

## Die Kaltlufttrocknung von Weizen unter energetischem und mikrobiologischem Aspekt

Von Werner Mühlbauer, Werner Hofacker,  
Hans-Martin Müller und Martin Thaler,  
Stuttgart-Hohenheim\*)

Mitteilung aus dem Sonderforschungsbereich 140 – Landtechnik "Verfahrenstechnik der Körnerfruchtproduktion"  
der Universität Hohenheim

DK 633.1:664.8.047:579.64

Die Energie- und Investitionskosten bei der Getreide-  
trocknung lassen sich durch Trocknung mit Kaltluft  
wesentlich reduzieren. Das witterungsbedingte Risiko bei  
der Kaltlufttrocknung kann durch verfahrenstechnische  
Maßnahmen weitgehend ausgeschlossen werden.

Es werden hier vier Verfahrensvarianten im Hinblick auf  
die Trocknungsleistung und den Bedarf an mechanischer  
und thermischer Energie untersucht. Als Beurteilungskri-  
terien für den Konservierungserfolg dienen der Mikroor-  
ganismenbesatz, der Trockenmasseverlust durch At-  
mungsreaktionen, die Keimfähigkeit und der Feuchtkle-  
bergehalt. Die Versuche zeigten, daß eine 4 m hohe Kör-  
nerschüttung mit einem Anfangsfeuchtegehalt bis zu  
22 % mit geringer Luftgeschwindigkeit ( $v_L = 0,075$  m/s)  
ohne nennenswerte Beeinträchtigung der Kornqualität  
getrocknet werden kann.

Die Verfasser danken den chem.-techn. Assistentinnen Frau Dorothea  
Weidmann und Frau Gisela Brunner für die Mitarbeit bei der Durchführung  
und Auswertung der Versuche.

\*) Dr.-Ing. W. Mühlbauer ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am  
Lehrstuhl Grundlagen der Landtechnik des Instituts für Agrar-  
technik (Lehrstuhlinhaber: Prof. Dr.-Ing. H.D. Kutzbach),  
Dr. rer. nat. H.-M. Müller ist Professor für Futtermittelkunde  
und Futtermittelmikrobiologie am Institut für Tierernährung  
der Universität Hohenheim, Dipl.-Ing. W. Hofacker und  
Dr. rer. nat. M. Thaler sind wissenschaftliche Mitarbeiter des  
Sonderforschungsbereichs 140 – Landtechnik.

### 1. Einleitung

Die Kaltlufttrocknung<sup>1)</sup> wurde bereits in den Jahren zwischen  
1950 und 1960 in den landwirtschaftlichen Betrieben der Bun-  
desrepublik Deutschland vorwiegend zur Konservierung von Ge-  
treide und Heu eingeführt [2 bis 4]. Der allgemeine Trend in der  
Landwirtschaft, durch stärkere Mechanisierung die Arbeitspro-  
duktivität zu erhöhen, begünstigte in Verbindung mit niedrigen  
Energiekosten in der Folgezeit trotz des hohen Energiebedarfs  
die Einführung von Warmlufttrocknungsanlagen.

Bei steigenden Energiepreisen und der zu erwartenden Verknä-  
pfung der fossilen Brennstoffe gewinnen jedoch zukünftig Kon-  
servierungsverfahren, die mit minimalem Energieaufwand arbeiten,  
zunehmend an Bedeutung. Als energetisch günstige Alternative  
zur Warmlufttrocknung von Saat- und Brotgetreide, sowie von  
Futtergetreide, das zur Vermarktung vorgesehen ist, bietet sich  
lediglich die Kaltlufttrocknung an. Die wesentlichen verfahrens-  
bedingten Vor- und Nachteile der Kaltlufttrocknung im Vergleich  
zur Warmlufttrocknung sind in Tafel I zusammengestellt.

Die Kaltlufttrocknung ist ein diskontinuierliches Trocknungsver-  
fahren, bei dem eine in einem Behälter ruhende Körnerschüttung  
mit Kaltluft solange belüftet wird, bis die Körner auf lagerfähigen  
Zustand getrocknet sind. Bei der Kaltlufttrocknung wird weitge-  
hend das Trocknungspotential, d.h. die Wasserdampfaufnahme-  
fähigkeit der Umgebungsluft genutzt, so daß sich der Energiebe-  
darf im wesentlichen auf den Antrieb des Ventilators zur Erzeu-  
gung des Luftstromes beschränkt. Bei ungünstigen Witterungsbe-  
dingungen ( $\varphi_{LO} > 0,8$ ) kann zur Beschleunigung des Trocknungs-  
vorganges die Wasserdampfaufnahmefähigkeit der Luft durch Er-  
wärmen oder durch Entfeuchten erhöht werden.

1) In Anlehnung an die Vorschriften für Bau, Aufstellung und Betrieb von  
landwirtschaftlichen Trocknungsanlagen für Getreide [1] wird anstelle des  
früher üblichen Begriffes Belüftungstrocknung im folgenden der Terminus  
Kaltlufttrocknung für Trocknungsverfahren verwendet, die mit Umge-  
bungsluft bzw. geringfügig vorgewärmter Umgebungsluft ( $\Delta\vartheta = 3-10$  K)  
betrieben werden.

Vorteile	Nachteile
Geringe Investitionskosten (Trocknungsbehälter ist identisch mit Lagerbehälter, geringe Zusatzkosten für Gebläse und Luftverteilereinrichtung)	Verfahren ist witterungsabhängig
Niedriger mechanischer und minimaler thermischer Energiebedarf	Verfahrensrisiko, da qualitative Veränderung der Körner durch enzymatische und mikrobielle Reaktionen nicht vollständig ausschließbar
Verfahren kann unabhängig von der Verfügbarkeit fossiler Brennstoffe betrieben werden	Verfahren ist für Körnermais nicht geeignet, da der mikrobielle Verderb schneller fortschreitet als die Trocknung
Hohe Verfahrensleistung, Anpassung der Konservierungsleistung an Erntekapazität ist möglich	
Verfahrensablauf kann voll mechanisiert werden	
Geringer Überwachungsaufwand	
Hohe Funktionsicherheit der technischen Einrichtungen	
Keine Belastung der Umwelt durch Staub und Lärm	

**Tafel 1.** Vor- und Nachteile der Kaltlufttrocknung von Getreide im Vergleich zu konventionellen Warmlufttrocknungsverfahren.

Die Auslegung und Optimierung von Kaltlufttrocknungsanlagen hinsichtlich Energiebedarf und Investitionskosten bei gleichzeitiger Berücksichtigung der Erhaltung der Qualität des Trocknungsgutes ist schwierig, da sowohl die Gutart, der Feuchtegehalt des Erntegutes, das hygroskopische Verhalten der Körner, der Besatz mit verschiedenen Mikroorganismengruppen sowie die Trocknungsparameter Zustand der Umgebungsluft, Luftdurchsatz, Schütthöhe, Trocknungsdauer, den Energiebedarf und die Qualitätseigenschaften des Trocknungsgutes beeinflussen.

Trotz der Bedeutung, die der Energieeinsparung in der Landwirtschaft zukommt, ist die Erhaltung der Qualität des Trocknungsgutes erstrangiges Optimierungskriterium. Während thermisch bedingte Veränderungen der biologischen, ernährungsphysiologischen und technologischen Eigenschaften in erster Linie bei der Warmlufttrocknung auftreten, besteht bei der unter Umständen mehrere Wochen dauernden Kaltlufttrocknung die Gefahr, daß Trockenmasseverluste durch enzymatischen Abbau der Stärke auftreten. Weiter kann bei Vermehrung der Mikroorganismen (Bakterien, Pilze, Hefen) durch deren Stoffwechselprodukte Geruch, Geschmack, Farbe und Keimfähigkeit der Körner verändert werden. Besondere Bedeutung kommt der Entwicklung von Schimmelpilzen zu, die toxische Stoffwechselprodukte bilden können. Diese, die sogenannten Mykotoxine, können Schäden bei landwirtschaftlichen Nutztieren hervorrufen und zu einer Gefährdung der menschlichen Gesundheit führen sowohl bei direkter Aufnahme als auch indirekt durch Übertragung beim Verzehr von Fleisch, Milch und Eiern.

## 2. Bisherige Arbeiten

Über die Kaltlufttrocknung von Weizenschüttungen liegen experimentelle Untersuchungen von *Dencker* [2], *Wenner* [4], *Maltry* [5], *Ekström* [6] u.a. vor, die sich aber im wesentlichen darauf beschränkten, die Zusammenhänge zwischen den Stoff- und Trocknungsparametern und dem Trocknungsverhalten der Weizenkörner bei kontinuierlicher und intermittierender Belüftung zu bestimmen. Das für den Konservierungserfolg letztlich entschei-

dende Kriterium, die qualitative Veränderung der Körner durch die Kaltlufttrocknung, wurde hingegen nur unzureichend berücksichtigt. Die von *Wenner* [4] und *Jouin* [7] als wertbestimmend angenommenen Kriterien Keimfähigkeit der Körner bzw. Trockenmasseverluste durch enzymatische Reaktionen sind nach neueren Untersuchungen von *Kuppinger u.a.* [8] nicht relevant, da die enzymatischen Reaktionen und die biochemischen und mikrobiologischen Vorgänge, die zu einer Reduzierung der Keimfähigkeit führen, langsamer ablaufen als die Vermehrung der mykotoxinbildenden Schimmelpilze.

Die thermodynamischen Zusammenhänge bei der Kaltlufttrocknung von Weizen wurden von *Wenner* [4] und *Maltry* [5] untersucht. Die dabei gewonnenen Erkenntnisse reichen für eine rechnerische Simulation der bei der Kaltlufttrocknung ablaufenden Vorgänge und eine Optimierung des thermodynamischen Prozesses jedoch nicht aus.

## 3. Aufgabenstellung

In einer experimentellen Untersuchung soll zunächst der Einfluß der Stoff- und Trocknungsparameter sowie der Witterungsbedingungen auf das Trocknungsverhalten, den Bedarf an thermischer und mechanischer Energie sowie die Qualität des Trocknungsgutes bei der Kaltlufttrocknung von Weizen untersucht werden. Dabei sollen gleichzeitig vier verschiedene Verfahrensvarianten der Kaltlufttrocknung (Trocknung mit Umgebungsluft, Trocknung mit vorgewärmter Luft, kontinuierliche und intermittierende Belüftung) miteinander verglichen werden, wobei der Energiebedarf zunächst das erstrangige Selektionskriterium darstellt. Um eine Übertragbarkeit der Versuchsergebnisse in die landwirtschaftliche Praxis sicherzustellen, sollen die Versuchsanlagen im technischen Maßstab erstellt und Schütthöhen bis 4 m untersucht werden. Zur Ermittlung der Grenzen des Verfahrens sollen Körner mit extrem hohen Feuchtegehalten ( $U_1 = 20-23\%$ ) getrocknet werden. Der Luftdurchsatz soll in einem Bereich variiert werden, der im Vergleich zur Warmlufttrocknung günstigere Energiebedarfswerte erwarten läßt. Besondere Bedeutung soll der qualitativen Veränderung der Körner beigemessen werden.

## 4. Theoretische Grundlagen

Voraussetzung für die mathematische Beschreibung des Trocknungsverlaufes in der Körnerschüttung bei der Kaltlufttrocknung ist die Kenntnis der Zusammenhänge zwischen der Temperatur und der relativen Feuchte der Trocknungsluft, der Luftgeschwindigkeit, dem Feuchtegehalt der Körner und der Trocknungs- bzw. Befeuchtungsgeschwindigkeit, wobei die Wechselwirkung zwischen dem Zustand der Trocknungsluft und dem Zustand des Trocknungsgutes infolge der langsam ablaufenden Vorgänge maßgeblich von dem hygroskopischen Verhalten der Körner beeinflußt wird.

Da beim derzeitigen Stand der Erkenntnisse eine Berechnung des zeitlichen Verlaufes der Trocknung in Abhängigkeit von der Schütthöhe bei veränderlichem Zustand der Trocknungsluft nicht möglich ist, wird im folgenden, ausgehend von Wärme- und Stoffbilanzen, der Einfluß der verschiedenen Stoff- und Trocknungsparameter auf den Energiebedarf beschrieben.

### 4.1 Analyse des Bedarfs an mechanischer Energie

Der Energiebedarf bei der Kaltlufttrocknung setzt sich zusammen aus dem Aufwand an mechanischer und thermischer Energie. Mechanische Energie  $E$  ist erforderlich zum Antrieb des Ventilators und kann nach folgender Beziehung berechnet werden:

$$E = P t \quad (1)$$

Für die Antriebsleistung P des Ventilators gilt:

$$P = \frac{\dot{V}_L (p_{\text{dyn}} + \Delta p_{\text{st}})}{\eta_G} \quad (2)$$

wobei der Volumenstrom sich aus dem Kontinuitätsgesetz ergibt:

$$\dot{V}_L = A v_L = \dot{m}_L \rho_L \quad (3)$$

Im Vergleich zu dem sich aus dem Strömungswiderstand der Körnerschüttung ergebenden Druckabfall  $\Delta p_{\text{st}}$  ist der dynamische Druck vernachlässigbar klein. Nach *Matthies* [9] kann der Strömungswiderstand einer Weizenschüttung in erster Näherung nach der Gleichung

$$\Delta p_{\text{st}} = h_{\text{sch}} C_1 \frac{1}{\epsilon^4} v_L^{2-n} \quad (4)$$

berechnet werden. Aus den Gleichungen (1) bis (4) ergibt sich der Bedarf an mechanischer Energie zu:

$$E = \frac{A C_1}{\epsilon^4 \cdot \eta_G} h_{\text{sch}} v_L^{3-n} t \quad (5)$$

Die Trocknungszeit t kann berechnet werden aus der Massenbilanz für die Feuchte, die besagt, daß die den Körnern entzogene Feuchtemasse von der Trocknungsluft aufgenommen wird:

$$A h_{\text{sch}} \rho_{\text{sch}} \frac{U_1 - U_2}{100 - U_2} = \eta \overline{\Delta x_{21}} \dot{V}_L \rho_L t \quad (6)$$

$\overline{\Delta x_{21}}$  ist der Mittelwert der in der Zeit t von der Trocknungsluft theoretisch aufnehmbaren Feuchtemasse. Der Zusammenhang zwischen dem tatsächlich aufgenommenen Feuchtestrom  $\Delta \dot{m}_w$  und dem theoretisch aufnehmbaren Feuchtestrom  $\dot{m}_L \overline{\Delta x_{21}}$  wird durch folgende Beziehung hergestellt:

$$\eta = \frac{\Delta \dot{m}_w}{\dot{m}_L \overline{\Delta x_{21}}} \quad (7)$$

Der Wirkungsgrad  $\eta$  stellt also ein Maß für die Ausnutzung des Trocknungspotentials der Trocknungsluft dar.

Die theoretisch von der Trocknungsluft aufnehmbare Feuchtemasse kann aus der Differenz des Feuchtegrades der Trocknungsluft  $x_1$  und dem bei isenthalper Befeuchtung bis zur Sättigung ( $\varphi_L = 1,0$ ) sich ergebenden Feuchtegrad  $x_2$  berechnet werden:

$$\overline{\Delta x_{21}} = \frac{1}{t} \sum (x_2 - x_1) \Delta t \quad (8)$$

Während der Feuchtegrad der Trocknungsluft  $x_1$  bei bekanntem  $\vartheta_L$  und  $\varphi_L$  nach den Beziehungen für feuchte Luft direkt berechnet werden kann, müssen zur Bestimmung des Feuchtegrades  $x_2$  die Gleichungen für die isenthalpe Zustandsänderung der Trocknungsluft ( $h = \text{const.}$ ) mit der Sättigungslinie zum Schnitt gebracht werden.

$$x = \frac{h - c_{pL} \vartheta}{r_o + c_{pD} \vartheta} \quad (9)$$

$$x = 0,622 \frac{p_s(\vartheta)}{p - p_s(\vartheta)} \quad (10)$$

Da die Dampfdruckgleichung  $p_s(\vartheta)$  nach *Wagner* [10] nicht nach  $\vartheta$  aufgelöst werden kann, muß  $p_s(\vartheta)$  und daraus wiederum x iterativ bestimmt werden.

Aus Gl. (6) ergibt sich für die Trocknungszeit t

$$t = \frac{U_1 - U_2}{100 - U_2} \cdot \frac{h_{\text{sch}} \rho_{\text{sch}}}{\eta \overline{\Delta x_{21}} v_L \rho_L} \quad (11)$$

Durch Einsetzen von Gl. (11) in Gl. (5) erhält man bei  $n = 0,7$  für den Bedarf an mechanischer Energie E die Beziehung

$$E = \frac{U_1 - U_2}{100 - U_2} \cdot \frac{C_1 A h_{\text{sch}}^2 \rho_{\text{sch}} v_L^{1,3}}{\eta \overline{\Delta x_{21}} \rho_L \eta_G \epsilon^4} \quad (12)$$

## 4.2 Analyse des Bedarfs an thermischer Energie

Bei ungünstigen Witterungsbedingungen ( $\varphi_{LO} > 0,8$ ) kann infolge des hygrokopischen Verhaltens der Körner eine Befeuchtung anstelle der angestrebten Trocknung eintreten. Durch Vorwärmen der Trocknungsluft kann deren relative Feuchte herabgesetzt und damit verbunden die Wasserdampfaufnahmefähigkeit und die Trocknungsgeschwindigkeit erhöht werden.

Der zur Erwärmung der Trocknungsluft erforderliche Wärmestrom  $\dot{Q}$  ist vom Luftdurchsatz und der Temperaturdifferenz abhängig:

$$\dot{Q} = \dot{m}_L c_{pL} (\vartheta_{L1} - \vartheta_{LO}) \quad (13)$$

## 4.3 Trocknungstechnische Kenngrößen

Für eine vergleichende Bewertung verschiedener Trocknungsverfahren hinsichtlich des Bedarfs an mechanischer und thermischer Energie ist es in der Trocknungstechnik üblich, den Energiebedarf auf die verdampfte Wassermenge zu beziehen:

$$e_w = \frac{E}{\Delta \dot{m}_w} = \frac{C_1 h_{\text{sch}} v_L^{1,3}}{\eta \overline{\Delta x_{21}} \rho_L \eta_G \epsilon^4} \quad (14)$$

$$q_w = \frac{\dot{Q}}{\Delta \dot{m}_w} = \frac{c_{pL} (\vartheta_{L1} - \vartheta_{LO})}{\overline{\Delta x_{21}}} \quad (15)$$

Aus den Gln. (14) und (15) ist ersichtlich, daß der spez. Bedarf an mechanischer und thermischer Energie bei der Kaltlufttrocknung von der Schütthöhe, der Luftgeschwindigkeit, der Wasserdampfaufnahmefähigkeit und der Vorwärmung der Trocknungsluft abhängig ist und in erster Linie diese Größen durch trockenstechnische Maßnahmen zu beeinflussen sind.

## 5. Versuchsaufbau

Für eine vergleichende Untersuchung verschiedener Kaltlufttrocknungsverfahren wurde eine Versuchsanlage erstellt, die aus vier gleichen Trocknungsbehältern besteht. Als Trocknungsbehälter wurden handelsübliche Lagersilos für Getreide aus gewelltem Stahlblech ausgewählt, die zur Aufstellung im Freien mit einem Dach versehen sind. Die Behälter mit kreisförmigem Querschnitt haben einen Durchmesser von 1800 mm und eine Gesamthöhe von 5000 mm. In 500 mm Abstand vom Boden wurde ein Sieblochboden (Lochdurchmesser 2 mm, Teilung 3,5 mm) eingebaut, um eine gleichmäßige Strömungsgeschwindigkeit der Luft über dem Querschnitt der Körnerschüttung zu erreichen. Bei einer Schütthöhe von 4000 mm haben die Behälter ein Fassungsvermögen von ca. 8000 kg Feuchtgetreide.

Zur Erzeugung des Trocknungsluftstromes wurde je Behälter ein Radialventilator (Nenndurchsatz 900 m<sup>3</sup>/h, Nenndruck 1140 N/m<sup>2</sup>, Nennleistung 0,75 kW) installiert. Zwei Behälter wurden zusätzlich mit elektrischen Widerstandsheizungen (Heizleistung 1,2 kW) ausgerüstet.

Die Anordnung der Meßstellen ist für einen Trocknungsbehälter mit Ventilator und elektrischer Widerstandsheizung in **Bild 1** dargestellt, die Meßgrößen und Meßverfahren sind aus **Tafel 2** ersichtlich.

Die Abfrage der Temperaturen, Drücke und des CO<sub>2</sub>-Gehaltes erfolgte mit einem digitalen Datenerfassungssystem in Intervallen von 30 Minuten. Zur Auswertung auf Rechenanlagen wurden die Daten auf Magnetbandkassetten gespeichert.

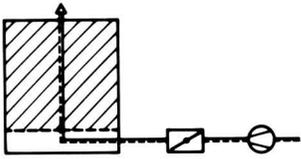


### Verfahren 1

Trocknung mit Umgebungsluft  
Kontinuierliche Belüftung

$$s_{L1} = s_{L0} \quad \varphi_{L1} = \varphi_{L0}$$

$$\dot{V}_L = \text{const.}$$



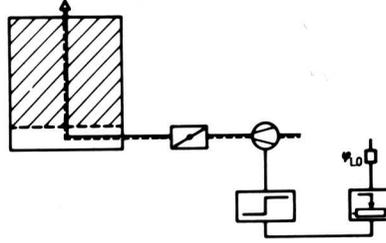
### Verfahren 2

Trocknung mit Umgebungsluft  
Intermittierende Belüftung

$$s_{L1} = s_{L0} \quad \varphi_{L1} = \varphi_{L0}$$

$$\varphi_{L0} < 0,7 \quad \dot{V}_L > 0$$

$$\varphi_{L0} > 0,7 \quad \dot{V}_L = 0$$



### 7.1 Einfluß der klimatischen Bedingungen

Da nach den Gln. (11), (14) und (15) die Wasserdampfaufnahmefähigkeit  $\Delta x_{21}$  der Trocknungsluft sowohl die Trocknungsdauer als auch den Energiebedarf beeinflusst, wurde diese Größe für die verschiedenen Verfahrensvarianten nach der in Abschn. 4.1 beschriebenen Methode bestimmt. Im Vergleich zur kontinuierlichen Belüftung mit Umgebungsluft (Verfahren 1  $\Delta x_{21} = 0,00147 \text{ kg/kg}$ ) konnte die mittlere Wasserdampfaufnahmefähigkeit durch den intermittierenden Betrieb des Ventilators bei Verfahren 2 auf  $\Delta x_{21} = 0,0020 \text{ kg/kg}$  erhöht werden. Ein noch günstigerer Wert ergab sich bei Verfahren 4 durch die konstante Vorwärmung der Trocknungsluft mit  $\Delta x_{21} = 0,00294 \text{ kg/kg}$ . Die mittlere Wasserdampfaufnahmefähigkeit reicht jedoch für eine Beurteilung des Einflusses der Witterungsbedingungen und der Vorwärmung der Trocknungsluft auf Trocknungsdauer und Energiebedarf nicht aus, da aus den Mittelwerten allein keine Aussage über die Zeiten, in denen keine Trocknung bzw. eine Wiederbefeuchtung stattfindet, getroffen werden kann.

### Verfahren 3

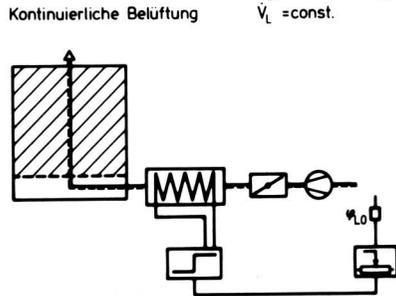
Trocknung mit vorgewärmter  
Umgebungsluft

$$s_{L1} = s_{L0} + \Delta s(\varphi_{L0})$$

$$\varphi_{L1} < 0,7 \quad \Delta s = 0$$

$$\varphi_{L1} > 0,7 \quad \Delta s = f(\varphi_{L0})$$

$$\dot{V}_L = \text{const.}$$



### Verfahren 4

Trocknung mit vorgewärmter  
Umgebungsluft

$$s_{L1} = s_{L0} + \Delta s$$

Kontinuierliche Belüftung

$$\dot{V}_L = \text{const.}$$

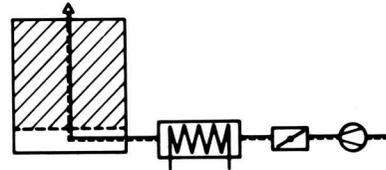


Bild 2. Schematische Darstellung der untersuchten Verfahrensvarianten.

		Verfahren			
		V1	V2	V3	V4
Luftdurchsatz	$\dot{V}_L$ m <sup>3</sup> /h	676	707	710	704
Luftgeschwindigkeit	$v_L$ m/s	0,073	0,077	0,077	0,077
Schütthöhe	$h_{sch}$ m	ca. 4,0	ca. 4,0	ca. 4,0	ca. 4,0
Masse d. feuchten Körner	$m_1$ kg	7720	7370	7410	7102
Masse d. trockenen Körner	$m_2$ kg	7091	6624	6867	6325
entzogene Wassermenge	$\Delta m_w$ kg	629	746	543	777
Trocknungszeit ( $\bar{U}_2 = 14\%$ )	t d	22,0	32,3	14,6	13,0
( $U_{2max}^* = 16\%$ )	$t^*$ d	23,2	33,2	19,2	16,1
Trocknungsleistung	$\Delta \dot{m}_w$ kg/h	1,19	0,96	1,55	2,48
spez. Bedarf an mech. Energ.	$e_w$ kWh/kg	0,412	0,29	0,329	0,200
spez. Wärmebedarf	$q_w$ kWh/kg	0	0	0,192	0,369
spez. Luftbedarf	$l_w$ kg/kg	681,6	494,9	549,4	339,5
spez. Energiekosten <sup>1)</sup>	EK DM/kg	0,0618	0,0435	0,0781	0,0853

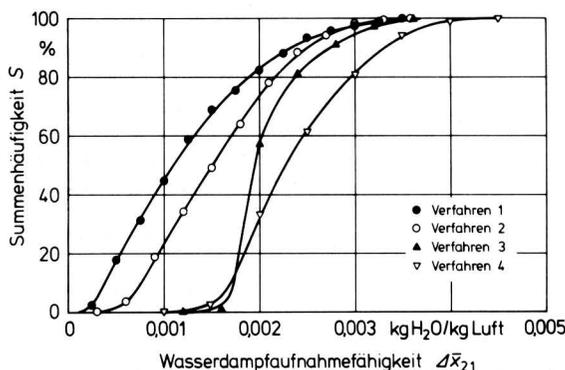
<sup>1)</sup> Preis für elektrische Energie: 0,15 DM/kWh

Tafel 3. Zusammenstellung der Kennzahlen für Leistung und Energiebedarf bei der Kaltlufttrocknung, 1980. (Die Energiebedarfszahlen und Energiekosten beziehen sich auf Trocknung bis  $\bar{U} = 14\%$ ).

	Verfahren			
	V1	V2	V3	V4
<b>Werte der Körner vor der Trocknung</b>				
Feuchtegehalt $\bar{U}_1$ %	21,0	22,7	20,3	23,4
$U_{max}$ %	21,4	23,4	22,4	23,9
$U_{min}$ %	20,3	21,7	18,8	23,0
Keimfähigkeit $\bar{K}$ %	97	93	96	92
Feuchtklebergehalt $\bar{F}$ %	33,4	33,2	32,6	33,9
Pilze gesamt g <sup>-1</sup>	$2,78 \cdot 10^5$	$5,13 \cdot 10^5$	$4,56 \cdot 10^5$	$3,99 \cdot 10^5$
Schimmelpilze g <sup>-1</sup>	$6,35 \cdot 10^4$	$1,18 \cdot 10^5$	$6,61 \cdot 10^4$	$8,67 \cdot 10^4$
Penicillien g <sup>-1</sup>	$2,1 \cdot 10^3$	$2,1 \cdot 10^3$	$2,1 \cdot 10^3$	$2,1 \cdot 10^3$
Mucoraceen, Fusarien g <sup>-1</sup>	$2,76 \cdot 10^4$	$1,29 \cdot 10^4$	$7,3 \cdot 10^3$	$7,92 \cdot 10^3$
Schwärzepilze g <sup>-1</sup>	$3,46 \cdot 10^4$	$1,05 \cdot 10^5$	$5,67 \cdot 10^4$	$7,67 \cdot 10^4$
Hefen g <sup>-1</sup>	$2,17 \cdot 10^5$	$3,83 \cdot 10^5$	$3,88 \cdot 10^5$	$3,08 \cdot 10^5$
<b>Werte der Körner nach der Trocknung</b>				
Feuchtegehalt $U_{2max}$ %	17,7	17,5	20,1	20,9
( $\bar{U}_2 = 14\%$ ) $U_{2min}$ %	12,9	12,9	11,9	10,5
Feuchtegehalt $U_2^*$ %	13,8	13,8	12,7	12,0
( $U_{2max}^* = 16\%$ ) $U_{2min}^*$ %	12,8	12,3	11,5	9,9
Keimfähigkeit $\bar{K}$ %	95	89	95	91
Feuchtklebergehalt $\bar{F}$ %	32,1	31,5	31,0	31,6
Pilze gesamt g <sup>-1</sup>	$9,28 \cdot 10^5$	$1,43 \cdot 10^6$	$2,72 \cdot 10^5$	$1,81 \cdot 10^5$
Schimmelpilze g <sup>-1</sup>	$3,12 \cdot 10^5$	$1,35 \cdot 10^6$	$1,69 \cdot 10^5$	$1,36 \cdot 10^5$
Penicillien g <sup>-1</sup>	$2,00 \cdot 10^5$	$1,30 \cdot 10^6$	$1,52 \cdot 10^5$	$1,24 \cdot 10^5$
Mucoraceen, Fusarien g <sup>-1</sup>	$4,15 \cdot 10^4$	$1,00 \cdot 10^3$	$7,76 \cdot 10^3$	$1,69 \cdot 10^3$
Schwärzepilze g <sup>-1</sup>	$1,66 \cdot 10^4$	$9,02 \cdot 10^2$	$9,22 \cdot 10^3$	$9,79 \cdot 10^3$
Hefen g <sup>-1</sup>	$6,16 \cdot 10^5$	$7,76 \cdot 10^4$	$1,03 \cdot 10^5$	$4,40 \cdot 10^4$

Tafel 4. Zusammenstellung von Kennwerten der Körner vor und nach der Trocknung, 1980. (Die Werte für Keimfähigkeit, Feuchtklebergehalt und Mikroorganismenbesatz sind Mittelwerte über die gesamte Schüttung).

Zeichnet man in ein  $h, x$ -Diagramm für feuchte Luft zusätzlich die Kurven der Gleichgewichtsfeuchte für Weizen ein, so zeigt sich, daß die Linie  $U_{gl} = 20\%$  nahezu identisch mit der Linie  $\varphi_L = 0,9$  verläuft. Das bedeutet für den Fall der Weizentrocknung, daß die Trocknungsluft nur dann Feuchte aus den Körnern aufnehmen kann, wenn die Wasserdampfaufnahmefähigkeit größer als  $0,0005 \text{ kg/kg}$  ist. Aus der Summenhäufigkeitsverteilung der Wasserdampfaufnahmefähigkeit der Trocknungsluft bei den untersuchten Verfahren 1 bis 4, Bild 3, ist für  $\Delta x_{21} = 0,0005 \text{ kg/kg}$  ersichtlich, daß bei Verfahren 1 der Ventilator ca. 25 % der Trocknungszeit läuft, ohne daß den Körnern Feuchte entzogen werden kann. Durch intermittierende Trocknung (Verfahren 2) kann erreicht werden, daß der Ventilator nur dann läuft, wenn die Luft trocknungsfähig ist. Bei den Verfahren 3 und 4 wurde durch die Vorwärmung der Trocknungsluft eine Verschiebung der Summenhäufigkeitskurve in Bereiche erreicht, in denen die Luft etwa doppelt soviel Wasser aufnehmen kann, wie bei den Verfahren 1 und 2.



**Bild 3.** Summenhäufigkeitskurven der theoretischen Wasserdampfaufnahmefähigkeit der Trocknungsluft bei verschiedenen Verfahren der Kaltlufttrocknung.

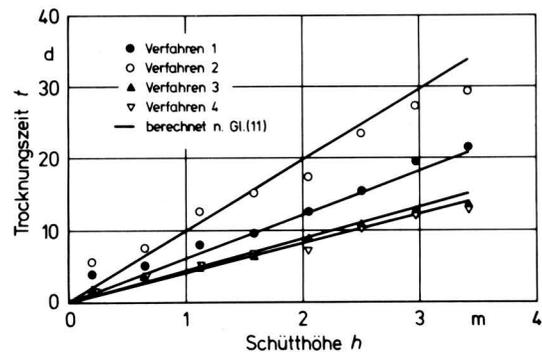
## 7.2 Trocknungsdauer

Da trotz Ernte vom gleichen Bestand und am gleichen Tage der mittlere Feuchtegehalt der Körner beispielsweise 1980 zwischen 20,3 und 23,4 % schwankte, Tafel 4, mußte, um vergleichbare Werte für die einzelnen Verfahren zu erhalten, die Trocknungszeit auf einen einheitlichen mittleren Anfangsfeuchtegehalt von  $U_1 = 22\%$  umgerechnet werden. Bei der Berechnung dieser korrigierten Trocknungszeit  $t^{**}$  wurde von den experimentell ermittelten Daten in Tafel 3 und 4 ausgegangen und eine lineare Abhängigkeit der Trocknungszeit von der entzogenen Feuchtemasse im Bereich  $20 \leq U \leq 23,5\%$  angenommen. Für die Trocknung auf einen mittleren Endfeuchtegehalt von  $U_2 = 14\%$  sind demnach folgende Zeiten erforderlich:

Verfahren 1	$t^{**} = 24,4 \text{ d}$
Verfahren 2	$t^{**} = 30,2 \text{ d}$
Verfahren 3	$t^{**} = 18,7 \text{ d}$
Verfahren 4	$t^{**} = 11,6 \text{ d}$

wobei bei Verfahren 2 der Ventilator insgesamt lediglich 17,0 Tage in Betrieb war. Im Vergleich zur kontinuierlichen Trocknung mit Umgebungsluft (Verfahren 1) konnte durch die Vorwärmung eine Reduzierung der Trocknungszeit um 23 % bei einer Regelung der Wärmezufuhr (Verfahren 3) und bei konstanter Vorwärmung (Verfahren 4) um 52,5 % erreicht werden. Die optimale Nutzung des Trocknungspotentials der Umgebungsluft bei Verfahren 2 führte zwar zu einer Reduzierung der Betriebsdauer des Ventilators von 24,4 auf 17,0 Tage, die Trocknungsdauer stieg aber um 23 % an.

Vergleicht man die experimentell ermittelten Trocknungszeiten bei Trocknung der Körner auf einen mittleren Endfeuchtegehalt  $U_2 = 14\%$  mit den nach Gl. (12) berechneten Werten, so ergibt sich bei allen Verfahren eine gute Übereinstimmung, Bild 4. Die Abweichungen zwischen den experimentell ermittelten und den berechneten Werten bei Verfahren 2 erklären sich durch den intermittierenden Betrieb des Ventilators.



**Bild 4.** Zur Trocknung auf den mittleren Feuchtegehalt  $U_2 = 14\%$  erforderliche Trocknungszeit in Abhängigkeit von der Schütthöhe, Vergleich von Meßwerten (Punkte) und gerechneten Werten (Kurven).

Erntejahr: 1980  
Schütthöhe: 4,0 m  
Gutart: Weizen (Vuca)  
Luftgeschwindigkeit: 0,075 m/s

## 7.3 Energiebedarf

Der spezifische Bedarf an mechanischer Energie betrug bei kontinuierlicher Belüftung (Verfahren 1)  $0,412 \text{ kWh/kg}$  Wasser und konnte durch intermittierenden Ventilatorbetrieb (Verfahren 2) auf  $0,29 \text{ kWh/kg}$  Wasser reduziert werden, Tafel 3. Bei beiden Verfahren entstand kein Bedarf an thermischer Energie.

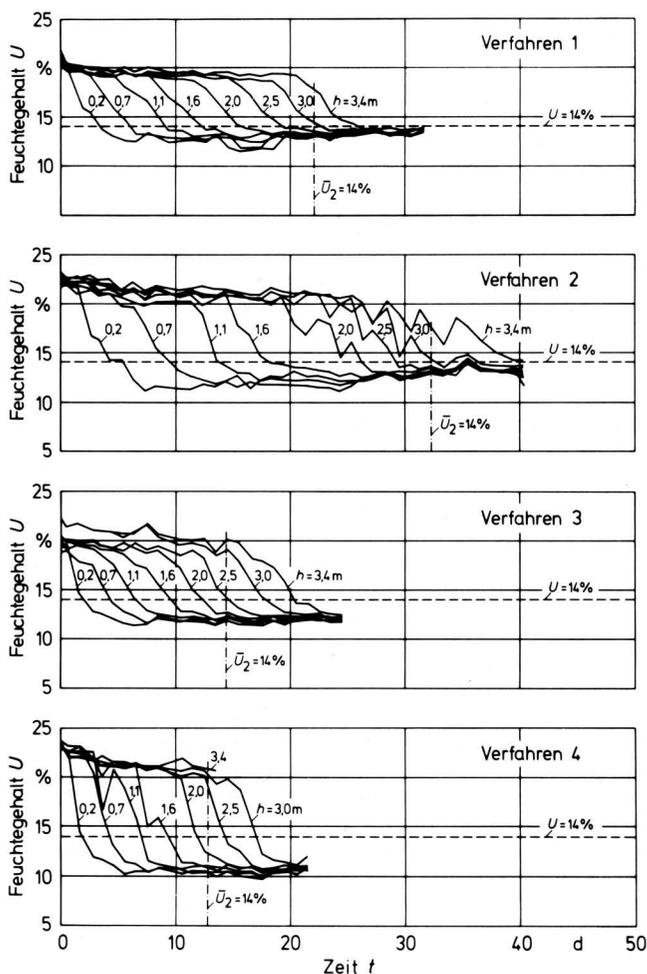
Durch eine konstante Vorwärmung der Trocknungsluft um 4 K verminderte sich zwar der Bedarf an mechanischer Energie auf  $0,20 \text{ kWh/kg}$  Wasser (Verfahren 4), jedoch mußten gleichzeitig  $0,369 \text{ kWh/kg}$  an thermischer Energie aufgewendet werden. Durch die Regelung der Vorwärmung (Verfahren 3) wurde im Vergleich zu Verfahren 4 bedeutend weniger thermische Energie nämlich nur  $0,192 \text{ kWh/kg}$  eingesetzt, wobei sich zwangsläufig durch die längere Trocknungsdauer der Bedarf an mechanischer Energie auf  $0,329 \text{ kWh/kg}$  erhöhte.

Die im Vergleich zu früheren Untersuchungen relativ niedrigen Werte für den spezifischen Bedarf an mechanischer Energie lassen sich durch die sehr niedrigen Luftgeschwindigkeiten von  $v_L = 0,075 \text{ m/s}$ , ( $\dot{V}_L/V_{sch} \approx 70 \text{ m}^3/\text{m}^3\text{h}$ ) erklären, die um den Faktor 4 bis 7 niedriger liegen als der beispielsweise von Wenner [4] für Getreide mit einem Feuchtegehalt von  $U_1 = 22\%$  empfohlene Luftdurchsatz ( $\dot{V}_L/V_{sch} = 260 \text{ m}^3/\text{m}^3\text{h}$ ).

Im Vergleich zur konventionellen Warmlufttrocknung liegen die entsprechenden Werte für den spezifischen Bedarf an mechanischer Energie infolge der längeren Trocknungsdauer bei der Kaltlufttrocknung zwar um den Faktor 5 höher [14], der wesentlich geringere Bedarf an thermischer Energie wirkt sich aber dahingehend aus, daß die spezifischen Gesamtenergiekosten, bezogen auf die entzogene Feuchte, insbesondere bei den Verfahren 1 und 2, wesentlich niedriger liegen als bei der Warmlufttrocknung ( $0,08\text{--}0,11 \text{ DM/kg}$  [14]).

## 7.4 Trocknungsverlauf

Der zeitliche Verlauf des Feuchtegehaltes der Körner  $U = f(t, h)$  bzw.  $\bar{U} = f(t, h)$ , Bild 5 und 6, und der Korntemperatur in verschiedenen Schütthöhen entsprach den im Schrifttum [4, 5] gefundenen Beschreibungen. Eine Zunahme des Feuchtegehaltes der Körner in der oberen Kornschicht als Folge von Kondensationserscheinungen bzw. Feuchteaufnahme der Körner konnte im Gegensatz zu den Untersuchungen von Wenner [4] und Maltry [5] jedoch nicht festgestellt werden, Bild 5. Die Temperatur der Körnerschüttung paßte sich erwartungsgemäß den witterungsbedingten Schwankungen der Umgebungsluft an. Die Abluft war während der gesamten Trocknungsdauer nahezu gesättigt. Erst nach Austreten der Trocknungszone aus der obersten Kornschicht konnte ein langsames Absinken der relativen Feuchte der Abluft beobachtet werden. Dies zeigte sich auch bei der Berechnung des thermischen Wirkungsgrades, der bei den untersuchten Verfahrensvarianten nahe bei 1,0 lag.

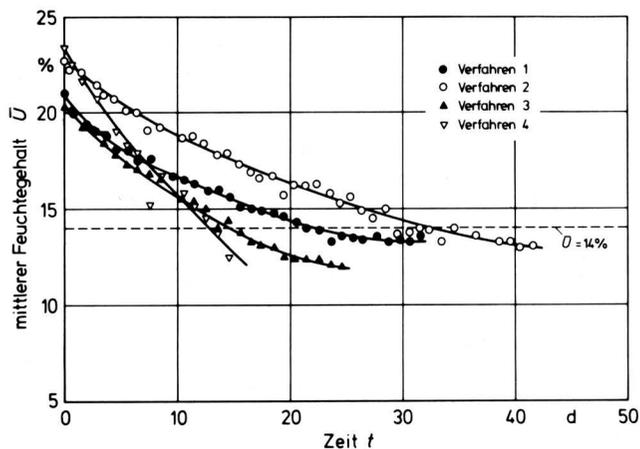


**Bild 5.** Zeitlicher Verlauf des Feuchtegehaltes der Körner in verschiedenen Höhen der Körnerschüttung.

Ernte: 1980  
Gutart: Weizen (Vuca)  
Luftgeschwindigkeit: 0,075 m/s

## 7.5 Gleichmäßigkeit der Trocknung

Bei der Getreidetrocknung wird normalerweise eine Trocknung auf einen Feuchtegehalt von 14 % angestrebt, da die Körner in diesem Zustand ohne nennenswerte Massen- und Qualitätsverluste gelagert werden können. Eine Übertrocknung führt zu einem erhöhten Energiebedarf und zu einer Minderung des Verkaufserlöses, unzureichende Trocknung der Körner zu Massen- und Qualitätsverlusten bei der nachfolgenden Lagerung.



**Bild 6.** Zeitlicher Verlauf des mittleren Feuchtegehaltes  $\bar{U}$  der Körnerschüttung.

Erntejahr: 1980  
Schütthöhe: 4,0 m  
Gutart: Weizen (Vuca)  
Luftgeschwindigkeit: 0,075 m/s

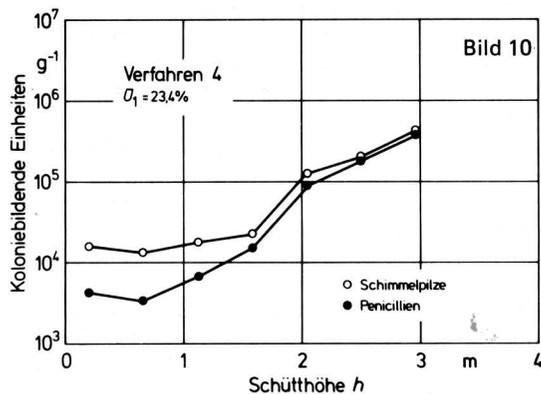
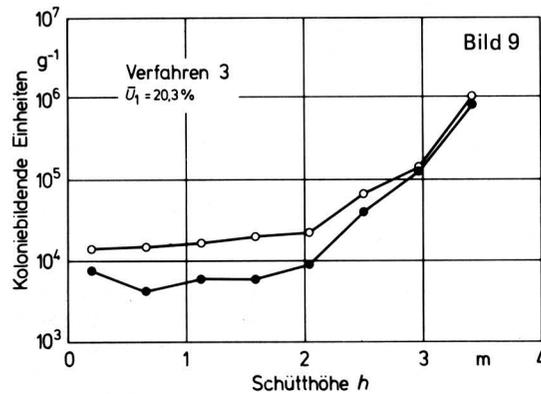
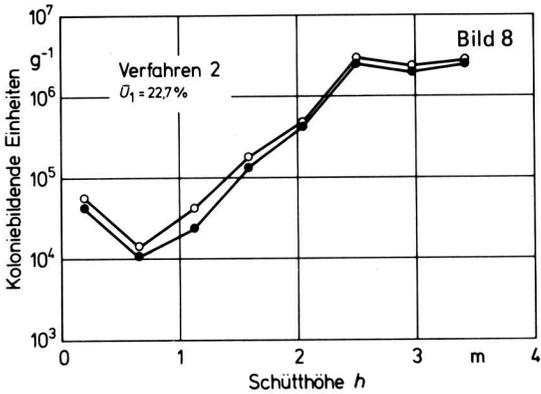
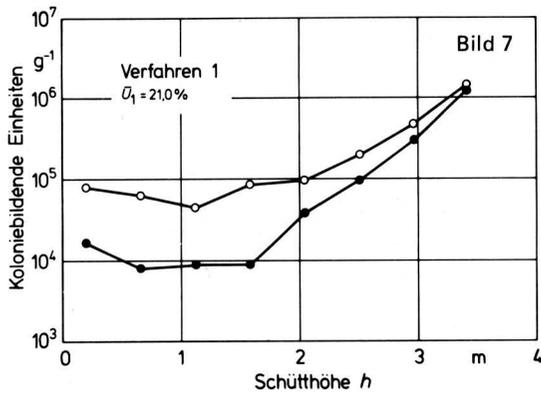
Geht man von einem mittleren Feuchtegehalt der Körnerschüttung von  $\bar{U}_2 = 14\%$  aus, so stellt sich bei Verfahren 1 und 2 in der untersten Schicht ein Feuchtegehalt von 12,9 % ein, während der Feuchtegehalt an der Oberfläche der Schüttung bei 17,7 bzw. 17,5 % lag. Noch gravierender waren die Feuchtedifferenzen bei Verfahren 3 und 4. Die Vorwärmung bewirkte eine starke Übertrocknung auf 11,9 bzw. 10,9 % an der Luft Eintrittsstelle, wogegen an der Luftaustrittsstelle die Körner noch Feuchtegehalte von 20,1 bzw. 20,9 % aufwiesen. Aufgrund der unzureichenden Trocknung in den obersten Kornschichten ( $U_2 > 17,5\%$ ) ist das Getreide in diesem Zustand nicht lagerfähig. Um eine verlustfreie Lagerung der Körner zu gewährleisten, muß die Trocknung solange fortgesetzt werden, bis an der Luftaustrittsstelle der Feuchtegehalt der Körner höchstens  $U_{2\max}^* = 16\%$  beträgt. In diesem Fall verlängern sich die Trocknungszeiten bei den verschiedenen Verfahren, womit gleichzeitig eine Reduzierung der Feuchtedifferenzen in der Schüttung erreicht wird, Tafel 4.

## 7.6 Qualität

Die Untersuchung der Keimfähigkeit der Körner vor und nach der Trocknung zeigte, daß bei den untersuchten Verfahrensvarianten keine signifikante Schädigung durch die Kaltlufttrocknung festgestellt werden konnte. Die Werte nach Abschluß der Trocknung lagen über der für Saatgut vorgeschriebenen Mindestkeimfähigkeit von 85 % [15]. Die Untersuchung des Feuchtklebergehaltes als indirektes Kriterium der Backfähigkeit brachte, wie bereits die Keimfähigkeitsuntersuchungen, keine Hinweise auf eine negative Beeinflussung der Körner. Die minimale  $\text{CO}_2$ -Entwicklung in der Körnerschüttung wies auf Trockenmasseverluste hin, die unter 0,1 % liegen.

Bei den mikrobiologischen Untersuchungen wurde die Pilzentwicklung in Abhängigkeit von der Trocknungszeit und der Schütthöhe bestimmt. Dabei zeigte sich, daß mit zunehmender Trocknungsdauer eine Umschichtung der Mikroflora stattfindet. Typische Feldpilze wie Hefen, Fusarien, Mucoraceen und Schwärzepilze bleiben bis zum Abschluß der Trocknung entwicklungsfähig, ohne daß eine nennenswerte Vermehrung beobachtet werden konnte. Von den Lagerpilzen nahmen Penicillium-Arten mit zunehmender Trocknungsdauer zu.

In Bild 7 bis 10 ist der Besatz an Schimmelpilzen und Penicillien nach Beendigung der Trocknung in Abhängigkeit von der Schütthöhe dargestellt. Es ist ersichtlich, daß bei allen Verfahren unterhalb einer Schütthöhe von ca. 2 m kein unzulässiger Anstieg der Pilzkeimzahlen ermittelt werden konnte. Im oberen Teil der Schüttung ( $h > 3\text{ m}$ ) stiegen insbesondere bei der Trocknung mit Umgebungsluft (Verfahren 1 und 2) die Pilzkeimzahlen auf Werte

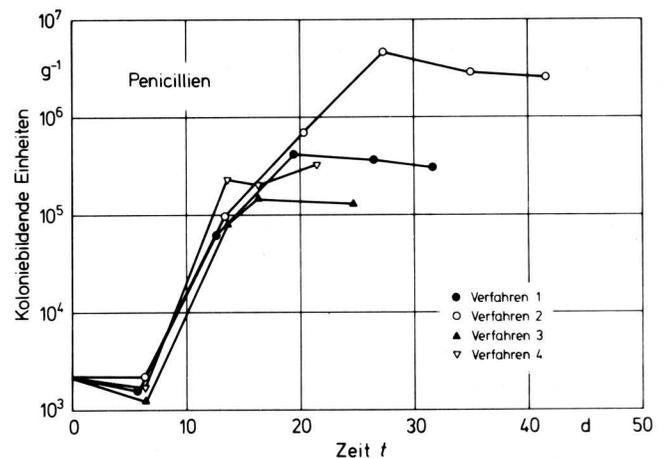


**Bild 7 bis 10.** Besatz an Schimmelpilzen und Penicillien, bezogen auf die Trockenmasse der Körner, nach Beendigung des Trocknungsvorganges in Abhängigkeit von der Schütthöhe.

Ernte: 1980 Gutart: Weizen (Vuca)  
Schütthöhe: 4,0 m Luftgeschwindigkeit: 0,075 m/s

an, die auf einen beginnenden Verderb infolge der zu langen Trocknungsdauer hinweisen.

Der Einfluß der Trocknungszeit auf das Wachstum der Penicillien in der obersten Körnerschicht ( $h > 3,5$  m) verdeutlicht **Bild 11**, aus dem hervorgeht, daß unabhängig von der untersuchten Verfahrensvariante und unabhängig vom Feuchtegehalt der Körner ( $U_1 = 20-23\%$ ) nach einer Trocknungsdauer von 8 Tagen ein starker Anstieg der Penicillien zu verzeichnen ist. Das Besatzmaximum ist jedoch verfahrensspezifisch und weist eindeutig auf den Zusammenhang zwischen Trocknungsdauer und Pilzwachstum hin.



**Bild 11.** Entwicklung des Besatzes an Penicillien in Abhängigkeit von der Trocknungszeit in der obersten Körnerschicht ( $h_{sch} = 3,5-4,0$  m).

Ernte: 1980 Gutart: Weizen (Vuca)  
Schütthöhe:  $h_{sch} = 4$  m Luftgeschwindigkeit: 0,075 m/s

Entsprechend den derzeit in der Futtermittelmikrobiologie geltenden Qualitätsrichtlinien [16] muß bereits der erntefrische Weizen in die Verderbnisstufe 1 eingeordnet werden. Eigene Untersuchungen geben jedoch Hinweise dafür, daß bei Weizen noch ein Penicillium-Besatz, bezogen auf die Trockenmasse des Getreides, in einer Größenordnung von  $10^5$  g<sup>-1</sup> toleriert werden kann, da bis zu diesem Wert nicht mit der Bildung der hier untersuchten Mykotoxine durch Penicillien zu rechnen ist. Wendet man dieses Kriterium für den Mittelwert des Keimbesatzes nach Abschluß der Trocknung (Tafel 4) an, so kann die Konservierungswirkung bei den Verfahren 1, 3 und 4 mit geringen Einschränkungen als erfolgreich bezeichnet werden, bei Verfahren 2 müssen aus mikrobiologischer Sicht jedoch erhebliche Bedenken angemeldet werden.

Es muß jedoch ausdrücklich festgestellt werden, daß trotz des Anstieges der Pilzkeimzahlen auf Werte über  $10^5$  g<sup>-1</sup> keine der von Penicillien-Arten gebildeten Mykotoxine Citrinin, Ochratoxin A, Patulin und Penicillinsäure festgestellt wurden. Das Vorkommen anderer Penicillium-Mykotoxine konnte nicht untersucht werden, da geeignete Bestimmungsmethoden bzw. Standardsubstanzen nicht zur Verfügung standen.

In früheren Jahren wurde die Qualitätsbeurteilung von Getreide bei Kaltlufttrocknung und Körnerkühlung ausschließlich durch Bestimmung der Keimfähigkeit vorgenommen. Dieses Kriterium muß nach den vorliegenden Untersuchungsergebnissen über die Kaltlufttrocknung von Mais [8] als unzureichend bezeichnet werden, da auch bei Weizen trotz Anstieg des Pilzbesatzes auf  $10^6$  g<sup>-1</sup> keine Verminderung der Keimfähigkeit festgestellt werden konnte.

## 8. Zusammenfassung

Eine experimentelle Untersuchung von vier Verfahrensvarianten der Kaltlufttrocknung zeigte, daß die Trocknung von Weizen mit Umgebungsluft oder geringfügig vorgewärmter Umgebungsluft aufgrund der geringen Energie- und Investitionskosten für landwirtschaftliche Betriebe eine Alternative zu konventionellen Warmluft-trocknungsverfahren darstellt.

Eine 4 m hohe Körnerschüttung mit einem Anfangsfeuchtegehalt von ca. 22 % konnte bei den im Raum Stuttgart herrschenden Witterungsbedingungen ohne nennenswerte Beeinträchtigung der Qualität der Körner getrocknet werden. Eine signifikante Verminderung der Keimfähigkeit und Verschlechterung der Backeigenschaften konnte ebensowenig festgestellt werden wie Trockenmasseverluste durch enzymatische Reaktionen. Eine unzulässig starke Zunahme der Pilzkeimzahlen in der obersten Schicht der Schüttung ( $h = 3,5-4,0$  m) bewirkt, bezogen auf die Gesamtmasse der getrockneten Körner, bei den Verfahren 1, 3 und 4 keine Überschreitung der zulässigen Werte. Von Penicillien-Arten gebildete Mykotoxine waren nicht nachweisbar.

Die Trocknungsdauer bei einem mittleren Anfangsfeuchtegehalt von 22 % betrug je nach Verfahrensvariante 16 bis 33 Tage, wobei als Kriterium für die Lagerfähigkeit nicht ein mittlerer Feuchtegehalt der gesamten Schüttung von 14 %, sondern ein maximaler Feuchtegehalt von 16 % in der obersten Schicht der Körnerschüttung zugrunde gelegt wurde. Die intermittierende Trocknung mit Umgebungsluft erbrachte die günstigsten Energieverbrauchszahlen, das Verfahren ist jedoch im Hinblick auf qualitative Veränderungen bei einer Trocknungsdauer von über 30 Tagen nur bedingt empfehlenswert. Eine Vorwärmung der Trocknungsluft um 4 K verkürzt die Trocknungszeit im Vergleich zur kontinuierlichen Belüftung mit Umgebungsluft um 4–7 Tage, hat aber gleichzeitig einen wesentlich höheren Energiebedarf und eine ungleichmäßigere Trocknung zur Folge. Die geringfügige Reduzierung des Energiebedarfes und der Trocknungsdauer durch eine Regelung der Wärmezufuhr in Abhängigkeit von der relativen Feuchte der Umgebungsluft rechtfertigt den technischen Aufwand für die Regelungseinrichtung nur in Ausnahmefällen.

Es ist vorgesehen, die Untersuchungen fortzusetzen, wobei durch verfahrenstechnische Maßnahmen eine schnellere Trocknung der oberen Schichten der Körnerschüttung und damit verbunden eine Reduzierung des Pilzwachstums im Bereich des Luftaustritts angestrebt wird.

### Verwendete Formelzeichen

A	Fläche
c	spezifische Wärme
$C_1$	Stoffkonstante
e	spezifischer Bedarf an mechanischer Energie
E	mechanische Energie
h	Enthalpie
$h_{sch}$	Schütthöhe
l	spezifischer Luftbedarf
$\dot{m}$	Massenstrom
n	Stoffkonstante
p	Druck
P	Leistung
q	spezifischer Wärmebedarf
$\dot{Q}$	Wärmestrom
r	Verdampfungsenthalpie
S	Summenhäufigkeit
t	Zeit
$t^*$	Trocknungszeit bei $U_{2max} = 16\%$
$t^{**}$	Trocknungszeit, normiert auf Anfangsfeuchte $U_1 = 22\%$ , bei $U_{2max} = 16\%$

U	Feuchtegehalt
$\bar{U}$	mittlerer Feuchtegehalt
v	Luftgeschwindigkeit
$\dot{V}$	Volumenstrom
$V_{sch}$	Volumen der Körnerschüttung
x	Feuchtegrad der Luft
$\frac{x}{\Delta x}$	mittlere Wasserdampfaufnahmefähigkeit der Luft
$\epsilon$	relatives Hohlraumvolumen
$\eta$	Wirkungsgrad
$\vartheta$	Temperatur
$\rho$	Dichte
$\tau$	Taupunkttemperatur
$\varphi$	relative Feuchte der Luft
Indizes	
dyn	dynamisch
gl	Gleichgewicht
max	maximal
min	minimal
p	bei konstantem Druck
s	Sättigung
sch	Schüttung
st	statisch
W	Wasser
G	Gebläse
H	Heizung
L	Luft
O	Umgebung
1	vor der Trocknung
2	nach der Trocknung

### Schrifttum

Bücher sind durch • gekennzeichnet

- [ 1 ] Deutsche Landwirtschafts-Gesellschaft: Vorschriften für Bau, Aufstellung und Betrieb von landwirtschaftlichen Trocknungsanlagen für Getreide. DLG-Merkblatt 131/132, Frankfurt: DLG-Verlag 1976.
- [ 2 ] Dencker, C.H., H. Heidt u. H.L. Wenner: Einrichtungen auf dem Hofe zur Lagerung und Trocknung von Erntedruschgetreide. Flugschrift KTL München/Wolfratshausen: Neureuter 1954.
- [ 3 ] Segler, G.: Technische Probleme der Belüftung von landwirtschaftlichen Ernteprodukten. Vorträge der wissenschaftlichen Jahrestagung des Instituts für Landtechnik, Potsdam-Bornim, 1959.
- [ 4 ] Wenner, H.L.: Die Voraussetzungen für die Lagerung und Belüftung von feucht geerntetem Getreide. KTL-Berichte über Landtechnik Nr. 45, München/Wolfratshausen: Neureuter 1955.
- [ 5 ] Maltry, W.: Einige Trocknungsversuche an Weizen. Archiv für Landtechnik Bd. 3 (1962) Nr. 2, S. 145/64.
- [ 6 ] Ekström, N. u. O. Noren: Studier över kallluftstorkning av spannmål. Swedish Institute of Agricultural Engineering, Ultuna-Uppsala (Schweden), Specialmeddelande S.23 (1974).
- [ 7 ] Jouin, C.: Grundlegende Kalkulationen für die Belüftung des Getreides. Getreide und Mehl Jg. 14 (1964) Nr. 6, S. 64/70.
- [ 8 ] Kuppinger, H., H.-M. Müller u. W. Mühlbauer: Die Belüftungstrocknung von erntefrischem und vortrocknetem Körnermais unter thermodynamischem und mikrobiologischem Aspekt. Grundl. Landtechnik Bd. 27 (1977) Nr. 4, S. 119/28.

- [ 9 ] *Matthies, H.J. u. H. Petersen:* Ausbau eines Verfahrens zur Berechnung des Strömungswiderstandes ruhender kornförmiger Schüttgüter. *Grundl. Landtechnik* Bd. 23 (1973) Nr. 2, S. 50/53.
- [ 10 ] *Wagner, W.:* Eine mathematisch-statistische Methode zum Aufstellen thermodynamischer Gleichungen — gezeigt am Beispiel reiner fluider Stoffe. *Fortschr.-Ber. VDI-Z.* Reihe 3, Nr. 39, Düsseldorf: VDI-Verlag 1974.
- [ 11 ] *Internationale Vorschriften zur Prüfung von Saatgut 1976.* *Seed Science and Technology* Bd. 4 (1976) Nr. 3, S. 358/550.
- [ 12 ] *Müller, H.-M. et al.:* Propionsäure als Konservierungsmittel für Feuchtmals. *Landw. Forschung* Bd. 32 (1976) S. 118/25.
- [ 13 ] *Schmidt, H.L.:* Über Vorkommen und Häufigkeit von hohen Pilzkeimgehalten sowie einzelner Pilzarten in Futtermitteln. *Landw. Forschung* Bd. 28 (1975) S. 224/34.
- [ 14 ] *Mühlbauer, W.:* Energietechnische und energiewirtschaftliche Untersuchungen zur Reduzierung des Energiebedarfs und der Energiekosten bei der Konservierung von Körnerfrüchten. *Forschungsbericht ET 5319 A "Musterhof Liebenau"* des Bundesministeriums für Forschung und Technologie, Bonn, 1980.
- [ 15 ] • *Gesetz über den Verkehr mit Saatgut.* Hannover: Alfred Strothe Verlag 1975.
- [ 16 ] *Gedek, B.:* Futtermittelverderb durch Bakterien und Pilze und seine nachteiligen Folgen. *Übersichten zur Tierernährung* Jg. 1 (1973) Nr. 1, S. 45/66.

## Voruntersuchungen zur Körnerkonservierung in Salzlösung

Von Theo Bischoff, Udo Elsner und Karl Johannes von Oy, Stuttgart-Hohenheim\*)

Mitteilung aus dem Sonderforschungsbereich 140 — Landtechnik "Verfahrenstechnik der Körnerfruchtproduktion" der Universität Hohenheim

DK 633.15:664.8.035:636.084

In zunehmendem Maße werden Körnerfrüchte für Futterzwecke feucht konserviert. Die Solekonservierung — das Einlagern von ganzen Körnern in eine Kochsalzlösung — hat sich als prinzipiell geeignetes Konservierungsverfahren herausgestellt. Gegenüber den bisherigen Feuchtkonservierungsverfahren scheint dieses neue Verfahren insbesondere bei kleineren Konservierungsmengen Kostenvorteile zu haben. Der Konservierungsprozeß verläuft ähnlich wie bei der Haltbarmachung von Lebensmitteln. Die Verfütterung der kochsalzhaltigen Körner an Mastschweine ist aus physiologischen Gründen problematisch. Die Konservierungsversuche gehen von diesem Sachverhalt aus und stellen Ausgangspunkte für zukünftige konservierungs- und verfahrenstechnische Untersuchungen fest.

### 1. Einleitung

Der Bereich der Körnerfruchtkonservierung ist einerseits durch steigende Energiepreise und andererseits durch eine Zunahme der innerbetrieblichen Verwertung von Körnerfrüchten in der Schweinemast geprägt. Beide Tendenzen vermehren die Bedeutung der Feuchtkonservierung von Körnerfrüchten. Zur Konservierung von Ährengetreide und Körnermais für Futterzwecke bieten sich neben der Trocknung und Kühlung die gasdichte Lagerung und die Propionsäurekonservierung an. Diese Verfahren sind gekennzeichnet durch hohe fixe Kosten (gasdichte Lagerung) bzw. hohe variable Kosten (Propionsäurekonservierung) [1]. Es bedarf deshalb alternativer Feuchtkonservierungsverfahren, die auch für kleinere Betriebe bzw. Konservierungsmengen ökonomisch sinnvoll sind.

\*) Prof. Dr. Th. Bischoff ist Leiter des Fachgebietes Verfahrenstechnik in der Tierproduktion und landwirtschaftliches Bauwesen des Instituts für Agrartechnik der Universität Hohenheim. Dipl.-Ing. agr. U. Elsner und Dipl.-Ing. agr. K.J. von Oy waren Mitarbeiter im Sonderforschungsbereich 140 — Landtechnik. Dipl.-Ing. agr. K.J. von Oy ist wissenschaftlicher Angestellter beim genannten Fachgebiet.

*Albrecht* [1] konservierte erstmals Körnerfrüchte in Salzlösung. Die Anregung dazu gab der Umstand, daß Futtergetreide bei der Verwertung durch Tiere letztlich immer mit Wasser versetzt werden muß, sei es bei der Aufbereitung zu Flüssigfutter oder durch die Wasseraufnahme der Tiere, und daß Salz als Konservierungsmittel bei Lebensmitteln verwandt wird. *Albrecht* lagerte frisch geerntete, ganze Körner bis zur Verfütterung in einer 3–5%igen Kochsalzlösung; eine Schwimmschicht aus hoch gereinigtem Mineralöl (technisches Weißöl) auf der Sole diente als Luftabschluß. In ersten Konservierungs- und Fütterungsversuchen konnte er die prinzipielle Eignung dieser sogenannten Solekonservierung — auch Tauchkonservierung genannt — für Futtergetreide nachweisen [1]. Bild 1 zeigt Vorschläge zur Verfahrensgestaltung.

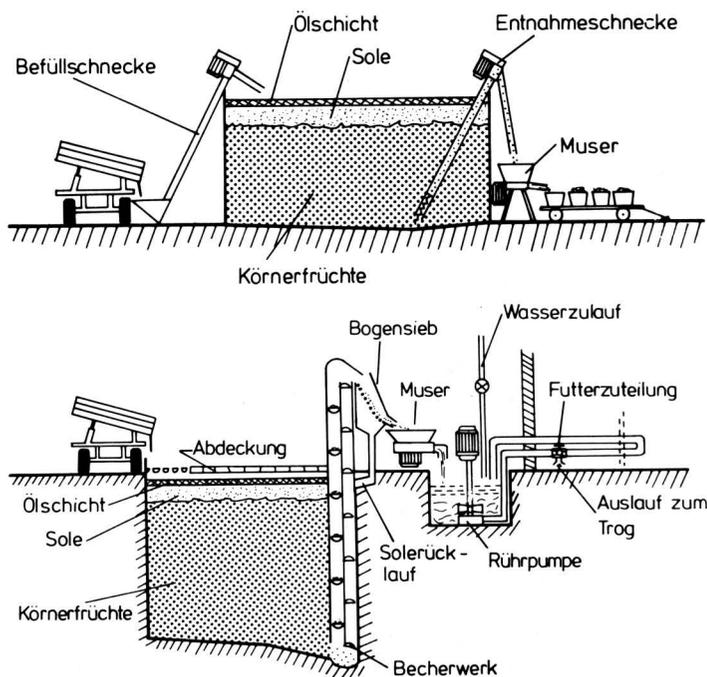


Bild 1. Vorschläge zur verfahrenstechnischen Gestaltung der Solekonservierung, nach *Albrecht* [1].