

# Die Berechnung von landwirtschaftlichen Trocknungsanlagen mit dicken Schüttgutschichten

Institut für Landtechnik, Stuttgart-Hohenheim

*Im Zusammenhang mit den im Institut für Landtechnik der Landw. Hochschule Hohenheim (Dir. Prof. Dr.-Ing. G. SEGLER) durchgeführten Untersuchungen auf dem Gebiet der Belüftungstrocknung von Heu wurden in Ergänzung zu den strömungstechnischen Arbeiten die bisher bekannt gewordenen Untersuchungsergebnisse einschließlich der in den USA, in Holland und Dänemark zusammengestellt. Die hier behandelte Berechnungsmethode läßt sich sowohl für halmförmiges als auch für körniges Gut anwenden.*

Die Berechnung von Trocknungsanlagen für landwirtschaftliche Erntegüter und andere Stoffe erfordert ein Verfahren, das mit befriedigender Genauigkeit folgende Einflußgrößen vorausbestimmen läßt: Die Trocknungsgeschwindigkeit<sup>1)</sup>, die Gleichmäßigkeit der Trocknung, die Trocknungskosten und den Trocknungswirkungsgrad. Hierbei wird meist ein Kompromiß erforderlich zwischen dem Einfluß der Schichtdicke des Gutes, der Temperatur der Trocknungsluft und der spezifischen Luftmenge. Dieser Kompromiß wird notwendig, um eine bestmögliche Trocknerausführung für die geforderte Trocknungskapazität, die Gleichmäßigkeit der Trocknung im Gut und die Trocknungskosten zu erzielen. Zur Ermittlung einiger spezifischer Gutkonstanten, die für die rechnerische Erfassung des Trocknungsvorganges notwendig sind, ist ein Versuchstrockner erforderlich. Die Konstruktion und Berechnung eines Versuchsmodells wird sehr schwierig ohne die Anwendung einiger theoretischer Grundlagen, die vor dem Bau des eigentlichen Trockners eine Voraussage über seine Leistungsfähigkeit erlauben.

Die hier beschriebene Theorie der Trocknung dicker Schüttgutschichten<sup>2)</sup> beruht auf Arbeiten von HUKILL [2; 3]. Zur Klärung der ursprünglichen Berechnungsmethode wurden vom erstgenannten Verfasser verschiedene Ergänzungen eingefügt und außerdem einige seiner Berechnungsverfahren für Trocknungsanlagen erläutert. Verschiedene Rechenbeispiele sollen weiterhin die Bedeutung des Verfahrens aufzeigen.

## Die allgemeinen Trocknungsgleichungen

Die Trocknungszeit  $t$  für eine dicke, luftdurchströmte Schüttgutschicht aus porösem Material kann durch das Gleichgewicht der Wärme definiert werden [4 bis 9]. Es ist in der folgenden Gleichung dargestellt durch das Verhältnis der Wärme, die zur Trocknung verfügbar ist, und dem Wärmeäquivalent des verdunsteten Wassers. Die Trocknungszeit  $t$  in Stunden beträgt

$$t = \frac{(X_1 - X) \cdot m_s \cdot i_D}{\{(m_L \cdot c_{pL} \cdot \Delta\theta) + B\} \cdot \eta} \quad (1)$$

Hierin bedeuten:

- $(X_1 - X)$  = Unterschied im Feuchtegrad des Gutes<sup>3)</sup>;
  - $X_1$  = Anfangsfeuchtegrad;
  - $X$  = Feuchtegrad des Gutes zur Zeit  $t$ ;
  - $m_s$  = Masse an Trockensubstanz in der Anlage in kg;
  - $i_D$  = Desorptionsenthalpie je kg verdunstetes Wasser in kcal/kg;
  - $m_L$  = Luftbedarf des Trockners in kg/h;
  - $c_{pL}$  = spezifische Wärme der Luft (0,24 kcal/kg °C für trockene Luft; 0,245 kcal/kg °C wird verschiedentlich gewählt für feuchte Luft);
  - $\Delta\theta$  = Temperaturabnahme der Trocknungsluft in °C, bedingt durch die Verdunstungskühlung;
  - $B$  = erzeugte biologische Wärme des Gutes in kcal/h;
  - $\eta$  = Trocknungswirkungsgrad;
- man bezeichnet hiermit den Wirkungsgrad, mit dem die in der Trocknungsluft vorhandene und aufgrund der Temperaturabnahme berechnete Wärme zur Wasserverdunstung ausgenutzt wird. ( $\eta = 1$  bedeutet, daß die gesamte Trocknungsluft durch das Naßgut strömt und bis zum Erreichen des Sorptionsgleichgewichtes gesättigt wird.)

Unter den obengenannten Größen ist der Trocknungswirkungsgrad  $\eta$  am schwierigsten abzuschätzen [10; 11], beispielsweise

bei den verschiedenen Bauformen von Trocknungsanlagen für landwirtschaftliche Erntegüter. Hier treten bei einzelnen Anlagenbauarten erhebliche Luftverluste durch Austreten der Trocknungsluft aus bereits getrockneten Schichten auf, wenn eine oder mehrere freie Anlagenseiten vorhanden sind. Nur bei einer Anlage mit vier dichten Seitenwänden können Luftverluste vermieden werden. Deshalb ist die Anwendung von Gl. (1) eng begrenzt, ausgenommen für sehr dicke Schüttgutschichten in einer Trocknungsanlage mit dichten Seitenwänden. Hier ist die Annahme zulässig, daß nahezu über die ganze Trocknungsperiode Naßgut und Abluft im hygroskopischen Gleichgewicht stehen, wobei ein Trocknungswirkungsgrad von fast 100% erreicht werden kann.

Ein anderer nur schwer zu bestimmender Faktor ist die biologische Wärmeerzeugung  $B$ . Zur genauen Bestimmung dieser Größe fehlen für viele Güter ausreichende Angaben. Sie kann jedoch bei der Kaltlufttrocknung von Heu sehr bedeutend sein, worauf schon früher verschiedentlich hingewiesen wurde [12; 13]. Nach amerikanischen Untersuchungen wurde die biologisch erzeugte Wärme zu 20 bis 90% der zur Trocknung erforderlichen Wärmemenge ermittelt [14 bis 17]. Bei ununterbrochenem Lüfterbetrieb betrug ihr Anteil an dem gesamten Energiebedarf während der Tagesstunden 20 bis 45% und stieg in den Nachtstunden unter bestimmten Voraussetzungen bis maximal 91% [16]. Die biologische Wärmeerzeugung ist stark von der Feuchte des Gutes, der spezifischen Luftmenge, der Temperatur der Trocknungsluft, der relativen Luftfeuchte und der Heuart abhängig [17]. Bei der Trocknung mit hohen Lufttemperaturen oder niedrigem Anfangsfeuchtegehalt des Gutes wird häufig die biologisch erzeugte Wärme vernachlässigbar klein. Wird Gut mit hohem Anfangsfeuchtegehalt getrocknet, so kann sie bei kleiner spezifischer Luftmenge einen bedeutenden Wert annehmen. Umfangreiche Messungen wurden am Institut für Landtechnik in Stuttgart-Hohenheim durchgeführt und sollen demnächst veröffentlicht werden.

Die Temperaturabnahme  $\Delta\theta$  wird gleich der psychrometrischen Temperaturdifferenz angenommen. Dies gilt unter der Voraussetzung, daß bei sehr dicken Schüttgutschichten im hygroskopischen Gleichgewicht die Abluft nahezu 100% relative Feuchte erreicht. In den USA wurden für mehrere Gebiete die Wetterdaten analysiert und die Häufigkeit verschiedener psychrometrischer Temperaturdifferenzen bestimmt [18; 19]. Ähnliche Daten sollten auch für andere Länder ermittelt werden.

Die erforderliche Desorptionsenthalpie bei der Verdunstung des an landwirtschaftliche Erntegüter gebundenen Wassers wurde für Getreide von JOHNSON und DALE [20] und für Heu von MILNE [21] bestimmt. Die Zunahme der Desorptionsenthalpie, die durch die CLAUSIUS-CLAPEYRONsche Gleichung vorausgesagt wird, erfolgt bei niedrigen Feuchtegehalten des Gutes  $U < 15\%$  bis  $20\%$  (Bild 1). Bei der Kaltlufttrocknung von landwirtschaftlichen Erntegütern kann bei einem Feuchtegehalt des Gutes oberhalb  $U = 15\%$  annähernd mit einer spezifischen Desorptionsenthalpie von 600 kcal/kg gerechnet werden. Dies entspricht annähernd der Verdampfungsenthalpie von freiem Wasser (585 kcal/kg für Wasser bei 20 °C).

<sup>1)</sup> Die Verfasser haben sich in diesem Aufsatz weitgehend an die in den VDMA-Einheitsblättern 24351 [1] festgelegten trockenstechnischen Grundbegriffe gehalten.

<sup>2)</sup> Beträgt die Schichthöhe in der Trocknungsanlage ein Vielfaches der Höhe der Verdunstungsschicht, dann spricht man von einer dicken Schüttgutschicht.

<sup>3)</sup> Nach den VDMA-Einheitsblättern 24351 ist zu unterscheiden zwischen dem

$$\text{Feuchtegehalt des Gutes } U = \frac{m_w}{m_w + m_s} \text{ und dem}$$

$$\text{Feuchtegrad des Gutes } X = \frac{m_w}{m_s}$$

$$m_w = \text{gesamte im Gut enthaltene Feuchtemasse}$$

$$m_s = \text{im Gut enthaltene Masse an Trockensubstanz}$$

Es gelten folgende Beziehungen zwischen den Größen

$$U = \frac{X}{1 + X} \quad \text{und} \quad X = \frac{U}{1 - U}$$

Die nachfolgend beschriebene Berechnungsmethode verwendet zur Kennzeichnung der Feuchte des Gutes vorwiegend den Wert  $X$ .

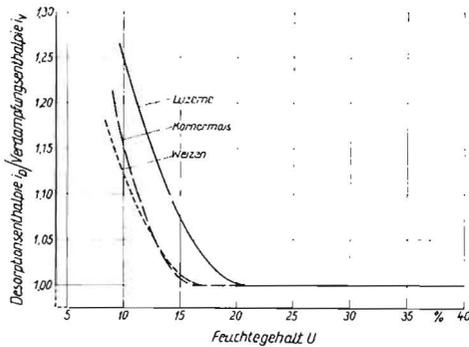


Bild 1: Zunahme der Desorptionenthalpie  $i_D$  im Vergleich zur Verdampfungsenthalpie  $i_V$  von freiem Wasser in Abhängigkeit vom Feuchtegehalt  $U$  bei verschiedenen Erntegütern

Werden dünne Schichten<sup>4)</sup> getrocknet, wie beispielsweise bei der Trocknung von Getreide mit stark vorgewärmter Luft, dann ergibt eine Rechnung nach Gl. (1) nicht die genaue Trocknungszeit. Sie zeigt weder die Verteilung des Feuchtegrades im Gut auf, noch bestimmt sie den Trocknungswirkungsgrad.

### Die Trocknung sehr dünner Schüttgutschichten

Die Grundlage für die in einem späteren Abschnitt beschriebene Theorie der Trocknung dicker Schüttgutschichten ist eine einfache mathematische Gleichung, die mit großer Genauigkeit den Trocknungsvorgang bei sehr dünnen Schüttgutschichten beschreibt<sup>5)</sup>. Diese Bedingungen herrschen dort vor, wo eine sehr dünne Gutschicht mit einer so bemessenen Luftmenge getrocknet wird, daß sich die Änderungen der Temperatur und der relativen Feuchte der Trocknungsluft fast dem Wert Null nähern. Die Gleichung, die in der bekannten Trocknungstheorie begründet ist, besagt, daß

$$\frac{dX}{dt} = C \cdot (P_{do} - P_{dl}) \quad (2)$$

ist. Die Trocknungsgeschwindigkeit  $\frac{dX}{dt}$  ist proportional der Differenz zwischen dem Dampfdruck  $P_{do}$  an der Oberfläche des Trocknungsgutes und dem Dampfdruck  $P_{dl}$  im Kern des Luftstromes. Ist kein Druckunterschied vorhanden, dann erfolgt kein Stoffübergang. Für den Fall, daß  $P_{do} > P_{dl}$  ist, läuft ein Trocknungsvorgang ab. Wird  $P_{do} < P_{dl}$ , dann erfolgt eine Wasseraufnahme durch das Gut. Der Faktor  $C$  ist ein Stoffübergangskoeffizient.

Für die weiteren Betrachtungen ist es günstiger, den Feuchtegrad als eine unabhängige Funktion der Zeit darzustellen. Der Dampfdruck muß deshalb aus Gl. (2) eliminiert und in Feuchtwerten ausgedrückt werden. In dem Bereich, in dem Luft und Dampf als ideale Gase betrachtet werden können, ist die relative Feuchte der Luft gleich dem relativen Dampfdruck. Damit wird

$$\frac{dX}{dt} = -C \cdot P_s \cdot (\varphi_{Lo} - \varphi_L) \quad (3)$$

Hierin bedeuten:

- $P_s$  = Sättigungsdruck des Dampfes bei der Lufttemperatur;
- $\varphi_{Lo}$  = relative Feuchte der Luft, die mit dem Gut vom Feuchtegrad  $X$  im hygroscopischen Gleichgewicht steht;
- $\varphi_L$  = relative Feuchte der Trocknungsluft.

Die Gleichung setzt voraus, daß der Feuchtegrad im Korn sich während der Trocknung auf einer Sorptionsisothermen entsprechend der Lufttemperatur befindet, wie es die Versuchsergebnisse von PABIS [22] bestätigen.

Innerhalb bestimmter Grenzen des Feuchtegrades verläuft die Sorptionsisotherme (bei Getreide) annähernd linear, vorwiegend im Bereich der Feuchtegrade, die am häufigsten bei der Trocknung

<sup>4)</sup> Bei einer dünnen Schicht ist die Schichthöhe des Gutes gleich oder kleiner als die Höhe der Verdunstungsschicht.

<sup>5)</sup> Man versteht unter sehr dünnen Schüttgutschichten eine Einzelkornschicht, das heißt eine Schicht aus einer Lage Körner. Bei halm- und blattförmigem, oder faserigem Gut erhält man ungefähr die gleiche Schichtdicke wie bei körnigem Gut, das heißt die Trocknerfläche wird mit Halm- und Blättern oder Fasern besetzt, daß die gleichen Bedingungen herrschen wie bei einer Einzelkornschicht.

landwirtschaftlicher Güter vorkommen [23; 24]. Unter der Annahme der Linearität gilt:

$$\frac{dX}{dt} = K \cdot (X - X_{gl}) \quad (4)$$

Hierin ist  $X$  der Feuchtegrad des Gutes zur Zeit  $t$  und  $X_{gl}$  der Gleichgewichts-Feuchtegrad bei einer bestimmten Temperatur und relativen Feuchte der Trocknungsluft.  $K [h^{-1}]$  ist die Trocknungskonstante, abgeleitet vom Diffusionskoeffizienten für Dampf, dem Sättigungsdruck des Dampfes und dem Verhältnis zwischen relativer Feuchte der Luft und dem Feuchtegrad des Gutes. Da nur der Sättigungsdruck des Dampfes temperaturabhängig ist, ändern sich die  $K$ -Werte bei verschiedenen Temperaturen im Verhältnis der Dampfdrücke.

Durch Integration von Gl. (4) zwischen den Zeitgrenzen 0 und  $t$  und zwischen den entsprechenden Feuchtegradgrenzen  $X_1$  und  $X$  erhält man folgende Lösung:

$$\frac{X - X_{gl}}{X_1 - X_{gl}} = e^{-K \cdot t} \quad (5)$$

Die linke Seite der Gleichung wird als Feuchtegrad-Verhältnis ( $XV$ ) bezeichnet, das als Dezimalbruch die bis zum Gleichgewicht durchzuführende Trocknung angibt. Eine weitere Betrachtung zeigt, daß der Feuchtegrad des Gutes sich dem Feuchtegleichgewicht in einer unendlichen Zeit nähert, er es aber theoretisch niemals erreicht. Für den Logarithmus von  $XV$  soll eine lineare Abhängigkeit von der Zeit bestehen. Versuche zur Bestimmung von  $K$ -Werten für verschiedene Güter haben folgendes gezeigt: Gl. (5) beschreibt den Trocknungsablauf mit guter Übereinstimmung bei kleineren Körnern, wie Weizen, und mit weniger guter Übereinstimmung bei großen Körnern, wie Mais [25; 26; 27]. Anscheinend führt der Widerstand gegen den Feuchtetransport (Diffusionswiderstand) in den großen Körnern zusammen mit dem Grenzschichtwiderstand zu einem viel verwickelteren Austauschsystem bei der Trocknung.

Die Halbwertzeit  $t_{1/2}$  erleichtert wesentlich das Verständnis der Theorie der Trocknung dicker Schüttgutschichten. Man versteht hierunter die Trocknungszeit, die erforderlich ist, um die Hälfte der bis zum Gleichgewicht abzuführenden Feuchtemasse zu verdunsten.

Es besteht folgende Beziehung:

$$t_{1/2} = \frac{0,693}{K} \quad (6)$$

Hier sollte erwähnt werden, daß Gl. (5) den Einfluß der Luftgeschwindigkeit auf den Trocknungsablauf nicht besonders berücksichtigt, mit Ausnahme der folgenden Forderung: Die Luftgeschwindigkeit muß beim Trocknungsvorgang so hoch sein, damit unbedeutende Änderungen im Luftzustand bei der Durchströmung des Gutes auftreten können. Versuche [22; 26] haben gezeigt, daß innerhalb des üblichen, eng begrenzten Bereiches der Luftgeschwindigkeiten diese den Trocknungsablauf nicht wesentlich beeinflussen.

Verschiedene wirklichkeitsnähere, mathematische Berechnungsmethoden für die Trocknung dünner Schüttgutschichten wurden von mehreren Forschern entwickelt [2; 22; 25; 26; 28]. Sie wurden jedoch nicht genügend verallgemeinert, um für die Theorie der Trocknung dicker Schüttgutschichten Anwendung zu finden.

### Hinweise zum Feuchtegleichgewicht

Wichtig bei der Berechnung von Trocknungsvorgängen sind Angaben über die Gleichgewichtsbeziehungen zwischen dem Feuchtegrad des Gutes und der relativen Feuchte der Luft. Zusammenfassungen von Versuchsergebnissen sind aus verschiedenen Quellen verfügbar [23; 24; 29]. HENDERSON [30] hat folgende theoretische Gleichung abgeleitet, mit deren Hilfe Feuchtegleichgewichtswerte bestimmt werden können

$$1 - \varphi_L = e^{-c \cdot T \cdot X_{gl}^n} \quad (7)$$

Hierin bedeuten:

- $\varphi_L$  = relative Feuchte der Luft;
- $X_{gl}$  = Gleichgewichts-Feuchtegrad;
- $T$  = Lufttemperatur in ° Kelvin;
- $c, n$  = experimentell ermittelte Gutkonstanten.

**Tafel 1: Werte der Gutkonstanten  $c$  und  $n$  von einigen Erntegütern**  
(weitere Angaben siehe [30])

Erntegut	Gutkonstante	
	$c$	$n$
Baumwolle . . .	$8,82 \times 10^{-5}$	1.70
Leinsamen . . .	$12,4 \times 10^{-5}$	2.02
Körnermais . . .	$1,98 \times 10^{-5}$	1.90
Sorghum . . . .	$6,12 \times 10^{-6}$	2.31
Soyabohnen . . .	$5,76 \times 10^{-5}$	1,52
Weizen . . . . .	$10,1 \times 10^{-7}$	3,03

In Tafel 1 sind Werte für  $c$  und  $n$  von einigen Erntegütern angegeben.

Der Anwendungsbereich von Gl. (7) ist sehr umfassend. Sie ermöglicht nach HENDERSON [30]:

- das Extrapolieren von begrenzten Gleichgewichtsangaben auf andere Feuchtegrade und relative Feuchten der Trocknungsluft;
- das Bestimmen des Temperatureinflusses auf die relativen Werte;
- das Erstellen einer vollständigen Sorptionsisotherme mit Hilfe weniger Versuchspunkte, mindestens aber mit zwei zur Bestimmung der Gutkonstanten  $c$  und  $n$ ;
- das Veröffentlicheln von Feuchtegleichgewichtsangaben in Form einer Tafel durch Angabe der Gutkonstanten  $c$  und  $n$ , wie in Tafel 1.

#### Die Theorie der Trocknung dicker Schüttgutschichten

Für das zu erläuternde Berechnungsverfahren werden die folgenden vereinfachenden Annahmen getroffen:

- adiabatischer Trocknungsverlauf; das heißt bei den Änderungen der Temperatur und des Feuchtegrades der Trocknungsluft wird weder äußere Wärme aufgenommen noch abgegeben. Die biologisch erzeugte Wärme wird vernachlässigt;
- das wasserhaltige Gut nimmt bei konstanter Verdunstung in dicker Schicht anfangs die Beharrungstemperatur  $\theta_H$  an. Sie ist bei reiner Lufttrocknung gleich der Feuchthometer-Temperatur  $\theta_f$  und damit gleich der Kühlgrenztemperatur  $\theta_k$ . Die Linien gleicher Kühlgrenztemperatur  $\theta_k$  im  $i-x$ -Diagramm stellen also die Änderungen der Trocknungsluft dar;
- die Geschwindigkeit, Temperatur und der Feuchtegrad der in die Gutmasse strömenden Trocknungsluft ändern sich nicht;
- die Veränderungen der spezifischen Wärme sind verschwindend klein im Vergleich zur Desorptionsenthalpie des verdunstenden Wassers. Dies ist von Bedeutung bei der Trocknung mit vorgewärmter Luft, wobei das Gut auf die Temperatur der Trocknungsluft erwärmt werden muß;
- das Trocknungsverhalten einer waagerechten Schicht wird nicht durch das der darüberliegenden Schichten beeinflusst.

Der Trocknungsablauf in einer dicken Gutschicht ist in Bild 2 dargestellt. Für die weiteren Betrachtungen wurden folgende Bezeichnungen ergänzend definiert:

Schichthöhe oder -dicke des Gutes = Belüftungsweglänge  
Höhe der Verdunstungszone = Verdunstungsweglänge.

Die Verdunstungszone wandert in einer bestimmten Ausdehnung, ausgehend vom Bereich des Lufteintritts in Strömungsrichtung durch das Gut. Über der Verdunstungszone hat keine Trocknung stattgefunden und der Feuchtegrad des Gutes ist gleich  $X_1$ . Nach dem Durchwandern der Verdunstungszone durch eine Gutschicht ist die Trocknung abgeschlossen, das bedeutet: Das Gut hat den Gleichgewichts-Feuchtegrad ( $X_{gl}$ ) erreicht und steht im hyroskopischen Gleichgewicht mit der Frischluft. Das Auftreten der Verdunstungszone wurde von vielen Trocknungsexperten beobachtet. N. IVES hat während seiner Tätigkeit an der

Iowa State Universität die Verdunstungszone sichtbar gemacht. Dies erfolgte in einfacher Weise so, daß beispielsweise Getreide in einem Labortrockner mit Chemikalien behandelt wurde, die ihre Farbe bei bestimmten Feuchtegraden änderten.

Die Ausdehnung der Verdunstungszone wird von den verschiedenen Bedingungen im Trocknungssystem beeinflusst. Die wichtigsten Faktoren für seine Ausdehnung sind die Luftgeschwindigkeit und -temperatur, ferner die Trocknungskonstante  $K$  für eine sehr dünne Gutschicht. Die hier dargelegte Berechnungsmethode wird diese Einflußfaktoren quantitativ erfassen. Die gesamte Schichthöhe der üblichen Trocknungssysteme hat die Ausdehnung von einigen wenigen Verdunstungsweglängen oder ist sogar kleiner als eine Weglänge (Bild 2). Deshalb ist es unerlässlich, die Verteilung des Feuchtegrades innerhalb der Verdunstungszone zu kennen. Wenn die gesamte Belüftungsweglänge ein Vielfaches der Verdunstungsweglänge ist, spielt die Kenntnis von der Verteilung des Feuchtegrades innerhalb des Gutes keine so wichtige Rolle. Die Trocknungszeit läßt sich mit Hilfe von Gl. (1) für eine Trocknungsanlage mit exakter Luftführung abschätzen unter der Annahme eines Trocknungswirkungsgrades von etwa 100%. Unglücklicherweise fordern wirtschaftliche Grenzen für die Lüfterleistung gewöhnlich Schichtdicken mit der Ausdehnung von weniger als 3 bis 4 Verdunstungsweglängen. Hierfür ist der Trocknungswirkungsgrad schwierig abzuschätzen. Außerdem ist bei der Trocknung mit stark vorgewärmter Luft der Gleichgewichts-Feuchtegrad  $X_{gl}$  des Gutes sehr viel niedriger, als es der für eine sichere Lagerung erwünschte Feuchtegrad erfordert. Zur Vermeidung von übertrockneten Schichten oder starken Streuungen im Feuchtegrad muß die Schichtdicke kleiner als eine Verdunstungsweglänge sein.

Die Berechnungsmethode nach HUKILL [2; 3] gibt uns die Möglichkeit, in einem Trocknungssystem den Feuchtegrad des Gutes zu jeder Zeit und in jeder Schichthöhe abzuschätzen. Sie ist auf dem folgenden Wärme-Gleichgewicht aufgebaut [ähnlich der Gl. (1)]:

$$m_L \cdot c_{pL} \cdot \Delta\theta = (X_1 - X_{gl}) \cdot \frac{dm_s}{dt} \cdot i_D \quad (8)$$

(siehe auch Erläuterung von Gl. 1).

In diesem Fall ist die Trocknungsgeschwindigkeit (bezogen auf die Trockensubstanz)

$$\frac{dm_s}{dt} = \frac{m_L \cdot c_{pL} \cdot \Delta\theta}{(X_1 - X_{gl}) \cdot i_D} \left[ \frac{\text{kg T. S.}}{\text{h}} \right] \quad (8a)$$

gleich der Masse an Trockensubstanz in kg in der Gutmenge, die in einer Stunde bis zum Gleichgewicht trocknet. Es soll hierbei das Maximum der verfügbaren und ausnutzbaren Wärme der Luft verwertet werden.  $X_1$  und  $X_{gl}$  sind der Anfangsfeuchtegrad und Gleichgewichts-Feuchtegrad.

HUKILL stellt die Beziehungen zwischen Gutfeuchte, Schichtdicke und Trocknungszeit in dimensionslosen Größen dar, so daß sie bei der allgemeinen Behandlung der meisten vorkommenden Trocknungsprobleme verwandt werden können.

Der Feuchtegrad wird dargestellt als Feuchtegrad-Verhältnis

$XV = \frac{X - X_{gl}}{X_1 - X_{gl}}$ , wie bereits in Gl. (5) definiert. Die Schichtdicke wird ausgedrückt in einer Zahl von Schichteinheiten  $D$ . Eine Schichteinheit  $D$  gibt die Gutmasse  $m_s^*$  in kg Trockensubstanz an, die mit der verfügbaren Wärme in einer Zeit die gleich der Halb-

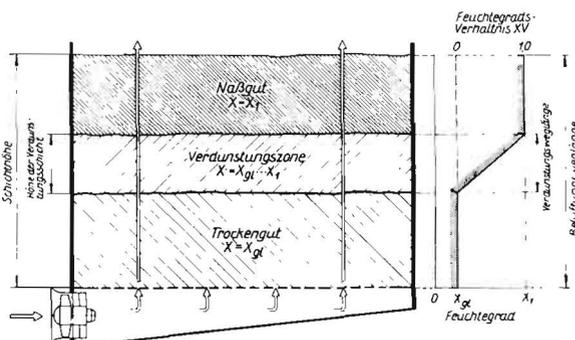


Bild 2: Der Trocknungsverlauf in einer dicken Schüttgutschicht

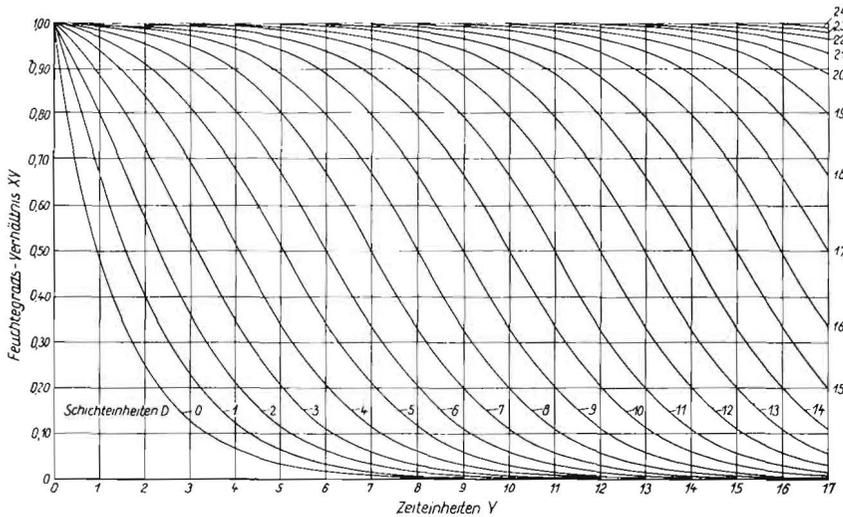


Bild 3: Hukill-Diagramm, das die berechneten Beziehungen zwischen Trocknungszeit, Feuchtegrad des Gutes und der Dicke der Trocknungsschicht darstellt

wertzeit  $t_{1/2}$  ist, bis zum Gleichgewicht getrocknet werden kann. Es ist also die Gutmasse  $m_s^*$  [kg T.S./Schichteneinheit]

$$m_s^* = \frac{dm_s}{dt} \cdot t_{1/2} \quad (8b)$$

und die Anzahl der Schichteneinheiten  $D$

$$D = \frac{m_s}{m_s^*}, \quad (9)$$

wobei  $m_s$  die gesamte Trockensubstanz (in kg) in der Trocknungsanlage ist.

Die Trocknungszeit wird ausgedrückt in einer Anzahl  $Y$  von Halbwertzeiten.

Es ist also

$$Y = \frac{\text{tatsächliche Trocknungszeit (Stunden)}}{t_{1/2} \text{ (Stunden)}} \quad (10)$$

Die folgende Gleichung stellt die Beziehungen der dimensionslosen Kurven dar

$$XV = \frac{2^D}{2^D + 2^Y - 1} \quad (11)$$

Obwohl die obige Gleichung von HUKILL [3] nicht mit mathematischer Genauigkeit abgeleitet wurde, zeigt er, daß Gl. (11) die Gl. (5) befriedigt. Sie befriedigt außerdem eine andere Gleichung, welche die Temperatur als eine Funktion der Schichtdicke ausdrückt und erfüllt ferner die zutreffenden Grenzbedingungen.

Die Kurven in Bild 3 sind eine graphische Darstellung von Gl. (11). Sie können für jeden Trocknungsfall angewandt werden, und zwar durch eine geeignete Umformung der tatsächlichen Einheiten des Systems in die dimensionslosen Einheiten der Kurven. Die unbedingt erforderlichen Angaben sind der Luftzustand, der Gleichgewichts-Feuchtegrad des Gutes und entsprechend die relative Feuchte der Luft, sowie die Halbwertzeit  $t_{1/2}$  für die Trocknung sehr dünner Schüttgutschichten.

Angaben von DAVIS und Mitarbeitern [31 bis 33] für die Halbwertzeit  $t_{1/2}$  und den Gleichgewichts-Feuchtegrad  $X_{gt}$  von Luzerneheu als Funktion des Luftzustandes sind in den Bildern 4 und 5 aufgetragen. Tafel 2 enthält Angaben [26; 27] zur Ermittlung der Trocknungskonstanten  $K$  aus Gl. (6) von einigen Getreidesorten, die bei der Trocknung sehr dünner Schüttgutschichten (Einzelkornschichten) ermittelt wurden. Betrachtet man die Abweichungen in diesen Angaben, die vielleicht bedingt sind durch die Unterschiede in der Getreideart, im Standort, im Erntejahr und andere Faktoren, dann wird man zweckmäßigerweise einen Versuch mit der Trocknung einer sehr dünnen Schüttgutschicht, bestehend aus einer Lage Körner, durchführen, um die Berechnungsmethode für dicke Schichten anwenden zu können. Dieser Versuch sollte mit einem charakteristischen Gut durchgeführt werden, bei Luftverhältnissen, die kennzeichnend sind für die späteren Betriebsdaten des geplanten Trockners. Die Anwendung dieser Berechnungsmethode wird durch die folgenden Beispiele erläutert.

### Beispiel 1

Gehäckseltes Luzerne-Heu soll unter folgenden Bedingungen in einer Flächanlage getrocknet werden:

Anfangsfeuchtegehalt	$U_1 = 40\%$
Masse des Naßgutes bei der Einlagerung	$m_s = 33300 \text{ kg}$
Grundfläche der Trocknungsanlage	$F = 100 \text{ m}^2$
Spezifische Strömungsgeschwindigkeit der Luft, bezogen auf den freien Querschnitt (das entspricht einer spezifischen Luftmenge von $\approx 0,1 \text{ m}^3/\text{s m}^2$ )	$w_L = 350 \text{ m/h} \approx 0,1 \text{ m/s}$
Desorptionenthalpie	$i_D = 600 \text{ kcal/kg}$
Temperatur des Trockenthermometers	$\vartheta_t = 25^\circ \text{ C}$
Relative Feuchte der Trocknungsluft am Eintritt	$\varphi_{tr} = 60\%$

Es ist die Trocknungszeit des Heues zu bestimmen, so daß der höchste Endfeuchtegehalt  $U_2 = 20\%$  beträgt.

Tafel 2: Halbwertzeiten der Trocknung von verschiedenen Getreidearten ermittelt durch Trocknungsversuche mit sehr dünnen Schüttgutschichten (Schicht bestehend aus einer Lage Körner)

Getreideart	Temperatur der Trocknungsluft $\vartheta_t$ [ $^\circ \text{ C}$ ]	relative Feuchte der Luft $\varphi_L$ [%]	Anfangsfeuchtegehalt $U_1$ [%]	Halbwertzeit der Trocknung $t_{1/2}$ [h]
Körnermais	16,0	50	36,2	14,6
	16,0	50	21,7	16,2
	23,5	51	34,0	10,3
	23,5	51	20,0	13,2
	23,5	51	36,0	6,3
	32	51	22,2	8,1
	43,5	14	20,2	1,5
	54,5	6	29,5	1,1
	54,5	4	24,8	1,4
	65,5	4	30,9	0,9
	65,5	4	19,0	1,1
Weizen	24	70	22,5	8,8
	24	34	39,8	5,2
	32	21	38,3	3,3
	32	50	21,5	5,2
	43	10	34,9	3,3
	54,5	4	31,2	0,84
	54,5	4	19,6	1,3
	65,5	3	17,2	0,95
Hafer	18	50	26,7	9,0
	24	33	28,2	9,6
	24	51	36,6	8,0
	32	51	26,8	6,8
	32	50	38,1	4,0

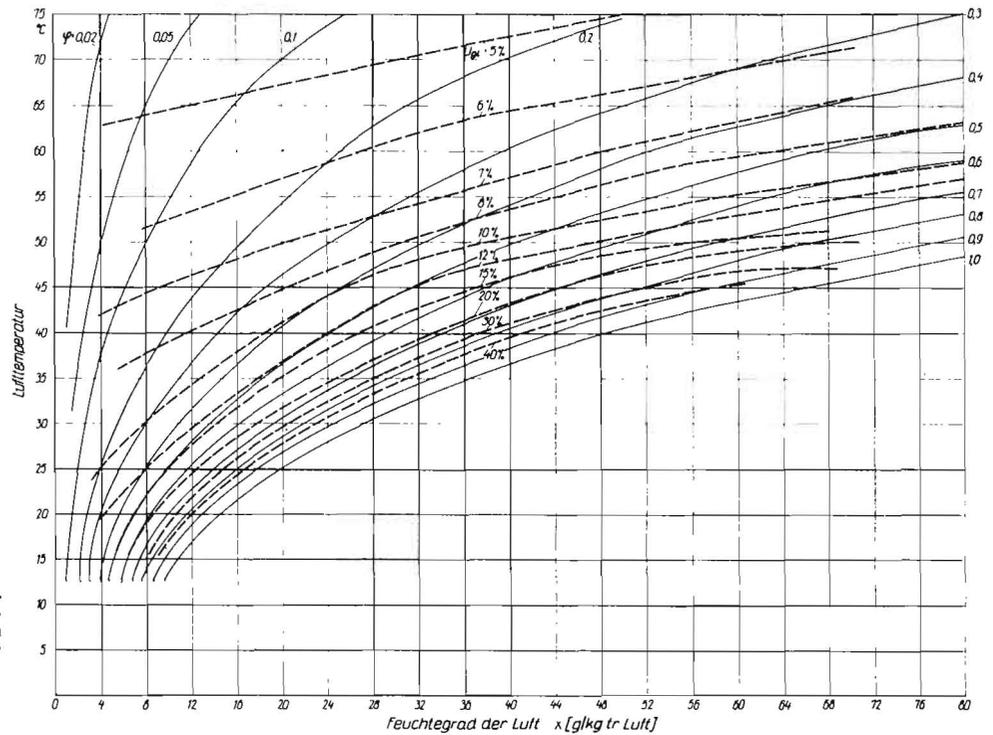


Bild 4: Der Gleichgewichts-Feuchtegehalt  $U_{gt}$  von Luzerne für Temperaturen der Trocknungsluft zwischen 15°C und 70°C, dargestellt im  $t$ - $x$ -Diagramm (Werte nach [33])

Berechnete Werte:

Feuchtthermometer-Temperatur der Luft  $\vartheta_f = 20^\circ \text{C}$   
 Spezifisches Volumen der feuchten Luft  $v_L = 0,86 \text{ m}^3/\text{kg}$

Für die weitere Berechnung werden nach den bereits früher erwähnten Beziehungen die Feuchtegehaltsangaben in Feuchtegradswerte umgewandelt.

Anfangsfeuchtegrad  $X_1 = \frac{U_1}{1 - U_1} \cdot 100 (\%)$ ,  
 $X_1 = \frac{0,40}{1 - 0,40} \cdot 100 \approx 67\%$ .

Bei dem herrschenden Luftzustand ist nach Bild 4 der

Gleichgewichts-Feuchtegehalt  $U_{gt} = 15\%$ ,  
 Gleichgewichts-Feuchtegrad  $X_{gt} = 17,7\%$ .

Gewünschter Zustand des Trockengutes

Endfeuchtegehalt  $U_2 = 20\%$ ,  
 Endfeuchtegrad  $X_2 = 25\%$ .

Das Feuchtegrad-Verhältnis für den gewünschten Endzustand ist nach Gl. (5)

$XV = \frac{0,25 - 0,177}{0,67 - 0,177}$ ,  
 $XV = 0,148$  (oder 14,8%).

Die stündlich der Anlage zuzuführende Masse an Trocknungsluft ist

$m_L = \frac{w_L \cdot F}{v_L} = \frac{350 \text{ m}^3/\text{h} \cdot 100 \text{ m}^2}{0,86 \text{ m}^3/\text{kg}}$ ,  
 $m_L = 40700 \text{ kg/h}$ .

Die relative Feuchte der Luft, die sich im hygroscopischen Gleichgewicht mit dem Gut vom Anfangsfeuchtegehalt  $U_1 = 40\%$  befindet, ist nahezu  $\varphi_L = 100\%$ . Die Abkühlung der Luft ist daher bei adiabatischem Trocknungsverlauf gleich der psychrometrischen Temperaturdifferenz

$\Delta\theta_{ps} = 25^\circ - 20^\circ = 5^\circ \text{C}$ .

Mit den Gl. (8) und (8a) ergibt sich die Trocknungsgeschwindigkeit

$\frac{dm_s}{dt} = \frac{m_L \cdot c_{pL} \cdot \Delta\theta_{ps}}{(X_1 - X_{gt}) \cdot i_D}$ ,  
 $\frac{dm_s}{dt} = \frac{40700 \cdot 0,24 \cdot 5}{(0,67 - 0,177) \cdot 600} = 164 \text{ kg T.S./h}$ .

Nach Bild 4 ist für den herrschenden Luftzustand die entsprechende Halbwertszeit

$t_{1/2} = 10 \text{ h}$

und damit nach Gl. (8b) die Masse an Trockensubstanz je Schichteinheit

$m_s^* = 10 \cdot 164$ ,  
 $= 1640 \text{ kg T.S./Schichteinheit}$ .

Die gesamte im Gut enthaltene Masse an Trockensubstanz  $m_s$  ist bei 33300 kg Naßgut und einem Anfangsfeuchtegehalt  $U_1 = 40\%$

$m_s = 0,6 \cdot 33300 = 20000 \text{ kg T.S.}$ .

Damit wird die Zahl der Schichteinheiten nach Gl. (9)

$D = \frac{m_s}{m_s^*} = \frac{20000 \text{ kg T.S.}}{1640 \text{ kg T.S./Schichteinheit}}$ ,  
 $D = 12,2$  Schichteinheiten.

Mit den errechneten Werten von  $XV$  und  $D$  erhält man aus Bild 3 oder nach Gl. (11) die Zahl der Zeiteinheiten  $Y$ , die erforderlich sind, damit die 12,2te Schichteinheit (die Einheit mit dem höchsten Feuchtegrad) das Feuchtegrad-Verhältnis  $XV = 0,148$  erreicht. Der Wert von  $Y$  ist nach Bild 3

$Y = 14,7$  Zeiteinheiten.

Die tatsächliche Zeit je Zeiteinheit ist die nach Bild 5 ermittelte Halbwertszeit  $t_{1/2}$ . Im vorliegenden Beispiel ist demnach die gesamte Trocknungszeit  $t$  in Stunden

$t = 10 \text{ h} \cdot 14,7$ ,  
 $t = 147 \text{ h}$ .

Aus Bild 3 ist ebenfalls ersichtlich, daß zu dem Zeitpunkt, an dem die oberste Schicht des Heues den gewünschten Feuchtegrad erreicht, der größte Teil des restlichen Heues bis auf den Gleichgewichts-Feuchtegrad  $X_{gt}$  heruntergetrocknet ist.

Da die meisten Schichteinheiten nicht mehr länger trocknen, ist die Verdunstungszone nahezu vollständig durch die Heuoberfläche hindurchgewandert. Der Trocknungswirkungsgrad ist zu dieser Zeit sehr niedrig, da nur in der 9., 10., 11. und 12. Schichteinheit eine spürbare Trocknung erfolgt.

Betrachtet man den Trocknungsvorgang zu einem früheren Zeitpunkt, beispielsweise nach 5 Zeiteinheiten oder 50 Stunden, dann kann man folgendes feststellen: die oberste Schichteinheit ( $D = 12,2$ ) hat kaum mit der Trocknung begonnen und die unterste ( $D = 0$ ) hat das Feuchtegleichgewicht noch nicht erreicht ( $XV = 0,07$ ). Die Verdunstungszone verläuft vollständig im Heu, und die von der Trocknungsluft abgegebene Wärme wird nahezu vollständig zur Wasserverdunstung ausgenutzt.

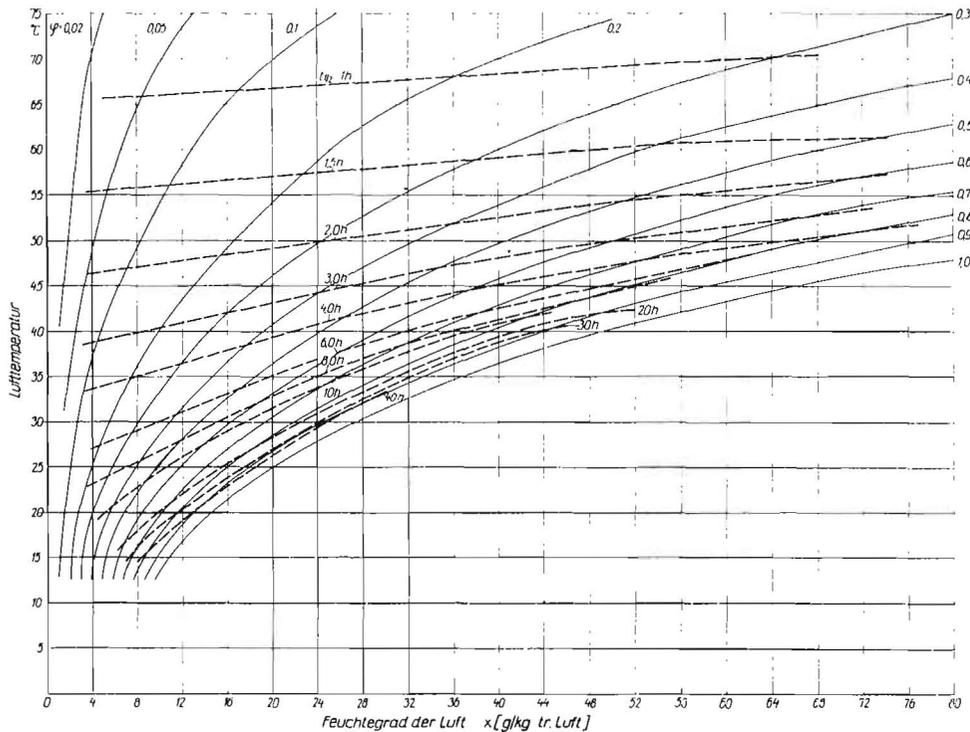


Bild 5: Die Halbwertszeit  $t_{1/2}$  von Luzerne für Temperaturen der Trocknungsluft zwischen 15°C und 70°C, ermittelt bei der Trocknung dünner Schichten (Werte nach [33])

**Beispiel 2**

Es soll die Auswirkung einer Vorwärmung der Trocknungsluft in Beispiel 1 auf  $\theta_i = 50^\circ\text{C}$  untersucht werden. Hierbei wird die Annahme getroffen, daß die Trocknungsluft nach dem Ventilator erhitzt und durch eine Drehzahlerhöhung derselbe Luftmassendurchsatz erreicht wird.

Es ergibt sich folgender gegenüber Beispiel 1 abgeänderter Rechengang:

Trockenthermometer-Temperatur der Luft	$\theta_i = 50^\circ\text{C}$
Feuchttthermometer-Temperatur der Luft	$\theta_f = 25,6^\circ\text{C}$
Abkühlung der Luft bei adiabatischem Trocknungsverlauf (Psychrometrische Temperatur-differenz)	$\Delta\theta_{ps} = 24,4^\circ\text{C}$
Relative Feuchte der Luft am Eintritt	$\varphi_{Lr} = 15\%$

Für den bestehenden Zustand der Trocknungsluft ist nach Bild 4 der

Gleichgewichts-Feuchtegehalt	$U_{gt} = 6,5\%$
Gleichgewichts-Feuchtegrad	$X_{gt} = 7,0\%$
und nach Bild 5 ist die Halbwertszeit	$t_{1/2} = 1,8\text{ h}$

Der gewünschte Endzustand der Trocknung ist als Feuchtegrad-Verhältnis nach Gl. (5)

$$XV = \frac{0,25 - 0,07}{0,67 - 0,07} = 0,30$$

Das bestehende Wärme-Gleichgewicht ist nach Gl. (8)

$$40700 \cdot 0,24 \cdot (50 - 25,6) = (0,67 - 0,07) \cdot \frac{dm_s}{dt} \cdot 600$$

und damit die Trocknungsgeschwindigkeit nach Gl. (8a)

$$\frac{dm_s}{dt} = 665\text{ kg T.S./h}$$

Nach Gl. (8b) ist die Masse an Trockensubstanz je Schichteinheit

$$m_s^* = 1,8\text{ h} \cdot 665\text{ kg T.S./h} = 1190\text{ kg T.S./Schichteinheit}$$

Damit wird die Zahl der Schichteinheiten nach Gl. (9)

$$D = \frac{20000\text{ kg T.S.}}{1190\text{ kg T.S./Schichteinheit}} = 16,8\text{ Schichteinheiten}$$

Für die Werte  $XV = 0,3$  und  $D = 16,8$  erhält man aus Bild 3 die Zahl der Zeiteinheiten  $Y$  zu

$$Y = 12\text{ Zeiteinheiten}$$

und mit der Halbwertszeit  $t_{1/2}$  ergibt sich die gesamte Trocknungszeit  $t$  in Stunden

$$t = 1,8\text{ h} \cdot 12 = 21,6\text{ h}$$

Die Trocknungszeit wurde, wie zu erwarten war, sehr stark vermindert und zwar auf ungefähr  $\frac{1}{6}$  der Zeit, die bei der Trocknung mit Kaltluft erforderlich war. Die Kosten für die Luftvorwärmung sind jedoch meist größer als die Einsparung bei den Stromkosten für den Ventilator aufgrund der verringerten Laufzeit in Beispiel 2. Es sollen hier aber noch die anderen Folgen untersucht werden, die durch die Anwendung höherer Lufttemperaturen bei der Trocknung entstehen. Zu dem Zeitpunkt, da die oberste Schicht genügend getrocknet ist, hat der größte Teil des übrigen Heues das hygroscopische Gleichgewicht erreicht. Dies lag für das Beispiel 2 bei einem Feuchtegehalt von  $U_{gt} = 6,5\%$  im Vergleich zu  $U_{gt} = 15\%$  bei Beispiel 1. Dies bedeutet eine starke Übertrocknung des Heues in Beispiel 2.

Bei der Anwendung höherer Temperaturen für die Trocknung mit vorgewärmter Luft entsteht häufig noch ein anderes Problem, und zwar das der Kondensschichtbildung. Das in den zuerst trocknenden Schichten verdunstete Wasser kondensiert in den nachfolgenden (in Strömungsrichtung gesehen) noch feuchten und kühleren Schichten. Eine solche Rekondensation kann eine beträchtliche Wiederbefeuchtung und Schädigung des Gutes bewirken. Im Beispiel 2 erreicht die Trocknungsluft, die während eines großen Teiles der Trocknungszeit durch die noch feuchten Schichten strömt, eine Temperatur von  $25,6^\circ\text{C}$  am Feuchttthermometer. Wenn das Naßgut mit einer wesentlich niedrigeren Temperatur in die Anlage gebracht wird, oder wenn vorgewärmte Luft mit höherer Feuchttthermometer-Temperatur hindurchgeschickt wird, dann kommt es zu Kondensationserscheinungen, bis die Temperatur des Naßgutes die des Feuchttthermometers erreicht hat. Starke Kondensationserscheinungen und Schäden am Gut können auftreten, wenn sehr große Gutschichten mit niedriger spezifischer Luftmenge bei hohen Temperaturen getrocknet werden. Dieses Problem tritt besonders in den kühlen Herbstmonaten in Erscheinung, wenn das zu trocknende Gut (beispielsweise Körnermais) bei niedrigen Außentemperaturen geerntet wird.

Bei der Lagertrocknung werden die meisten landwirtschaftlichen Erntegüter mit Kaltluft oder leicht vorgewärmter Luft getrocknet,

um eine Übertrocknung der Güter und Kondensationserscheinungen zu vermeiden. Wie aus den Beispielen hervorgeht, erfordert diese Trocknungsart lange Trocknungszeiten. Anlagen für die Lagertrocknung müssen so ausgelegt werden, daß die Trocknung abgeschlossen ist, bevor die Schädigungen durch Mikroorganismen zu groß werden. FRUDDEN [10] erwähnt frühere amerikanische Untersuchungen von JENNINGS [34], die den Einfluß der Trocknungszeit auf die Schimmelbildung im Heu zeigen. Hiernach sollte zur Vermeidung von Schimmelbildungen die zu trocknende Heuschicht innerhalb von sieben Tagen einen Endfeuchtegehalt  $U_2$  von 10% oder innerhalb von vier Tagen einen mittleren Feuchtegehalt  $U_m$  von 20% erreicht haben. Die praktischen Erfahrungen in den USA haben gezeigt, daß bei der Kaltlufttrocknung Heu mit einem Anfangsfeuchtegehalt  $U_1$  von 35 bis 40% innerhalb von neun Tagen [15; 21] fertiggetrocknet sein muß. Geht man zu einem höheren Anfangsfeuchtegehalt über, dann muß jedoch das Heu zur Vermeidung von Schimmelbildung wesentlich rascher getrocknet werden. Eine Änderung im Feuchtegehalt des Gutes hat einen ähnlichen Einfluß auf die anzustrebende Trocknungszeit, wie die im feuchten Heu herrschenden Lufttemperaturen, und zwar vergrößert sich die Zeitspanne bis zur Schimmelbildung mit fortschreitender Trocknung. Bild 6 zeigt den Einfluß der Lufttemperatur auf den Zeitpunkt der Schimmelbildung bei Heu mit einem Anfangsfeuchtegehalt  $U_1$  von 50 bis 60% [15]. Es besteht ferner noch eine starke Abhängigkeit von der relativen Feuchte der das Heu umgebenden Luft. Wie durch andere Untersuchungen [35] bestätigt wird, herrschen bei Luft- und Guttemperaturen von 30 bis 35° C und einem Feuchtegehalt im Gut von 24 bis 40% optimale Bedingungen für die Schimmelbildung bei Heu. Dies ist besonders bei der Trocknung mit vorgewärmter Luft zu beachten. Hier können bei zu dicken Gutschichten die noch feuchten Zonen längere Zeit von gesättigter, warmer Luft durchströmt werden. Bei der Anwendung vorgewärmter Luft muß daher die Trocknung in zwei bis drei Tagen beendet sein. Die Trocknung von Getreide mit einem Anfangsfeuchtegehalt bis zu 25% muß nach amerikanischen und englischen Untersuchungen in etwa zehn bis vierzehn Tagen abgeschlossen sein. Deutsche Untersuchungen [36] ergaben eine höchstzulässige Trocknungszeit von 10 Tagen für Getreide mit einem Anfangsfeuchtegehalt  $U_1$  bis zu 22%. Bei höheren Feuchtegehalten und vegetativ feuchtem Getreide wird eine kürzere Trocknungszeit von sechs Tagen empfohlen, um ein Schlechtwerden des Getreides zu verhindern. Werden größere Trocknungsleistungen benötigt, oder müssen Güter mit höherem Anfangsfeuchtegehalt getrocknet werden, dann sind höhere Temperaturen der Trocknungsluft und eine größere spezifische Luftmenge erforderlich. Zur Vermeidung der Übertrocknung und Kondensation sollten kleinere Trocknungsschichten (weniger als drei bis fünf Schichteinheiten) angewendet werden, und das Gut sollte nach der Trocknung (bei Durchlauf- und bei Chargentrocknern) vor der Einlagerung durch einen Fördervorgang (mechanisch bei Heu und Getreide oder pneumatisch bei Getreide) gut durchmischt werden. Die Anzahl der Schichteinheiten ergibt sich aus der folgenden Gleichung

$$D = \frac{m_s \cdot (X_1 - X_{gt}) \cdot i_D}{t_{1/2} \cdot m_L \cdot c_{pL} \cdot \Delta\theta} \quad (12)$$

Wie aus Gl. (12) ersichtlich ist, beeinflussen bei einer bestimmten Trocknungsschicht noch andere Faktoren außer der Masse an Trockensubstanz die Anzahl der Schichteinheiten. Sie werden ver-

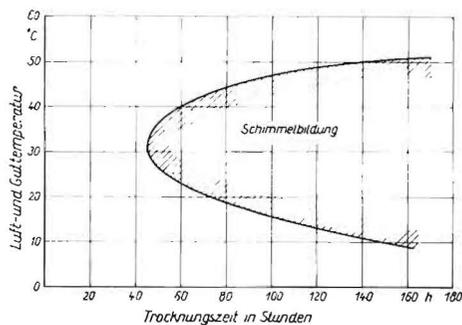


Bild 6: Die Schimmelbildung bei Heu in Abhängigkeit von der Temperatur im Heustock und von der Trocknungszeit (nach [15])

mindert durch einen höheren Luftbedarf  $m_L$ . Höhere Temperaturen der Trocknungsluft führen dazu, die Halbwertszeit  $t_{1/2}$  sowie den Gleichgewichts-Feuchtegrad  $X_{gt}$  zu vermindern und die Temperaturdifferenz zwischen Frischluft und Abluft zu erhöhen. Wie aus Beispiel 2 hervorgeht, in dem der Luftbedarf des Trockners konstant gehalten wurde, ist die tatsächliche Folge einer Temperaturerhöhung ein Anwachsen der Zahl von Schichteinheiten.

### Die Berechnung von Getreidetrocknungsanlagen mit hohen Lufttemperaturen

Wie bereits früher angedeutet, wird bei den Trocknern mit hohen Frischlufttemperaturen, bei denen eine Luftvorwärmung um mehr als 10° C erfolgt, eine gewisse Mischung des getrockneten Gutes vor der Lagerung erforderlich. Dies hat den Zweck, übertrocknetes Gut mit zu wenig getrocknetem zu mischen. Bei einem etwa gleichmäßig getrockneten Gut, das innerhalb der Schicht keine größeren Unterschiede im Feuchtegehalt als 10% absolut gesehen aufweist, erfolgt ein Feuchteausgleich in den durchmischten Körnern, bevor das zu wenig getrocknete Gut verdirbt.

Die Berechnung solcher Trocknungsanlagen wird gewöhnlich so durchgeführt, daß das Ende des Trocknungsvorganges durch den mittleren Feuchtegrad  $X_m$  bestimmt wird. Bei einer anderen Berechnungsmethode wird das Ergebnis durch den höchstzulässigen Endfeuchtegrad festgelegt. Der erstgenannte Verfasser dieses Beitrages fand es für die Berechnung nach dem mittleren Feuchtegrad günstig, die Kurven von HUKILL so abzuändern, daß das mittlere Feuchtegrad-Verhältnis  $XV_m$  direkt abgelesen werden kann. In Bild 7 sind diese Kurven dargestellt. Sie bringen die Zahl der Schicht- und Zeiteinheiten, die in üblicher Weise bestimmt wurden, in Beziehung zu dem mittleren Feuchtegrad-Verhältnis  $XV_m$  von jeder Anzahl  $D$  von Schichteinheiten. Die folgende, von Gl. (11) abgeleitete Formel wird durch die Kurven in Bild 7 dargestellt und kann zur Erweiterung der Kurven verwendet werden.

$$XV_m = \frac{X_m - X_{gt}}{X_1 - X_{gt}} = \frac{1}{D} \left[ \frac{2}{1 + 2^r} + \frac{2^2}{2^2 + 2^r - 1} + \dots \dots - \frac{2^p}{2^p + 2^r - 1} \right] \quad (13)$$

Es ist vorteilhaft, den mittleren Trocknungswirkungsgrad  $\eta_m$  der vorgeschlagenen Berechnungsmethode in folgender Form zu bestimmen:

$$\eta_m = \frac{Q_Y}{Q_Y} \cdot 100 (\%) \quad (14)$$

Hierin bedeuten:

$Q_Y$  = bei der Trocknung von  $m_s$  kg Trockensubstanz in  $Y$  Zeiteinheiten umgewandelte Wärme;

$Q_Y$  = für Umwandlung in  $Y$  Zeiteinheiten verfügbare Wärme.

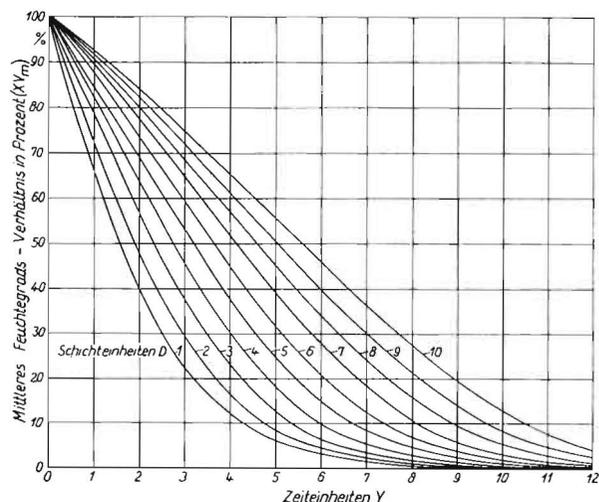


Bild 7: Abgeändertes Hukill-Diagramm zur Bestimmung des mittleren Feuchtegrad-Verhältnisses  $XV_m$

Es stellt die berechneten Beziehungen zwischen Trocknungszeit, mittlerem Feuchtegrad des Gutes und der Dicke der Trocknungsschicht dar

Für die Berechnung der beiden Größen gelten folgende Beziehungen:

$$Q_T = (X_1 - X_m) \cdot m_s \cdot i_D \quad (14a)$$

mit

$X_m = f(Y)$  und

$m_s =$  Masse an Trockensubstanz in der Anlage in kg.

Das Gleichgewicht der Wärme ist nach Gl. (8)

$$m_L \cdot 0,24 \cdot \Delta\theta_{\max} = (X_1 - X_m) \cdot \frac{dm_s}{dt} \cdot i_D;$$

aus den Gl. (8b) und (9) folgt

$$\frac{dm_s}{dt} = \frac{m_s^*}{t_{1/2}} = \frac{m_s}{D \cdot t_{1/2}}$$

Da  $Y$  Zeiteinheiten  $= Y \cdot t_{1/2}$  Stunden sind, wird die verfügbare Wärme je Stunde

$$Q_T = (X_1 - X_m) \cdot \frac{m_s}{D \cdot t_{1/2}} \cdot i_D,$$

und die verfügbare Wärme je  $Y$  Zeiteinheiten ist

$$Q_Y = (X_1 - X_m) \cdot \frac{m_s \cdot Y \cdot i_D}{D} \quad (14b)$$

Damit erhält man folgende Gleichung für den mittleren Trocknungswirkungsgrad

$$\eta_m = \frac{Q_T}{Q_Y} \cdot 100 = \frac{(1 - X V_m) \cdot D}{Y} \cdot 100 (\%) \quad (15)$$

Gl. (15) liefert zusammen mit Bild 7 eine günstige Prüfungsmöglichkeit des mittleren Trocknungswirkungsgrades und der Trocknungszeit, um ein bestimmtes, mittleres Feuchtegrad-Verhältnis zu erreichen. Es ist zu beachten, daß der durch Gl. (15) angezeigte Trocknungswirkungsgrad  $\eta_m$  einen Mittelwert für den Trocknungsvorgang in  $Y$  Zeiteinheiten darstellt. Man erhält also nicht den augenblicklichen Wirkungsgrad zur Zeit  $Y$ . Falls der letztere gewünscht wird, kann man die Kurven in Bild 2 zur Zeit  $Y$  graphisch differenzieren, unter Verwendung aller Kurven einschließlich dem zutreffenden Wert von  $D$ . Die Kurve  $D = 0$  wird nicht benutzt, da sich die Dicke dieser Schicht dem Wert Null nähert. Wurde die mittlere Trocknungsgeschwindigkeit  $\frac{dX}{dt}$  in kg abgeführtes Wasser je Stunde aller Schichteinheiten bestimmt, dann läßt sich mit Hilfe einer Wärmebilanz die Ablufttemperatur  $\theta_a$  bestimmen.

Es ist

$$m_L \cdot 0,24 \cdot (\theta_1 - \theta_a) = \frac{dX}{dt} \cdot i_D,$$

wobei  $\theta_1$  die Trockenthermometer-Temperatur der Luft ist. Der augenblickliche Trocknungswirkungsgrad errechnet sich nach der Formel

$$\eta = \frac{\theta_1 - \theta_a}{\theta_1 - \theta_{gt}} \quad (17)$$

Hierbei ist  $\theta_{gt}$  die Temperatur der Abluft, die mit dem Anfangsfeuchtegehalt des Gutes im Gleichgewicht steht. Gewöhnlich ist dies die Temperatur des Feuchttthermometers.

Das obige Verfahren eignet sich gut zur vorherigen Bestimmung der Ablufttemperatur. Dies ermöglicht, Kondensationserscheinungen im Gut zu erfassen oder Messungen der Ablufttemperatur zur Bestimmung des Trocknungsendpunktes zu verwenden. Diese Erkenntnis wird in Amerika zur automatischen Steuerung einiger Getreidetrockner benutzt. Bei Anlagen für die Lagertrocknung oder Satztrocknung kann die Wärmezufuhr automatisch abgeschaltet werden, wenn die Ablufttemperatur bis zu einem gewissen Punkt angestiegen ist. Bei Durchlauftrocknern verändert sich die Verweilzeit im Trockner so, daß die Ablufttemperatur nahe am Ende der Trocknungsschicht den gewünschten Temperaturpegel erreicht. Die Steuerung von Getreidetrocknungsanlagen über die Ablufttemperatur ist sehr wirtschaftlich und einfach. Sie erfordert jedoch eine gelegentliche Überprüfung durch Bestimmen des Feuchtegehaltes einzelner Proben mit dem Feuchtemeßgerät. Die Beziehung zwischen Feuchtegehalt und Ablufttemperatur wird teilweise durch die Wetterverhältnisse und durch die Trocknungscharakteristik des Gutes beeinflusst. Eine zuverlässigere,

jedoch teurere Regelanlage wurde vor kurzem von dem erstgenannten Verfasser dieses Beitrages und seinen Mitarbeitern an der Purdue-Universität, G. L. ZACHARIAH [37] und D. L. GRAHAM im Rahmen eines Forschungsauftrages des US-Department of Agriculture entwickelt. Dieses Steuerungssystem zieht automatisch eine Probe von einem Durchlauftrockner, wiegt sie, bestimmt den Feuchtegehalt nach einem dielektrischen Meßverfahren und stellt entsprechend den Körnerdurchfluß ein, um die gewünschte Verweilzeit für das Getreide zu erhalten. Bei dem Entwurf dieser Regelanlage wurde die vorhergehend beschriebene Berechnungsmethode benutzt, um auf mathematischem Wege die Wirkungsweise der Getreidetrocknungsanlage nachzuahmen. Durch Kombinieren mit einem mathematischen Kontrollsystem konnte das gemeinsame dynamische Verhalten vom Trockner und der Regelanlage mit Hilfe einer elektronischen Rechenanlage vorausgesagt werden [37].

Das folgende Beispiel veranschaulicht die Anwendung der HUKILL-Analyse bei der Berechnung einer Getreidetrocknungsanlage für hohe Temperaturen.

### Beispiel 3

Es soll Weizen mit einem Anfangsfeuchtegehalt von  $U_1 = 25\%$  auf einen mittleren Feuchtegehalt von  $U_m = 13\%$  heruntergetrocknet werden. Die Trocknungsluft wird auf  $80^\circ\text{C}$  vorgewärmt, ausgehend von dem Anfangszustand: Temperatur  $20^\circ\text{C}$  und relative Feuchte  $50\%$ . Die aus einem Versuch sich ergebenden Berechnungsbedingungen erfordern einen spezifischen Luftbedarf von  $3000 \text{ m}^3$  Luft/h  $\text{m}^3$  Getreide und eine Gutschicht von  $30 \text{ cm}$  in Richtung der Luftströmung. Ein Trocknungsversuch mit diesem Weizen ergab, daß seine Halbwertzeit  $0,6$  Stunden beträgt. Wie lange dauert die Trocknung dieser Schüttgutschicht?

Berechnung: Es ist günstiger mit einer Flächeneinheit ( $1 \text{ m}^2$ ) für die Körnerschicht zu arbeiten, da die Trocknungszeit unabhängig von der Schichtfläche ist, wenn der Luftbedarf bezogen auf die Flächeneinheit bestimmt wird. Die Dichte der Trocknungsluft ist  $\rho_L = 1,04 \text{ kg/m}^3$ . Die Feuchttthermometer-Temperatur ist  $30^\circ\text{C}$ . Volumen je  $\text{m}^2$  Anlagengrundfläche  $= 0,3 \cdot 1 = 0,3 \text{ m}^3$  Getreide.

Es ist der spezifische Luftbedarf

$$\begin{aligned} m_L &= 3000 \text{ m}^3/\text{h m}^3 \cdot 1,04 \text{ kg/m}^3 \cdot 0,3 \text{ m}^3/\text{m}^2, \\ m_L &= 970 \text{ kg/h m}^2. \end{aligned}$$

Der Gleichgewichts-Feuchtegrad  $X_{gt}$  des Weizens bei dem festgelegten Zustand der Trocknungsluft von  $80^\circ\text{C}$  Temperatur und  $2,5\%$  relativer Feuchte, wird wie folgt nach Gl. (7) bestimmt:

$$\begin{aligned} 1 - \varphi_L &= e^{-e \cdot T \cdot X_{gt}^n}, \\ 1 - 0,025 &= e^{-10,1 \cdot 10^{-7} \cdot 353 \cdot X_{gt}^{3,03}}, \\ X_{gt}^{3,03} &= 71,5, \\ X_{gt} &= 4,1\%. \end{aligned}$$

Eine ähnliche Rechnung ergibt, daß die Luft, die sich im hygroskopischen Gleichgewicht mit Gut von dem Anfangsfeuchtegrad  $X_1 = 33,3\%$  befindet, eine relative Feuchte von nahezu  $100\%$  besitzt.

Deshalb ist die Abkühlung der Trocknungsluft (entsprechend der psychrometrischen Temperaturdifferenz)

$$\Delta\theta_{ps} = 80 - 30 = 50^\circ\text{C},$$

und nach Gl. (8)

$$\begin{aligned} m_L \cdot 0,24 \cdot \Delta\theta_{ps} &= (X_1 - X_m) \cdot \frac{dm_s}{dt} \cdot i_D, \\ 970 \cdot 0,24 \cdot 50 &= (0,333 - 0,041) \cdot \frac{dm_s}{dt} \cdot 600^s, \\ \frac{dm_s}{dt} &= 66,1 \text{ kg T.S./h}. \end{aligned}$$

<sup>s)</sup> Die Verdampfungsenthalpie von freiem Wasser ist kleiner als  $600 \text{ kcal/kg}$  bei  $50^\circ\text{C}$ . Aber bei der Getreidetrocknung mit hohen Temperaturen können einige der Körner tief genug heruntergetrocknet sein (unter  $U_{gt} = 15\%$ ), wobei die Desorptionenthalpie je kg verdunstetes Wasser größer ist als bei freiem Wasser. Der Wert  $600 \text{ kcal/kg}$  ist deshalb ein Näherungswert.

Die Masse an Trockensubstanz je 1 m<sup>2</sup> Anlagengrundfläche ist

$$m_s = 0,3 \text{ m}^3 \cdot 660 \text{ kg T.S./m}^3, \\ = 198 \text{ kg T.S.}$$

Nach Gl. (8b) wird die Gutmenge

$$m_s^* = \frac{dm_s}{dt} \cdot t_{1/2} = 66,1 \cdot 0,6, \\ = 39,6 \text{ kg T.S./Schichteinheit};$$

und nach Gl. (9)

$$D = \frac{m_s}{m_s^*} = \frac{198}{39,6}, \\ D = 5,0 \text{ Schichteinheiten.}$$

Das gewünschte mittlere Feuchtegrad-Verhältnis ist nach Gl. (13)

$$XV_m = \frac{X_m - X_{gt}}{X_1 - X_{gt}}, \\ XV_m = \frac{0,149 - 0,041}{0,333 - 0,041} = 0,37,$$

oder in Prozent

$$XV_m = 37\%.$$

Mit den Werten von  $XV_m$  und  $D$  erhält man aus Bild 7 die Zahl der Zeiteinheiten, die erforderlich sind, damit die 5,0te Schichteinheit das mittlere Feuchtegrad-Verhältnis  $XV_m = 37\%$  erreicht. Der Wert von  $Y$  ist nach Bild 7

$$Y = 4,0 \text{ Zeiteinheiten.}$$

Die tatsächliche Zeit je Zeiteinheit ist die Halbwertszeit  $t_{1/2}$  und damit die gesamte Trocknungszeit  $t$

$$t = Y \cdot t_{1/2} = 4 \cdot 0,6, \\ t = 2,4 \text{ Stunden.}$$

Der mittlere Trocknungswirkungsgrad zu dieser Zeit ist nach Gl. (15)

$$\eta_m = \frac{(1 - 0,37) \cdot 5}{4} \cdot 100, \\ \eta_m = 79\%.$$

Aus Bild 3 ist zu entnehmen, daß das größte Feuchtegrad-Verhältnis bei 4 Zeiteinheiten  $XV_{\max} = 0,67$  ist und der Kleinstwert (bei  $D = 1$ ) etwa  $XV_{\min} = 0,12$  beträgt. Aus den beiden Grenzwerten  $XV_{\max}$  und  $XV_{\min}$  ergeben sich mit Gl. (5) die Feuchtegradswerte im Bereich  $X_{\max} = 0,237$  und  $X_{\min} = 0,076$  oder umgerechnet  $U_{\max} = 19,2\%$  und  $U_{\min} = 7,1\%$  bei einem gewünschten Mittelwert von  $U_m = 13\%$ . Dies ist ein starkes Maß von Ungleichförmigkeit im Feuchtegehalt des Gutes. Sie kann durch Vergrößern des Luftbedarfes oder durch Vermindern der Schichtdicke verringert werden. Beide Maßnahmen vermindern die Anzahl der Schichteinheiten [s. Gl. (12)] und verbessern die Gleichförmigkeit im Feuchtegehalt, aber der Gesamtwirkungsgrad wird hierbei verschlechtert. Auch bei einer größeren Zahl von Schichteinheiten kann eine gute Gleichmäßigkeit in der Verteilung der Gutfeuchte erzielt werden, wenn das Getreide während der Trocknung mechanisch durchmischt wird. Dies ist in der Praxis so gelöst, daß die unteren Körner (vom Boden der Trocknungsanlage) nach oben zurückgefördert werden. Eine andere Möglichkeit besteht darin, die Körner über Dachreiter hinwegzuführen, um eine Mischung des Getreides zu erreichen, wenn es durch den Schüttbehälter fließt. Bei Durchlauftrocknern mit mehrmaligem Gutdurchgang sollte darauf geachtet werden, daß die Körner durch das wiederholte Fördern keine unzulässigen mechanischen Beschädigungen erfahren.

Der Konstrukteur kann verschiedene Kombinationen der einzelnen Einflußfaktoren wie Luftbedarf, Schichtdicke, Anfangsfeuchtegehalt und Lufttemperatur bei der Berechnung eines Trockners ausprobieren. Zur Abkürzung der langwierigen Rechenarbeit beim Testen der vielen Kombinationen haben amerikanische Studenten unter Leitung vom erstgenannten Verfasser dieses Beitrages eine elektronische Rechenanlage zu Hilfe genommen. Ferner laufen zur Zeit Forschungsarbeiten, um mit Hilfe der dynamischen Programmierungstechnik, unter Benützung einer elektronischen Rechenanlage, zu einem optimalen Trocknerentwurf zu kommen.

## Wie zuverlässig ist die Berechnungsmethode nach HUKILL?

Das Rechenverfahren nach HUKILL ist zugegebenermaßen auf eine einfache, vielleicht zu stark vereinfachte mathematische Gleichung von einem Trocknungsprozeß mit sinkender Trocknungsgeschwindigkeit begründet [s. Gl. (2)–(5)]. Die möglichen Fehlerquellen wurden schon erwähnt.

Es wurden viele Vergleiche von Ergebnissen des Berechnungsverfahrens mit wirklichen Trocknungsdaten durchgeführt, aber nicht veröffentlicht. Ein begrenzter Vergleich wurde von HUKILL in seiner Original-Arbeit [2] durchgeführt. Bei diesem Vergleich kam er zu dem Schluß, daß das Ergebnis der Berechnung die Trocknungszeit für Sorghum zu niedrig angibt. Eine sehr eingehende Abschätzung der Berechnungsmethode wurde von KOFÖED [38] durchgeführt. Bei diesem Vergleich hat er die HUKILL-Analyse abgeändert und die Schichteinheit  $D = 1$  anstatt  $D = 0$  als die experimentelle Grundlage des Rechenverfahrens verwendet. Er schloß daraus, daß die Berechnungsmethode unter diesen Bedingungen bis zu dem Wert  $D = 6$  genau war, bei größeren Werten von  $D$  aber mehr abwich.

Das Verfahren von HUKILL scheint im allgemeinen eine gute Abschätzung der Arbeitsweise von einem gegebenen Trockner zu ermöglichen. Es ist besonders zweckmäßig, vergleichende Angaben zu machen, wenn gewisse Berechnungskonstanten verändert wurden. Die Genauigkeit kann durch Trocknungsversuche mit dünnen Schichten und vielleicht durch Versuche zur Bestimmung des Gleichgewichts-Feuchtegehalts mit den speziell zu trocknenden Körnern verbessert werden.

## Zusammenfassung

Es wird über ein Verfahren zur Berechnung landwirtschaftlicher Trocknungsanlagen berichtet. Einleitend sind die allgemeinen Trocknungsgleichungen und die wichtigsten Einflußfaktoren wie Trocknungswirkungsgrad, biologische Wärmeerzeugung und erforderliche Desorptionenthalpie behandelt. Die Überlegungen zur Trocknung sehr dünner Schüttgutschichten führen zur Ableitung neuer Kenngrößen, die in der nachfolgend beschriebenen Theorie der Trocknung dicker Schüttgutschichten wiederkehren.

Eine theoretisch abgeleitete Formel zur Bestimmung von Feuchtegleichgewichtswerten wird beschrieben. Für das Berechnungsverfahren zur Trocknung dicker Schüttgutschichten nach HUKILL werden dimensionslose Größen definiert, so daß mit den dimensionslosen Kurven des HUKILL-Diagramms gerechnet werden kann. Zwei Beispiele veranschaulichen die praktische Anwendung dieses Berechnungsverfahrens bei der Trocknung von Luzerneheu mit Kaltluft und vorgewärmter Luft. Die Ergebnisse werden kritisch untersucht und wichtige Faktoren besonders betrachtet, beispielsweise der Einfluß des Feuchtegehaltes auf die Trocknungszeit.

Eine weitere Anwendungsmöglichkeit der Theorie ist die Berechnung von Getreidetrocknungsanlagen mit hohen Lufttemperaturen. Das HUKILL-Diagramm wurde hierfür in seiner Form abgeändert, damit eine Berechnung nach dem mittleren Feuchtegrad durchgeführt werden kann. Verschiedene Steuer- und Regelungseinrichtungen für Getreidetrocknungsanlagen werden beschrieben. Ein Beispiel zeigt die Anwendung des abgeänderten Berechnungsverfahrens. Abschließend wird eine kritische Betrachtung der Berechnungsmethode nach HUKILL durchgeführt.

## Schrifttum

- [1] Trocknungstechnische Grundbegriffe. (VDMA-Einheitsblätter, Nr. 24351.) Beuth-Vertrieb, Berlin 1963
- [2] HUKILL, W. V.: Basic principles in drying corn and grain sorghum. Agricultural Engineering 28 (1947), S. 335–340
- [3] HUKILL, W. V.: Drying of grain. In: J. A. ANDERSON und A. V. ALCOCK: Storage of cereal grains and their products. American Association of Cereal Chemists, St. Paul/Minnesota 1954, S. 402–435
- [4] SEGLER, G.: Technische Probleme der Belüftung von landwirtschaftlichen Ernteprodukten. In: Vorträge der wissenschaftlichen Jahrestagung 1959 des Instituts für Landtechnik Potsdam Bornim (Tagungsberichte Nr. 22) Berlin 1959, S. 135–154
- [5] SPRENGER, J. J. I.: Vorschlag für die Berechnung von Trocknern, insbesondere von Darren. De Ingenieur 69 (1957), (Ch. 27–36)
- [6] KRÜSCHER, O.: Die wissenschaftlichen Grundlagen der Trocknungstechnik. Springer Verlag, Berlin/Göttingen/Heidelberg 1956
- [7] KRÖLL, K.: Trockner und Trocknungsverfahren. Springer Verlag, Berlin/Göttingen/Heidelberg 1959
- [8] LITZENBERGER, F.: Systematik der Trockner für rieselfähiges Gut. Grundlagen der Landtechnik Heft 16. Düsseldorf 1963, S. 40–52
- [9] BUSSEN, R.: Die Grundzüge der landwirtschaftlichen Trocknung. Grundlagen der Landtechnik Heft 15. Düsseldorf 1962, S. 46–52

- [10] FRUDDEN, C. E.: Factors controlling the rate of moisture removal in barn hay-curing systems. *Agricultural Engineering* 27 (1946), S. 109—111
- [11] MATTHIES, H. J.: Heutrocknung durch Kaltbelüftung. *Landtechnik* 7 (1952), S. 773—778
- [12] SEGLER, G.: Die Belüftungstrocknung von Raufutter. Sonderdruck aus „Landwirtschaftliche Woche 1956“. Bayerischer Landwirtschaftsverlag, München 1956
- [13] SEGLER, G.: Fortschritte in der Heubelüftungstechnik. *Landtechnik* 13 (1958), S. 590—594
- [14] DAWSON, J. E. und R. B. MCGRAVE: Respiration in hay as a source of heat for barn drying partially cured hay. *Agricultural Engineering* 27 (1946), S. 565—567
- [15] TERRY, C. W.: Relation of time and operating schedule to hay quality, mold development, and economy of operation. *Agricultural Engineering* 28 (1947), S. 141—144
- [16] HENDRIX, A. T.: Heat generated in chopped hay and its relation to the drying effect. *Agricultural Engineering* 28 (1947), S. 286—288
- [17] TERRY, C. W.: Some 1947 results of barn hay drying research. *Agricultural Engineering* 29 (1948), S. 208, 209, 214
- [18] SCHAPER, L. A., G. W. ISAACS und A. C. DALE: Evaluating heat available for drying in natural air. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers* 4 (1961), S. 140—141
- [19] SCHMIDT, J. L. und W. V. HUKILL: Summaries of wet bulb temperatures and wet bulb depressions for grain drier design. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers* 5 (1962), S. 151—152
- [20] JOHNSON, H. K. und A. C. DALE: Heat required to vaporize moisture. *Agricultural Engineering* 35 (1954), S. 705—709, 714
- [21] MILNE, C. M.: Functional requirements for drying hay. *Agricultural Engineering Department. — Purdue University Lafayette, Indiana 1954* (M. S. thesis). Werte auszugsweise veröffentlicht in *Agricultural Engineers Yearbook 1963*, St. Joseph/Michigan 1963
- [22] HENDERSON, S. M. und S. PABIS: Grain drying theory. I. Temperature effect on drying coefficient. *Journal of Agricultural Engineering Research* 6 (1961), S. 169—174; II. A Critical analysis of the drying curve for shelled maize. *Journal of Agricultural Engineering Research* 6 (1961), S. 272—277; III. The air/grain temperature relationship. *Journal of Agricultural Engineering Research* 7 (1962), S. 21—26; IV. The effect of airflow rate on the drying index. *Journal of Agricultural Engineering Research* 7 (1962), S. 85—89
- [23] Hygroscopicity of seeds (ASAE Data) *Agricultural Engineers Yearbook 1963*, St. Joseph/Michigan 1963
- [24] Equilibrium moisture content of various grains aus ASAE Data: *Engineering Data on grain storage*, *Agricultural Engineers Yearbook 1963*, St. Joseph/Michigan 1963
- [25] PAGE, G. E.: Factors influencing the maximum rates of air drying shelled corn in thin layers. (M. S. thesis). *Agricultural Engineering Department, Purdue University Lafayette, Indiana 1949*.
- [26] VAN REST, D. J.: Exposed layer drying rates of shelled corn and small grains. (M. S. thesis). *Agricultural Engineering Department, Purdue University Lafayette, Indiana 1958*. (Paper presented before ASAE by D. J. VAN REST and G. W. ISAACS at Chicago in December 1958)
- [27] RODRIGUEZ-ARIAS, J. H.: Desorption isotherms and drying rates of shelled corn in the temperature range of 40° to 140° F (4.5° bis 60° C) (Ph. D. thesis). *Michigan State University 1956* (Wertangaben siehe auch Literatur [29], S. 248)
- [28] SCHNEIDER, A.: Untersuchungen über das Trocknungsverhalten von Luzerne und Zuckerrübenblatt in Einzelschichten und durchströmten Schüttungen. *Wärme* 69 (1963), S. 81—92
- [29] HALL, C. W.: *Drying farm crops*. *Agricultural Consulting Associates, Inc. Reynoldsburg, Ohio 1957*
- [30] HENDERSON, S. M.: A basic concept of equilibrium. *Agricultural Engineering* 33 (1952), S. 29—32
- [31] DAVIS, R. B. jr.: Supplemental heat in mow drying of hay. *Agricultural Engineering* 28 (1947), S. 289—290, 293
- [32] DAVIS, R. B. jr. und G. E. BARLOW jr.: Supplemental heat in mow drying of hay. (Part II) *Agricultural Engineering* 29 (1948), S. 251—254
- [33] DAVIS, R. B. jr., G. E. BARLOW jr. und D. P. BROWN: Supplemental heat in mow drying of hay (Part III). *Agricultural Engineering* 31 (1950), S. 223—226
- [34] JENNINGS, A. B.: Mow curing of hay. (Progress Report 824.) *Agricultural Experiment Station, New York 1944*
- [35] BARKE, A. L. und N. L. NAECHER: The relation of moisture to respiration and heating. (Iowa State College Research Bulletin 165), June 1933
- [36] WENNER, H. L.: Die Voraussetzungen für die Lagerung und Belüftung von feucht gerentetem Getreide. (Berichte über Landtechnik Heft 45) Verlag Neureuter, Wolfsrathshausen 1955
- [37] ZACHARIAH, G. L.: Simulation and dynamic response of automatic control systems on variable time-delay processes (Ph. D. thesis). *Purdue University, August 1963*. (The research of this thesis was conducted under a research contract sponsored by the Agricultural Marketing Service, U.S. Department of Agriculture. A publication is in process. The thesis will be made public in August 1964)
- [38] KOFOED, S. S.: Investigations on drying grain with slightly preheated air in thick layers. *Bulletin from the Department of Agricultural Engineering, Sonderdruck aus: Yearbook of the Royal Veterinary and Agricultural College, Copenhagen/Denmark 1959*

## Integrierter Pflanzenschutz

Wirtschaftliche Gründe führen heute zur Vereinfachung landwirtschaftlicher Fruchtfolgen. Dadurch sind die einzelnen Früchte stärker durch sogenannte Fruchtfolgekrankheiten gefährdet. Wie man hier in einer sinnvollen Verbindung anbautechnischer, chemischer und biologischer Maßnahmen Abhilfe schaffen kann, wird im Rahmen eines Schwerpunktprogrammes untersucht, das unter dem Stichwort „Integrierter Pflanzenschutz“ von der Deutschen Forschungsgemeinschaft gefördert wird. Mit jetzt ausgesprochenen Bewilligungen von rund 400 000,— DM hat die Forschungsgemeinschaft bisher 1,2 Mill. DM für dieses Programm ausgegeben, an dem etwa 25 Forscher aus betriebswirtschaftlichen, Pflanzenbau- und Pflanzenschutz-Instituten der Hochschulen und aus der Biologischen Bundesanstalt für Land- und Forstwirtschaft beteiligt sind.

## Résumé

Gerald W. Isaacs und Albert Scheuermann: „The calculation of Agricultural Drying Plants with Thick Layers of Bulk Material“

The paper deals with methods for calculating agricultural drying plants. In the introduction the general drying equations and the most important factors of influence such as drying efficiency, biological heat production, and the required desorption enthalpy are discussed. The considerations on the drying of very thin layers of bulk material lead to the deduction of new characteristic magnitudes, which occur again in the subsequently described theory of drying thick layers of bulk material. A theoretically deduced formula for the determination of moisture equilibrium values is described. For the calculation method for drying thick layers of loose material according to HUKILL dimensionless values are defined, so that the dimensionless curves of the HUKILL diagram can be used. Two examples illustrate the practical application of this calculation method when drying lucerne hay with cold air and preheated air. The results are examined critically and important factors are especially considered, e.g. the effect of the moisture content on the time of drying. A further possibility of application of this theory if the calculation of grain drying plants with high air temperatures. Here the form of the HUKILL diagram has been altered so that a calculation according to the mean degree of moisture can be made. Various control and regulating devices for grain drying plants are described. The application of the altered method of calculation is shown by an example. In conclusion the calculation method according to HUKILL is critically examined.

Gerald W. Isaacs et Albert Scheuermann: «Le calcul d'installations de séchage agricoles pour des couches épaisses de produits en vrac»

On décrit dans l'article un procédé de calcul d'installations de séchage agricoles. On traite d'abord des équations générales de séchage et des facteurs d'influence les plus importants comme par exemple le taux de séchage, la production de chaleur biologique et l'enthalpie de désorption nécessaire. Des réflexions sur le séchage de couches très minces on déduit de nouveaux paramètres qui reviennent dans la théorie de séchage de couches épaisses décrite ensuite. On décrit une formule obtenue théoriquement et destinée à la détermination de valeurs d'équilibre d'humidité. On définit des grandeurs sans dimensions pour le procédé de calcul du séchage de couches épaisses d'après HUKILL de sorte que l'on peut faire les calculs à l'aide des courbes sans dimensions du diagramme HUKILL. Deux exemples démontrent l'application pratique de ce procédé de calcul au séchage de foin de luzerne au moyen d'air froid et d'air préchauffé. Les résultats sont examinés critiquelement et des facteurs importants sont étudiés comme par exemple l'influence de la teneur d'humidité sur le temps de séchage. Une autre possibilité d'application de la théorie est le calcul d'installations de séchage de céréales utilisant de l'air très chaud. La forme du diagramme HUKILL a été modifiée dans ce but afin qu'un calcul puisse être exécuté d'après la teneur d'humidité moyenne. Quelques dispositifs de commande et de réglage pour les installations de séchage des céréales sont décrits. Un exemple montre l'application du procédé de calcul modifié. Enfin on examine de façon critique la méthode de calcul d'après HUKILL.

Gerald W. Isaacs y Albert Scheuermann: «El cálculo de instalaciones secadoras agrícolas para capas gruesas de material»

En este artículo se trata de un procedimiento de calcular instalaciones secadoras agrícolas. Se detallan primero las ecuaciones generales para el secado, así como los factores más importantes que influyen en el mismo, como coeficiente de secado, generación biológica de calor y entalpía de desorción necesaria. Las consideraciones sobre el secado de capas muy delgadas llevan a la deducción de valores nuevos que se repiten en la teoría sobre el secado de capas gruesas que se describe a continuación. Se explica una fórmula deducida teóricamente para la definición de valores de equilibrio de humedad. Se definen valores indeterminados para el procedimiento de secado de capas gruesas de material según HUKILL, de forma que pueda calcularse a base de las curvas indeterminadas del diagrama HUKILL. Para ilustrar el empleo práctico de este procedimiento de calcular, se dan dos ejemplos para el secado de heno de alfalfa con aire frío y con aire precalentado. Se hace una investigación crítica de los resultados y de los factores más importantes, p.e. de la influencia que ejerce el contenido de humedad sobre el tiempo de secado. Otra posibilidad para la aplicación de esta teoría consiste en el cálculo de instalaciones secadoras de trigo a temperaturas elevadas de aire. Para esto se ha variado la forma del diagrama de HUKILL, para que pueda efectuarse el cálculo según el grado medio de humedad. Se describen varios dispositivos de mando y de regulación para instalaciones secadoras de trigo, demostrando un ejemplo la aplicación del procedimiento de cálculo variado. El artículo termina con algunas consideraciones críticas del método de calcular de HUKILL.