

Die Bestimmung des Trocknungsverlaufs und des Energiebedarfs der Körnertrocknung mit Hilfe von Computersimulation

Von A.G. Meiering und H.J. Höfkes, Guelph*)

DK 664.8.047:518.5

Einfache Simulationsmodelle von Durchlauf- und Satz-trocknern für Getreide wurden mit den Ergebnissen einer Versuchsanlage auf ihre Gültigkeit geprüft. Mit ihrer Hilfe ließen sich der Trocknungsverlauf und der spezifische Energiebedarf von Kreuzstrom- und Gleichstrom-trocknern, sowie von Belüftungsanlagen vorausbestimmen. Die Simulation zeigte weiterhin, daß eine Rückführung der Kühlluft deutliche Energieeinsparungen ermöglicht.

1. Einleitung

Steigende Energiepreise und die gesetzlich vorgeschriebenen Maßnahmen zur Verhinderung von Staub- und Schallimmissionen haben zu einer Verteuerung der mit Warmluft arbeitenden Korn-trocknungsverfahren geführt. Das gilt vor allem für die Durchlauf-trockner des Handels und der landwirtschaftlichen Großbetriebe. Das Emissionsproblem hat keine große Bedeutung bei der Satz- und Belüftungstrocknung in den mittleren und kleinen Betrieben. Der Heizkostenanstieg macht sich allerdings auch bei der Satz-trocknung bemerkbar.

Die Verteuerung der Trocknungskosten führte vor allem in Nord-amerika, wo wegen der großen Flächenausstattung auch der land-wirtschaftliche Betrieb vorwiegend mit Durchlauf-trocknern ar-beiten muß, zu einer Intensivierung der Forschungsarbeiten auf dem Gebiet der Körnertrocknung. Ziel der Forschungen ist es, energie-sparende und emissionsarme Trocknungsverfahren zu entwickeln.

Die in diesem Bericht erwähnten Projekte wurden vom Ontario Ministry of Agriculture und vom Ontario Ministry of the Environment im Rahmen von Forschungsverträgen finanziert.

*) Dr. A.G. Meiering ist Associate Professor an der School of Engineering der University of Guelph und Leiter der Abteilung Food Engineering. H.J. Höfkes war Research Engineer in der gleichen Abteilung und ist jetzt Projektingenieur in der Schlepper-projektplanung der International Harvester Company mbH in Neuß.

Die Bemühungen konzentrieren sich hauptsächlich auf eine Ver-besserung des Wärme- und Stoffaustausches bei den im Kreuz-strom- und Gleichstromverfahren arbeitenden Durchlauf-trock-nern. Daneben werden Satz-trocknung und ebenfalls die Belüf-tungstrocknung auf ihre Anwendbarkeit unter nordamerikani-schen Bedingungen geprüft.

Größere Beachtung erfährt in diesem Zusammenhang das "Driera-tion"-Verfahren, das aus einer Kombination von Heißluft-trock-nung und stationärer Kaltbelüftung besteht.[1]. Die Körner wer-den hierbei zunächst mit Heißluft auf ca. 17 % getrocknet, danach zum Ausgleich der Feuchteunterschiede im Korninneren für meh-rere Stunden im warmen Zustand zwischengelagert und schließlich mit niedrigem Luftdurchsatz im Belüftungsverfahren ohne Heizung schonend zu Ende getrocknet. Bessere Wärmeausnutzung und ver-ringerter Kornbruch sind die Vorteile dieses Verfahrens.

Die Energieübertragung durch Mikrowellenstrahlung, die verlustär-mer erfolgen kann als die herkömmliche konvektive Übertragung mit Luft, wird im Rahmen der Forschungsprogramme auf ihre Eig-nung für die Körnertrocknung untersucht. Sie dürfte wegen ihres hohen technischen Aufwandes und ihres Bedarfes an teurerer Sek-undärenergie ähnlichen Schwierigkeiten gegenüberstehen wie die bei anderen Produkten ebenfalls anwendbare Infrarotstrahlung oder auch die Ultraschallbehandlung.

In den bisherigen Forschungsarbeiten sind theoretische Modelle des Wärme- und Stoffaustausches für ruhende oder gleichmäßig fließende Kornschichten entwickelt worden [2, 3, 4]. Mit ihrer Hilfe lassen sich die verschiedenen Trocknungsverfahren für belie-bige Betriebsbedingungen auf Digitalrechenanlagen simulieren und somit Voraussagen über Trocknungsverlauf, Energieverbrauch und Umweltimmissionen der verschiedenen Anlagen treffen.

2. Wärme- und Stoffaustausch bei der Körnertrocknung

Der Wassertransport innerhalb biologisch intakter Körner wird durch Zellmembranen und die Semipermeabilität des Zellplasmas weitgehend gesteuert [5, 6]. Das Gutswasser ist zum großen Teil im Zellsaft gelöst und bewegt sich in Richtung des osmotischen Druckgefälles. Zwischen benachbarten Zellen besteht dauernd die Tendenz zum Ausgleich der Druckkräfte. Ein Teil des Gutswassers wandert als Dampf durch die interzellularen Hohlräume von Zelle

zu Zelle. Zur technischen Beschreibung des Wassertransportes kann unterstellt werden, daß die Wasserbewegung im Korninneren ohne nennenswerte Zufuhr von Nettoverdampfungsenergie isotrop in Richtung des Feuchtepotentials erfolgt [6]. Die zeitlichen Änderungen der Temperatur, des Feuchtegrades und des Kornvolumens an beliebigen Stellen innerhalb der Körner betragen [6, 7, 8]:

$$\frac{\partial T_G}{\partial t} = k_1 \Delta T_G + k_2 \Delta X_G + k_3 \Delta V_G \quad (1a)$$

$$\frac{\partial X_G}{\partial t} = D_1 \Delta T_G + D_2 \Delta X_G + D_3 \Delta V_G \quad (1b)$$

$$\frac{\partial V_G}{\partial t} = \chi_1 \Delta T_G + \chi_2 \Delta X_G + \chi_3 \Delta V_G \quad (1c)$$

Bei der Körnertrocknung werden allgemein nur die prinzipiellen Temperatur- und Feuchtigkeitspotentiale berücksichtigt. Wird außerdem die beim Trocknungsvorgang auftretende Verformung der Körner ausschließlich als eine Funktion der Guttemperatur und der Gutsfeuchte definiert, dann vereinfacht sich Gleichungssystem (1) zu:

$$\frac{\partial T_G}{\partial t} = a \Delta T_G \quad (2)$$

$$\frac{\partial X_G}{\partial t} = D \Delta X_G \quad (3)$$

$$\frac{\partial V_G}{\partial t} = \chi_1 \Delta T_G + \chi_2 \Delta X_G \quad (4)$$

mit den Grenzbedingungen an der Kornoberfläche

$$\frac{\partial X_G}{\partial n} = \frac{\sigma}{D \rho_G} (X_{G1} - X_L) \quad (5)$$

$$\frac{\partial T_G}{\partial n} = \frac{a}{\lambda} (T_L - T_G) - \frac{r \sigma}{\lambda} (X_{G1} - X_L) \quad (6)$$

sowie weiterhin [2, 3, 6]

$$\sigma = \frac{a (X_{G1} + 0,622)}{0,622 c_{pL}} \quad (7)$$

$$X_{G1} = 0,622 \frac{\varphi P_S}{P_{ges} - \varphi P_S} \quad (8)$$

$$D = D (X_G, T_G) \quad (9)$$

$$a = a (X_G, T_G) \quad (10)$$

Die Gln. (2) bis (10) lassen sich nicht analytisch exakt lösen. Eine numerische Lösung nach dem recht schnellen und stabilen ADEP-Verfahren [9] bereitet dagegen auf einer Hybrid- oder Digitalrechenanlage keine Schwierigkeiten.

Um den Rechenaufwand bei der Simulation in vertretbaren Grenzen zu halten, wird allgemein mit Durchschnittswerten der Korn-temperatur und der Gutsfeuchte gearbeitet [4, 10]. Die Änderungen der Temperatur und des Feuchtegrades von Körnern und Luft in einer ruhenden, beziehungsweise gleichmäßig fließenden, im Kreuzstromverfahren oder im Gleichstromverfahren trocknenden Getreideschicht betragen dann [2, 3, 4]:

$$\frac{\partial \bar{T}_G}{\partial z} = \frac{a A}{v_L \rho_L c_{pL}} (T_L - \bar{T}_G) \quad (11a)$$

$$\frac{\partial \bar{T}_G}{\partial u} = \frac{a A}{v_G \bar{\rho}_G c_G} (T_L - \bar{T}_G) - \frac{r \sigma A}{v_G \bar{\rho}_G c_G} (X_{G1} - X_L) \quad (11b)$$

$$\frac{\partial X_L}{\partial z} = \frac{\sigma A}{v_L \rho_L} (X_{G1} - X_L) \quad (11c)$$

$$\frac{\partial \bar{X}_G}{\partial u} = \frac{\sigma A}{v_G \rho_G} (X_{G1} - X_L) \quad (11d)$$

Im Falle der ruhenden Schicht tritt allerdings die Größe v_G im Nenner der Gln. (11b) und (11d) nicht auf. Die Variable u repräsentiert die Trocknungszeit bei der Trocknung einer ruhenden Getreidesäule. Im Kreuzstromtrockner bzw. im Gleichstromtrockner bezeichnet sie die Länge bzw. die Stärke der Kornsäule. Der für die Integration der Gln. (2), (3) und (4), sowie für die Auswertung von Gln. (9) und (10) benötigte Rechenaufwand wird eingespart. Gln. (7) und (8) bleiben weiterhin gültig. Das Gleichungssystem (11), in dem eine durch die Trocknung verursachte Deformierung der Körner nicht berücksichtigt ist, gilt nur für den stationären Zustand. Die Deformierung läßt sich aber mit den nach System (11) erhaltenen Grenzwerten:

$$T_L = T_L(z, t) \quad (12a)$$

$$X_L = X_L(z, t) \quad (12b)$$

für beliebige Punkte innerhalb der Kornschicht durch eine Lösung der Gln. (2), (3) und (4) nachträglich berechnen.

Die Verwendung einer durchschnittlichen Korntemperatur verursacht nur unbedeutende Unterschiede zwischen Simulationswerten und gemessenen Werten [6]. Ungenauigkeiten entstehen allerdings, wenn Gl. (11d) durch Näherungslösungen von der Form

$$\bar{X}_G = X_{G0} e^{-Kt} \quad (13)$$

zur Berechnung der durchschnittlichen Gutsfeuchte benutzt werden. Vorteilhafter erscheint es, den Stofftransport nach Gl. (11d) zwar ebenfalls auf ein reines Oberflächenproblem zu reduzieren, dabei aber den Einfluß des Gradienten der Kornfeuchte auf die relative Luftfeuchtigkeit an der Kornoberfläche zu berücksichtigen.

Eine Messung des Feuchtegradienten in trocknenden Getreide- und Maiskörnern bereitet erhebliche technische Schwierigkeiten, und von ihr ist bisher nicht berichtet worden. Bei homogenen Körnern mit regelmäßiger Geometrie kann mit den Gln. (2) bis (10) der Feuchtegradient für gemessene Randbedingungen der Trocknung berechnet werden. Solche von *Meiering* [6] berechneten Werte sind für kugelförmige Erbsen in **Tafel 1** angegeben. Sie zeigen, daß die Gutsfeuchte an der Kornoberfläche von Erbsen sehr schnell dem nach der Beziehung [11]

$$\varphi = \exp(-A T_G \exp(-B X_G)) \quad (14)$$

berechenbaren Gleichgewichtswert von $X_G = 6,22\%$ zustrebt.

Die in **Tafel 1** angegebenen Werte der relativen Luftfeuchtigkeit an der Kornoberfläche sind in **Bild 1** über dem Verhältnis der Feuchtegrade $G = \bar{X}_G / \bar{X}_{G0}$ aufgetragen. Sie lassen sich auf die mit der durchschnittlichen Kornfeuchte \bar{X}_G nach Gleichung (14) im Gleichgewicht stehenden relativen Luftfeuchtigkeit beziehen. Der Kurvenverlauf dieses Verhältnisses kann durch eine Exponentialfunktion von der Form

$$\varphi_0 = a + \bar{\varphi} G^b \quad (15)$$

angenähert werden. Eine solche Funktion mit $a = 0$ und $b = 3,0$ wurde aus den in **Tafel 1** angegebenen Simulationswerten der Erbsen berechnet und ist ebenfalls in **Bild 1** dargestellt. Sie weist im Vergleich zu den Simulationswerten mit abnehmendem Feuchtegradverhältnis G zu geringe Werte der relativen Luftfeuchtigkeit auf. Bei höheren Trocknungstemperaturen, wie sie in der Trock-

nungspraxis benutzt werden, dürfte sich jedoch wegen der entsprechend niedrigeren Gutsfeuchte an der Kornoberfläche auch nach fortgeschrittener Trocknung eine weitgehende Übereinstimmung ergeben.

Mit Gl. (15) läßt sich die Gleichgewichtsluftfeuchte an der Kornoberfläche bei der Simulation fortlaufend in einfacher Weise aus den nach Gleichung (14) ermittelten Werten von $\varphi(\bar{X}_G)$ und dem Feuchtegradverhältnis $G = \bar{X}_G/\bar{X}_{G_0}$ berechnen. Dieses Verfahren dürfte allerdings auf den Fall der erheblichen Untertrocknung der Einzelkörner beschränkt sein. Es wird daher in den folgenden Simulationsbeispielen nur bei den mit hohen Temperaturen arbeitenden Kreuzstromtrocknern angewendet.

Trocknungszeit h	Feuchtegrad der Körner		Relative Luftfeuchte	
	\bar{X}_G %	$X_{G\text{Oberfl.}}$ %	$\bar{\varphi}$ %	$\varphi\text{Oberfl.}$ %
0	52,5	52,5	98	98
0,002	41,8	22,1	98	87
0,1	37,6	9,9	98	48
0,2	37,0	8,3	98	34
0,3	36,6	7,8	98	29
1,0	32,5	6,9	96	20
2,0	26,6	6,6	93	18
3,0	22,2	6,5	86	17
4,0	18,9	6,4	80	16
5,0	16,4	6,4	75	16
6,0	14,4	6,3	66	15

Tafel 1. Änderungen des Wassergehaltes und der relativen Luftfeuchte an der Oberfläche trocknender Erbsen. Trocknungstemperatur: $T_L = 42,8^\circ\text{C}$; Feuchtegrad der Luft: $X_L = 7,63\text{ g/kg}$.

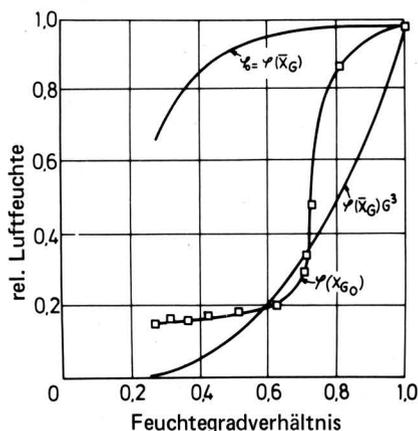


Bild 1. Relative Luftfeuchte an der Oberfläche trocknender Erbsen in Abhängigkeit vom Feuchtegradverhältnis $G = X_G/X_{G_0}$. Trocknungstemperatur: $T_L = 42,8^\circ\text{C}$; Feuchtegrad der Luft: $X_L = 7,63\text{ g/kg}$.

3. Die Simulation des Trocknungsverlaufs im Versuchstrockner

Unter Benutzung der Gln. (7), (8), (14) und (15) und der Clausius-Clapeyronschen Gleichung für den Sättigungsdruck des Wassers wurde mit Gleichungssystem (11) zunächst der Trocknungsvorgang von Körnermais im Kreuzstromtrockner simuliert. Als Versuchsparameter und Randbedingungen wurden die in Tafel 2 angegebenen Werte eingesetzt, die zum großen Teil in der in Bild 2 dargestellten Versuchsanlage gemessen wurden.

Gleichungssystem (11) wurde nach der "Finite Difference"-Methode im impliziten Verfahren numerisch gelöst. Ein Teil der Simulationsergebnisse wurde durch Messungen überprüft. So wurden zum Beispiel an den sechs unteren der in Bild 2 eingezeichneten neun Temperaturmeßstellen zusätzlich Kornproben aus der Kornsäule entnommen, deren Feuchtegrad nach der Trockenschrankmethode bestimmt wurde. Die Probenahme erfolgte jeweils zwei Stunden nach Erreichen des stationären Betriebszustandes.

Versuchsgröße	Einheit	Versuch I	Versuch II
Temperatur der Trocknungsluft	$^\circ\text{C}$	86	120
Temperatur der Außenluft	$^\circ\text{C}$	0	1
Feuchtegrad d. Trocknungsluft	g/kg	3,2	3,2
Anfangsfeuchtegehalt d. Körner	%	28,2	21,3
Luftdurchsatz	$\text{m}^3/\text{m}^2\text{h}$	1450	1400
Korndurchsatz	t/h	0,65	0,822
Spezifische Kornoberfläche	m^2/m^3	844	844
Wärmeübergangskoeffizient	$\text{kJ}/\text{m}^2\text{Kh}$	84	84
Durchschn. Verdampfungswärme	kJ/kg	2500	2500
Durchschn. Gutsdichte	kg/m^3	684	684
Durchschn. Spez. Wärme d. Körner	kJ/kg K	2,13	2,13
Durchschn. Spez. Wärme d. Luft	kJ/kg K	1,02	1,02

Tafel 2. Meß- und Versuchswerte der Körnermaistrocknung.

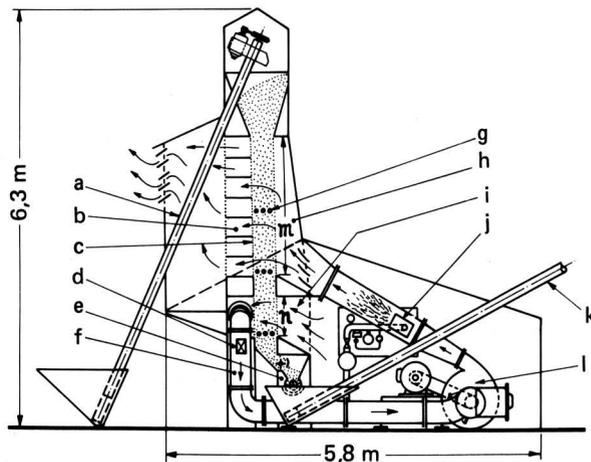


Bild 2. Versuchstrockner für Körnermais.

- a Förderschnecke
- b Staubsammelzellen
- c Siebwand
- d Regelklappe für Frischluft
- e Förderschnecke
- f Kühlluftückführung
- g Temperaturmeßstellen
- h Heißluftinlaß
- i Kühlluftinlaß
- j Gasbrenner
- k Förderschnecke
- l Radialgebläse
- m Trocknungszone
- n Kühlzone

Die Simulationsergebnisse der Korn- und Ablufttemperatur, sowie der am Ende der Trocknungszone und der Kühlzone gemessenen Kornfeuchtegrade sind in Bild 3 dargestellt. In beiden Versuchen ergab sich eine gute Übereinstimmung zwischen Simulations- und Meßwerten. Auch zwischen der Ablufttemperatur und der um etwa 1°C niedrigeren Korntemperatur an der Abluftseite der Kornsäule ergaben sich keine signifikanten Unterschiede. Ferner stimmten die als geometrisches Mittel aus dem simulierten Feuchtigkeitsprofil in der Säule ermittelten durchschnittlichen Gutsfeuchtegrade am Trocknerausgang mit den während des stationären Betriebszustandes aus einer Probenserie ermittelten mittleren Gutsfeuchtegraden überein. Eine größere Anzahl von Versuchen ergab, daß

das Simulationsverfahren eine ausreichende Genauigkeit besitzt, um auch bei der Analyse der Trocknerleistung und des Energiebedarfs von gewerblichen Großtrocknungsanlagen benutzt zu werden.

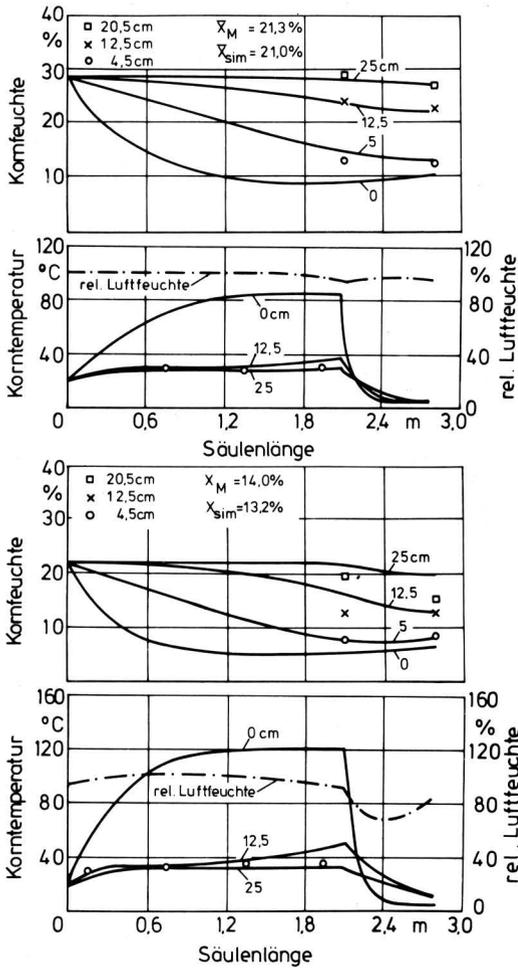


Bild 3. Vergleich der Simulations- und Meßergebnisse von Kornfeuchte und Korntemperatur für die Versuchsanlage, Länge der Trocknungszone: 2,10 m; Länge der Kühlzone: 0,75 m; Versuchsdaten: siehe Tafel 2.

4. Die Simulation des Trocknungsverlaufs in gewerblichen Körnertrocknungsanlagen

Die in Tafel 2 angegebenen Werte zum Wärme- und Stoffaustausch und der Materialeigenschaften wurden ohne Änderungen für die Simulation gewerblicher Trockner übernommen. Zunächst wurde die Trocknung in einem Kreuzstromtrockner, **Bild 4**, der nach Firmenangaben je Trocknungssäule etwa 8,9 t Mais pro Stunde von ca. 24,0 % auf ca. 14,0 % Endwassergehalt trocknen kann, simuliert. Aus technischen Gründen war es nicht möglich, die Simulationsergebnisse des Feuchtigkeitsprofils und des Temperaturprofils in der Kornssäule durch Messungen zu überprüfen. **Bild 5** zeigt aber, daß mit den am Versuchstrockner gewonnenen Informationen eine ausreichend genaue Voraussage der Trocknerleistung möglich war. Diese Tatsache läßt die Schlußfolgerung zu, daß auch die Simulationsergebnisse der Luft- und Korntemperaturen, sowie des Feuchtegrades der Luft und der Körner eine ausreichende Vertrauensbasis besitzen. Demnach wird ein Teil der Körner weit untertrocknet und auf zu hohe Temperaturen erhitzt. Das gilt auch für höhere Anfangsfeuchten um 30 %, **Bild 5** unten. Weiterhin zeigt sich in der Simulation, daß bis etwa 4–5 m Abstand vom Korneintritt am oberen Ende der Trocknersäule der in der Abluft enthaltene Wasserdampf kondensiert. Diese Erscheinung konnte

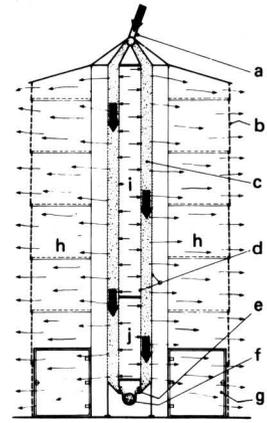


Bild 4. Schnitt durch einen gewerblichen Kreuzstromtrockner.

- | | |
|-------------------------|-----------------------|
| a Getreidezufuhr | f Förderschnecke |
| b Gelochtes Profilblech | g Tor für Staubabfuhr |
| c Kornssäule | h Abluftschacht |
| d Siebwand | i Heißluftschacht |
| e Ausläßregler | j Kühlluftschacht |

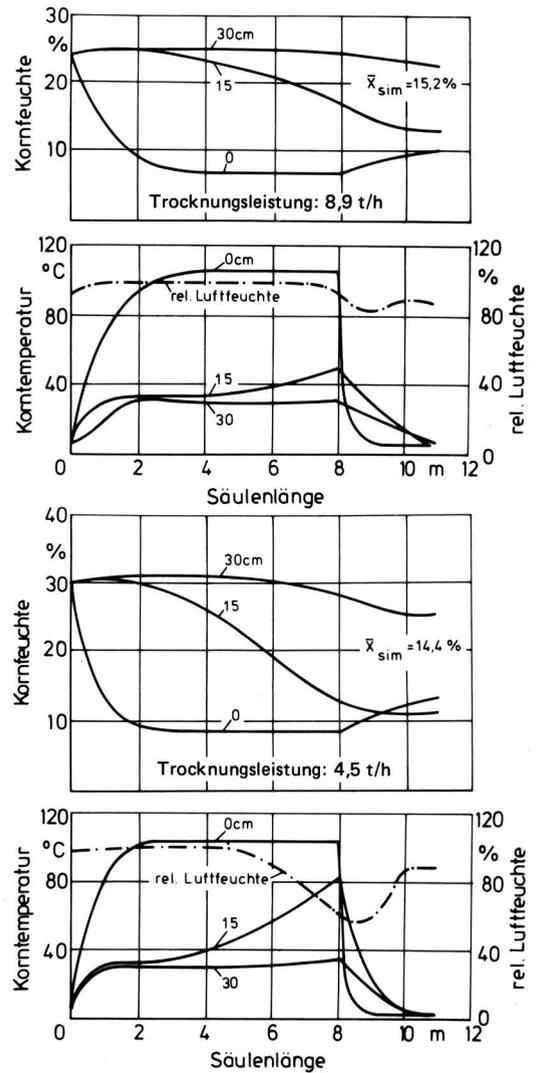


Bild 5. Kornfeuchte und -temperatur als Ergebnis der Simulation der Körnertrocknung in einem gewerblichen Kreuzstromtrockner, Trocknungstemperatur: 105 °C; Feuchtegrad der Luft: 3,2 g/kg bei 0 °C; Länge der Trocknungszone: 8,0 m; Länge der Kühlzone: 3,0 m; Stärke der Kornssäule: 0,3 m; Breite der Kornssäule: 3,66 m; Luftdurchsatz: 1500 m³/m² h.

durch Messungen bestätigt werden. Unterhalb dieser Grenze setzte mit dem Durchstoßen der Trocknungszone eine starke Emission von Bruchkorn und Hüllspelzen ein. Diese Partikel, die sich zum großen Teil bei der recht erheblichen Schrumpfung von den Körnern abspalten, werden nach der Abtrocknung der Kornoberflächen nicht mehr in der Trocknersäule zurückgehalten und können dann mit der Abluft ins Freie gelangen, **Bild 6**.

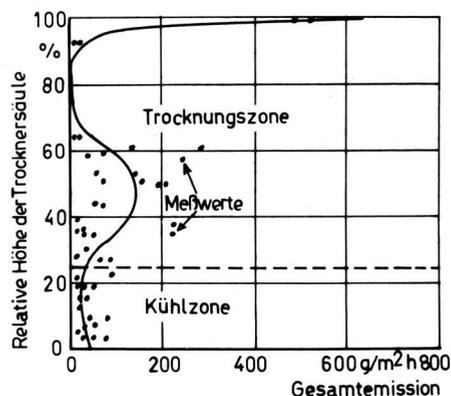


Bild 6. Emission von Bruchkorn und Hüllspelzen bei der Maistrocknung in gewerblichen Kreuzstromtrocknern [12, 13].

In neueren Trocknerkonstruktionen wird durch erhöhten Luftdurchsatz und verringerte Schichtstärken bei weitgehender Vermeidung der Untertrocknung an der Heißluftseite ein gleichmäßigeres Feuchtigkeitsprofil in der Kornsäule erzielt. Ein solcher Trockner ist im Schema in **Bild 7** dargestellt. Die Simulationsergebnisse der Maistrocknung für diesen Trockner zeigen, daß das ausgeglichene Feuchtigkeitsprofil nur mit einer erheblichen Verringerung des Korndurchsatzes und der Abluftsättigung erreicht werden kann, **Bild 8**. Die maximalen Korntemperaturen bleiben allerdings etwas niedriger, weil die Untertrocknung an der Heißluftseite vermindert wird. Bei diesen Trocknern wird allgemein Abluft aus der Trocknungszone zusammen mit der Abluft aus der Kühlzone in das Heizaggregat zurückgeführt [14]. Dadurch läßt sich die Energiebilanz im üblichen Rahmen halten oder im Vergleich zu anderen Trocknern ohne Abluftrückführung sogar verbessern. Zusätzliche Geräte zur Regelung der Lufttemperatur und des Korndurchsatzes sind erforderlich, um ein stabiles Profil der relativen Luftfeuchtigkeit über der Abluftseite herzustellen. Nur dann läßt sich die Abluft zuverlässig in einen vorwiegend gesättigten und einen ungesättigten Strom, der sich für die Rückführung eignet, teilen.

Aus **Tafel 3** geht hervor, daß sich bei höherem Korndurchsatz die Unterschiede in der relativen Feuchte der Abluft weitgehend ausgleichen. Die Sättigung steigt dann in dem in **Bild 8** beschriebenen Beispiel bei einer Luftmenge von $1500 \text{ m}^3/\text{m}^2 \text{ h}$ und etwa achtfachem Korndurchsatz auf Werte um 80 % an, so daß eine Rückführung der Abluft aus der Trocknungszone überflüssig wird. Die Rückführung der Kühlluft würde jedoch eine Energieeinsparung von ca. 23 % ergeben. Der Wasserentzug beträgt unter diesen Bedingungen etwa 8 %, was bei Anfangsfeuchtegehalten um 40 % ein dreifaches Durchlaufen der Körner durch den Trockner erforderlich macht, um einen Endfeuchtegehalt von 14,4 % zu erreichen. Erhöhter Luftdurchsatz führt zwar zu einer Erhöhung der Trocknerleistung, gleichzeitig aber auch zu einer abnehmenden Sättigung und damit zu höheren Energieverlusten in der Abluft, wenn der ungesättigte Anteil nicht zurückgeführt und dem Heißluftstrom beigemischt wird, **Bild 9**.

In einigen Trocknerkonstruktionen wird die Heißluft wechselweise von beiden Seiten der Kornsäule zugeführt. Andere Trockner haben Umwälzvorrichtungen in der Getreidesäule, die nach einer bestimmten Strecke die trockene Körnerschicht von der Heißluftseite zur Abluftseite und die feuchten Körner gleichzeitig in die umgekehrte Richtung lenken. Beide Maßnahmen helfen das Übertrocknen zu mildern.

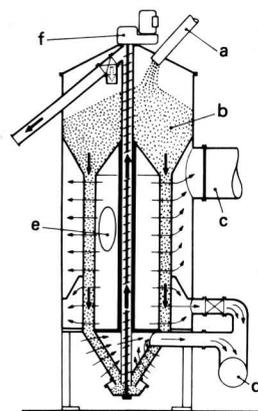


Bild 7. Dünnschicht-Kreuzstromtrockner für Mais, Länge der Trocknungszone: 2,5 m; Länge der Kühlzone: 1,0 m; Stärke der Kornsäule: 0,10 m; Breite der Kornsäule: 4,71 m.

- a Getreidezufuhr
- b Vorratsbehälter
- c Abluft
- d Abluftrückführung aus Trocknungs- und Kühlzone
- e Heißluftzufuhr
- f Förderschnecke

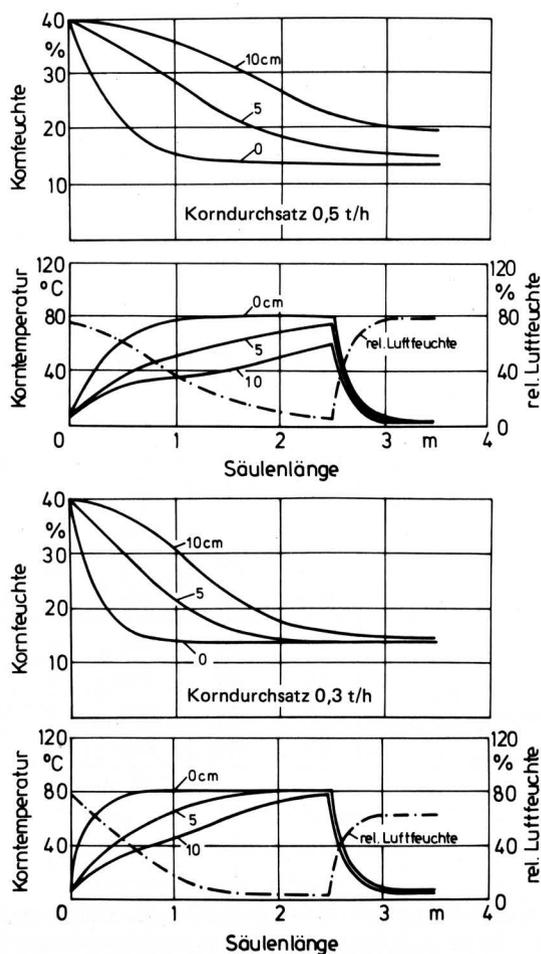


Bild 8. Simulationsergebnisse für die Maistrocknung im Dünnschicht-Kreuzstromtrockner. Stärke der Kornsäule: 0,10 m; Trocknungstemperatur: 80 °C; Feuchtegrad der Luft: 3,2 g/kg bei 5 °C; Luftdurchsatz: $1500 \text{ m}^3/\text{m}^2 \text{ h}$.

Eine sehr gute Energiebilanz und Trocknerleistung wird im Gleichstromtrockner erreicht, **Bild 10**. Selbst bei Lufttemperatur zwischen 200 °C und 300 °C erreichen die Körner (Eingangsfeuchte 40 %) nur Temperaturen zwischen 45 °C und 54 °C, **Tafel**

Tafel 3. Die Heißluft trifft dauernd auf die Körner mit dem höchsten Wassergehalt, was zu einer intensiven Verdunstung mit entsprechend hoher Abkühlung in unmittelbarer Nähe des Korneintritts führt. Ein Übertrocknen der Körner mit der damit verbundenen Überhitzung tritt nicht ein. Das aus dem Trockner austretende Korn hat eine gleichmäßige Feuchtigkeitsverteilung und bedarf keiner Mischung. Der Trockner kann so ausgelegt werden, daß die Körner einige nacheinander angeordnete Trocknungs- und Kühlschichten durchlaufen, wodurch eine hohe Abluft sättigung erreicht wird. Der Energiebedarf für die Überwindung des etwas höheren Luftwiderstandes ist zwar höher als beim Kreuzstromtrockner, hat jedoch wegen der ebenfalls höheren Heizleistung einen etwa gleich hohen prozentualen Anteil an der aufzuwendenden Gesamtenergie. Ein Rückführen der Kühlluft würde zu einer Energieeinsparung von ca. 8 % führen.

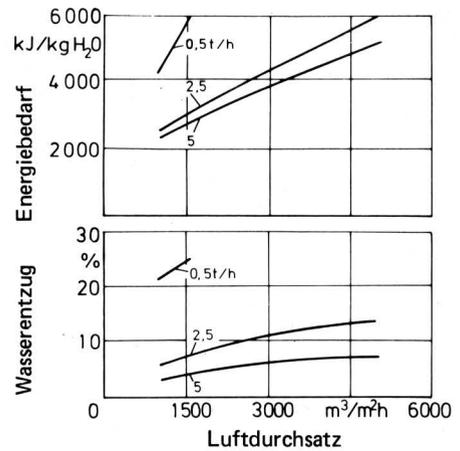


Bild 9. Einfluß des Luftdurchsatzes auf den Energiebedarf bei fehlender Rückführung der ungesättigten Abluft.

Tafel 3. Trocknungsleistung und Energiebedarf verschiedener Trocknertypen.

Länge der Trocknungs- u. Kühlzone	Schichtstärke	Trockn.-temp.	Luftdurchsatz	Druckabfall	Korndurchsatz		Kornfeuchtegehalt		Korn-temperatur		Sättigung der Abluft		Energiebedarf	Energie-rückge-winn aus Abluft	
					Ein-gang	Aus-gang	Max.	Min.	Max.	Min.					
m	m	°C	m³/m² h	mbar	t/h	m/h	%	%	°C	°C	%	%	kJ/kg	%	
2,1 / 0,75	0,25	86	1350	2,9	0,45	3,0	21,0	11,5	86	31	100	85	4044	25	
2,1 / 0,75	0,25	86	1450	3,2	0,65	4,3	28,2	21,0	86	28	100	93	3303	26	
2,1 / 0,75	0,25	120	1400	3,0	0,82	5,5	21,3	13,2	120	32	100	89	3320	35	
8,0 / 3,0	0,30	105	1500	4,1	8,9	13,5	24,0	15,2	105	30	100	97	3663	27	
8,0 / 3,0	0,30	105	1500	4,1	4,5	6,8	30,0	14,4	105	34	100	64	3789	18	
2,5 / 1,0	0,10	80	1000	0,7	5,0	17,7	40,0	37,0	47	28	94	91	2512	33	
2,5 / 1,0	0,10	80	1500	1,4	5,0	17,7	40,0	36,1	47	28	82	74	2713	25	
2,5 / 1,0	0,10	80	3000	4,3	5,0	17,7	40,0	34,2	47	31	50	38	3772	15	
2,5 / 1,0	0,10	80	4500	8,7	5,0	17,7	40,0	33,0	47	33	32	22	4785	10	
2,5 / 1,0	0,10	80	1000	0,7	2,5	8,8	40,0	34,1	64	28	94	82	2512	23	
2,5 / 1,0	0,10	80	1500	1,4	2,5	8,8	40,0	32,4	64	30	82	60	2968	17	
2,5 / 1,0	0,10	80	3000	4,3	2,5	8,8	40,0	28,7	64	35	48	25	4232	10	
2,5 / 1,0	0,10	80	4500	8,7	2,5	8,8	40,0	27,0	64	40	30	13	5497	8	
2,5 / 1,0	0,10	80	1500	1,4	2,5	8,8	32,4	23,6	72	31	81	52	3261	18	
2,5 / 1,0	0,10	80	1500	1,4	2,5	8,8	23,6	14,4	78	34	79	35	3960	20	
2,5 / 1,0	0,10	80	1500	1,4	0,3	1,1	40,0	14,0	80	77	76	1,4	9039	4	
Gleich-strom-trockner	0,5	100	2000	11,0	0,3	t/m²	0,44	40,0	32,4	32	—	—	100	3868	8
	0,5	200	2000	11,0			0,44	40,0	24,9	45	—	—	99	3487	8
	0,5	200	3000	21,8			0,44	40,0	14,4	50	—	—	78	3537	6
	0,5	300	2000	11,0			0,44	40,0	18,5	54	—	—	91	3307	8

Der niedrigste Energiebedarf ergibt sich bei der Belüftungstrocknung. Das gilt auch für den Fall einer zusätzlichen geringen Luftanwärmung um etwa 4 °C während 30 % der Trocknungszeit, Tafel 4. Die maximale Anfangsfeuchtigkeit der Körner ist jedoch auf etwa 20 bis 25 % beschränkt, wenn die Trocknung einer 2,0 m hohen Schüttung mit Luftmengen von 600 bis 900 m³/m² h in ca. 7 bis 8 Tagen beendet sein soll. Bei Anfangsfeuchtegehalt $U_0 = 30\%$ wächst der Luftbedarf auf ca. 1 200 m³/m² h an, damit die Trocknungszone rechtzeitig die gesamte Schüttung durchdringen kann, Bild 11.

Weitere Untersuchungen insbesondere über die Abhängigkeit der Kornqualität von der Trocknungsdauer sind notwendig, um zuver-

lässigere Richtlinien für die Belüftungstrocknung von Mais in verschiedenen Klimagebieten zu erarbeiten. Die Belüftungstrocknung dürfte wegen des vergleichsweise hohen Bedarfs an Trocknungsraum hauptsächlich auf landwirtschaftliche Betriebe, in denen die Körner in den gleichen Behältern gelagert und getrocknet werden, beschränkt sein. Eine Heißlufttrocknung von ca. 40 % Anfangsfeuchtegehalt auf ca. 20 % Endfeuchtegehalt in Kombination mit einer nachfolgenden Belüftungstrocknung auf ca. 14 % im Lagerbehälter könnte auch für gewerbliche Betriebe Vorteile bieten. Dieses "Drieration" genannte Verfahren schließt ein Übertrocknen der Körner aus und verhilft daher zu einer besseren Energieausnutzung und einer Qualitätsverbesserung der Körner.

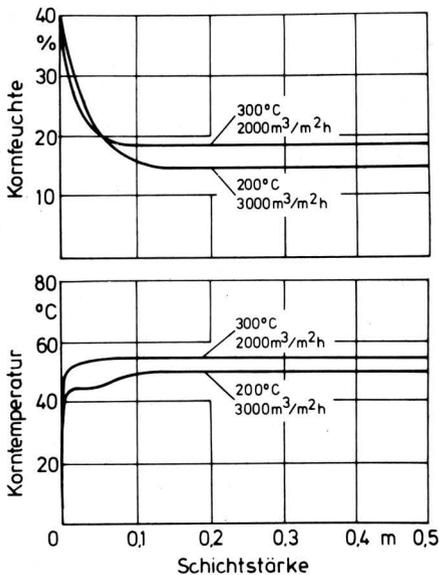


Bild 10. Kornfeuchte und Korntemperatur im Gleichstromtrockner, Trocknungstemperatur: 200 und 300 °C; Schichtstärke: 0,50 m; Feuchtegrad der Luft: 3,2 g/kg bei 0 °C; Korndurchsatz: 0,3 t/m² h; Luftdurchsatz: 2000 und 3000 m³/m² h.

Die obengenannten Werte des Energiebedarfs und der Energieeinsparung beziehen sich auf die in der Simulation gewonnenen Temperaturwerte und auf durchschnittliche spezifische Wärmen von $c_{pL} = 1,02 \text{ kJ/kg K}$ für Luft und $c_G = 2,13 \text{ kJ/kg K}$ für Maiskörner. Der Wirkungsgrad der Heizgeräte und Wärmeverluste sind nicht berücksichtigt. Sie dürften bei der Belüftungstrocknung etwas günstiger liegen als bei den mit Heißluft arbeitenden Verfahren. Eine Luftanwärmung mit Rauchgasbeimischung dürfte bei Verwendung von Gas als Brennstoff keine größeren Probleme verursachen. Rauchgas von Heizöl enthält dagegen je nach Qualität unterschiedliche Mengen an Schwefel und je nach der Güte des unter den Bedingungen der Praxis nicht immer störungsfreien Brennvorgangs unterschiedliche Mengen unverbrannter polyzyklischer Kohlenwasserstoffe [15]. Forschungsarbeiten im Institut für Landtechnik der Universität Stuttgart-Hohenheim haben ergeben, daß von den Maiskörnern mehrere solcher Substanzen, darunter das krebserregende Benzo(a)pyren, absorbiert werden. Weitere Forschungsarbeiten müssen ergeben, ob die direkte Beheizung mit Heizöl bei der Getreidetrocknung vertretbar ist [16].

Verwendete Formelzeichen

A	Spezifische Kornoberfläche
A, B, K	stoffspezifische Konstanten
a	Temperaturleitfähigkeit
c_G	Durchschnittliche spezifische Wärmekapazität der Körner
c_{pL}	Spezifische Wärmekapazität der Luft bei konst. Druck
D	Diffusionskoeffizient des Gutswassers
D_1, D_2, D_3	Koeffizienten für die Feuchtediffusion
K	Trocknungskonstante
k_1, k_2, k_3	Koeffizienten für die Wärmediffusion
n	Normale zur Kornoberfläche
p_{ges}	Gesamtdruck
p_S	Sättigungsdruck des Wassers
r	Verdampfungswärme
T_G	Korntemperatur
\bar{T}_G	Durchschnittliche Korntemperatur

Feuchtegehalt		Schütthöhe	Luftdurchsatz		Trocknungsdauer	Energiebedarf	
Beginn	Ende		Q	P		30 % Hzg.	keine Hzg.
%	%	m	m³/m² h	mm	Tage	kJ/kg	kJ/kg
40,0	27,1	2,0	900	120	10	1818	740
40,0	22,0	2,0	1200	193	10	2261	1179
30,0	19,7	2,0	600	64	10	1551	414
30,0	14,1	2,0	900	121	10	1981	807
30,0	14,1	2,0	1200	193	7,5	2466	1287
20,0	14,2	2,0	600	64	7,6	2537	677
20,0	14,2	2,0	900	121	5,1	3164	1287

Tafel 4. Trocknungsleistung und Energiebedarf bei der Belüftungstrocknung von Mais.

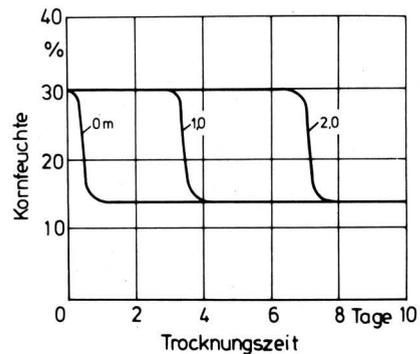


Bild 11. Typischer Trocknungsverlauf bei der Belüftungstrocknung von Körnermais; Anfangsfeuchtegehalt: $U_0 = 30 \%$; Luftdurchsatz: $1200 \text{ m}^3/\text{m}^2 \text{ h}$; Schütthöhe: 2,0 m.

T_L	Lufttemperatur
t	Zeit
U_0	Anfangsfeuchtegehalt
u	Zeit bei der Belüftungstrocknung, Säulenlänge beim Kreuzstromtrockner, Schichtstärke beim Gleichstromtrockner
V_G	Kornvolumen
v_L	Luftgeschwindigkeit
v_G	Fließgeschwindigkeit der Körner
X_G	Feuchtegrad der Körner
\bar{X}_G	Durchschnittlicher Feuchtegrad der Körner
\bar{X}_{G0}	Durchschnittlicher Anfangsfeuchtegrad der Körner
X_{G1}	Gleichgewichtsfeuchtegrad der Luft an der Kornoberfläche
X_L	Feuchtegrad der Trocknungsluft
z	Stärke der Korssäule oder Kornschicht
a	Wärmeübergangskoeffizient
λ	Wärmeleitfähigkeit
χ_1, χ_2, χ_3	Koeffizienten der Volumenänderung
ρ_L	Dichte der Luft
$\bar{\rho}_G$	Durchschnittliche Dichte der Körner
ρ_G	Durchschnittliche Dichte der Korntrockenmasse
σ	Stoffübergangskoeffizient für Wasser
φ	Relative Luftfeuchtigkeit
$\bar{\varphi}$	Relative Luftfeuchtigkeit im Gleichgewicht mit \bar{X}_G
φ_0	Relative Luftfeuchtigkeit im Gleichgewicht mit X_G an der Kornoberfläche

Schrifttum

Bücher sind durch • gekennzeichnet

- [1] *Sabbah, M.A., G.H. Foster, C.H. Haugh u. R.M. Peart:* Effect of tempering after drying on cooling shelled corn. Transactions ASAE, Vol. 15 (1972) No. 4, S. 763.
- [2] *Klapp, E.:* Mathematische Behandlung gekoppelter Wärme- und Stoffaustauschvorgänge in durchströmten Schüttgütern. Ingenieur-Archiv, Bd. 32 (1963) H. 5, S. 360.
- [3] *Meiering, A.G., W.H. Clifford u. F.W. Bakker-Arkema:* Drying of a bed of composted waste. Transactions ASAE, Vol. 15 (1972) No. 1, S. 116.
- [4] *Bakker-Arkema, F.W., L.E. Lerew, S.F. De Boer u. M.G. Roth:* Grain drier simulation. Research Report 224, Mich. State Univ. Exp. Sta., Jan. 1974.
- [5] • *Slatyer, R.O.:* Plant-Water Relationships. London, New York: Academic Press 1967.
- [6] *Meiering, A.G.:* Der gekoppelte Wärme- und Stoffaustausch bei der Verarbeitung von Nahrungsmitteln unter besonderer Berücksichtigung der Trocknung von Körnerfrüchten. VDI-Z. Fortschr.-Ber., Reihe 14, Nr. 14, Düsseldorf: VDI-Verlag 1971.
- [7] *Husain, A., C.S. Chen, J.T. Clayton u. L.F. Whitney:* Mathematical simulation of mass and heat transfer in high moisture foods. Transactions ASAE, Vol. 15 (1972) No. 4, S. 732.
- [8] *Chen, C.S.:* Simultaneous heat and mass transfer in convective drying of biological materials. Ann. Technol. agric. 22 (1973) 3, S. 305.
- [9] *Allada, S.R. u. D. Quon:* A stable, explicit numerical solution of the conduction equation for multidimensional, nonhomogeneous media. Chemical Engineering Progress Symposium Series, Vol. 62, No. 64, S. 151.
- [10] *Baughman, G.R., M.Y. Hamdy u. H.J. Barre:* Analog computer simulation of deep-bed drying of grain. Transactions ASAE, Vol. 14 (1971) No. 6, S. 1058.
- [11] *Gustafson, B.J. u. G.E. Hall:* Equilibrium moisture content of shelled corn from 50 to 150 °F. Transactions ASAE, Vol. 15 (1974) No. 1, S. 120.
- [12] *Meiering, A.G. u. H.J. Hoefkes:* Particulate emission in corn drying. Research Report, School of Engineering, Univ. of Guelph, March 1976.
- [13] *Hoefkes, H.J.:* Particulate emission in corn drying. M. Sc. Thesis, School of Engineering, Univ. of Guelph, May 1976.
- [14] *Bakker-Arkema, F.W., D.M. Farmer u. L.E. Lerew:* Optimum grain drier design through simulation. Ann. Technol. agric. 22 (1973) 3, S. 275.
- [15] *Kremer, H.:* Schadstoffemission von Ölbrennern niedriger Leistung mit Druckzerstäubung unter verschiedenen Betriebsbedingungen. Vorabdruck VDI-Bericht Nr. 246, S. 199, Düsseldorf: VDI-Verlag 1975.
- [16] *Hutt, W. u. W. Oelschläger:* Einfluß der Brenneremissionen auf die Gehalte an anorganischen Ablagerungen auf Körnerfrüchten bei direktbeheizten Trocknungsanlagen. Mitteilung Sonderforschungsbereich 140, Landtechnik Hohenheim 1976.

Untersuchungen zur Bewegung des Zitzengummis in Abhängigkeit von Einfaltdruck, Pulszyklus und Vakuumbreite in Melkanlagen

Von Hermann Worstorff und Hans Stanzel, Weihenstephan*)

DK 637.125

Melkmaschinenforschung und -entwicklung unterliegen seit einigen Jahren einem deutlichen Wandel in der Zielsetzung von wesentlich arbeitswirtschaftlichen zu mehr qualitativen Merkmalen des maschinellen Milchentzuges. Maßgebend für diese Veränderungen sind Probleme mit der Eutergesundheit sowie der Wunsch, das genetische Potential der Kühe voll auszuschöpfen. Die Entwicklungen werden begleitet von internationalen und nationalen Normierungsbestrebungen bezüglich Terminologie und Mindestanforderungen an Melkanlagen. Das ist als wesentlicher erster Schritt für eine Verbesserung der Maschinen in der Praxis anzusehen. Es ist jedoch seit längerem bekannt, daß die für den maschinellen Milchentzug entscheidenden Faktoren Vakuum und Pulsierung im

Aus den Arbeiten des Sonderforschungsbereiches 141 "Produktionstechniken der Rinderhaltung" an der TU München-Weihenstephan, durchgeführt vom Institut für Landtechnik, Weihenstephan (Direktor: Prof. Dr. H.L. Wenner).

*) Dr. agr. Hermann Worstorff ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am SFB-Projektbereich "Maschineller Milchentzug", Dr. agr. Hans Stanzel ist Leiter der Meßabteilung der Landtechnik Weihenstephan und verantwortlich für das Teilprojekt "Programmgesteuerte Melkanlagen".

Melkzeubereich auch bei modernen Anlagen einer starken Variation unterliegen. Der vorliegende Artikel analysiert die für die Bewegung des Zitzengummis ausschlaggebenden Kräfte.

1. Einleitung

Nachdem durch die Entwicklung leistungsstarker Milchentzugssysteme und milchflußgesteuerter Melkeinheiten wichtige arbeitswirtschaftliche Probleme des maschinellen Milchentzuges einer Lösung näher gebracht worden sind, gilt es nun, die Melkmaschine verstärkt im Hinblick auf Vollständigkeit der Milchgewinnung ohne technologisch bedingtes Nachgemelk bei gleichzeitiger Wahrung einer guten Eutergesundheit zu optimieren. Beide Schritte sind erforderlich, um das genetische Potential der Tiere und die eingesetzten Betriebsmittel maximal zu nutzen und lassen sich unter Beibehaltung der herkömmlichen Melktechnik mit Zweiraum-Zitzenbechern nur durch optimale Anpassung von Vakuum und Pulsierung an die Bedürfnisse des Tieres erreichen. Diese Anpassung wiederum ist technisch nur möglich, wenn beide Faktoren konstant gehalten und ggf. sogar gezielt variiert werden können.

Der vorliegende Beitrag zeigt beispielhaft für den Parameter Saugphase, welche Bedeutung dem Einfaltdruck des Zitzengummis, der Gestaltung des Pulszyklus und der Höhe des Vakuums unterhalb der Zitze zukommen und weist auf die dringende Notwendigkeit hin, die Vakuumapplikation am Euter zu stabilisieren.