn die spez. Wärme der Trockenluft gemäß dem Zustand in der Grenzschicht eingesetzt wird, was durch die Bezeichnung  $C_{p_g}$  angedeutet werden soll.

<sup>2)</sup> Nach den beiden Hauptsätzen der Thermodynamik unter Verwendung des Gasgesetzes gilt:

$$i_{d_t} = C_{fl} \cdot t_s + r_s + C_{p_d} \cdot (t - t_s) = C_{p_d} \cdot t + (C_{fl} - C_{p_d}) \cdot t_s + r_s$$

$$C_{p_d} = C_{fl} + \frac{dr}{dT} \quad \text{oder integriert} \quad r_s - r_0 = (C_{p_d} - C_{fl})(t_s - t_0)$$

oder, wenn  $r_0$  die Verdampfungswärme bei  $t_0 = 0^\circ \text{C}$  bedeutet:

$$\underline{r_s + (C_{fl} - C_{p_d}) \cdot t_s = r_0} \quad \text{und damit: } i_{d_t} = C_{p_d} \cdot t + r_0.$$

Sowohl  $k_v$  als auch  $i_g$  sind mit  $i$  veränderlich. Die Integration läßt sich nur durchführen, wenn entsprechende Beziehungen bekannt sind. Für Mittelwerte von  $k_v$  und  $(i_g - i)$  erhält man dagegen:

$$Z = \frac{G_L}{k_{v_m} \cdot v} \cdot \frac{i_2 - i_1}{(i_g - i)_m} \quad (8)$$

Unter Zuhilfenahme der aus dem  $i-x$ -Diagramm folgenden Beziehung:

$$\frac{di}{dx} = \frac{i_g - i}{x_g - x}$$

findet man weiter in Verbindung mit Gleichung (7) den Ausdruck:

$$Z = \frac{G_L}{k_{v_m} \cdot v} \cdot \frac{x_2 - x_1}{(x_g - x)_m} \quad (9)$$

Die Gleichungen (8) und (9) stellen die Grundlage zur Berechnung von Trockenvorgängen dar.

Bei reiner Konditionierung, d. h. Wärme- und Feuchtigkeitsbehandlung des Gutes ohne nennenswerte Trocknung ist die Ermittlung der Wärmeinhaltsveränderung des Trockengutes  $dQ_T = G_T di$  von Interesse.

Schreibt man die Guts erwärmung:

$$dQ_T = \alpha_T (t - \dot{t}) dF = G_T di = - G_L di, \quad (10)$$

so folgt mit Hilfe von Gleichung (5) ohne weiteres:

$$\alpha_T = k \left[ C_{p_g} - \frac{i_{d_t} (x_g - x)}{t - \dot{t}} \right]$$

oder

$$\alpha_{T_v} = k_v \left[ C_{p_g} - \frac{i_{d_t} (x_g - x)}{t - \dot{t}} \right] \quad (11)$$

Damit findet man für die zur Aufwärmung des Gutes nötige Wärme:

$$Q_T = G_T (i_2 - i_1) = \alpha_{T_{v_m}} (t - \dot{t})_m \cdot V \quad (12)$$

Die insgesamt zum Trocknen des Gutes überzuführende Wärme beträgt hingegen:

$$Q_F = \alpha_{v_m} (t - \dot{t})_m \cdot V = k_{v_m} \cdot C_{p_g} (t - \dot{t})_m \cdot V \quad (13)$$

Aus der Wärmeinhaltsänderung des Trockengutes  $dQ_T$  läßt sich der Trockenwirkungsgrad  $\eta_T$  als Verhältnis der zur eigentlichen Entfeuchtung

benötigten Wärme ( $dQ_F - dQ_T$ ) zu der insgesamt dem Gut zugeführten Wärme  $dQ_F$  bestimmen. Man findet:

$$\eta_T = \frac{dQ_F - dQ_T}{dQ_F} = 1 - \frac{dQ_T}{dQ_F} = 1 - \frac{\alpha_T}{\alpha} \quad (14)$$

oder durch Einsetzen der Gleichungen (3) und (11)

$$\eta_T = \frac{i_{d,m}(x_g - x)}{C_{p,g}(t - t)_m} \quad (15)$$

Die Gleichungen (11) bis (13) gestatten nun, den Wärmeaustausch in einfacher Weise als Funktion der Temperaturdifferenz zwischen Trockenluft und Trockengut darzustellen.

Die Wärmeübergangszahlen  $\alpha_v$  und  $\alpha_{T_v}$  sind bestimmt durch die Verdunstungszahl  $k_v$  und die Zustände der Trockenluft und des Trockengutes während des Verlaufes der Entfeuchtung.

Die Lösung von Trockenaufgaben besteht nun darin, einerseits die Verdunstungszahl  $k_v$  zu bestimmen und andererseits die Zustandsgrößen von Luft und Gut darzustellen. Der Anfangszustand der Trockenluft ist meistens gegeben. Der Endzustand läßt sich mittelst der Wärme- und Feuchtigkeitsbilanz berechnen. Damit können für die verschiedenen Größen der Gleichungen (11) bis (13) Mittelwerte gebildet werden. Liegen die Zustände des Trockengutes nicht zu weit voneinander entfernt und in der Nähe des hygroskopischen Gleichgewichtes, so läßt sich zur Bestimmung von  $C_{p,g}$  in genügender Annäherung der Zustand des Taupunktes benützen. An Stelle von  $(x_g - x)$  darf dann das Sättigungsdefizit ( $x'' - x$ ) treten, wobei  $x''$  dem Feuchtigkeitsgehalt der Trockenluft beim Taupunkt entspricht.

Mit Taupunkt oder Kühlgrenze wird diejenige Temperatur bezeichnet, auf welche sich die Trockenluft beim Berühren einer kälteren Wasser- oder feuchten Guts oberfläche höchstens abkühlen kann. Diese Grenztemperatur entspricht der Anzeige des feuchten Thermometers am Psychrometer. Bei der Kühlgrenze ist das Wärmegleichgewicht zwischen der nassen Oberfläche und der sie umspülenden Luft erreicht. Ein Wärmeaustausch mit der äußeren Umgebung findet nicht mehr statt.  $Q = 0$ . Weder die Verdunstungs oberfläche noch die Trockenluft verändern weiterhin ihre Temperatur. Es vollzieht sich einzig noch ein innerer Wärmeaustausch, der darin besteht, daß die von der Luft an das Gut übergehende Wärme zum Verdampfen von Feuchtigkeit verbraucht wird. Der Wärmeinhalt der Luft verändert sich folglich nur noch um den Betrag der Flüssigkeitswärme der in die Luft hinüberwechselnden Feuchtigkeit. Hierbei handelt es sich aber nicht um einen Wärmetransport im eigentlichen Sinn, sondern um einen solchen durch einfachen Ortswechsel.

Die Kühlgrenze kann durch die Gleichung

$$Q = 0 = G_L [(i_1 - i_2) - i_{wt}(x_2 - x_1)]$$

oder

$$(i_1 - i_2) = i_{wt}(x_2 - x_1)$$

dargestellt werden.

Im  $i$ - $x$ -Diagramm bedeutet diese Gleichung eine Gerade, die Taulinie. Sie verläuft parallel zu der im Randmaßstab angegebenen Richtung von  $i = C_w \cdot x$  und unterscheidet sich nur wenig von der Richtung der Linie  $i = \text{konst.}$

Hat das Gut bereits stark hygroskopischen Charakter, so ist es nötig, den Zustandsverlauf desselben in Abhängigkeit vom Luftzustand zu kennen. (Vergl. S. 25.)

Für die bei der Getreidetrocknung vorkommenden Trockengrade zwischen etwa 20 und 14 % genügt die erstgenannte Annäherung.

## 2. Verdunstungskühlung

Trotz Trocknen des Gutes bis unterhalb des Feuchtigkeitsgehaltes, wo Verderben eintritt, kann bei warmer Einlagerung Schimmelung und Gärung des Trockenproduktes eintreten. Die Ursache liegt darin, daß der das warme Gut umgebende Dunst bei langsamer Abkühlung kondensiert. Güter, die nach dem Trocknen nicht sofort weiterverarbeitet, sondern in Silos oder sonstigen Behältern gelagert werden, müssen daher rückgekühlt werden. Die Abkühlung bedeutet einen weiteren Trockeneffekt. Er wird als Verdunstungskühlung bezeichnet. Der Vorgang ist dem des Kühlturmproblems ganz ähnlich. Der Unterschied besteht einzig darin, daß der Zustand über dem Gut nicht nur flüssig, sondern auch hygroskopisch sein kann.

Setzt man in der Lewis'schen Gleichung für  $C_{pk}$  die dem wirklichen Zustand über dem Gut entsprechende spezifische Wärme ein, so dürfen die von *Merkel*<sup>3)</sup> aufgestellten Beziehungen benützt werden.

Auch hier sagt die Wärmebilanz nichts aus über die Dauer des Prozesses, die nötigen Austauschoberflächen und den Endzustand des Kühlmittels. Diese Größen sind allein durch die Gesetze des Wärmeüberganges und Stoffaustausches bestimmt.

Bei der Verdunstungskühlung vollzieht sich der Wärmeaustausch ähnlich wie beim Trocknen, nämlich durch Übergang der fühlbaren Wärme an die Luft und durch Verdunsten der Flüssigkeit an diese. Beide Wärmeanteile werden dem warmen Gut entzogen, welches sich in der Folge abkühlt.

Die Wärmebilanz lautet:

$$dQ = - G_T C_f dt = dQ_F + dQ_W \quad (16)$$

<sup>3)</sup> Fr. Merkel, Verdunstungskühlung. Forschungsheft No. 275.

worin 
$$dQ_F = \alpha_v(t - t) dV \quad (17)$$

die durch Leitung und Konvektion an die Luft übergeführte, und

$$dQ_W = dW(i_{d_t} - i_{w_t}) \quad (18)$$

die zur Verdunstung notwendige Wärme bedeutet. Setzt man nach der Verdunstungsgleichung

$$dW = k_v(x_g - x) dV \quad (19)$$

und unter Vernachlässigung der Flüssigkeits- und Überhitzungswärme

$$(i_{d_t} - i_{w_t}) = r \quad (20)$$

so lautet die Wärmebilanz:

$$dQ = -G_T C_f dt = \alpha_v(t - t) dV + k_v(x_g - x) r dV \quad (21)$$

Mit Hilfe des Lewis'schen Gesetzes ergibt sich daraus:

$$-G_T \cdot C_f \cdot dt = k_v \{ (C_{p_g} \cdot t + r \cdot x_g) - (C_{p_g} \cdot t + r \cdot x) \} dV \quad (22)$$

Solange das Gut noch oberflächlich feucht bleibt, nimmt die Luft im Sättigungszustand die Temperatur des Gutes an. Das gilt näherungsweise auch dann noch, wenn das Ende des Kühlprozesses in der Nähe des hygroskopischen Gleichgewichtszustandes liegt. In diesem Falle darf man setzen:

$$C_{p_g} \cdot t + r \cdot x_g = i_g \quad (23)$$

Damit wird:

$$\boxed{-G_T \cdot di = -G_T \cdot C_f \cdot dt = k_v(i_g - i) dV} \quad (24)$$

Man erhält eine ganz ähnlich aufgebaute Gleichung wie für die Trocknung. Der Unterschied besteht darin, daß der Zustandsverlauf während des Trocknens verfolgt werden kann, wenigstens solange das Gut feuchten Charakter besitzt, während beim Kühlen der Endzustand unbekannt bleibt.

Um trotzdem den Zustandsverlauf der Kühlluft ermitteln zu können, hat *Merkel* in der schon genannten Arbeit den Entwurf von Kühlkurven vorgeschlagen. Ebenso befaßt sich eine neueste Arbeit von *Koch* (F. H. No. 404) mit einer solchen Darstellung.

Stehen aus Versuchen solche Kühlkurven zur Verfügung oder sind etwa Kühlluftmenge oder Kühloberfläche zum voraus gegeben, so läßt sich das Kühlproblem durch einfache Rechnung lösen.

Ohne diese Hilfsmittel gelingt die allgemeine Lösung nur bei Kenntnis der Verdunstungszahl unter Zuhilfenahme der abgeleiteten Beziehung zwischen Wärmeübergangszahl und Verdunstungsziffer.

Im Grenzfall kann beim Kühlen der Taupunkt erreicht werden. Die Guts-temperatur fällt dabei unter die Lufttemperatur. Das Erreichen der Kühlgrenze hängt von der Kühlluftmenge und vom Kühlvolumen ab.

## II. Versuche

### 1. Meßverfahren

Die Versuche haben den Zweck, die Verdunstungszahl  $k_v$  von Weizen zu bestimmen. Dabei schließt  $k_v$  sowohl die Körperdiffusion, als auch die Diffusion des Dampfes in die umgebende Luft in sich.

Um die Messungen auf ein Minimum zu beschränken, wurde versucht, Kennzahlen festzulegen. Trotz der bestehenden Ähnlichkeit der Differentialgleichungen für Wärmeleitung und Diffusion, können aber im vorliegenden Fall deshalb keine Kennzahlen abgeleitet werden, weil noch Körperdiffusion auftritt. Diese ist abhängig von Materialeigenschaften, welche sich im Verlaufe der Trocknung verändern.

Durch Tastversuche, welche gleichzeitig Versuchsapparatur und Meßverfahren unter Probe stellten sollten, wurden die beeinflussenden Größen zu ermitteln versucht.

Es zeigte sich, daß Temperatur, Feuchtigkeit und Strömungsgeschwindigkeit des Trockenmediums auf die Verdunstungszahl Einfluß haben. Die ersten zwei Zustandsgrößen lassen sich zum Sättigungsdefizit zusammenfassen. Von den Gutseigenschaften sind augenblicklicher Feuchtigkeitsgehalt, Anfangsfeuchtigkeit und Weizenart von Bedeutung. Der erhebliche Einfluß der Weizenart dürfte durch seinen molekularen Aufbau bedingt sein.

Durch die den Stärkekörnern zwischengelagerten Eiweißklebermoleküle tritt infolge Wasseraufnahme oder -Abgabe ein Quellen, beziehungsweise Schrumpfen des Gutes ein. Damit stimmt die Beobachtung überein, daß hochqualifizierter, kleberreicher Weizen leichter quillt, beziehungsweise Wasser abgibt, als schwacher Weizen. Ferner macht sich die Dicke und Zähigkeit der Schale bemerkbar.

In sehr starkem Maße ist die Verdunstungszahl von der Weizenfeuchtigkeit selbst abhängig. Dies ist verständlich, indem sich durch den Trockenvorgang die Kapillaren verengen und damit auch die Diffusionsarbeit steigern. In der Praxis ist es längst bekannt, daß die Resttrocknung schwieriger ist, als die Trocknung stark feuchter Güter.

Als etwas Eigenartiges erscheint die Abhängigkeit der Verdunstungszahl von der Ausgangsfeuchtigkeit. Die Versuche zeigen jedoch deutlich, daß  $k_v$  für eine bestimmte Feuchtigkeit, z. B. 15 %, verschiedene Werte annimmt, je nachdem, ob 15 % die Anfangsfeuchtigkeit oder eine Zwischenfeuchtigkeit darstellt, und zwar sind die zur Anfangsfeuchtigkeit gehörenden Werte größer. Versuche mit wieder befeuchtetem Weizen zeigen dasselbe Ergebnis. So wurde von 15 % auf 8 % heruntergetrockneter Weizen wieder künstlich auf 15 % genetzt, eine zeitlang stehen gelassen, und von neuem getrocknet. Es ergab sich eine mit der ersten Trocknung vollkommen iden-

tisch verlaufende Entfeuchtungskurve. Trocknet man hingegen Weizen von 15 % auf 12 %, läßt ihn bei 12 % längere Zeit stehen und setzt die Trocknung später von 12 % weg wieder fort, so schließt sich die Fortsetzung sprunghaft an die begonnene Kurve an. Es ergibt sich also in diesem Falle für 12 % nur ein einziger  $k_v$ -Wert. (Vergl. Abb. 24.) Dieses sonderbare Verhalten kann nur dadurch erklärt werden, daß ein bestimmter Feuchtigkeitsanteil seinen Sitz in der Schale oder im Keimling hat. Diese beiden Teile sind für Wasser viel durchlässiger, als der innere Mehlkern. Der Keimling läßt das Wasser 6-mal, die Schale 3,5-mal rascher eindringen, als der Mehlkern. Am Anfang der Trocknung können daher diese Teile zunächst verhältnismäßig leicht Wasser abgeben. Es zeigt sich, daß trotz langen Abstehtzeiten in der Schale und im Keim mehr Wasser enthalten ist, als im Endosperm<sup>4)</sup>. Färbversuche<sup>5)</sup> über das Eindringen von Flüssigkeit weisen nach, daß dieselbe ziemlich leicht durch Schale und Keimling dringt, sich aber unter der Schale staut und nur langsam den Weg ins Innere findet. Es kommt schließlich zu einem hygroskopischen Gleichgewicht zwischen Schale und Umgebung einerseits und zwischen Schale und Mehlkern andererseits.

Weitere Versuche über elektrische Feuchtigkeitsmessung an Körnerfrüchten<sup>6)</sup> zeigen ebenfalls, daß das Eindringen von Flüssigkeit bis zu 48 Stunden benötigt.

Den Versuchen wurde die Verdunstungsgleichung zu Grunde gelegt:

$$\boxed{\frac{dW}{dZ} = kF(x_g - x)} \quad (25)$$

daraus folgt:

$$k = \frac{dW}{dZ} \cdot \frac{1}{F(x_g - x)}$$

An Stelle der unbestimmbaren Oberfläche wird das reine Kornvolumen  $V$  eingeführt. Dieses bestimmt sich aus dem spezifischen Schüttgewicht  $s$  und dem spez. Gewicht  $\gamma$  durch Bildung des Stappelfaktors  $R = \frac{s}{\gamma}$

Das reine Kornvolumen  $V$  ergibt sich aus dem Schüttvolumen  $V_0$  gemäß:

$$V = V_0 \cdot R$$

Man erhält somit:

$$\boxed{k_v = \frac{dW}{dZ} \cdot \frac{1}{V(x_g - x)}} \quad (26)$$

<sup>4)</sup> Hoffmann-Mohs, Das Getreidekorn I, 1931.

<sup>5)</sup> A. v. Ugrimoff, Mühle 1933, Heft 24 und 25.

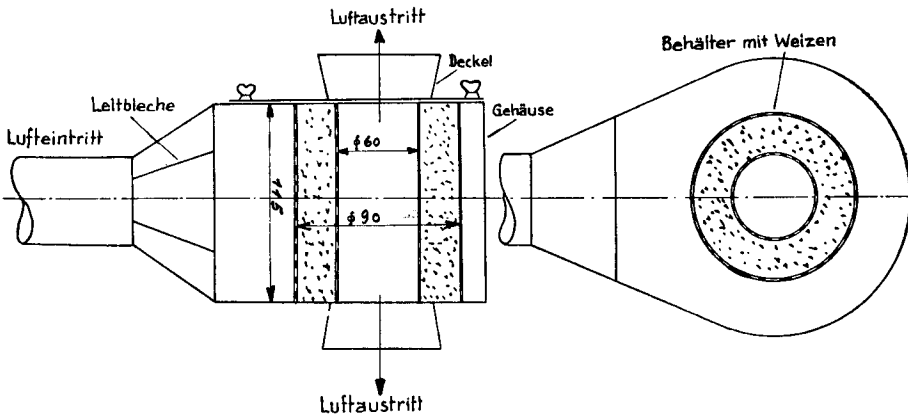
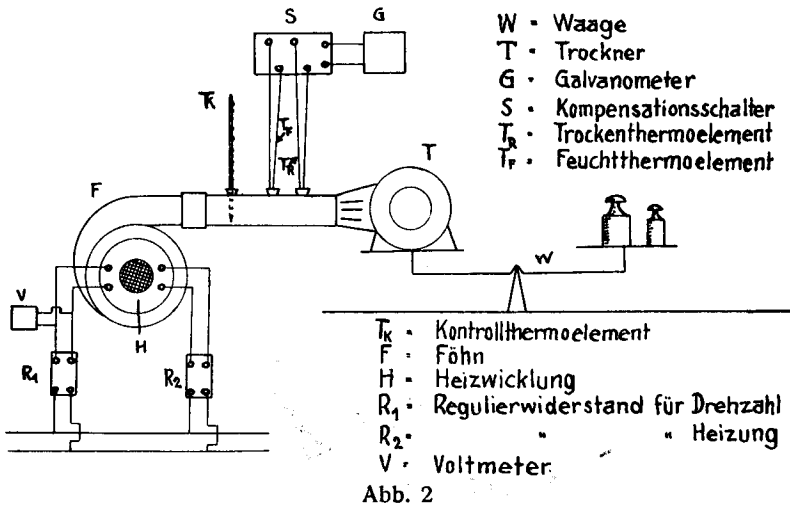
<sup>6)</sup> E. T. H. (Institut für Schwachstromtechnik) noch unveröffentlichte Versuche über elektrische Feuchtigkeitsmessung.



Die Messung besteht nun darin, das pro Zeiteinheit verdunstete Wasser zu messen unter Variation des Luftzustandes, der Luftgeschwindigkeit, der Weizenfeuchtigkeit und der Weizenart.

## 2. Versuchseinrichtung (Abb. 2 und 3)

Als Trockner diente ein aus Drahtgewebe bestehender Kreisringzylinder. Dieser war zwecks Luftführung von einem dünnen Aluminiumgehäuse umgeben. Die Luftbewegung wurde durch Leitbleche ausgeglichen. Der mit Trockengut (Getreide) gefüllte Drahtbehälter konnte durch einen abnehmbaren Deckel in das Gehäuse eingeschoben werden. Am Gehäuse war ein zylindrisches Luftzuführungsrohr eingeschweißt. Dieses besaß Öffnungen für die Thermometer. In das Lufteinführungsrohr konnte ein elektrisch geheizter



kleiner Ventilator (Föhn) gesteckt werden, welcher die heiße Trockenluft lieferte. Der Luftaustritt erfolgte durch je einen diffusorartigen Stutzen am Deckel und am Gehäuse. Trockner  $T$  und Föhn  $F$  bildeten so ein Ganzes von ca. 1 kg Gewicht, welches dadurch ein bequemes und fehlerfreies Abwägen gestattete, daß das komplette Aggregat auf die Meßwaage gestellt und austariert werden konnte. Als Waage diente eine Busch 1 kg-Absackwaage mit einem max. Ausschlag von  $\pm 30$  gr. Luftmenge und Lufttemperatur konnten mit je einem Rheostaten reguliert werden. Die Verbindungen mit dem Föhn bestanden aus ganz dünnem Kupferdraht. Eine Nachkontrolle ergab keine Beeinflussung der Wägung. Durch Spannungsschwankungen im elektrischen Netz entstanden Unregelmäßigkeiten in der Luftmenge und damit auch solche in der Lufttemperatur. Durch Voltmeter und am Gehäuse fest eingebaute Thermometer wurden beide Größen überwacht und an den Widerständen  $R_1$  und  $R_2$  von Hand ausreguliert. Zur Messung der Luftfeuchtigkeit wurde ein aus  $\frac{2}{100}$  mm starken Drähten angefertigtes Cu-Co-thermoelekt. Psychrometer benützt. Die Luftmenge wurde an den beiden Austrittsstutzen mittelst Anemometer gemessen.

### 3. Meßgenauigkeit und Eichung

Die Waage wurde vor jedem Versuch mit dem gefüllten Trockner zusammen austariert. In ihrem ganzen Bereich wurde sie von Zeit zu Zeit durch Auflegen kleiner Gewichte geeicht. Ihre Empfindlichkeit betrug ca. ein halbes

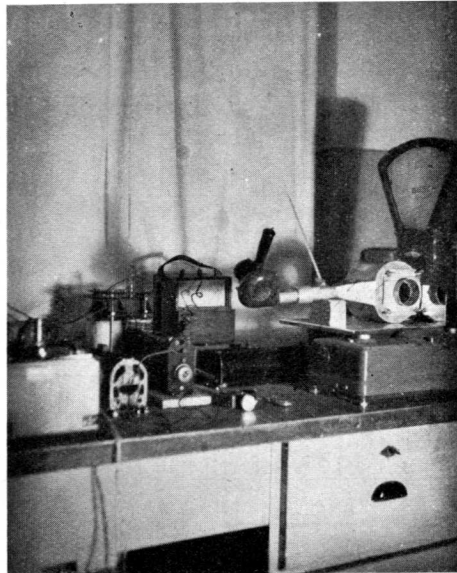


Abb. 4

Gramm. Die Ablesegenauigkeit erstreckt sich auf  $\frac{1}{10}$  gr. Sämtliche Thermometer und Thermoelemente wurden geeicht. Sie waren auf  $\frac{1}{10}^0$  genau ablesbar. Die Luftmengenmessung geschah mittelst Anemometer an den beiden Austrittsstutzen und zwar je während einer Minute zu verschiedenen Malen innerhalb der Versuchsdauer. Die Anemometer wurden durch das Aerodynamische Institut der E. T. H. im Durchfluß und im freien Luftstrom geeicht. Die Meßgenauigkeit betrug, bezogen auf die Luftmenge, ca. 1 %. Um zu verhindern, daß die Luft infolge Schrumpfens der Weizenkörner während der Trocknung frei durchströmen konnte, wurde der Trockner liegend auf die Waage montiert. Die Schrumpfung war übrigens so gering, daß keine dadurch bedingte Änderung der Luftmenge feststellbar war. Durch Verstellen der Leitbleche konnte an beiden Austrittsstutzen die gleiche Luftmenge eingestellt werden. Die ca. 1,5 cm dicke Weizenschicht sorgte im übrigen für eine ziemlich gleichmäßige Luftverteilung. Zu beachten war ferner noch, daß durch das Anbringen der Anemometer an den Austrittsstutzen eine geringe Stauung eintrat. Diese erwies sich aber als vernachlässigbar.

#### 4. Versuchsauswertung

Anhand des Versuchsprotokolles kann zunächst die Entfeuchtungskurve  $\Delta W = f(Z)$  aufgezeichnet werden. Daraus läßt sich der Feuchtigkeitsverlauf als Funktion der Zeit ableiten. (Vergl. Abb. 7.)

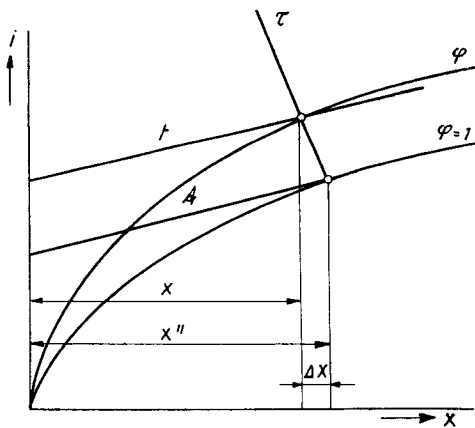


Abb. 5

Es sei:

$G_0$  das Ausgangsgewicht }  
 $f_0$  des Ausgangsfeuchtigkeitsgehalt } zur Zeit  $Z = 0$

und:

$G = G_0 - \Delta W$  das Gewicht }  
 $f = f_0 - \Delta f$  der Feuchtigkeitsgehalt } zur Zeit  $Z$

so läßt sich das Gewicht der Trockensubstanz ausdrücken durch:

$$\underline{G_T = G_0(1 - f_0) = G(1 - f)} \quad (27)$$

Gemäß Verdunstungsgleichung (26) soll das Verhältnis  $\frac{dW}{dZ}$  ermittelt werden. Dies kann durch Konstruktion der Tangenten an die Entfeuchtungskurve  $W$  leicht geschehen. Aus der Feuchtigkeitskurve  $f$  findet man entsprechend die dazugehörige Feuchtigkeit  $f_z$ . (Siehe Abb. 7.)

Zur Bestimmung der Verdunstungszahl  $k_v$  gehört weiter die Kenntnis Sättigungsdefizites  $\Delta x$ . Ihre Ermittlung folgt aus der Messung der Trockentemperatur  $t$  und der Feuchttemperatur  $t$  entweder durch Rechnung oder gemäß Abb. 5 anhand des  $i-x$ -Diagrammes.

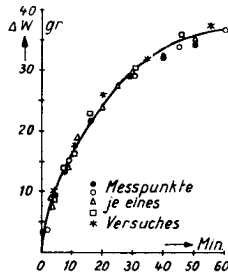


Abb. 6  
Wiederholung der Verdunstungsversuche zum Beweis der Reproduzierbarkeit der Versuche.

Die Verdunstungszahl läßt sich gemäß Gleichung (26) schreiben:

$$k_v = \frac{\frac{dW}{dZ}}{R \cdot V_0 \cdot \Delta x} \quad (28)$$

und mit Hilfe der Kurven nach Abb. 7 in Abhängigkeit von  $f$  darstellen. (Vergl. Abb. 6 bis 9.) Dabei bedeutet:

$R$  = Stappelfaktor

$V_0$  = Inhalt des Versuchstrochners.

## 5. Vorversuche

Die Vorversuche galten dem Zweck, die Apparatur zu prüfen, die Meßgenauigkeit zu untersuchen und die Versuchsabhängigen zu trennen.

Die ersten Messungen zeigten untereinander große Streuungen. Als erste Unzulänglichkeit wurde die Trägheit der verwendeten Waage festgestellt. In der Folge wurde diese durch eine Busch-Präzisionswaage ersetzt. Die Streuungen waren kleiner geworden. Als weitere Fehlerquelle ergab sich die stark schwankende Netzspannung, wodurch die Luftmenge und die Lufttemperatur empfindlich beeinflußt wurden. Die veränderlichen Raumtemperaturen erwiesen sich ebenfalls als nachteilig. Schließlich wird noch eine Abhängigkeit von der Stappellung der Körner beobachtet. Die Behebung dieses

Einflusses gelang dadurch, daß vor jedem Trockenversuch der gefüllte Behälter bei hoher Frequenz und kleinem Hub geschüttelt wurde.

Nachdem alle diese Fehlerquellen überwunden waren, erhielt man gut reproduzierbare Versuchsergebnisse. So wurde z. B. fünfmal der gleiche Versuch wiederholt. Das erzielte Ergebnis ist auf Abb. 6 wiedergegeben. Damit war Apparatur und Meßverfahren in Ordnung.

a) *Einfluß der Lufttemperatur.*

Die Trockenlufttemperatur hat keinen direkten Einfluß auf die Trocknung. Maßgebend ist vielmehr die Dampfdruckdifferenz ( $P - \beta$ ) oder das Sättigungsdefizit ( $x'' - x$ ). Bei ungesättigter Luft bildet die Temperatur allerdings ein Maß. Die Temperaturmessung ist lediglich zur Bestimmung der Feuchtigkeit aus der Psychrometerdifferenz nötig.

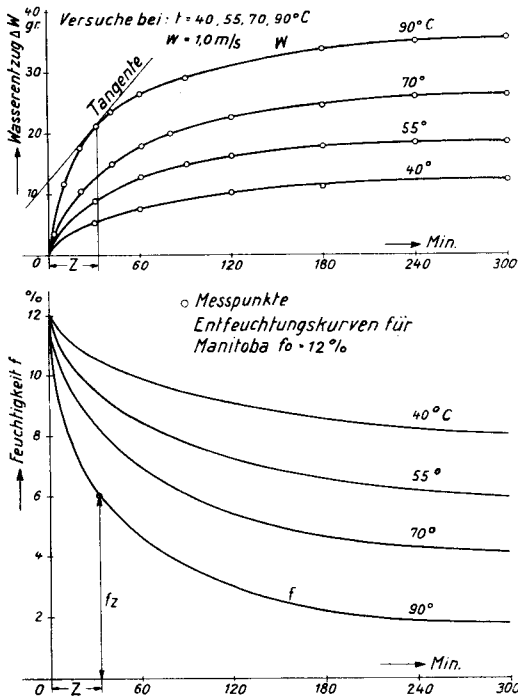


Abb. 7

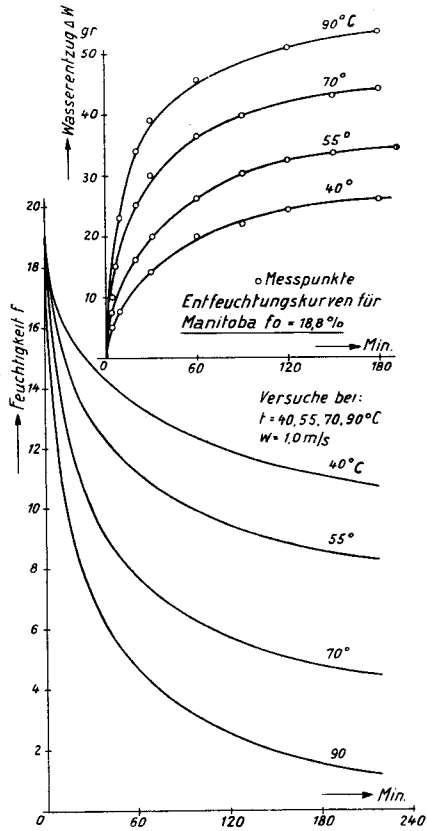


Abb. 8

Die Versuchstemperaturen wurden zu 40, 55, 70 und 90° gewählt. Sie entsprechen den beim Getreidetrocknen angewendeten Temperaturen. Die Versuchsergebnisse sind auf den Abb. 7 und 8 ersichtlich. Man beobachtet,

daß die Entfeuchtung einem Grenzwert zustrebt. Jeder Temperatur oder besser gesagt jedem Sättigungsdefizit entspricht eine bestimmte Restfeuchtigkeit des Trockengutes. Diese Feststellung wurde schon bei anderen Trockenversuchen gemacht<sup>7)</sup>.

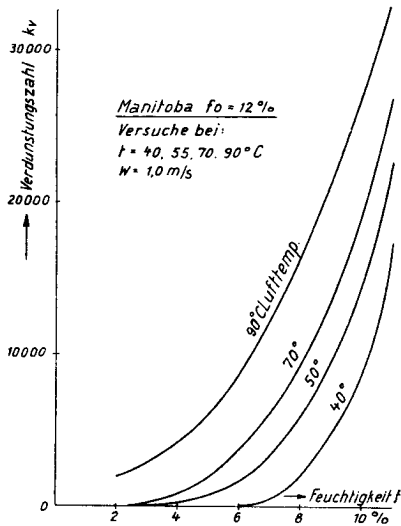


Abb. 9. Verdunstungszahl in Abhängigkeit der Weizenfeuchtigkeit.

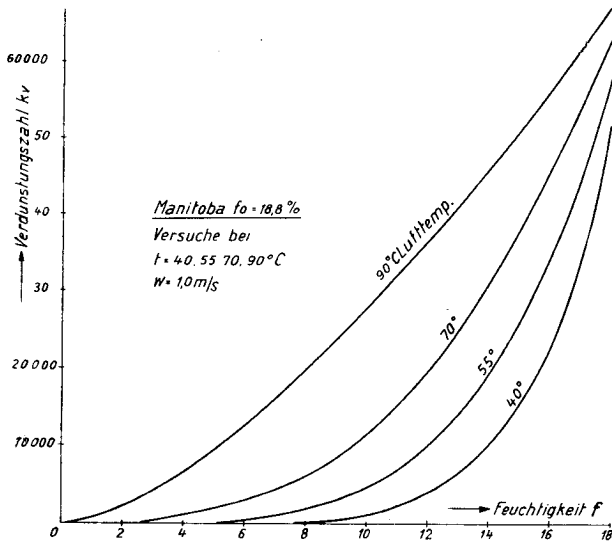


Abb. 10. Verdunstungszahl in Abhängigkeit der Weizenfeuchtigkeit.

<sup>7)</sup> Fabrizius, Berechnung der Trockendauer. Diss. T. H. München 1933.

Die aus den Entfeuchtungskurven ermittelten Verdunstungszahlen sind in Abhängigkeit der Temperatur und der Gutsfeuchtigkeit auf den Abb. 9 und 10 dargestellt. Es entstehen hyperbelähnliche Kurven. Bei der Umzeichnung auf logarithmischen Maßstab fiel zunächst eine erhebliche Streuung auf. Die Ursache wurde darin gefunden, daß näherungsweise  $(x_g - x) = (x'' - x)$  gesetzt worden war, d. h. daß an Stelle der wirklich vorhandenen

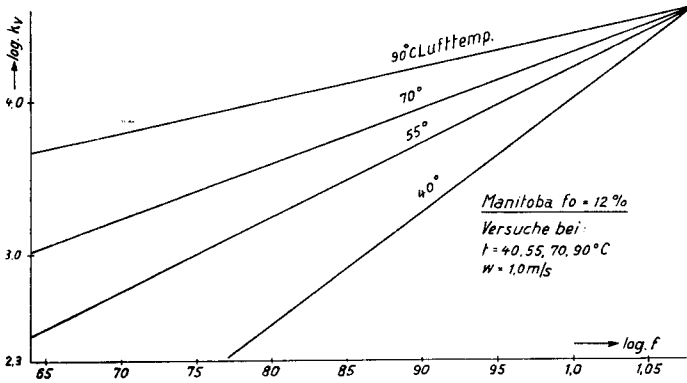


Abb. 11. Verdunstungszahl in Abhängigkeit der Weizenfeuchtigkeit und der Lufttemperatur in logarithm. Darstellung.

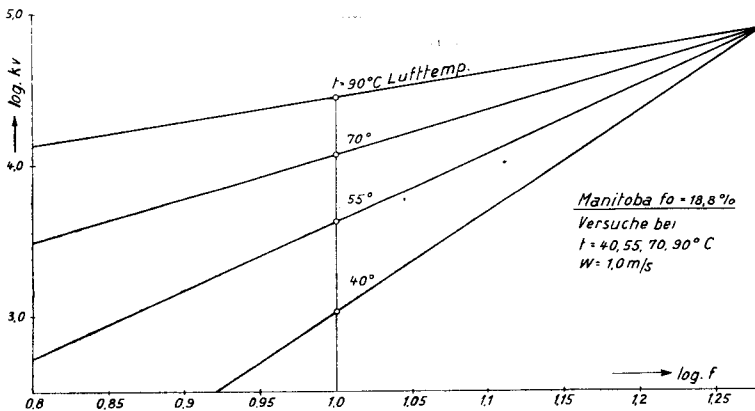


Abb. 12. Verdunstungszahl in Abhängigkeit der Weizenfeuchtigkeit und der Lufttemperatur in logarithm. Darstellung.

Feuchtigkeitsdifferenz zwischen der Luft in der Grenzschichte um die Körner und der eintretenden Trockenluft das Sättigungsdefizit eingesetzt wurde. Verwendet man hingegen die über dem Gut vorhandene Feuchtigkeitsdifferenz  $(x_g - x)$ , so fällt die Streuung weg. (Vergl. Abb. 11 und 12.) Die Annäherung  $(x_g - x) = (x'' - x)$  ist folglich nur in unmittelbarer Nähe des hygroskopischen Gleichgewichtszustandes zulässig.

Die Abb. 13 und 14 zeigen dieselbe Darstellung, bezogen auf das Sättigungsdefizit, welche durch Umrechnung der Trockentemperaturen auf  $\Delta x$  gewonnen wurde. Die Linien konstanten Sättigungsdefizites sind nun keine Geraden mehr, sondern schwach gekrümmte Kurven. Sie lassen sich aber mit ausreichender Genauigkeit als Gerade auffassen. Dadurch wird die analytische Darstellung wesentlich erleichtert.

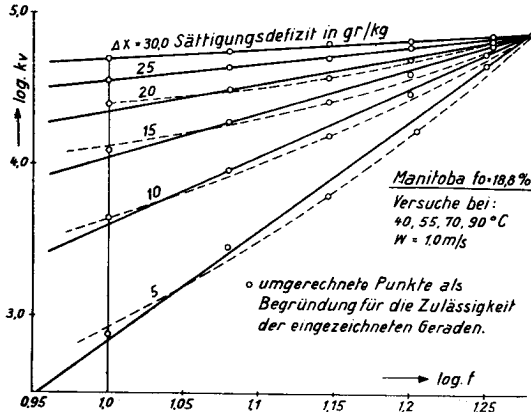


Abb. 13. Verdunstungszahl  $k_v$  in Funktion der Feuchtigkeit  $f$  und des Sättigungsdefizites  $\Delta x$  in logarithm. Darstellung. Trockenlufttemperatur umgerechnet auf das Sättigungsdefizit.

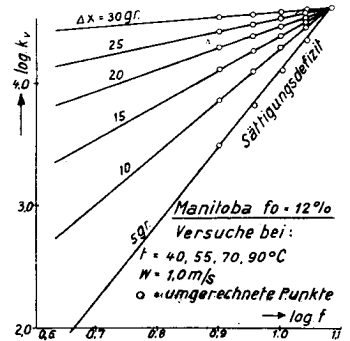


Abb. 14. Verdunstungszahl in Abhängigkeit der Weizenfeuchtigkeit und des Sättigungsdefizites in logarithm. Darstellung. Trockenlufttemperatur umgerechnet auf das Sättigungsdefizit.

Die Geraden laufen in einem gemeinsamen Schnittpunkt zusammen, welcher durch die Anfangsfeuchtigkeit charakterisiert ist. Dies geht daraus hervor, daß die Verdunstungszahl zu Beginn der Trocknung, wo Gutstemperatur und Raumlufttemperatur zusammenfallen, der Anfangsfeuchtigkeit entsprechen muß. Das Ergebnis wird dadurch noch allgemeiner, als der Dampfdruck über der Gutsoberfläche nur von der Feuchtigkeit und nicht von der Temperatur abhängig ist. Auf diese Tatsache haben schon Hoffmann und Hirsch<sup>8)</sup> in ihrer Behandlung hygroskopischer Trockengüter hingewiesen.

Als hygroskopisch wird ein Gut bezeichnet, wenn  $\frac{\beta}{P''} < 1$  ist.

$\beta$  bedeutet den Dampfdruck über dem Gut bei der Temperatur  $t$ ,  $P''$  den entsprechenden Sättigungsdruck.

Beim Trocknen hygroskopischer Güter entspricht jedem Zustand der Trockenluft eindeutig ein bestimmter Zustand des Trockengutes. Hoffmann hat gestützt auf Versuche ein  $\frac{\beta}{P''}$  —  $\tau$ -Diagramm entworfen. Für Weizen be-

<sup>8)</sup> Hoffmann, Die Getreidespeicher. — Hirsch, Trockentechnik.



steht dieses Diagramm in einer durch den Ursprung gehenden Geraden mit der Gleichung<sup>9)</sup>:

$$\frac{\mathfrak{P}}{P''} = 5 \varkappa$$

Für  $\varkappa = 0,2$  wird demnach  $\frac{\mathfrak{P}}{P''} = 1$

Verläuft der Trockenprozeß langsam genug und ist zudem turbulente Luftbewegung vorhanden, sodaß sich in jedem Augenblick zwischen dem Zustand der Luft und demjenigen des Gutes Gleichgewicht einstellen kann, so ist der Dampfdruck  $\mathfrak{P}$  über dem Gut gleich dem Dampfdruck  $P$  der umgebenden Trockenluft. Es gilt in diesem Falle:

$$\frac{\mathfrak{P}}{P''} = \frac{P}{P''} = \varphi$$

Die Linien konstanter relativer Luftfeuchtigkeit  $\varphi$  stellen also gleichzeitig Linien gleicher Gutsfeuchtigkeit  $\varkappa$  dar. Die ihnen zugeordneten  $\varkappa$ -Werte sind von den Eigenschaften des Trockengutes abhängig.

Der Luftzustand selber ändert sich im hygroskopischen Gebiet angenähert längs der  $\tau$ -Linie. Genau genommen liegt er zwischen der  $\tau$ - und der  $i$ -Linie. Diese beiden weichen aber nur unbedeutend voneinander ab.

Die Gutstemperatur  $t$  kann im  $i-x$ -Diagramm mit genügender Genauigkeit als Schnittpunkt der  $\varphi$ -Linie mit der zum Luftzustand gehörenden  $\tau$ -Linie gefunden werden. Der Betrag von  $\varphi$  folgt aus dem Feuchtigkeitsgehalt  $f$  oder  $\varkappa$  des Gutes.

Für einen hygroskopischen Weizen von  $f = 14\%$  wird  $\varkappa = 0,163$  und damit:

$$\varphi = \frac{\mathfrak{P}}{P''} = \frac{\varkappa}{0,2} = \frac{0,163}{0,2} = \underline{0,815}$$

Steht zum Trocknen des Weizens Heißluft zur Verfügung von  $t = 90^{\circ}\text{C}$ ,  $x = 0,05\text{ kg/kg}$ ,  $\varphi = 10\%$ , so ergibt sich eine Taupunkttemperatur von  $\tau = 46^{\circ}\text{C}$ . Der Weizen erwärmt sich dabei entsprechend seinem hygroskopischen Zustand auf  $t = 50^{\circ}\text{C}$ . Feuchter Weizen würde sich demgegenüber auf die Temperatur  $t_f = \tau = 46^{\circ}\text{C}$  erwärmen.

Weitere Versuche über die Verdunstungszahl zeigen die bedeutende Abhängigkeit von  $k_v$  mit der Weizenfeuchtigkeit selbst und zwar namentlich bei kleinem Sättigungsdefizit. Mit wachsendem  $\Delta x$  nimmt dieser Einfluß ab. Je grösser nämlich  $\Delta x$  wird, um so gewichtiger ist die Wirkung der Dampf-

<sup>9)</sup> Darüber wurden keine eigenen Versuche angestellt. Es ist deshalb insofern ein Vorbehalt berechtigt, als diese einfache Beziehung nicht unbedingt für alle Weizensorten in gleicher Weise gültig zu sein braucht. Immerhin ist es für die hier angestellten Untersuchungen ausreichend erwiesen.

druckdifferenz, also der Trockenkraft, gegenüber den diffusionshemmenden Kapillarkräften. (Vergl. Abb. 15 und 16.)

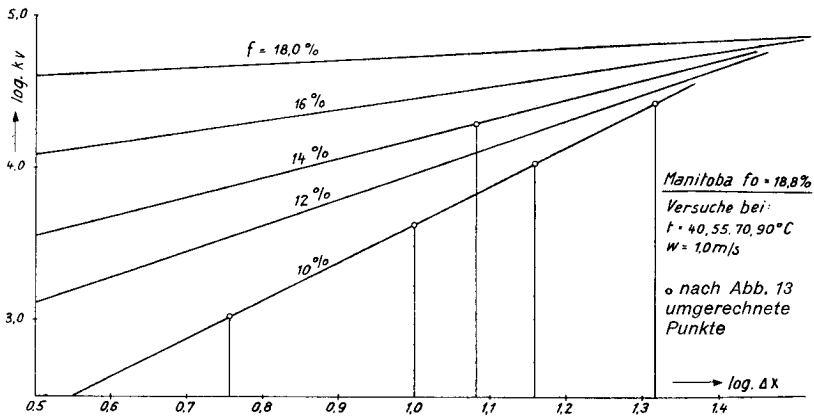


Abb. 15. Verdunstungszahl in Funktion des Sättigungsdefizites und der Weizenfeuchtigkeit in logarithm. Darstellung. Trockenlufttemperatur umgerechnet auf das Sättigungsdefizit.

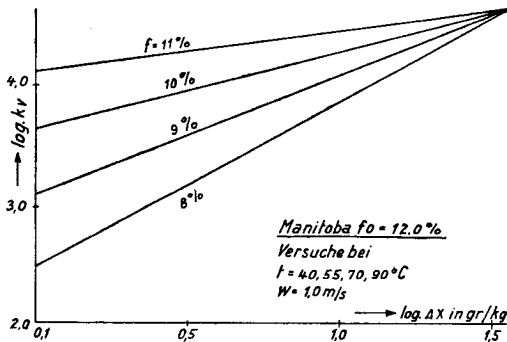


Abb. 16.

Verdunstungszahl in Abhängigkeit vom Sättigungsdefizit und der Weizenfeuchtigkeit in log. Darstellung. Trockenlufttemperatur umgerechnet auf das Sättigungsdefizit.

b) Einfluß der Anfangsfeuchtigkeit.

Wie schon erwähnt, hat die Anfangsfeuchtigkeit des Weizens selbst einen bedeutenden Einfluß auf die Verdunstungszahl. Der Grund liegt in der Beschaffenheit der Weizenkörner, insbesondere in der Porösität und Zähigkeit der Schale. Es galt diese Eigenschaft zahlenmäßig zu erfassen.

Abb. 17 zeigt zunächst den Verdunstungs- und Entfeuchtungsverlauf für verschiedene Werte der Anfangsfeuchtigkeit  $f_0$ . Anschließend ist auf Abb. 18 die Verdunstungszahl selbst dargestellt. Für eine bestimmte Weizenfeuchtigkeit  $f$  wächst der  $k_v$ -Wert mit kleiner werdender Anfangsfeuchtigkeit. Dies rührt daher, daß ein entsprechend größerer Anteil der Feuchtigkeit in der äußeren Schale der Körner sitzt und deshalb leichter entzogen werden kann, als das im Innern des Mehlkernes verteilte Quellwasser.

Die verdunstete Flüssigkeitsmenge ist folglich, hauptsächlich aber bei stark feuchtem Weizen, am Anfang der Trocknung sehr groß und sinkt dann rasch ab. Gemäß Abb. 18 erhält man z. B. für  $f = 13\%$  bei einer Anfangsfeuchtigkeit von  $f_0 = 15,1\%$  eine Verdunstungszahl  $k_v = 32\ 000$ . Beginnt die Trocknung hingegen schon bei  $18,5\%$ , so beträgt die Verdunstungszahl bei der gleichen Weizenfeuchtigkeit von  $13\%$  nur noch  $21\ 700$ . Dieser Unterschied verwischt sich aber mit sinkender Feuchtigkeit.

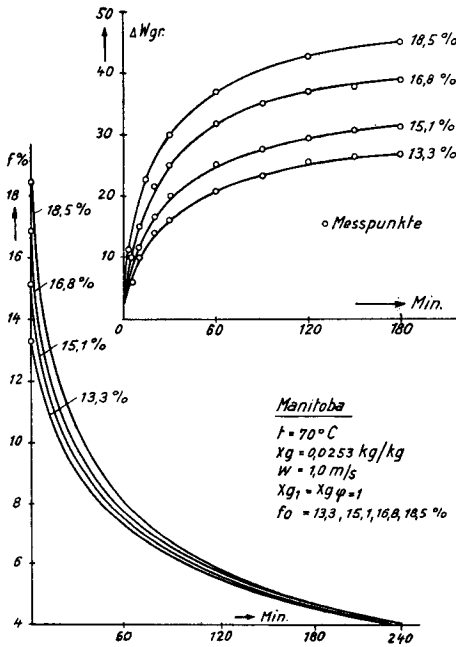


Abb. 17. Einfluß der Anfangsfeuchtigkeit auf die Entfeuchtung. Manitoba.

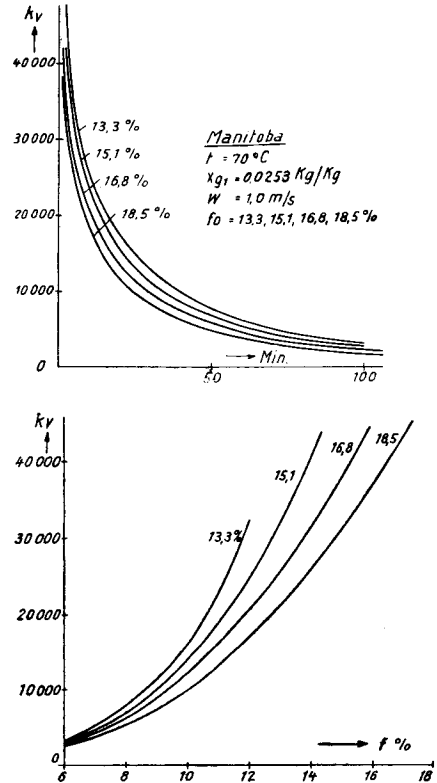


Abb. 18. Einfluß der Anfangsfeuchtigkeit auf die Verdunstungszahl  $k_v$ . Manitoba.

Zur rechnerischen Erfassung der Anfangsfeuchtigkeit wurden die Versuchsergebnisse gemäß Abb. 20 über dem Logarithmus des Sättigungsdefizites aufgetragen. Es zeigt sich, daß der Verlauf der entstehenden Kurven fast geradlinig und parallel ist. Hauptsächlich die am meisten interessierenden Kurven hoher Anfangsfeuchtigkeit weisen keine großen Abweichungen auf. Mit dieser Annäherung gestaltet sich die Rechnung besonders einfach.

Die Geraden gleichen Luftzustandes ( $\Delta x$ ) haben demnach für alle Anfangsfeuchtigkeiten dieselbe Neigung. Für jede Anfangsfeuchtigkeit erhält

man nun ein Bündel von Geraden. Die einzelnen Strahlen sind durch das Sättigungsdefizit charakterisiert. Die Bündel selbst sind unter sich parallel. Diese parallelen Bündel sind nunmehr analytisch auszudrücken.

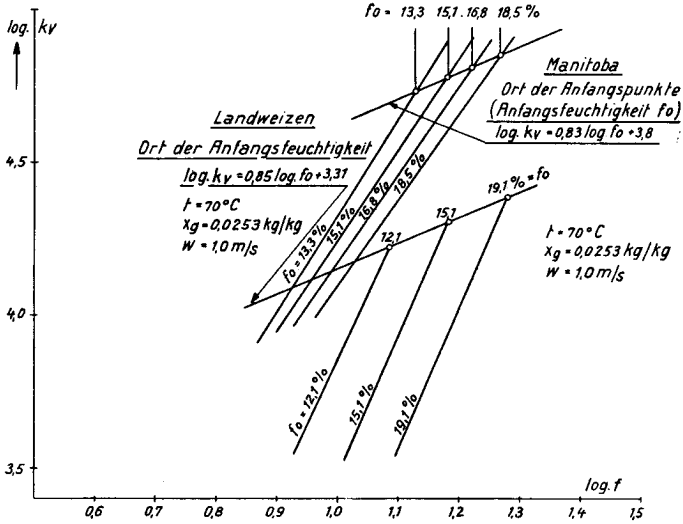


Abb. 19. Darstellung der Verdunstungszahl  $kv$  in Abhängigkeit von der Anfangsfeuchtigkeit  $f_0$  in log. Masstab. (Gerade der Anfangsfeuchtigkeit.)

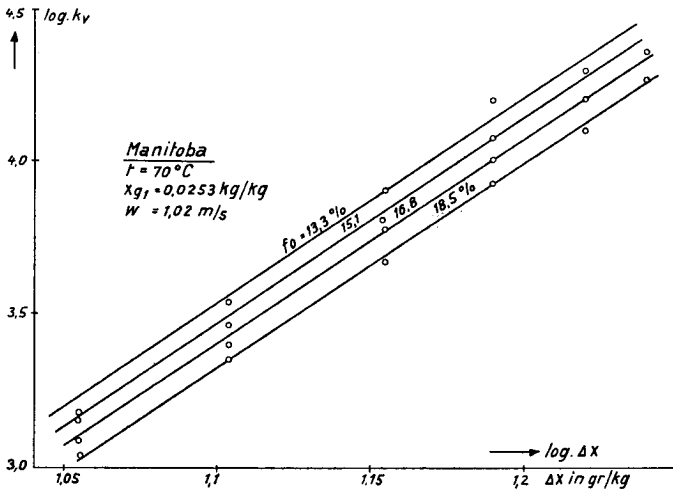


Abb. 20. Darstellung der Verdunstungszahl  $kv$  in Abhängigkeit der Anfangsfeuchtigkeit  $f_0$  und des Sättigungsdefizites  $\Delta x$  in log. Masstab. (Die eingezeichneten Punkte sind nach Abb. 19 umgerechnet und dienen zur Rechtfertigung über die Annahme der Parallelität der Geraden gleicher Anfangsfeuchtigkeit.)

Die Gleichung eines Strahlenbüschels durch einen gegebenen Punkt  $P(p_1, q_1)$  lautet:

$$\underline{q - q_1 = a(p - p_1)} \quad (29)$$

$a$  stellt einen Parameter dar. Wandert der Punkt  $P$  auf einer Geraden  $q_1 = b + c \cdot p_1$ , so lautet nun die Gleichung des parallel verschobenen Büschels:

$$\underline{q = a(p - p_1) + b + c \cdot p_1} \quad (30)$$

Angewendet auf die Darstellung der Verdunstungszahl, bedeutet (vergl. Abb. 19 und 20):

$$\begin{aligned} q &= \log k_v \\ p &= \log f \\ p_1 &= \log f_0 \\ b, c &= \text{Konstante (Aus den Versuchen zu bestimmen)} \\ a &= \text{Konstante (Abhängig vom Sättigungsdefizit)} \end{aligned} \quad (31)$$

Damit wird numeriert:

$$\boxed{k_v = A \cdot f_0^c \cdot \left(\frac{f}{f_0}\right)^a} \quad (32)$$

Die Konstanten  $a$ ,  $c$  und  $A$  werden aus den Hauptversuchen bestimmt.

### c) Einfluß der Luftgeschwindigkeit.

Die Luftgeschwindigkeit durch den Weizen wurde auf den zwischen den Körnern vorhandenen freien Querschnitt bezogen. Derselbe wurde aus dem Stappelfaktor bestimmt. Hat der Trockner einen Inhalt von  $V_0 \text{ m}^3$ , so folgt aus der Raumerfüllung  $R$  der freie Raum zu  $(1 - R) \cdot V_0$ . Der freie, vom Weizen nicht ausgefüllte Querschnitt wird nun festgesetzt als:

$$\underline{F = \sqrt[3]{(1 - R)^2 \cdot V_0^2}} \text{ m}^2 \quad (33)$$

Die Versuche wurden für die so definierten Geschwindigkeiten von:

$$w = 0,145, 0,37, 0,68, 0,78 \text{ und } 1,02 \text{ m/sek.}$$

durchgeführt. Als Weizen gelangte Manitoba von 14 % Anfangsfeuchtigkeit zur Verwendung. Die Lufttemperatur betrug  $70^\circ \text{ C}$  bei einer Feuchtigkeit von  $x = 0,007 \text{ kg/kg}$ .

Aus den Verdunstungskurven (Abb. 21) geht hervor, daß die Luftmenge keinen Einfluß hat auf die Restfeuchtigkeit. Alle Kurven mit verschiedenen Geschwindigkeiten als Parameter streben demselben Grenzwert zu. Der Einfluß der Geschwindigkeit kommt nur in der Trockendauer zum Ausdruck. Der Grenzwert wird mit großer Luftgeschwindigkeit rascher erreicht als mit kleiner. Demzufolge muß die Verdunstungsgeschwindigkeit und damit die

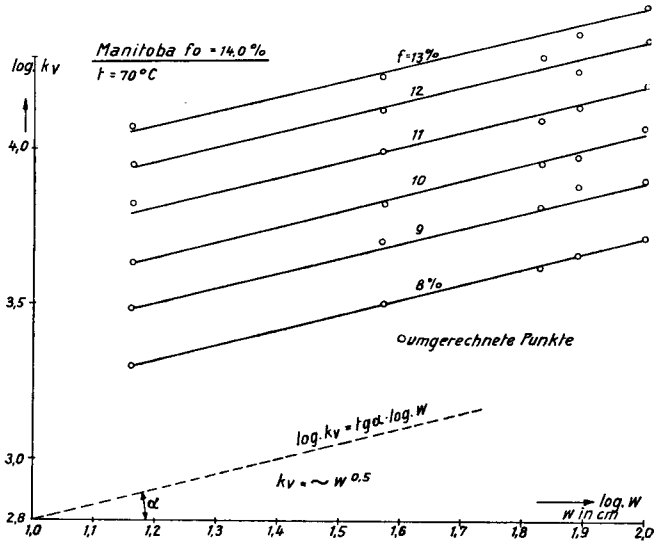


Abb. 22. Einfluß der Luftgeschwindigkeit auf die Verdunstungszahl in log. Masstab.

d) Einfluß der Weizenart.

Zur Abklärung des Einflusses der Weizenart wurden drei typische Sorten ausgewählt, nämlich:

1. Manitoba, als Typus von dünnchaligen, kleberreichen, amerikanischen Weichweizen.
2. Französischer und schweizerischer Landweizen, als Vertreter zähschaliger, mitteleuropäischer Weichweizen.
3. Spanischer Hartweizen, als Beispiel für kleberarmen, glasigen Weizen.

Damit war bezüglich der Beschaffenheit der verschiedenen Sorten eine Auswahl getroffen worden, welche weitgehend die dadurch bedingten Trockeneigenschaften berücksichtigen sollte.

Da Manitoba und Hartweizen eine Naturfeuchtigkeit von nur 11 % besitzen, wurden sie künstlich auf 15, bzw. 19 % befeuchtet. Wie die Versuche über das Wiederbefeuchten zeigten, hat dies keinen Einfluß auf die Trockencharakteristik, sofern der Weizen nach der Netzung genügend lang stehen gelassen wird. (24 bis 48 Std.)

Die auf Abb. 23 dargestellten Versuchsergebnisse zeigen, daß die untersuchten europäischen Weichweizen bezüglich Verdunstungsgeschwindigkeit gleiche Eigenschaften besitzen. Dies ist nicht verwunderlich, da die übrigen physikalischen Merkmale, wie Raumgewicht, Härte, Naturfeuchtigkeit, Schalenzähigkeit etc. ebenfalls übereinstimmende Werte aufweisen.

Erstaunlich ist hingegen das Ergebnis, daß sich der spanische Hartweizen als Typus eines kleberarmen Weizens von sehr harter Struktur ähnlich ver-

Verdunstungszahl mit wachsender Luftgeschwindigkeit zunehmen, was auch durch die Versuche bestätigt wird. (Vergl. Abb. 22.) Die Strömungsgeschwindigkeit wird also in erster Linie die Dimensionen des Trockners beeinflussen.

Abb. 21a. Einfluß der Luftgeschwindigkeit auf die Entfeuchtung.

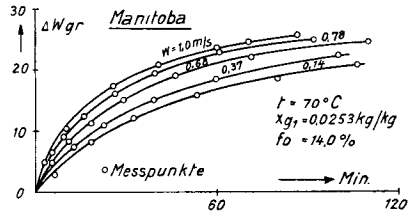
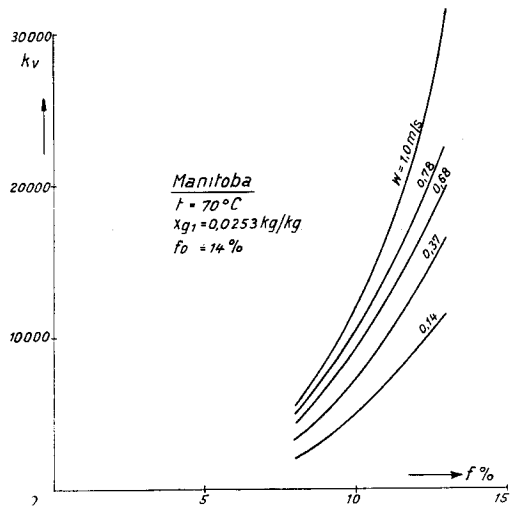


Abb. 21b. Einfluß der Luftgeschwindigkeit auf die Verdunstungszahl  $k_v$ .



Zur Erfassung der Geschwindigkeit durch die Rechnung wurde  $k_v$  gemäß Abb. 22 in logarithmischem Maßstab über  $w$  aufgetragen unter Verwendung von  $f$  als Parameter. Mit nur geringer Streuung ergab sich eine Schar paralleler Geraden. Da der Einfluß der Feuchtigkeit schon berücksichtigt wurde, ergab sich aus der Neigung der parallelen Geraden der Exponent für das Potenzgesetz der Geschwindigkeit. Danach wird:

$$k_v \text{ propr. } w^{0,5} = \text{propr. } \sqrt{w} \quad w \text{ in m/sek} \quad (34)$$

Wird dieses Ergebnis in die Gleichung (32) eingetragen, so lautet die vollständige empirische Formel für die Verdunstungszahl  $k_v$ :

$$k_v = A \cdot f_0^c \cdot \left(\frac{f}{f_0}\right)^a \cdot \sqrt{w} \quad (35)$$

hält wie Weichweizen. Offenbar kompensiert die durch seine dünnwandige Schale gegebene bessere Wasserdurchlässigkeit einen Teil des durch die Kleberarmut bedingten größeren Wasserhaltevermögens.

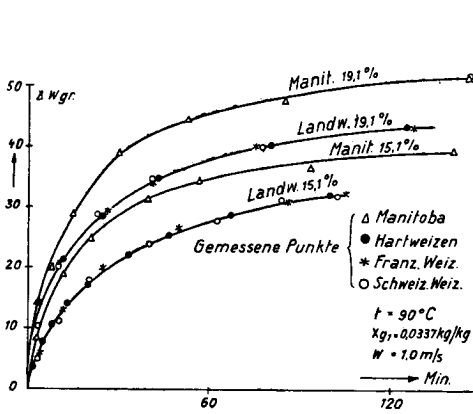


Abb. 23a. Einfluß der Weizenart auf die Entfeuchtung.

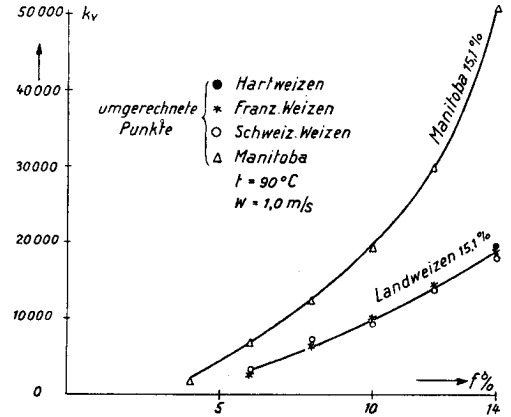


Abb. 23b. Einfluß der Weizenart auf die Verdunstungszahl.

Beim Manitoba erfolgt hingegen die Trocknung viel rascher. Demzufolge ist auch seine Verdunstungszahl entsprechend größer. Dies wird den Fachmann kaum verwundern, denn er weiß schon lange aus der Erfahrung, daß sich Manitoba sehr leicht befeuchten und trocknen läßt. Der Grund liegt hier sowohl in der außerordentlich dünnen Schale, als auch in seinem sehr hohen Klebergehalt. Letzterer quillt und schrumpft sehr leicht, wogegen die Stärkekörner, welche beim Weichweizen vermehrt vorhanden sind, gerne verkleistern.

e) Einfluß des Wiederbefeuchtens.

Um festzustellen, ob das künstliche Befeuchten, wie es sowohl in der Praxis in großem Maßstab als auch bei den vorliegenden Versuchen zur Anwendung gelangte, die Trockeneigenschaften gegenüber dem naturfeuchten Weizen verändert, wurden solche Versuche durchgeführt. Die Untersuchung wurde so gestaltet, daß der Weizen zunächst bis zur Restfeuchtigkeit getrocknet wurde. Anschließend wurde er wieder künstlich auf seine ursprüngliche Feuchtigkeit gebracht, in diesem Zustand mindestens 24 Stunden stehen gelassen und dann von neuem getrocknet. Das Ergebnis ist auf Abb. 24 a ersichtlich. Die aus je 3 Versuchen entstandenen Entfeuchtungskurven decken sich bei beiden Versuchsgruppen vollständig. Damit ist auch die in der Praxis häufig vertretene Ansicht als irrig zu bezeichnen, wonach genetzter Weizen andere Trockeneigenschaften besitze als naturfeuchter Weizen. Voraussetzung dazu ist allerdings die, daß der Weizen nach der Befeuchtung



genügend lang abgestanden hat. Irgendwelche Hysteresiserscheinungen, wie man sie bei der Trocknung von Kohle und Ligniten beobachtet hat<sup>10)</sup>, konnten hier nicht beobachtet werden. Offenbar treten beim Weizen, wenigstens bei den vorhandenen Versuchsbedingungen, keine Kapillar- oder sonstige Stoffveränderungen auf.

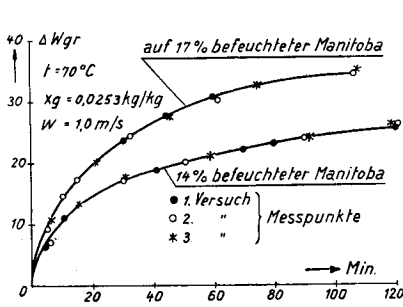


Abb. 24 a. Einfluß des Wiederbefeuchtens.

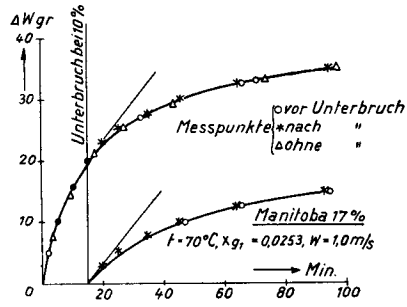


Abb. 24 b. Unterbruch der Trocknung.

### j) Einfluß eines Unterbruches der Trocknung.

Als Beweis, daß die Anfangsfeuchtigkeit zum größten Teil aus den Randpartien des Weizenkornes stammt und damit einen bemerkenswerten Einfluß auf die Verdunstungszahl ausüben kann, ist der unterbrochene Trockenversuch anzusehen.

Nachdem der Weizen während 15 Minuten von 17 auf 10 % heruntergetrocknet worden war, wurde die Trocknung für die Dauer von 15 Stunden unterbrochen. Die Fortsetzung ergab ein sprungloses Anschließen an die begonnene Entfeuchtungskurve (vergl. Abb. 24 b). Es zeigt sich also keine beschleunigte Verdunstung beim Wiederbeginn der Trocknung, wie sie sonst jeweils am Anfang beobachtet wurde. Die größere Verdunstungszahl zu Beginn der Trocknung kann folglich nur auf eine größere Feuchtigkeitsansammlung in der Schalennähe beruhen.

Der sprunglose Übergang nach dem Unterbruch zeigt übrigens, daß zwischen Mehlkern-Schale-Trockenluft ein bestimmtes Feuchtigkeitsgleichgewicht vorhanden sein muß.

## 6. Hauptversuche

Die Vorversuche hatten alle Einflüsse abzuklären, welche die Verdunstungszahl bestimmen können. Die Hauptversuche sollten nun die Unterlagen für die Berechnung der in Gleichung (35) enthaltenen Konstanten liefern.

<sup>10)</sup> P. Rosin, Braunkohle 1934, Heft 18 und 19.

Die Versuche über den Einfluß der Weizenart zeigten bereits, daß sich die Untersuchung auf Manitoba und europäischen Landweizen beschränken ließ. Die Versuche wurden für beide Weizenarten bei

$f_0 = 18,5, 16,8, 15,1$  und  $13,3\%$  für Manitoba, bzw.  
 $f_0 = 19,1, 15,1$  und  $12,1\%$  für Landweizen durchgeführt.

a) *Manitoba.*

1. Meßprotokoll.

Es wurden folgende Größen gemessen:

Tabelle 1.

No.	Bar. m/m Hg	Zeit	Luftmenge		W gr	Lufttemp.		Raum- temp. °C	Volt	$f_0$ %	Weizen- gewicht gr
			links m/min.	rechts m/min.		trocken °C	feucht °C				
30	720	10.30	44	44	0	90	32,0	21,5	280	18,7	309
		10.34			12,2						
		10.36			16,9						
		10.40	44	44	24,1	90	32,1	21,5			
		10.45			29,8						
		10.50			34,0						
		10.55	44	44	38,4	90	32,1	22,2			
		11.02			40,0						
		11.10			42,0						
		11.30			45,4	90	31,8				
		11.55	44	44	48,7						
		12.30	44	44	51,5	90	32,0	24,0			
		13.30	44	43,5	54,2	90	32,0	24,5			

Anhand des Protokolles kann die Entfeuchtung  $\Delta W$  und die Feuchtigkeit  $f$  ermittelt und in Funktion der Zeit  $Z$  aufgetragen werden (vergl. Abb. 8). Daraus folgt in Verbindung mit der Verdunstungsgleichung (26) die Bestimmung der Verdunstungszahl  $k_v$ .

$$k_v = \frac{dW}{dZ} \cdot \frac{1}{RV_0(x_g - x)}$$

worin für Manitoba  $R = 0,6$  zu setzen ist.

Die Auswertung geschieht am besten tabellarisch (Tabelle 2).

Aus dem  $i-x$ -Diagramm folgt für  $t = 90^\circ \text{C}$ ,  $\tau = 32^\circ \text{C}$  die Feuchtigkeit  $x = 0,0083$  und  $x'' = 0,0328$ .

Oberhalb des hygroskopischen Gleichgewichtszustandes ( $f_h = 17\%$ ) darf  $x_g = x''$  gesetzt werden.

Unterhalb  $f_h$  muß  $x_g$  vermittelst des  $i-x$ -Diagrammes bestimmt werden, durch Schneiden der Linie  $\tau = 32^\circ$  mit der Kurve  $\frac{P}{P''} = \varphi$ . Die Feuchtigkeit  $\varphi$

selbst ergibt sich aus der Beziehung zwischen  $\xi$  und  $\varphi$ . (Vergl. S. 25.)  
Schließlich folgt das Verhältnis  $\frac{dW}{dZ}$  aus der Entfeuchtungskurve (vergl. Abb. 8).

2. Auswertungsprotokoll.

Tabelle 2.

$f$ %	$\xi$ Kg/kg	$\frac{P}{P''} = \varphi$	$x_g$	$x$	$x_g - x$	$\frac{dW}{dZ}$	$k_v$
18	0,22	1,0	0,0328	0,0083	0,0245	7,2	68000
17	0,205	1,0	0,0328		0,0245	6,4	61000
16	0,19	0,95	0,0324		0,0241	4,9	48000
15	0,177	0,89	0,0318		0,0235	4,0	38000
14	0,163	0,82	0,0314		0,0231	3,0	28500
12	0,136	0,68	0,0304		0,0221	2,6	24500
10	0,111	0,56	0,0390		0,0207	2,1	19800
8	0,087	0,44	0,0276		0,0193	1,15	10800
6	0,064	0,32	0,0255		0,0172	0,50	4650
4	0,042	0,21	0,0225		0,0142	0,26	2500
2	0,020	0,11	0,0175		0,0092	0,11	980

Die übrigen Versuche für  $t = 70, 55, 40^\circ\text{C}$  werden in analoger Weise ausgewertet.

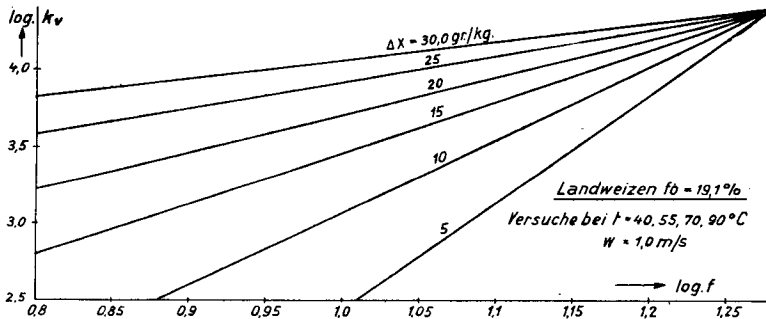


Abb. 25. Verdunstungszahl  $k_v$  in Funktion der Feuchtigkeit  $f$  und des Sättigungsdefizites  $\Delta x$  in log. Darstellung. Trockenlufttemperatur umgerechnet auf das Sättigungsdefizit.

$k_v$  wird nun zunächst über der Gutsfeuchtigkeit  $f$  mit der Lufttemperatur  $t$  als Parameter aufgetragen (vergl. Abb. 10). Dann folgt die Umzeichnung in logarith. Maßstab (vergl. Abb. 12). Jedem Punkt dieser Geradenschar ist eine bestimmte, aus Lufttemperatur und Weizenfeuchtigkeit, gemäß Tabelle 3 berechenbare Feuchtigkeitsdifferenz  $\Delta x = (x_g - x)$  zugeordnet.  $k_v$  kann also auch in Funktion  $f$  mit  $\Delta x$  als Parameter dargestellt werden (vergl. Abb. 13). Zum Ausgleich der Geraden ist ein weiteres Diagramm mit  $k_v$  als Abhängige von  $\Delta x$  mit  $f$  als Parameter nützlich (vergl. Abb. 15).

Aus Abb. 13 bestimmt sich der Neigungswinkel der  $k_v$ -Geraden in Abhängigkeit von  $\Delta x$ . Für die Rechnung darf mit guter Annäherung  $\Delta x = (x_g - x) = g(x'' - x)$  gesetzt werden. Für die Temperaturen zwischen  $70^0$  und  $100^0$  C ist  $g$  nunmehr allein von der Feuchtigkeit  $f$  abhängig. Dergleichen läßt sich  $\varphi$  in diesen Grenzen ebenfalls als Funktion von  $f$  auftragen (vergl. Tabelle 3).

Tabelle 3.

$f$ %	$g = \frac{x_g - x}{x'' - x}$	$\varphi$
18	1,0	1,0
17	1,0	1,0
16	0,986	0,95
15	0,96	0,89
14	0,944	0,82
12	0,91	0,68
10	0,863	0,56
8	0,75	0,44
6	0,70	0,32

Nun läßt sich die Konstante  $a$  aus den Werten von  $\Delta x$  ausrechnen und als Kurve auftragen (vergl. Tabelle 4 und Abb. 26).

Tabelle 4.

$\Delta x$ gr/kg	$a(\Delta x)$
5,0	7,25
10,0	4,5
15,0	3,0
20,0	1,75
25,0	1,05
30,0	0,70

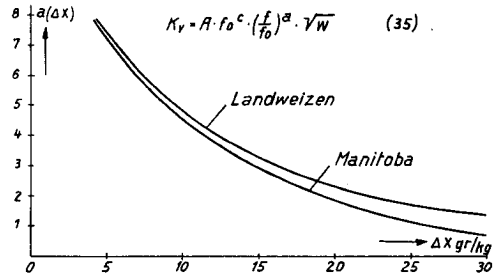


Abb. 26 Exponent  $a$  der Gleichung (35) abhängig vom Sättigungsdefizites  $\Delta x$ .

Die weiteren Konstanten  $A$  und  $c$  bestimmen sich durch Aufzeichnen der Verbindungslinie aller Anfangsfeuchtigkeiten, welche als Gerade aufgefaßt werden darf. Diese Gerade folgt aus dem Zusammenhang, daß die aus den einzelnen Versuchsserien im logarithmischen Maßstab erhaltenen Büschel der  $k_v$ -Kurven näherungsweise geradlinig und zueinander parallel verlaufen (vergl. Abb. 19).

Für Manitoba findet man:

$$\log A = 3,8; \quad A = 6310$$

$$c = 0,83$$

Damit erhält Gleichung (35) Abschnitt 5c folgende empirische Form:

$$k_v = 6310 \cdot f_0^{0,83} \cdot \left(\frac{f}{f_0}\right)^a \cdot \sqrt{w} \quad (36)$$

Darin bedeutet:

$f$  = Weizenfeuchtigkeit in %

$f_0$  = Anfangsfeuchtigkeit in %

$a = a(\Delta x)$  = Konstante abhängig der Differenz der Luftfeuchtigkeit

$w$  = Luftgeschwindigkeit bezogen auf den freien Querschnitt zwischen den Körnern in m/s.

### 3. Kontrolle der $k_v$ -Werte.

Eine Nachprüfung der gefundenen Formel anhand der gemessenen  $k_v$ -Werte ergibt die in Tabelle 5 enthaltene Kontrolle. Die Abweichung beträgt im Mittel etwa 5 %.

Tabelle 5.

$t$ °C	$w$ m/s	$f_0$ %	$f$ %	$\Delta x$ gr/kg	$a$	$k_v$ gem. Kg/h m <sup>3</sup>	$k_v$ ger. Kg/h m <sup>3</sup>	Diff. %
90	1,0	18,8	10,0	21,5	1,5	27800	28900	+3,5
70	1,0	18,8	14,0	15,5	2,8	31600	31600	+3,0
40	1,0	18,7	16,0	7,0	5,8	23000	24000	+4,4
70	1,0	16,8	12,0	13,5	3,4	20600	21400	+4,0
70	0,68	14,9	14,9	14,9	3,6	13000	13800	+6,0
70	0,37	14,0	12,3	14,3	3,75	7600	8200	+8,0

Die Übereinstimmung ist namentlich bei den hohen Anfangsfeuchtigkeiten befriedigend, womit die getroffenen Vereinfachungen zur rechnerischen Darstellung gerechtfertigt erscheinen.

#### b) *Europäischer Landweizen.*

Durch eine gleichartige Auswertung wie für Manitoba erhält man gemäß Abb. 19 und 25 die entsprechende empirische Formel für Landweizen:

$$k_v = 2040 \cdot f_0^{0,85} \cdot \left(\frac{f}{f_0}\right)^a \cdot \sqrt{w} \quad (37)$$

Die Konstante  $a$  kann unter Benützung der Tabellen 3 und 6 gefunden werden.

Tabelle 6.

$\Delta x$	$a(\Delta x)$
5	7,2
10	4,75
15	3,3
20	2,4
25	1,7
30	1,2

Die Abweichung der beiden Formeln (36) und (37) kommt in erster Linie in der Konstanten  $A$  zum Ausdruck, während  $c$  und  $a$  wenig verschieden sind.

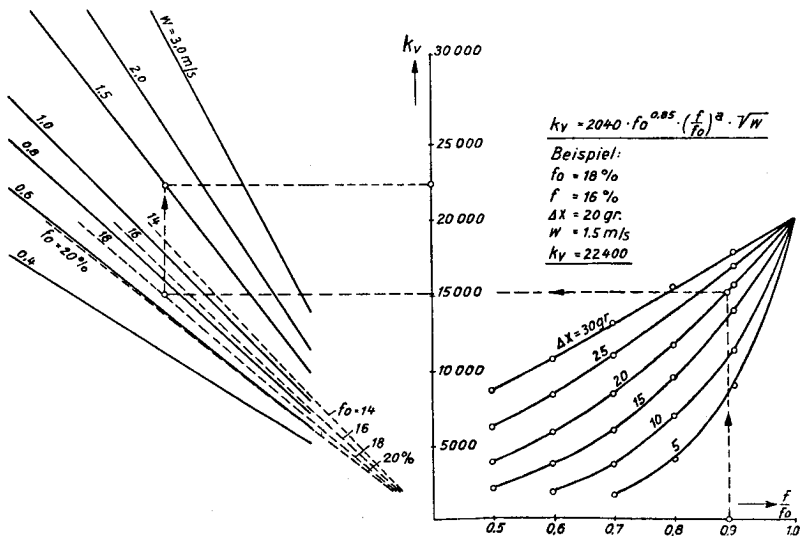


Abb. 27. Darstellung von  $k_v$  für Landweizen.

Für den praktischen Gebrauch der beiden Gleichungen kann ein Diagramm entworfen werden (vergl. Abb. 27).

## 7. Resultate

Die beiden Gleichungen für die Verdunstungszahl  $k_v$  geben die Meßresultate recht gut wieder. Die Kontrolle der gerechneten mit den gemessenen Werten stimmt im Durchschnitt auf 5% genau. Es darf damit angenommen werden, daß das gefundene Exponentialgesetz innerhalb des Meßbereiches

$f = 18 - 8\%$ ,  $t = 40 - 90^\circ \text{C}$ ,  $w = 0,15 - 1,0 \text{ m/s}$   
gültig ist.

Erstaunlich ist der große Unterschied zwischen der Verdunstungszahl für Manitoba und für europäischen Landweizen.  $k_1$ -Man. ist bei gleichen äußeren Einflüssen 3 mal größer als  $k_2$ -Land. Dieser enorme Unterschied kann nicht nur allein in der größeren Durchlässigkeit der Schale begründet liegen. Man beobachtet nämlich, daß der Unterschied erst bei geringem Feuchtigkeitsgehalt kleiner wird. Das Wasser muß also schon von innen her leichter nachdiffundieren. Es ist bekannt, daß das an die Stärkekörner gebundene Wasser ein größeres Haltevermögen besitzt, als das in den Eiweißkörpern enthaltene. Die Eiweißmoleküle können auch viel mehr Wasser aufnehmen, als die Stärkekörner. Manitobaweizen besitzt nun einen bedeutend größeren Klebergehalt (Eiweiß), von elastischer Qualität, als Landweizen.

In der Anfangsfeuchtigkeit kommt eine Stoffeigenschaft zum Ausdruck, welche andeutet, daß sich anfänglich eine größere Feuchtigkeitsmenge in der Schale und im Keimling befindet, welche leichter verdunstet, als das innere Wasser. Diese Beobachtung wird durch das stärkere Wasserabsorptionsvermögen dieser Teile bestätigt. Bei Maistrocknung kennt man den hemmenden Einfluß der dicken Schale auf die Trocknung besonders gut.

Der Einfluß der Feuchtigkeit selbst folgt einem Exponentialgesetz. Der Exponent seinerseits ist aus der Feuchtigkeitsdifferenz oder aus der Temperatur des Trockenmediums gebildet. Hier ist man mehr erstaunt über den großen Einfluß der Gutsfeuchtigkeit als über denjenigen der Trocken-Temperatur.

Der starke Einfluß des Sättigungsdefizites ist nicht verwunderlich, weil damit die Partialdruckdifferenz oder die Trockenkraft exponentiell wächst. Es sei erwähnt, daß dasselbe von der Temperatur nur beim Frischlufttrocknen gilt und nicht beim Umluftverfahren.

Der Einfluß der Luftströmung, wobei die Geschwindigkeit um die Weizenkörner ausgedrückt wurde, zeigt ebenfalls Potenzcharakter. Es war zu erwarten, daß der Exponent bei der vorherrschenden laminaren Strömung kleiner als 1 ausfallen werde. Die Reynolds'sche Zahl  $\frac{wd}{\nu}$  beträgt 30—250.

$$d = \text{mittlere Körnerabmessung (ung. 4 m/m)}$$

$$(w = 0,15 - 1,0)$$

$$(\nu = 17,0 - 23,0 \cdot 10^{-6})$$

Der Exponent von 0,5 ist durchaus vergleichbar mit solchen der Wärmeübertragung bei laminarer Bewegung.

*Kraussold* findet für laminare Rohrströmung einen Einfluß von  $Re^{0,5}$ , während *Hilpert* für Strömung um dünne Rohre  $\alpha \sim Re^{0,4}$  findet. Ebenso weist *Fabrizius* durch seine Trockenversuche an Lehmformlingen einen Einfluß von  $w^{0,64}$  nach. *Sherwood* findet übereinstimmend beim Holz-trocknen  $w^{0,6}$ .

Um sich ein Bild von der Größe der Verdunstungszahl zu machen, ist es empfehlenswert, auf die Verdunstung bezogen auf die Oberfläche zurückzukehren. Nach Definition war  $k_v \cdot V = k_f \cdot F$ . Die Bestimmung der Kornoberfläche ist praktisch unmöglich. Da es sich aber nur um das Größenverhältnis zwischen  $k_v$  und  $k_f$  handelt, so ist eine Approximation zulässig. Wir fassen das Korn auf als dreiachsiges Ellipsoid. Aus ca. 100 Nachmessungen ergaben sich für Landweizen als Achsenmasse folgende Mittelwerte:

$$2a = 3 \text{ m/m}, \quad 2b = 4 \text{ m/m} \quad 2c = 7 \text{ m/m}$$

Der Korninhalt beträgt damit  $6,6 \cdot 10^{-8} \text{ m}^3$   
 die Kornoberfläche  $8,8 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2$

1 m<sup>3</sup> Weizen wiegt ca. 750 kg. Bei einem spez. Gewicht von 1350 kg/m<sup>3</sup> beträgt damit das vom Weizen wirklich eingenommene Volumen 0,557 m<sup>3</sup>.

1 m<sup>3</sup> geschütteter Weizen enthält folglich  $8,45 \cdot 10^6$  Körner, mit einer Gesamtoberfläche von 745 m<sup>2</sup>.

Bei einem  $k_v = 25000 \text{ kg/m}^3 \text{ h}$  ( $f = 18,0 \%$ ,  $\Delta x = 25 \text{ gr}$ ,  $w = 1,0 \text{ m/s}$ ) beträgt damit  $k_f = 33,5 \text{ kg/m}^2 \text{ h}$ .

Nach Lewis ist:

$$k_f = \frac{\alpha_f}{C_{p_g}}, \text{ mit } C_{p_g} = 0,245 \text{ wird } \underline{\alpha_f = 8,0 \text{ WE/m}^2 \text{ h } ^\circ\text{C}}$$

ähnlich wird  $\alpha_v = k_v \cdot C_{p_g} = \underline{6100 \text{ WE/m}^3 \text{ h } ^\circ\text{C}}$ .

Dasselbe erhält man auch direkt aus  $\alpha_v = \alpha_f \cdot \frac{F}{V}$ .

Diese Zahlen sind nun mit anderen Versuchen eher vergleichbar. Hirsch<sup>11)</sup> findet bei einem Trockenversuch von Luft im Kühlturm mit Füllkörpern ein  $\alpha_v = 5600$ ; ferner beim Trocknen von Fellen ein  $\alpha_f$  von 28—50 bei  $t = 50^\circ$ ,  $w = 0,5 - 2,0 \text{ m/s}$ . Schließlich beobachtet Hilpert<sup>12)</sup> bei seinen Verdunstungsversuchen an Tonröhren einen  $k_f$ -Wert von 15—20 kg/m<sup>2</sup>h. Fabrizius seinerseits findet bei den schon erwähnten Trockenversuchen an Lehmformlingen  $k_f$ -Werte von ca. 150, bei  $w = 2,65 \text{ m/s}$ ,  $\Delta x = 0,007$ .

Der Vergleich zeigt die erhaltenen Verdunstungszahlen in guter Übereinstimmung mit anderen Verdunstungsergebnissen, wenigstens der Größenordnung nach.

## 8. Rechnungsbeispiel für einen Gegenstromtrockner

4000 Kg/h Landweizen sollen von  $f_1 = 20 \%$  auf  $f_3 = 15 \%$  hinuntergetrocknet werden und zwar von 20 % auf 16 % im Trockner und von 16 % auf 15 % im Rückkühler. Der Weizen soll dabei zur Konditionierung von 15 °C auf 45 °C erwärmt und anschließend auf 20 °C rückgekühlt werden.

<sup>11)</sup> Hirsch, Trockentechnik, 2. Aufl., Seite 75 und 82.

<sup>12)</sup> R. Hilpert, Verdunstung und Wärmeübergang. F. H. No. 355.



Zum Trocknen steht Heißluft von  $85^{\circ}\text{C}$  mit einer Feuchtigkeit von  $x_1 = 0,05 \text{ Kg/Kg}$  zur Verfügung, was durch Mischen von Frischluft und Abluft erreicht wird. Das Rückkühlen geschieht mit Raumluft von  $18^{\circ}\text{C}$  und 70 % relativer Feuchtigkeit.

*A. Trockner.*

$$\begin{aligned} \text{Feuchtgewicht} \quad G_F &= 4000 \text{ Kg/h} \\ \text{Trockensubstanz} \quad G_T &= G_F(1 - f_1) = 4000 \cdot 0,8 = \underline{3200 \text{ Kg/h}} \end{aligned}$$

Die absolute Weizenfeuchtigkeit beträgt:

$$\begin{aligned} \varepsilon_1 &= \frac{f_1}{1 - f_1} = \frac{0,2}{0,8} = 0,25 \\ \varepsilon_2 &= \frac{f_2}{1 - f_2} = \frac{0,16}{0,84} = 0,19 \\ \underline{\Delta \varepsilon} &= \varepsilon_1 - \varepsilon_2 = \underline{0,06} \end{aligned}$$

Die verdunstete Wassermenge beträgt:

$$\underline{W_1} = G_T \cdot \Delta \varepsilon = 3200 \cdot 0,06 = \underline{194 \text{ Kg/h}}$$

Die Luftzustände sind mit Rücksicht auf die Weizenerwärmung zu wählen. Der Weizen hat mit  $\varepsilon_1 = 0,25$  feuchten Charakter. Seine Erwärmung entspricht zunächst der Taupunkttemperatur der Trockenluft. Soll der Weizen  $45^{\circ}\text{C}$  erreichen, so muß der Taupunkt der Trockenluft ebenfalls bei dieser Temperatur liegen. Dies entspricht bei der gewählten Heißlufttemperatur von  $85^{\circ}\text{C}$  einem Feuchtigkeitsgehalt von  $x_1 = 0,05$ . Ein so hoher Feuchtigkeitsgehalt kann durch Beimischen von Abluft erreicht werden.

Der Abluftzustand ist seinerseits durch die Weizentemperatur und ferner durch die Forderung, daß in den Luftkanälen keine Tropfwasserbildung eintritt, begrenzt.

Die Luftzustände werden folgendermaßen gewählt:

$$\text{Vor Trockner: } t_1 = 85^{\circ}\text{C}, \quad x_1 = 0,05 \text{ Kg/kg}, \quad i_1 = 52 \text{ WE/kg}$$

$$\text{Nach Trockner: } t_2 = 45^{\circ}\text{C}$$

Die Weizenerwärmung beträgt:

$$Q_W = G_T(i_2 - i_1)$$

$$\text{wobei} \quad i = c_f \cdot t, \quad c_f = c_T + \varepsilon \cdot c_{fl}, \quad c_T = 0,37, \quad c_{fl} = 1,0$$

$$c_{f_1} = 0,37 + 0,25 = 0,62$$

$$c_{f_2} = 0,37 + 0,19 = 0,56$$

$$\text{damit} \quad i_2 = 0,56 \cdot 45 = 25,2 \text{ WE/Kg}$$

$$i_1 = 0,62 \cdot 15 = 9,3 \text{ „}$$

$$\underline{i_2 - i_1} = \underline{15,9 \text{ WE/Kg}}$$

Die Weizenerwärmung verlangt die Zufuhr von

$$\underline{Q_{W_1} = 3200 \cdot 15,9 = 51000 \text{ WE/h}}$$

Die Luftmenge bestimmt sich gemäß der Forderung, daß dem Weizen vor Einsetzen der Trocknung die Wärmemenge  $Q_{W_1}$  zugeführt werden soll (Trockenvorgang bei  $x = \text{konst.}$ ). Erst anschließend daran erfolgt die eigentliche Trocknung durch einen Prozeß bei konstantem Wärmeinhalt  $i$  (siehe Abb. 28).

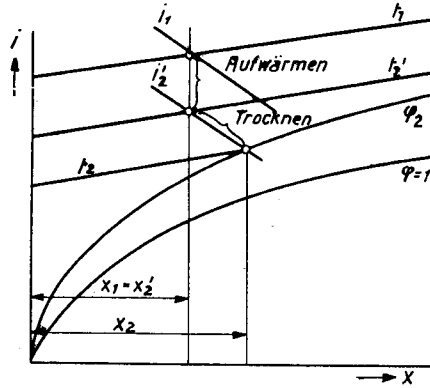


Abb. 28

Es ist:

$$x_1 = x_2' \quad (1)$$

$$i_2 = i_2' \quad (2)$$

$$G_L(i_1 - i_2') = 51000 \quad (3)$$

$$G_L(x_2 - x_2') = 194 \quad (4)$$

$$i_2' = 0,24 t_2' + x_2'(595 + 0,46 t_2') \quad (5)$$

$$i_2 = 0,24 t_2 + x_2(595 + 0,46 t_2) \quad (6)$$

Durch Auflösung dieser 6 Gleichungen lassen sich die Werte

$\underline{G_L}$ ,  $\underline{t_2'}$ ,  $\underline{i_2'}$ ,  $\underline{i_2}$ ,  $\underline{x_2'}$ ,  $\underline{x_2}$  bestimmen.

Die Auflösung kann auch durch Probieren mit Hilfe des  $i-x$ -Diagrammes geschehen.

Man findet:

$$\underline{G_L = 17000 \text{ Kg/h}} \quad \underline{x_2 = 0,0610 \text{ Kg/Kg}} \quad \underline{i_2 = 49 \text{ EW/Kg}}$$

Ferner entnimmt man dem  $i-x$ -Diagramm für  $x_1$  und  $x_2$  die zugehörigen Werte für:

$$x_{g_1} = 0,069, \quad x_{g_2} = 0,063 \quad \text{und daraus}$$

$$x_{g_1} - x_1 = 0,019 \quad x_{g_2} - x_2 = 0,002$$

Zur Bestimmung der Verdunstungszahl  $k_v$  wird die empirisch gefundene Gleichung (37) benützt:

$$k_v = 2040 \cdot f_0^{0,85} \cdot \left(\frac{f}{f_0}\right)^a \cdot \sqrt{w}$$

und zwar wird der log. Mittelwert für den Anfangs- und Endzustand der Trocknung bestimmt.

Für den Anfangszustand gilt:

$$\underline{k_{v_a}} = 2040 \cdot 20^{0,85} \cdot \left(\frac{20}{20}\right)^a \cdot \sqrt{w} = \underline{25\,950 \cdot \sqrt{w}}$$

Für den Endzustand gilt entsprechend:

mit  $a = 12$  (vergl. Abb. 26 für  $\Delta x_2 = 0,002$ )

$$\underline{k_{v_e}} = 20 \cdot 2040^{0,85} \cdot \left(\frac{16}{20}\right)^{12} \cdot \sqrt{w} = \underline{5420 \cdot \sqrt{w}}$$

Daraus folgt der log. Mittelwert  $\underline{k_v = 9000 \cdot \sqrt{w}}$  (I)

Als weitere Beziehung steht die Gleichung (13) über den totalen Wärmebedarf zur Verfügung:

$$Q_{tot} = Q_F = \alpha_{v_m} \cdot \Delta t_m \cdot V$$

$Q_F$  setzt sich zusammen aus der Weizenerwärmung

$$Q_{W_1} = Q_T = 51\,000 \quad \text{und der Verdampfungswärme}$$

$$Q_D = W_1(i_{d_t} - i_{w_t}) = W_1(C_{p_d} \cdot t + r_0 - i_{w_t}).$$

Für  $t$  wird der Mittelwert der Lufttemperatur von  $t_1 = 85^\circ$  und  $t_2 = 45^\circ$  gesetzt; also  $\underline{t = 65^\circ \text{C}}$ .

Für  $i_{w_t} = C_{fl} \cdot t$  folgt der Mittelwert aus  $t_1 = 15^\circ$  und  $t_2 = 45^\circ$ ; also  $\underline{i_{w_t} = 30 \text{ WE/Kg}}$

$$\underline{r_0 = 595 \text{ WE/Kg}}$$

folglich  $\underline{Q_D = 194(595 + 0,46 \cdot 65 - 30) = 115\,000 \text{ WE/h}}$ .

Also  $\underline{Q_F = 166\,000 \text{ WE/h}}$  (II)

Nach Gleichung (3) bzw. (11) bestimmen sich die Wärmeübergangszahlen gemäß:

$$\alpha_{v_m} = k_{v_m} \cdot C_{p_g} \quad \text{bzw.} \quad \alpha_{T_{v_m}} = k_{v_m} \left[ C_{p_g} - \frac{(x_g - x)_m \cdot i_{dt}}{\Delta t_m} \right]$$

worin  $\underline{\Delta t_m = \frac{t_1 - t_1 + t_2 - t_2}{2} = \frac{85 - 45 + 45 - 15}{2} = 35^\circ \text{C}}$

beträgt.

Ferner ist:

$$C_{p_g} = C_{p_L} + x_{g_m} \cdot C_{p_d}$$

$$C_{p_L} = 0,24$$

$$x_{g_m} = \frac{x_{g_1} + x_{g_2}}{2} = \frac{0,069 + 0,063}{2} = 0,0660$$

$$C_{p_d} = 0,46$$

Damit wird:

$$C_{p_g} = 0,24 + 0,46 \cdot 0,0660 = \underline{0,27}$$

Mit der Beziehung

$$\underline{(x_g - x)_m} = \frac{(x_{g_1} - x_1) + (x_{g_2} - x_2)}{2} = \frac{0,069 - 0,05 + 0,063 - 0,061}{2} = \underline{0,0105}$$

und dem Betrag für den Wärmehalt

$$i_{d_t m} = 625$$

folgt schließlich für die Wärmeübergangszahl:

$$\underline{\alpha_{v_m} = 0,27 \cdot k_{v_m}} \quad \text{und} \quad \underline{\alpha_{T_{v_m}} = 0,083 \cdot k_{v_m}} \quad (\text{III})$$

Die 4000 Kg/h feuchten Weizen nehmen bei einem Hektolitergewicht von  $s = 72$  Kg/hl ein Schüttvolumen von  $5,55 \text{ m}^3$  ein. Dem entspricht bei einem spezifischen Gewicht von  $\gamma = 144$  Kg/hl ein Stappelfaktor

$$R = \frac{s}{\gamma} = \frac{72}{144} = 0,5.$$

Daraus folgt ein stündlicher Durchsatz an Kornvolumen von  $\nu = 2,775 \text{ m}^3$ . Bezeichnet  $V_0$  den Trocknerinhalt, so ist das darin eingenommene Kornvolumen  $V = R \cdot V_0$ . Der freie Raum zwischen den Körnern beträgt somit  $V_0 - V = V_0 (1 - R)$ . Daraus bestimmt sich nach Gleichung (33) der freie Querschnitt zu

$$F = \sqrt[3]{\nu_0^2 (1 - R)^2}$$

oder mit  $R = 0,5$

$$\underline{F = \sqrt[3]{\nu^2}}$$

Andererseits ist nach dem Kontinuitätsgesetz:

$$F = \frac{G_L}{3600 \cdot \gamma_L \cdot w}$$

Durch Gleichsetzen der beiden Ausdrücke für  $F$  folgt:

$$\underline{\sqrt[3]{\nu^2} = \frac{G_L}{3600 \cdot \gamma_L \cdot w}} \quad (\text{IV})$$

Die Auflösung der Gleichungen (I) bis (IV) liefert schließlich:

$$\sqrt[3]{v^2} = \frac{166\,000}{0,27 \cdot 9000 \cdot 35 \cdot \sqrt{\frac{17\,000}{3600 \cdot 1}}} = 0,91$$

Woraus sich die Volumen bestimmen zu:

$$\underline{V = 0,87 \text{ m}^3}$$

$$\underline{V_0 = 1,74 \text{ m}^3}$$

Durch rückwärtiges Einsetzen in die Gleichungen (I) bis (IV) ergibt sich endlich:

$$\underline{\alpha_{vm} = \frac{Q_F}{\Delta t_m \cdot V} = \frac{166\,000}{35 \cdot 0,87} = 5450 \text{ WE/m}^3 \text{ h}^\circ \text{C}}$$

$$\underline{k_{vm} = \frac{\alpha_{vm}}{C_{pg}} = \frac{5450}{0,27} = 20\,000 \text{ Kg/m}^3 \text{ h}}$$

$$\underline{Z = \frac{V}{v} = \frac{0,87}{2,775} = 0,315 \text{ h} = 19 \text{ Min.}}$$

Zur Kontrolle dient die Beziehung:

$$\underline{\alpha_{Tvm} = \frac{Q_T}{V \cdot \Delta t_m} = \frac{51\,000}{0,87 \cdot 35} = 1680 \text{ WE/m}^3 \text{ h}^\circ \text{C}}$$

und daraus:

$$\underline{k_{vm} = \frac{1680}{0,083} = 20\,000 \text{ Kg/m}^3 \text{ h}}$$

Ferner gilt nach Gleichung (9)

$$Z = \frac{G_L}{k_{vm} \cdot v} \cdot \frac{(x_2 - x_1)}{(x_g - x)_m}$$

$$\underline{Z = \frac{17\,500}{20\,000 \cdot 2,77} \cdot \frac{0,0105}{0,011} = 0,305 \text{ h}}$$

Beide Kontrollrechnungen stimmen gut überein.

Schließlich folgt der Trockenwirkungsgrad nach Gl. (14) zu  $\eta_T = 1 - \frac{\alpha_{Tv}}{\alpha_v}$

$$\underline{\eta_T = 1 - \frac{0,083}{0,27} = 0,69}$$

### B. Kühler.

Der Weizen soll von  $t_2 = 45^\circ$  auf  $t_3 = 20^\circ$  im Gegenstrom gekühlt werden und gleichzeitig von  $f_2 = 16\%$  auf  $f_3 = 15\%$  getrocknet. Es steht Kühlluft von folgendem Zustand zur Verfügung:

$$t_3 = 18^\circ, \quad \varphi_3 = 70 \%, \quad x_3 = 0,0094, \quad i_3 = 10 \text{ WE/Kg}$$

Der Abluftzustand sei beschrieben durch:  $t_4, \varphi_4, x_4, i_4$ .

Aus  $f_2$  und  $f_3$  folgt:

$$x_2 = 0,190, \quad x_3 = 0,177, \quad \Delta x = 0,0133$$

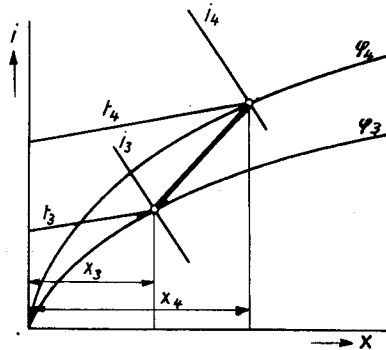


Abb. 29

Die verdunstete Wassermenge beträgt:

$$\underline{W_2} = G_T \cdot \Delta x = 3200 \cdot 0,0133 = \underline{42,6 \text{ kg/h}}$$

Der Wärmehalt des Weizens beträgt:

$$i_2 = c_{f_2} \cdot t_2 = 0,56 \cdot 45 = 25,2 \text{ (Wärmehalt vor Kühlung)}$$

$$\underline{i_3} = c_{f_3} \cdot t_3 = 0,547 \cdot 20 = \underline{11,0} \text{ (Wärmehalt nach Kühlung)}$$

$$\underline{\Delta i} = \underline{14,0 \text{ WE/kg}}$$

Danach folgt die abzuführende Wärme:

$$\underline{Q_{W_2}} = G_T \cdot \Delta i = 3200 \cdot 14,0 = \underline{45\,000 \text{ WE/h}} = Q_F$$

Zur Ermittlung der Größen  $t_4, G_L, V, Z$ , welche den Kühler vollständig bestimmen, ist ein System von 10 Gleichungen aufzulösen.

Zur Vereinfachung geht man schrittweise vor. Aus den Gleichungen

$$1) \quad G_L(x_4 - x_3) = W_2 = 42,6$$

$$2) \quad G_L(i_4 - i_3) = Q_{W_2} = 45\,000$$

$$3) \quad i_4 = 0,24 t_4 + x_4 (595 + 0,46 t_4)$$

bestimmt man zunächst die unbekanntnen Größen  $G_L, i_4, x_4$  für ein paar gewählte Werte von  $t_4$ . Mit Hilfe des  $i$ - $x$ -Diagrammes lassen sich alsdann die Größen  $x_{g3}, x_{g4}, C_{pg}$  bestimmen und daraus die Mittelwerte errechnen.

Durch Auflösen der folgenden weiteren Gleichungen ermittelt man die Ausdrücke für  $k_{vm}, V$  und  $\alpha_{vm}$ .

$$4) \quad k_{v_m} = 2040 f_0^{0,85} \left(\frac{f}{f_0}\right)^a \cdot \sqrt{w} = 2040 \cdot 16^{0,85} \left(\frac{15}{16}\right)^a \cdot \sqrt{w} = A \cdot \sqrt{w}$$

$$5) \quad w = \frac{G_L}{3600 \cdot \gamma \cdot \sqrt[3]{v^2}}$$

$$6) \quad Q_F = \alpha_{v_m} \cdot \Delta t_m \cdot V = Q_T - Q_W = 45\,000 - 42,6 \cdot 595 = 20\,000$$

$$7) \quad \alpha_{v_m} = k_{v_m} \cdot C_{p_g}$$

Die Auflösung der Gleichungen (4–7) liefert:

$$8) \quad \sqrt[3]{v^2} = \frac{Q_F}{A \cdot C_{p_g} \cdot \Delta t_m \cdot \sqrt{\frac{G_L}{3600 \cdot \gamma}}}$$

wobei  $A$  nach Gleichung (4) bestimmt ist. Rückwärts werden aus  $V$  die Werte  $k_{v_m}$  und  $\alpha_{v_m}$  errechnet.

Die Werte werden für die Luftaustrittstemperaturen  $t_1 = 25, 30, 35^\circ\text{C}$  tabellarisch ermittelt.

Schließlich folgt die Kühlzeit  $Z$  aus:

$$9) \quad Z_1 = \frac{V}{v}$$

Durch den trockneren Zustand des Weizens vor der Kühlung ist das Kornvolumen etwas kleiner geworden. Dementsprechend sei  $v = 2,6 \text{ m}^3/\text{h}$  gewählt.

$$10) \quad Z_2 = \frac{G_L}{k_{v_m} \cdot v} \cdot \frac{x_2 - x_1}{(x_g - x)_m}$$

wobei  $Z_1 = Z_2 = Z$  sein muß.

Die Beträge von  $Z_1$  und  $Z_2$  werden über der Temperatur  $t_4$  aufgetragen. Der Schnittpunkt beider Kurven liefert die richtige Lösung für  $Z$ . Daraus kann schließlich der wahre Wert von  $t_4$ ,  $G_L$ ,  $k_{v_m}$  und  $\alpha_{v_m}$  rückwärts gerechnet werden.

Man wählt nun  $t_4$  und rechnet schrittweise weiter gemäß Tabelle.

$t_4$	25	30	35°C	gewählt
$t_3$	18	18	18°C	gegeben
$t_2$	45	45	45°C	"
$t_3$	20	20	20°C	"
$\Delta t_m = \frac{t_2 - t_4 + t_3 - t_3}{2}$	11	8,5	6°C	gerechn.
$x_4$	0,0131	0,0158	0,0188	Kg/kg n. Gl. 1–3
$x_3$	0,0094	0,0094	0,0094	" gegeben
$\Delta x = x_4 - x_3$	0,0037	0,0064	0,0094	" gerechn.
$i_4$	13,85	16,8	19,9	WE/Kg n. Gl. 1–3

$i_3$	10,0	10,0	10,0	„	gegeben
$\Delta i = i_4 - i_3$	3,85	6,8	9,9	„	gerechn.
$G_L$	11700	6600	4500	Kg/h	n. Gl. 1—3
$x_{g_4}$	0,0151	0,0185	0,0223	Kg/kg	n. $i-x-Dia$
$x_{g_3}$	0,0107	0,0107	0,0107	„	„
$x_{g_4} - x_3$	0,0021	0,0027	0,0035	„	gerechn.
$x_{g_3} - x_2$	0,0013	0,0013	0,0013	„	„
$\Delta x_g = \frac{x_{g_4} - x_4 + x_{g_3} - x_3}{2}$	0,0017	0,0020	0,0024	„	„
$C_{pg}$	0,246	0,247	0,248	WE/Kg°C	„
$i_{d_t} - i_{w_t}$	573	574	575	WE/Kg	„
$a(\Delta x)$	10,5	10,0	9,5		n. Abb. 26
$\left(\frac{f_2}{f_1}\right)^a$	0,64	0,66	0,68		gerechn.
$A$	13 700	14 200	14 450		n. Gl. 4
$\sqrt{\frac{G_L}{3600 \cdot \gamma}}$	1,71	1,27	1,03		gerechn.
$\sqrt[3]{V^2}$	0,315	0,535	0,93		n. Gl. 8
$V$	0,18	0,39	0,90	m <sup>3</sup>	gerechn.
$\alpha_{v_m}$	10 000	6000	4250	WE/m <sup>3</sup> h°C	n. Gl. 7
$k_{v_m}$	40 500	24 000	17 000	Kg/m <sup>3</sup> h	n. Gl. 6
$Z_1 = \frac{V}{v}$	0,070	0,150	0,355	h	n. Gl. 9
$\frac{\Delta x}{\Delta x_g}$	2,18	3,05	3,6		gerechn.
$Z_2$	0,225	0,325	0,37	h	n. Gl. 10

Der Schnittpunkt der beiden Z-Kurven liegt im vorliegenden Beispiel ziemlich genau bei  $t_4 = 35^\circ \text{C}$ . Daraus folgen nun gemäß vorstehender Tabelle oder aber allgemein aus der Rechnung alle gesuchten Größen wie folgt:

$$\begin{aligned}
 t_4 &= 35^\circ \text{C} \\
 x_4 &= 0,0188 \text{ Kg/kg} \\
 i_4 &= 19,1 \text{ WE/Kg} \\
 G_L &= 4500 \text{ Kg/h} \\
 Q_W &= 45 000 \text{ WE/h} \\
 Q_F &= 20 000 \text{ WE/h} \\
 k_{v_m} &= 17 000 \text{ Kg/m}^3 \text{ h} \\
 \alpha_{v_m} &= 4250 \text{ WE/m}^3 \text{ h}^\circ \text{C} \\
 V &= 0,90 \text{ m}^3 \\
 V_0 &= 1,80 \text{ m}^3 \\
 Z &= 0,360 \text{ h} = 22 \text{ Min.}
 \end{aligned}$$



Zur Kontrolle kann analog wie beim Trockenprozeß der Ansatz gemacht werden:

$$Q_T = \alpha_{T_{v_m}} \cdot \Delta t \cdot V,$$

wobei nach den Gleichungen (18), (20) und (21) für die Wärmeübergangszahl folgt:

$$\alpha_{T_{v_m}} = \left[ C_{p_g} + \frac{r(x_g - x)}{(t - t)_m} \right] \cdot k_{v_m}$$

Man findet:

$$\alpha_{T_{v_m}} = 0,488 \cdot k_{v_m} = 8300$$

Daraus:

$$V = \frac{45\,000}{8300 \cdot 6} = 0,905 \text{ m}^3$$

## Zusammenfassung

Die Untersuchung über die Verdunstungszahl hatte den Zweck, die bis heute vorhandenen Berechnungsgrundlagen für Weizentrockner zu ergänzen. Der Verdunstungszahl kommt beim Trocknen die gleiche Bedeutung zu, wie der Wärmeübergangszahl beim Wärmetransport.

In einem einleitenden theoretischen Teil werden die Zusammenhänge der Zustandsgrößen von Luft und Gut, die Wärme- und Feuchtigkeitsbilanzen, die Beziehungen zwischen Verdunstungszahl, Trockenvolumen und Trockenzeit, zusammengefaßt. Ferner wird eine Relation zwischen Verdunstungszahl, Wärmeübergangszahl und Lewis'schem Gesetz dargestellt.

Die Versuche vermitteln die Abhängigkeit der die Verdunstungszahl beeinflussenden Größen. Diese Größen sind:

1. Zustand der Trockenluft.
2. Luftgeschwindigkeit zwischen den Körnern.
3. Feuchtigkeitszustand des Gutes.
4. Weizenart.

Alle diese Einflüsse werden einzeln dargestellt und schließlich in einer empirischen Formel zusammengefaßt.

Bei der Trocknung von Weizen war man bis heute zwar in der Lage, sowohl den Zustand der Trockenluft während der Trocknung, als auch die nötige Trockenluftmenge zu berechnen. Dies geschah auf Grund der in der Praxis gut bestätigten Annahme, daß zunächst das Gut aufgewärmt und anschließend ohne äußeren Wärmeeinfluß bei  $i = \text{konstant}$  getrocknet wird. Darüber hinaus war man aber nicht im Stande, die Trockenzeit und die Dimensionen des Trockners zu bestimmen. An Hand von Erfahrungen konnte man allerdings die Durchlaufzeit den Trockenforderungen anpassen.

Bei der Berechnung des Weizenkühlers was bis anhin keine Möglichkeit vorhanden, den Zustandsverlauf der Kühlluft zu berechnen. Der Endzustand nach der Kühlung war völlig unbestimmt. Auch hier gelingt dies nunmehr mit Hilfe der Verdunstungszahl.

Das Rechnungsbeispiel zeigt, wie die Dimensionierung eines Trockners mittelst der Verdunstungszahl geschehen kann.

## Literaturverzeichnis

- Hirsch*, Trockentechnik. 2. Auflage 1932.  
*Grubemann*, Das  $i-x$ -Diagramm.  
*Fabricius*, Berechnung der Trockenzeit. Diss. T. H. München 1933.  
*Merkel*, Verdunstungskühlung. F. H. No. 275.  
*Hoffmann-Mohs*, Das Getreidekorn. — Getreidespeicher.  
Mühle, Zeitschrift für Müllerei.  
Zeitschrift für das gesamte Getreidewesen.  
*P. Rosin*, Trocknung von Kohle. Braunkohle 1934, No. 18 und 19.  
*R. Hilpert*, Verdunstung und Wärmeübertragung. F. H. No. 355.  
*E. Kirschbaum*, Wärme- und Stoffaustausch im  $i-x$ -Diagramm. Forschung 1936, S. 109.  
*F. Kollmann*, Künstliche Holz Trocknung. Forschung 1935, S. 169. — Holz Trocknung.  
Forschung 1936, S. 113.  
*G. Ackermann*, Diffusion von Dämpfen in strömender Luft. Forschung 1935, S. 53.  
— Das Lewis'sche Gesetz für das Zusammenwirken von Wärmeübergang und Verdunstung. Forschung 1934, S. 95.  
— Wärmeübergang und molekularer Stoffaustausch. F. H. No. 392.  
*W. Nusselt*, Wärmeübergang, Diffusion, Verdunstung. Z. A. M. M. 1930, S. 117.  
*Ten Bosch*, Wärmeübertragung.

## **Lebenslauf**

Am 2. Juli 1908 wurde ich als Sohn des Erwin Otto Müller, Pfarrer, Bürger von Birmensdorf, Aargau, in Le Locle geboren. Ich besuchte von 1915 bis zur Maturität die Schulen von Lenzburg und Aarau. Von 1928 bis 1932 studierte ich Maschineningenieur an der E. T. H. Bis zum Frühjahr 1934 war ich Assistent von Hrn. Prof. H. Quiby und anschließend unter seiner Leitung bis zum Herbst 1935 Bauführer für den mechanischen Teil beim Neubau des Maschinenlaboratoriums der E. T. H. Vom Herbst 1935 bis zum Sommer 1939 war ich in der Firma Gebr. Bühler, Uzwil, als Leiter der Versuchsabteilung tätig. Seit dem 1. Juli 1939 bin ich als Ingenieur in der Firma Gebr. Sulzer A. G., Winterthur, Abt. Kesselbau, angestellt.