

Das Kennfeld eines Getreidesatztrockners

Teil 2: Rechenmodell für die Feuchteverteilung in der Schüttung

Von Alexander Coenen und Franz Wieneke, Göttingen*)

DK 664.8.047:633.1.004.12:519.61

Aus systematischen Untersuchungen [1, 2] wurde in Teil 1 [3] der Einfluß der wesentlichen Größen bei der Getreidesatztrocknung ermittelt und als Kennfeld dargestellt. In diesem Beitrag wird für das in der Schüttung sich einstellende Feuchteprofil eine mathematische Beziehung angegeben, deren zeitabhängige Konstante bzw. die Krümmung beschreibende Faktoren aus den Trocknungsparametern zu bestimmen sind. Es wird ein Rechenmodell in Form eines Flußdiagramms vorgestellt, mit dem die Trocknungsdauer bis zum Erreichen der in der Schüttung gewünschten Feuchte zu berechnen ist. Die berechneten Feuchteprofile zeigen gute Übereinstimmung mit entsprechenden gemessenen Feuchtwerten von Trocknungsversuchen.

1. Das Sorptionsverhalten im h,x-Diagramm

Bei den üblichen landwirtschaftlichen Getreidetrocknungsverfahren dient Luft als Wärmeträger. Sie gibt die Wärme an die Oberfläche der Körner ab und nimmt gleichzeitig Feuchte auf. Es findet so ein gekoppelter Wärme- und Stoffaustausch statt. Die Feuchteabgabe beruht auf einem Dampfdruckgefälle zwischen Trocknungsgut und Luft. Am Ende des Trocknungsprozesses kommt es zu einem Gleichgewicht zwischen dem Dampfdruck des Trocknungsgutes und der Luft; der Feuchtigkeitsgehalt des hygroskopischen Gutes stellt sich entsprechend dem Feuchtigkeitsgehalt und der Temperatur der Luft ein.

Bei Trocknungsgütern mit hohem Wassergehalt ist der Dampfdruck an der Gutoberfläche gleich dem Sättigungsdampfdruck. Bei landwirtschaftlichen Trocknungsgütern unter 20 % Wassergehalt ist der Dampfdruck wesentlich herabgesetzt. Um diese Zusammenhänge zwischen Luft und Getreide deutlich zu machen, wurde das Sorptionsverhalten von Weizen in das Zustandsdiagramm für Luft eingetragen, **Bild 1**.

Durch das Übertragen der Gleichgewichtsfeuchten von Weizen, die in eigenen Versuchen nach einer Trocknung über 50 (oder 100) h mit einer Luftgeschwindigkeit von 0,4 (oder 0,2) m/s ermittelt und

durch entsprechende Werte von *Eimer* und *Morcos* [4, 5, 6] ergänzt sind, entsteht ein Diagramm, aus dem sich der Dampfdruck am Korn für gegebene Werte von Feuchte und Temperatur ablesen läßt.

Streicht das Trocknungsmedium Luft an feuchten Getreidekörnern vorbei, so sinkt bei adiabatischem Trocknungsverlauf die Lufttemperatur so lange, bis die Luft annähernd mit dem feuchten Gut im Gleichgewicht ist. Die Endtemperatur bei diesem Prozeß stellt sich dort ein, wo sich die Linie konstanter Enthalpie der Luft mit der Linie des entsprechenden Sorptionsgleichgewichtes des Getreides schneidet.

Nach Ermittlung dieses Punktes im Diagramm ist aus **Bild 1** auch die maximale Wasseraufnahme der Trocknungsluft und die relative Feuchte der Abluft bei gegebenen Werten der Getreideanfangsfeuchte und des Zuluftzustandes abzulesen. Bei Getreide mit einem Feuchtegehalt $U = 18\%$ erreicht die relative Feuchte der Abluft für einen Enthalpiebereich von 30–50 kJ/kg Luft maximal Werte von 83–88 %. Für 17 % feuchtes Getreide beträgt die relative Feuchte der Abluft maximal 80–84 % je nach Enthalpie der Trocknungsluft. Bei der Lagerbelüftungstrocknung mit einer Einlagerungsfeuchte von $U = 18\text{--}19\%$ ist daher für eine Abschätzung der Trocknungsdauer nur eine relative Feuchte der Abluft von 85 % anzusetzen. Eine Sättigung der Abluft ($\varphi = 100\%$) ist für die üblichen Trocknungstemperaturen auch bei sehr hohen Feuchten des Trocknungsgutes praktisch nicht zu erreichen. In **Tafel 1** sind die aus dem Diagramm (**Bild 1**) interpolierten maximal erreichbaren relativen Feuchten der Abluft in Abhängigkeit von der Enthalpie der Trocknungsluft zusammengestellt.

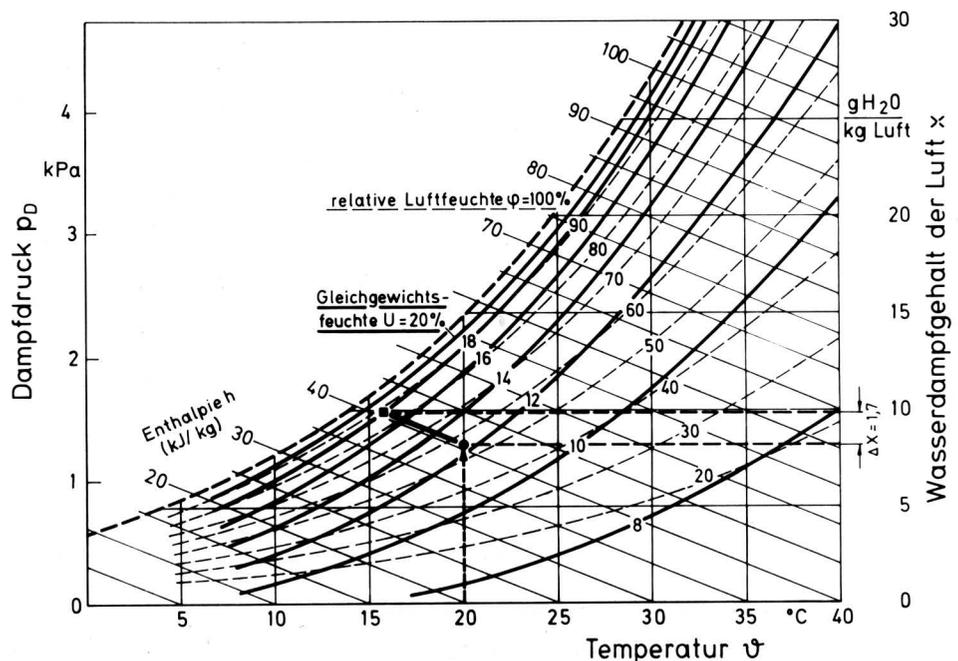


Bild 1. Zustandsdiagramm der Luft mit Linien konstanten Gleichgewichtsfeuchtegehaltes von Weizen; Beispiel: bei $\vartheta_{ZU} = 20\text{ °C}$ und $\varphi_{ZU} = 55\%$ der Zuluft sowie einem Anfangsfeuchtegehalt des Kornes $U_a = 18\%$ ergibt sich ein Endfeuchtegehalt von $U_{GL} \approx 12,3\%$ und ein Wasseraufnahmevermögen der Trocknungsluft von $\Delta x = 1,7\text{ g/kg}$; (nach *Eimer* [4] und *Morcos* [6], erweitert).

*) Dr. A. Coenen war wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Agrartechnik der Universität Göttingen und ist nun Mitarbeiter der Kleinwanzlebener Saatzucht AG, Einbeck. Prof. Dr.-Ing. F. Wieneke ist Direktor des Instituts für Agrartechnik der Universität Göttingen.

Anfangsfeuchtegehalt U (%)	Enthalpie der Trocknungsluft (kJ/kg)			
	30	40	50	60
	rel. Feuchte der Abluft (%)			
17	79	82	84	86
18	83	86	88	90
19	87	90	92	93
20	91	93	94	95

Tafel 1. Maximal erreichbare relative Feuchte der Abluft in Abhängigkeit von der Enthalpie der Trocknungsluft und vom Anfangsfeuchtegehalt U des Getreides.

2. Verlauf der Trocknung in hohen Schüttungen

Die Trocknungszone wird definitionsgemäß nach unten durch die Gleichgewichtsfeuchte X_{gl} und nach oben durch die Anfangsfeuchte des Getreides X_a begrenzt, Bild 2. Versuche haben gezeigt, daß die physikalische Gleichgewichtsfeuchte bei der Belüftungstrocknung tatsächlich nicht ganz erreicht wurde. Es stellte sich vielmehr ein Feuchtegleichgewicht nahe dem endgültigen Sorptionsgleichgewicht X_{gl} ein; eine weitere Verminderung des Feuchtegrades fand von da ab nur noch in sehr geringem Maße statt.

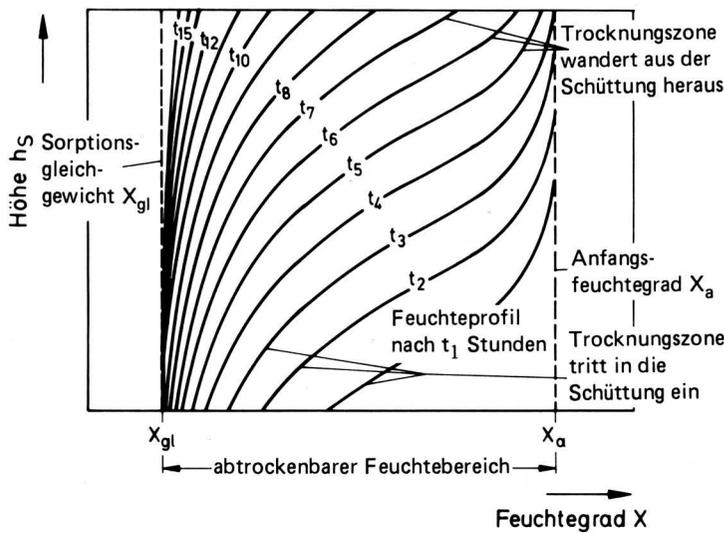


Bild 2. Feuchteprofile in der Getreideschüttung nach unterschiedlicher Trocknungszeit.

Der Wasserdampfpartialdruck der Trocknungsluft ist abhängig vom Luftzustand (relative Feuchte, Temperatur und Energiegehalt). Das Dampfdruckgefälle zwischen Korn und Luft ist außerdem von Korntemperatur und -feuchte und damit von den Wasserbindungskräften im Korn abhängig. Zu den physikalischen Wasserbindungen kommen noch chemisch-biologische hinzu. Änderungen des Zuluftzustands haben verschiedene Auswirkungen auf den Wasserdampfpartialdruck der Luft, den Dampfdruck am Korn und damit auch auf das Dampfdruckgefälle zwischen Korn und Luft. Dies beeinflusst seinerseits die Erstreckung und Wanderung der Trocknungszone wie auch die Trocknungsdauer.

3. Ansatz für das Trocknungszonenmodell

Den typischen Trocknungsvorgang in hohen Schüttungen charakterisiert der s-förmige Verlauf des Feuchteprofils bei vollausgebildeter Trocknungszone. Die Kurve erstreckt sich dann über den gesamten abtrockenbaren Feuchtebereich zwischen Anfangsfeuchte und Gleichgewichtsfeuchte. Bei der folgenden mathematischen Beschreibung des Feuchteprofils wird zur Vereinfachung der Gleichgewichtsfeuchtegrad als Nullpunkt der Abszisse gewählt, d.h. vom jeweiligen Feuchtegrad wird der Gleichgewichtsfeuchtegrad subtrahiert: $X' = X - X_{gl}$. Als Ansatz der mathematischen Beschreibung des Kurvenverlaufs wurde nachfolgender Funktionstyp gewählt:

$$f(X') = \text{Konst.} + f_2(X') + f_1(X') \quad (1)$$

$$f(X') = A + B \ln X' + C e^{X'} \quad (2)$$

Die Koeffizienten A, B und C wurden dabei für jede einzelne Kurve anhand einer Regressionsanalyse ermittelt.

Die Koeffizienten B und C, die den typischen Kurvenverlauf bestimmen, verändern sich im Verlauf der Trocknung mit konstanten Zuluftbedingungen nicht. Nur der Summand A wird mit zunehmender Trocknungsdauer größer.

Die Funktion Gl. (2) setzt sich aus einem logarithmischen Anteil $f_2(X')$ und einem exponentiellen Anteil $f_1(X')$ sowie einer Konstanten A zusammen, deren Bestimmung im folgenden einzeln behandelt wird.

3.1 Exponentielle Funktion mit dem Ausdehnungsfaktor C

Funktionen mit der allgemeinen Form

$$f_1(X') = C e^{X'} \quad (3)$$

haben den in Bild 3 Teil 1 gezeigten typischen Verlauf: die Ordinate wird im Punkt C geschnitten und der Faktor C bewirkt aufgrund der speziellen Eigenschaften der Funktion eine Parallelverschiebung der Kurve in Richtung der Abszisse. Je kleiner der Faktor C gewählt wird, desto weiter verschiebt sich die Kurve nach rechts.

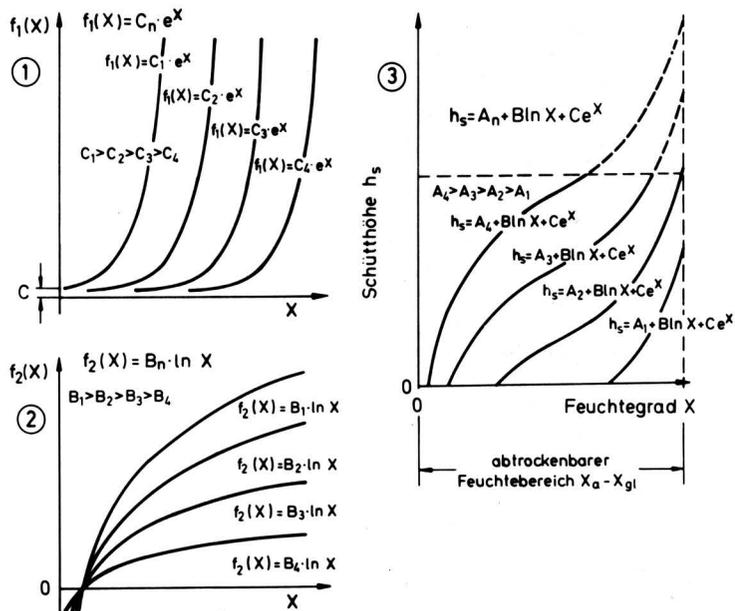


Bild 3. Allgemeiner Kurvenverlauf einer Exponentialfunktion (Bildteil 1), einer logarithmischen Funktion (Bildteil 2) und der für das Feuchteprofil vorgeschlagenen Funktion (Bildteil 3).

In der Funktion $f(X')$ nach Gl. (2) gibt der Faktor C die Ausdehnung des Feuchteprofils in Richtung der Abszisse an. Dies bedeutet, daß der Faktor C direkt von der Anfangsfeuchte und der Gleichgewichtsfeuchte, also vom abtrockenbaren Feuchtebereich X_{pot} , abhängt:

$$X_{pot} = X_a - X_{gl} \quad \text{mit } X_{gl} = f(\vartheta, \varphi) \quad (4)$$

Über den Gleichgewichtsfeuchtegrad X_{gl} gehen somit die relative Feuchte und die Temperatur der Zuluft mit in den Ausdehnungsfaktor C ein.

Durch Versuche mit unterschiedlichen relativen Feuchten und Temperaturen der Zuluft sowie unterschiedlichen Anfangsfeuchten des Gutes ist es möglich, ein weites Spektrum unterschiedlicher abtrockenbarer Feuchtebereiche (X_{pot}) abzudecken. Wird der in den Regressionsanalysen für die einzelnen Versuche ermittelte Faktor C logarithmisch über dem abtrockenbaren Feuchtebereich X_{pot} aufgetragen, Bild 4, so ergibt sich eine Gerade, die durch die Beziehung

$$C = e^{-1,102 X_{pot} + 5,508} \quad (5)$$

beschrieben wird. Diese Zahlenwertgleichung, in der X_{pot} in der Einheit kg/100 kg einzusetzen ist, gilt auch für unterschiedliche Luftgeschwindigkeiten.

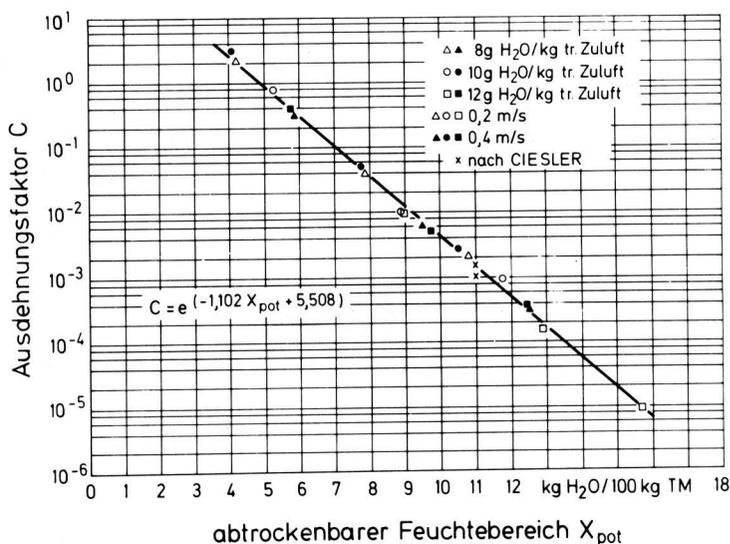


Bild 4. Ausdehnungsfaktor C in Abhängigkeit vom Bereich der abtrockenbaren Feuchte $X_{pot} = X_a - X_{gl}$.

3.2 Logarithmische Funktion mit dem Erstreckungsfaktor B

Der typische Verlauf des Graphen

$$f_2(X') = B \ln(X') \quad (6)$$

ist in Bild 3 im Teil 2 dargestellt. Die Kurvenschar zeigt, daß über den Faktor B die Funktion gut in Richtung der Ordinate anzupassen ist.

In der Funktion des Feuchteprofils gibt der Faktor B die Erstreckung der Trocknungszone über die Höhe der Getreideschüttung an. Diese Erstreckung in der Getreideschüttung ist zum einen, wie im Teil I beschrieben, von den Trocknungsparametern Luftgeschwindigkeit und Zuluftzustand, zum anderen aber auch vom Trocknungsgut selbst abhängig. Die Wassernachlieferung aus dem Getreidekorn wird von den Diffusionswiderständen im Korn und

somit teilweise auch vom Reifezustand bestimmt. Diese stoffspezifischen Eigenschaften sind auch bei anderen Trocknungsgütern für die Erstreckung der Trocknungszone im Stapel maßgebend.

In Bild 5 ist der empirisch ermittelte Erstreckungsfaktor B in Abhängigkeit von der relativen Feuchte und der Temperatur der Zuluft für unterschiedliche Luftgeschwindigkeiten aufgetragen.

3.3 Zeitabhängige Abschnittskonstante A

Das Feuchteprofil, dessen Krümmungen durch den Erstreckungsfaktor B und den Ausdehnungsfaktor C bestimmt werden, wandert während des Trocknungsprozesses parallel zur Ordinate durch die Schüttung (Bild 3, Teil 3).

In welchem Maße sich die Kurve pro Zeiteinheit verschiebt, ist allein von der Wasseraufnahmekapazität der Zuluft abhängig. Ist das Wasseraufnahmevermögen der Zuluft Δx bekannt, so ergibt sich mit dem Luftdurchsatz \dot{V} der Feuchteausstrag g_D pro Zeiteinheit, bezogen auf 1 m² der Trocknergrundfläche A_f , zu:

$$g_D = \dot{V} \rho_L \Delta x / A_f = v_L \rho_L \Delta x \quad (\text{g/m}^2 \text{ h}) \quad (7)$$

Betrachtet man in Bild 3 die Fläche, die vom Feuchteprofil und der Abszisse begrenzt wird, so vergrößert sie sich um einen konstanten Betrag pro Zeiteinheit. Mit der Schüttdichte des Getreides ρ_G läßt sich der zeitliche Wasserentzug, die Trocknungsgeschwindigkeit, auch ermitteln aus:

$$g_D = \rho_G \Delta h_S X_{pot} / t \quad (\text{g/m}^2 \text{ h}) \quad (8)$$

Mit Hilfe der Stammfunktion zum Feuchteprofil

$$F(X') = A X' + B (X' \ln X' - X') + C e^{X'} \quad (9)$$

kann die Fläche unterhalb des Feuchteprofils, die durch den Abszissenabschnitt im Bereich der abtrockenbaren Feuchte X_{pot} begrenzt wird, bestimmt werden. Dies sei anhand eines Beispiels erläutert.

3.4 Verknüpfung zum Trocknungsmodell

Die Funktion des Feuchteprofils besteht, wie dargestellt, aus drei Summanden, die ihrerseits mit den Angaben folgender Parameter bestimmt werden (die Werte gelten für das hier behandelte Beispiel):

1. Zulufttemperatur $\vartheta_{zu} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$
2. Relative Feuchte der Zuluft $\varphi_{zu} = 55 \%$
3. Anfangsfeuchte des Getreides $U_a = 18 \%$
4. Luftgeschwindigkeit $v_L = 0,4 \text{ m/s}$.

Mit Hilfe dieser vier Parameter ist es möglich, die Koeffizienten in der Funktion des Feuchteprofils sowie die Veränderung der zeitabhängigen Abschnittskonstante zu bestimmen.

Aus Bild 1 ergibt sich anhand von Temperatur (20 °C) und relativer Feuchte der Zuluft (55 %) der Endfeuchtegehalt des Weizens ($U_{gl} = 12,3 \%$), was einem Gleichgewichtsfeuchtegrad von $X_{gl} = 14,03 \text{ kg Wasser/100 kg TM}$ entspricht. Durch Subtraktion des Gleichgewichtsfeuchtegrades vom Anfangsfeuchtegrad ($X_a = 21,95 \text{ kg Wasser/100 kg TM}$) wird der abtrockenbare Feuchtebereich ($X_{pot} = 7,92 \text{ kg Wasser/100 kg TM}$) ermittelt, der eingesetzt in Gl. (5):

$$C = e^{-1,102 \cdot 7,92 + 5,508}$$

den Ausdehnungsfaktor $C = 0,04$ ergibt.

Aus den empirisch ermittelten Werten für den Erstreckungsfaktor B läßt sich die Regressionsgleichung

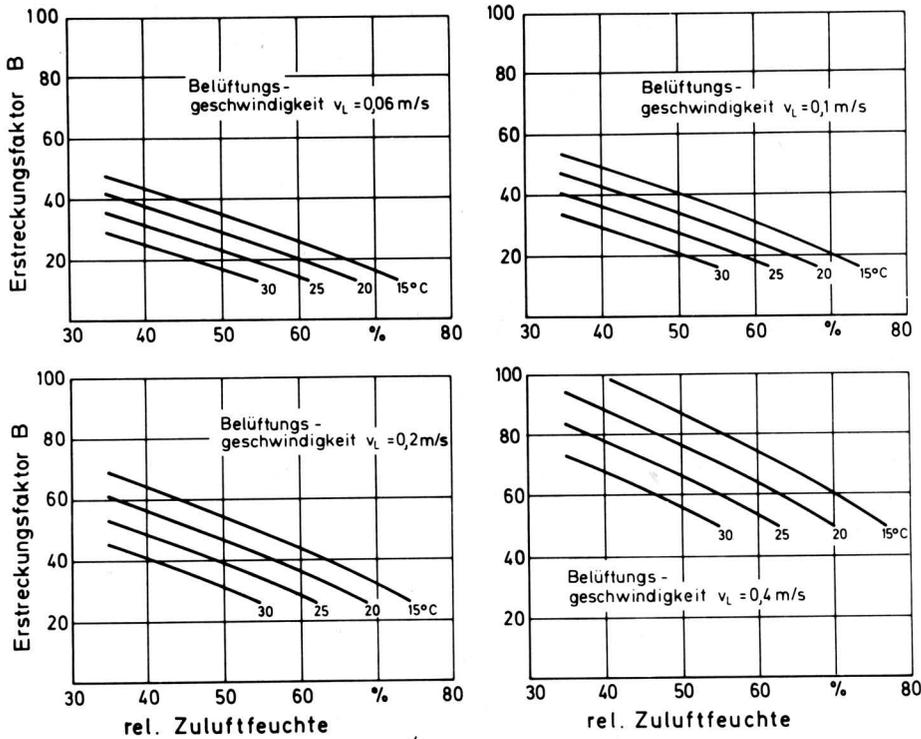


Bild 5. Erstreckungsfaktor B in Abhängigkeit von der relativen Feuchte der Zuluft für verschiedene Werte der Luftgeschwindigkeit und der Zulufttemperatur; Weizen.

$$B = -106,3 + 0,9 \vartheta_{zu} + (193,2 - 1,99 \vartheta_{zu} - 86,7 \varphi_{zu}) e^{VL} \quad (10)$$

ableiten. Der Erstreckungsfaktor B erhöht sich mit zunehmender Luftgeschwindigkeit exponentiell. Für den Temperatur- und Luftfeuchtebereich, der bei der Belüftungstrocknung angewandt wird, kann der Einfluß der Zulufttemperatur sowie der relativen Feuchte der Zuluft auf den Erstreckungsfaktor B, wie er in Bild 5 dargestellt ist, in der Gleichung linear wiedergegeben werden.

Die Berechnung des Erstreckungsfaktors B nach Gl. (10) mit den Werten für die Zulufttemperatur ($\vartheta_{zu} = 20 \text{ °C}$), die relative Feuchte der Zuluft ($\varphi_{zu} = 0,55$) und die Luftgeschwindigkeit ($v_L = 0,4 \text{ m/s}$) führt auf den Wert $B = 69,4$.

Die Abschnittskonstante A ist abhängig von der Wandergeschwindigkeit des Feuchteprofils, dessen Krümmung durch Ausdehnungs- und Erstreckungsfaktor gegeben ist.

Die Wandergeschwindigkeit des Feuchteprofils bzw. die Trocknungsgeschwindigkeit errechnet sich aus dem Wasseraufnahmevermögen der Trocknungsluft (vgl. Bild 1) und der Luftgeschwindigkeit (Gl. (7)). Zur Vereinfachung ist sie einem Umlaufdiagramm zu entnehmen, **Bild 6**, in dem zuerst der Feuchtegrad der Zuluft bestimmt wird (Beispiel: $\vartheta_{zu} = 20 \text{ °C}$ und $\varphi_{zu} = 55 \text{ %}$ ergeben $x = 8 \text{ g Wasser/kg Luft}$).

Im zweiten Teil des Umlaufdiagramms wird bei einer angenommenen Abluftsättigung von $\varphi = 85 \text{ %}$ die pro kg Luft aufgenommene Wassermasse abgelesen (Beispiel: $\Delta x = 1,7 \text{ g Wasser/kg Luft}$).

Für die gegebene Luftgeschwindigkeit ist aus dem dritten Teil des Umlaufdiagramms die Trocknungsgeschwindigkeit $g_D = 2937 \text{ g Wasser/m}^2 \text{ h}$ abzulesen; um diesen Betrag schiebt sich stündlich die Trocknungszone weiter in die Schüttung hinein.

Zur Berechnung der Abschnittskonstante A des Feuchteprofils für die jeweilige Trocknungszeit t wird das Integral $I(X')$ von dem Schnittpunkt der Trocknungskurve mit der Abszisse (X'_0) bis zum abtrocknabaren Feuchtegrad (X'_{pot}) herangezogen:

$$\int_{X'_0}^{X'_{pot}} f(X') dX' = t g_D / \rho_G = I(X') \quad (11)$$

Bei der Lösung dieses Integrals $I(X')$ bedient man sich der Stammfunktion des Feuchteprofils:

$$I(X') = F(X'_{pot}) - F(X'_0) \quad (12)$$

Zur Ermittlung des Nullpunktes (X'_0) des Feuchteprofils sowie der zeitabhängigen Abschnittskonstante A stehen die folgenden beiden Gleichungen zur Verfügung:

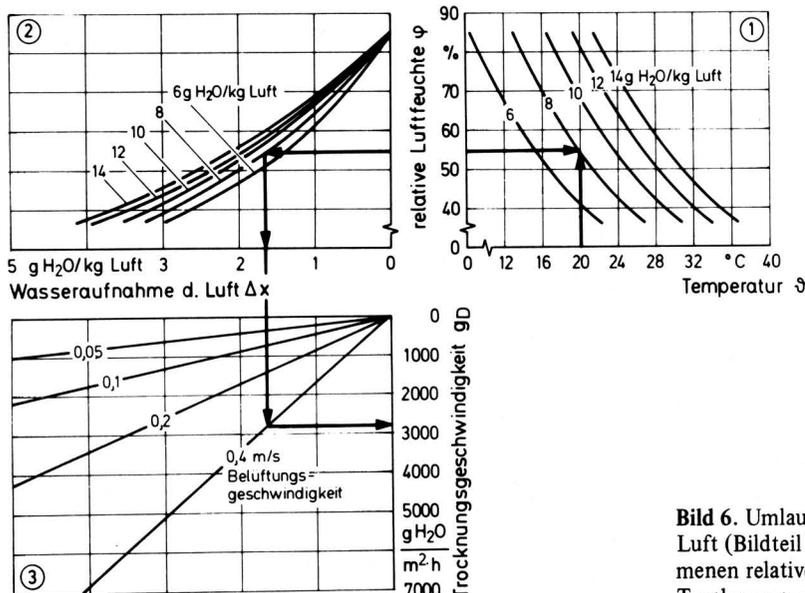


Bild 6. Umlaufdiagramm zur Ermittlung des Feuchtegrades der Luft (Bildteil 1), der Wasseraufnahme der Luft bei einer angenommenen relativen Feuchte der Abluft von 85 % (Bildteil 2) und der Trocknungsgeschwindigkeit (abgeführte Wassermasse pro Stunde und m^2 der Trocknergrundfläche, Bildteil 3).

$$I(X') = A(X'_1 - X'_0) + B(X'_1 \ln X'_1 - X'_1) - B(X'_0 \ln X'_0 - X'_0) + C e^{X'_1} - C e^{X'_0} \quad (13)$$

und

$$0 = A + B \ln X'_0 + C e^{X'_0} \Leftrightarrow A = -B \ln X'_0 - C e^{X'_0} \quad (14)$$

wobei nach Einsetzen der zweiten Gleichung in die erste der Nullpunkt (X'_0) durch Iteration bestimmt wird.

Da der Wertebereich für den Nullpunkt (X'_0) des Feuchteprofils zwischen 0 und dem abtrockenbaren Feuchtebereich (X'_{pot}) liegt, werden für X'_0 je nach der gewünschten Genauigkeit schrittweise Werte von 0 beginnend in die Gleichung

$$F(X'_{pot}) - F(X'_0) = I_1(X') \quad (15)$$

eingesetzt. Da X'_{pot} und $X'_0 \in \mathbb{R}^{>0}$ und $X'_{pot} > X'_0$ sowie $I(X') > 0$, gilt $F(X'_{pot}) > F(X'_0)$. Daraus ergibt sich, daß der Funktionswert für den Nullpunkt (X'_0) erreicht ist, sobald

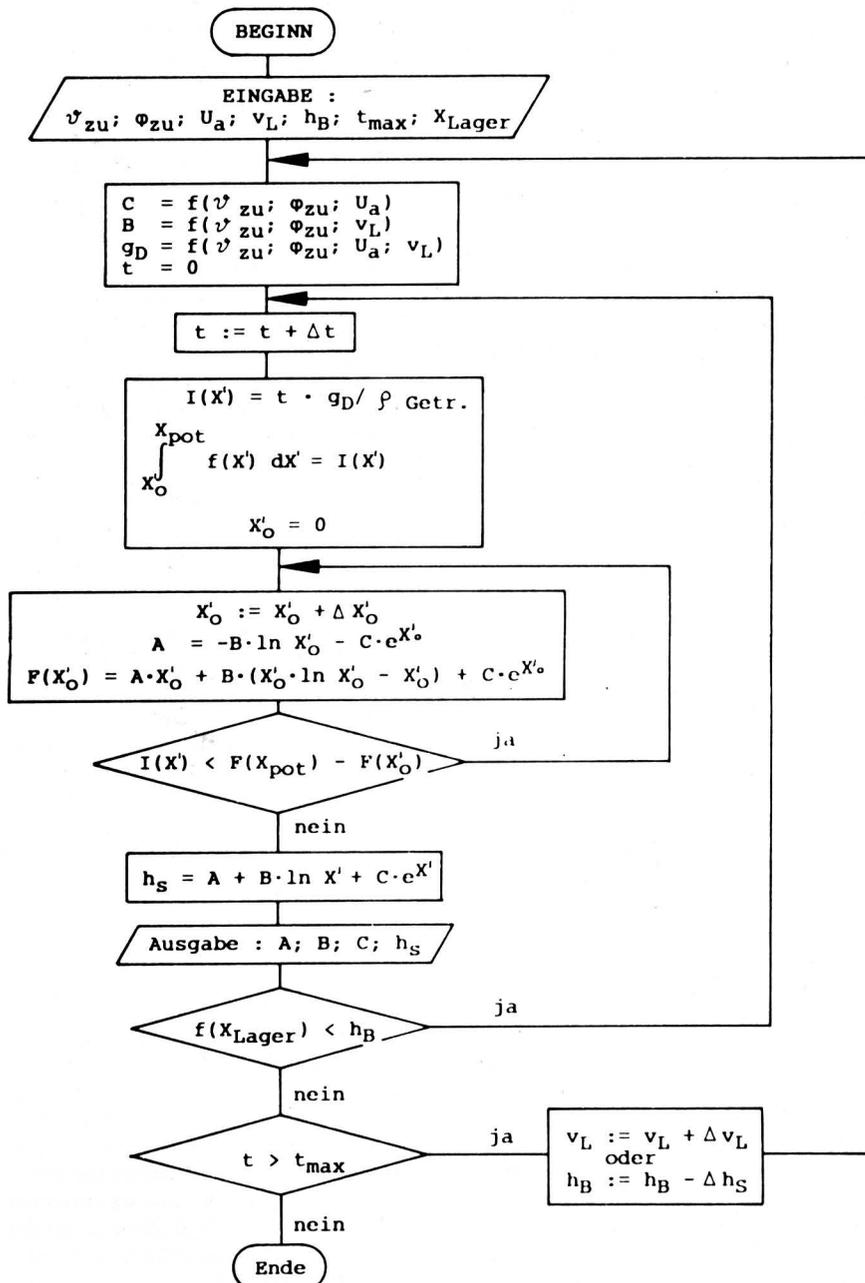
$$I_1(X') > I(X') \quad (16)$$

Durch Einsetzen des durch Interpolation ermittelten Nullpunktes in die Gleichung

$$A = -B \ln X'_0 - C e^{X'_0} \quad (17)$$

wird die für das Feuchteprofil gesuchte zeitabhängige Abschnittskonstante A errechnet.

Der Ablauf der Berechnung des Feuchteprofils und die Schlussfolgerungen für die Durchführung des Trocknungsprozesses werden im Flußdiagramm, Bild 7, besonders deutlich. Nach Eingabe der Parameter werden der Ausdehnungsfaktor, der Erstreckungsfaktor und die Trocknungsgeschwindigkeit errechnet. Mit diesen Faktoren werden die Wanderung des Feuchteprofils und der Zeitpunkt, zu dem die oberste Getreideschicht den gewünschten Feuchtegrad erreicht hat, bestimmt. Diese Trocknungsdauer wird mit der maximalen Trocknungszeit, die aus arbeitstechnischen, ökonomischen und Kapazitätsgründen sowie durch den Verderb vorgegeben wird, verglichen. Wenn die maximale Trocknungszeit überschritten ist, wird der Rechenvorgang mit einer höheren Luftgeschwindigkeit oder einer kleineren Befüllhöhe wiederholt.



Mit dieser Vorgehensweise zur Bestimmung der Wanderung des Feuchteprofils ist es möglich, den Trocknungsprozeß mittels eines einfachen 8 bit-Tischrechners für jeden Anwendungsfall zu simulieren. Ein solcher Rechner wurde gewählt, um zu zeigen, daß mit den häufig in landwirtschaftlichen Betrieben vorhandenen Rechnern eine Simulation des Trocknungsprozesses bei konstanten Zuluftbedingungen jederzeit möglich ist.

In Bild 8 ist die errechnete Wanderung des Feuchteprofils für unterschiedliche Luftgeschwindigkeiten und verschiedene Werte der abtrockenbaren Feuchte dargestellt. Es wird auch hier deutlich, daß sich die Trocknungszone mit steigender Luftgeschwindigkeit über einen größeren Bereich der Schüttung erstreckt. Mit zunehmender Anfangsfeuchte benötigt man einen längeren Zeitraum, bis das Getreide auch in einer Höhe von 3 m getrocknet ist. Zum Beispiel ist Getreide mit einer Anfangsfeuchte von $U = 22,5\%$ bei einer Belüftungsgeschwindigkeit von $0,1 \text{ m/s}$, was bei einer Schütthöhe von 3 m einer spezifischen Luftmenge von 120 m^3 Luft pro m^3 Getreide und Stunde entspricht, erst nach 550 Stunden trocken.

Bild 7. Flußdiagramm zur Berechnung der Feuchteprofile und der notwendigen Trocknungszeit bei der Satz-trocknung mit konstantem Zustand der Trocknerzuluft; aufbauend auf Angaben von Ciesler [1] und Eimer [4].

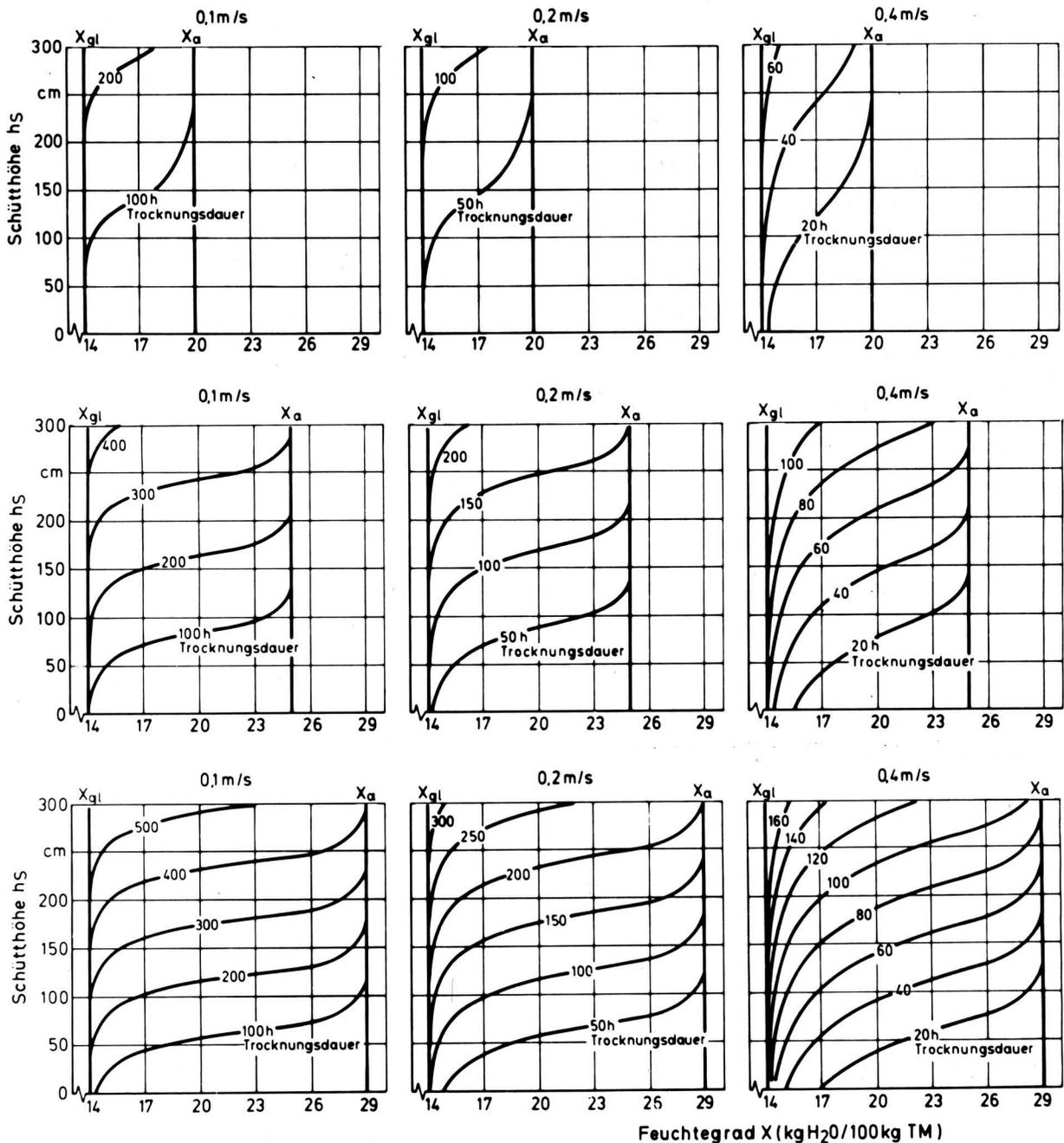


Bild 8. Berechnete Feuchteprofile für verschiedene Trocknungszeiten bei unterschiedlichen Werten der Luftgeschwindigkeit und des Bereichs der abtrockenbaren Feuchte.

oben: $X_a - X_{gl} = (20,0 - 14,0) \text{ kg}/100 \text{ kg} = 6 \text{ kg}/100 \text{ kg}$; $U_a = 16,7 \%$, $U_{gl} = 12,3 \%$
 Mitte: $X_a - X_{gl} = (25,0 - 14,0) \text{ kg}/100 \text{ kg} = 11 \text{ kg}/100 \text{ kg}$; $U_a = 20,0 \%$, $U_{gl} = 12,3 \%$
 unten: $X_a - X_{gl} = (29,0 - 14,0) \text{ kg}/100 \text{ kg} = 15 \text{ kg}/100 \text{ kg}$; $U_a = 22,5 \%$, $U_{gl} = 12,3 \%$

3.5 Vergleich der Berechnungen mit experimentell ermittelten Ergebnissen

Mit Hilfe des erarbeiteten Rechenmodells wurde der Trocknungsverlauf für Versuche, die der Qualitätsbestimmung von Getreide in hohen Schüttungen dienen, vorausberechnet. In **Bild 9 und 10** sind zum Vergleich berechnete Feuchteprofile und entsprechende Meßergebnisse zusammen dargestellt. Bei diesen Versuchen hatte die Zuluft eine konstante Temperatur von 25 °C und eine relative Feuchte von 60 %. Der Anfangsfeuchtegrad betrug 22,4 bzw. 27,3 kg Wasser/100 kg TM, die Luftgeschwindigkeit 0,06 m/s (Bild 9) bzw. 0,1 m/s (Bild 10).

Nach der beschriebenen Vorgehensweise wurden für die einzelnen Versuche die Ausdehnungs- und Erstreckungsfaktoren B und C ermittelt. Die zeitabhängige Abschnittskonstante A wurde dann für den jeweiligen Zeitpunkt, zu dem die Feuchteproben genommen wurden, berechnet und das Feuchteprofil aufgetragen. Aus den Bildern ist eine gute Übereinstimmung des errechneten Verlaufs des Feuchteprofils mit den gemessenen Werten abzulesen.

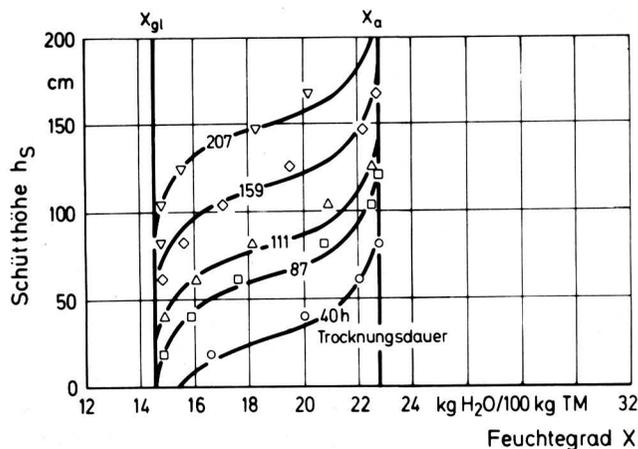


Bild 9. Vergleich der berechneten Feuchteprofile (Kurven) mit den entsprechenden Versuchsergebnissen (Meßpunkte);
 $\vartheta_{zu} = 25 \text{ }^\circ\text{C}$, $\varphi_{zu} = 60 \%$, $X_a = 22,4 \text{ kg}/100 \text{ kg}$, $X_{gl} = 14,2 \text{ kg}$
 pro 100 kg , $v_L = 0,06 \text{ m/s}$.

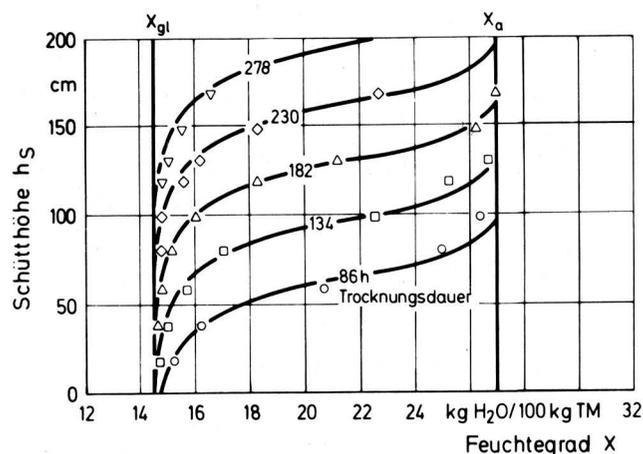


Bild 10. Vergleich der berechneten Feuchteprofile (Kurven) mit den entsprechenden Versuchsergebnissen (Meßpunkte);
 $\vartheta_{zu} = 25 \text{ }^\circ\text{C}$, $\varphi_{zu} = 60 \%$, $X_a = 27,3 \text{ kg}/100 \text{ kg}$, $X_{gl} = 14,2 \text{ kg}$
 pro 100 kg , $v_L = 0,1 \text{ m/s}$.

4. Zusammenfassung

Ausgehend von den Ergebnissen bei umfangreichen Versuchen zur Satz-trocknung von Weizen, wird eine Gleichung abgeleitet, mit der das Feuchteprofil in der Schüttung für beliebige Werte der Trocknungszeit zu bestimmen ist:

$$h_s = f(X') = A + B \ln X' + C e^{X'}$$

Hier ist $X' = X - X_{gl}$ der um den Gleichgewichtsfeuchtegrad verminderte Feuchtegrad des Getreides. Die zeitabhängige Abschnittskonstante A ist über die Trocknungsgeschwindigkeit und die Trocknungszeit zu berechnen. Die Faktoren B und C, die bei gleichbleibendem Zuluftzustand während der Trocknung konstant bleiben, beschreiben die Krümmung des Feuchteprofils und lassen sich mit empirisch ermittelten Beziehungen bestimmen.

Mit einem Rechenmodell, das als Flußdiagramm angegeben ist, läßt sich die Trocknungszeit bestimmen, zu der die oberste Körnerschicht die gewünschte Feuchte erreicht. Es läßt sich so entscheiden, ob der Trocknungsprozeß in der geforderten Zeit abgeschlossen ist oder ob für die Trocknung veränderte Werte des Zuluftzustandes, der Luftgeschwindigkeit oder der Schütthöhe vorge-sehen werden müssen.

Verwendete Formelzeichen

A	Zeitabhängige Abschnittskonstante
A_f	Grundfläche des Belüftungstrockners
B	Erstreckungsfaktor
C	Ausdehnungsfaktor
$f(X')$	Feuchteprofil
$F(X')$	Stammfunktion von $f(X')$
g_D	Trocknungsgeschwindigkeit
h_B	Gesamthöhe der Schüttung
h_s	Höhe in der Schüttung
$I(X')$	Flächeninhaltsfunktion
t	Trocknungszeit
t_{max}	maximal zugelassene Trocknungszeit
U_a	Anfangsfeuchtegehalt
v_L	Luftgeschwindigkeit
\dot{V}	Volumenstrom der Zuluft
X_a	Feuchtegrad bei Beginn der Trocknung
X_{gl}	Gleichgewichtsfeuchtegrad
X_{Lager}	Feuchtegrad bei der Lagerung
X_{pot}	gesamter abtrockenbarer Feuchtegrad ($X_{pot} = X_a - X_{gl}$)
X'	jeweiliger noch abtrockenbarer Feuchtegrad ($X' = X - X_{gl}$)
X_0	Feuchtegrad am Lufteintritt
ϑ_{zu}	Temperatur der Zuluft
ρ_G	Dichte der Getreideschüttung
ρ_L	Dichte der Luft
φ_{zu}	relative Feuchte der Zuluft

Schrifttum

- [1] Ciesler, B.: Untersuchungen zum Trocknungsverlauf und zur Entwicklung eines Trocknungsmodells der Getreidesatz-trocknung.
Diss. Univ. Göttingen 1986.
- [2] Coenen, A.: Theoretische und experimentelle Untersuchungen zur Kühlzwischenlagerung und Belüftungssatz-trocknung von Weizen.
Diss. Univ. Göttingen 1987.
- [3] Coenen, A., B. Ciesler u. F. Wieneke: Das Kennfeld eines Getreidesatz-trockners, Teil 1: Praktische Versuche.
Grundl. Landtechnik Bd. 38 (1988) Nr. 5, S. 148/55.
- [4] Eimer, M.: Ermittlung des zeitlichen De- und Adsorptions-verhaltens sowie der Trockenmasseverluste und des Schim-melbeginns erntefrischer Getreidekörner.
Forschungsbericht des Instituts für Agrartechnik, Göttingen 1985 (unveröffentlicht).
- [5] Eimer, M. u. B. Morcos: Grenzen für Konservierung und Lagerung von Getreide durch mikrobielle Entwicklung und Umsetzung.
Landtechnik Bd. 40 (1985) Nr. 6, S. 286/88.
- [6] Morcos, B.: Mikrobielle Entwicklung und Verderb bei der Konservierung und Lagerung von Getreide – Schädigungs-freie Verweilzeiten und tolerierbare Grenzen.
Diss. Univ. Göttingen 1986.