

## Richtiger Elektroenergieeinsatz bei der Getreidekaltbelüftung

Die Getreidekaltbelüftung in Zentralrohrsilos ist in der Praxis weit verbreitet. Die Gebläse der Zentralrohrsilos sind mit einem 11-kW-Motor, neuerdings mit einem 7-kW-Motor ausgerüstet. Der Anschlußwert der Luftvorwärmaneinrichtung beträgt  $3 \times 6$  kW. Maximal kann demnach bei einem Zentralrohrsilos ein Anschlußwert von 29 kW auftreten. Daraus geht hervor, daß es sich bei der Getreidekaltbelüftung um einen elektroenergieaufwendigen Arbeitsprozeß handelt. Wie eigene Untersuchungen zeigen, wird im praktischen Betrieb häufig wesentlich mehr Elektroenergie zur Getreidetrocknung verwendet, als auf Grund wissenschaftlicher Untersuchungen notwendig ist. Oft werden die vorhandenen Vorwärmanaggregate völlig willkürlich, oft sogar falsch eingesetzt. Dieser Zustand muß überwunden werden, denn die Getreidetrocknung soll möglichst billig und risikolos sein und in der kürzestmöglichen Zeit erfolgen.

Die Lagerfähigkeit von Getreide ist abhängig vom Getreidefeuchtigkeitsgehalt bei der Einlagerung und von der Lager Temperatur. Es ist bekannt, daß der für unbegrenzte Lagerung von Getreide höchstzulässige Feuchtigkeitsgehalt bei 14% liegt. Zwischen der Getreidefeuchtigkeit und der Luftfeuchtigkeit besteht ein Feuchtigkeitsgleichgewicht. Um Getreide auf 14% Feuchtigkeitsgehalt zu trocknen, darf die relative Luftfeuchtigkeit nicht mehr als 65% betragen, sie liegt aber häufig tagelang höher. Andererseits werden aber gerade an diesen Tagen die Trocknungsanlagen gebraucht, da in dieser Zeit das Getreide am feuchtesten eingebracht wird. Die relative Luftfeuchtigkeit muß deshalb verbessert werden. Das kann durch Erhöhung der Lufttemperatur geschehen, denn bei höherer Temperatur kann die Luft mehr Wasser aufnehmen.

Allgemein gilt, daß ein Grad Temperaturerhöhung die relative Luftfeuchtigkeit um etwa 5% herabsetzt. Um bei ungünstiger Luftfeuchtigkeit trocknen zu können, müssen unsere Trocknungsanlagen mit einer Heizung ausgerüstet sein. Dabei genügt eine Heizung, die eine Erhöhung der Lufttemperatur um 6°C ermöglicht. Rechnet man mit einer Erwärmung der Luft durch Reibung um 1°C, so ist mit der Lufttemperaturerhöhung von 6°C eine Trocknung auch bei relativer Luftfeuchtigkeit von 100% möglich. Mit dem elektrischen Luftvorwärmanagregat wird die Lufttemperatur je Heizstufe etwa um 2°C erhöht [1]. Folgende Trocknungsbedingungen ergeben sich damit:

Relative Luftfeuchtigkeit [%]	Heizstufen
bis 70	keine
70 bis 80	eine
80 bis 90	zwei
über 90	drei

In der Praxis wird häufig die Meinung vertreten, daß man die Trocknungsgeschwindigkeit durch Einschalten von einer oder mehreren Heizstufen erhöhen kann. Tatsächlich hängt die Trocknungsgeschwindigkeit in erster Linie von der Luftmenge und weniger von der relativen Luftfeuchtigkeit, die durch das Einschalten der Heizstufen verringert wird, ab. Ein unbedachter Einsatz der Heizstufen bringt keinen Zeitgewinn bei der Trocknung, dagegen nimmt der Elektroenergieverbrauch erheblich zu. Die spezifischen Trocknungskosten hängen demnach weitgehend von der Benutzung der Heizstufen ab. Eine theoretisch notwendige Einsatzzeit der Heizstufen kann nicht ermittelt werden, weil die vorhandene Luftfeuchtigkeit allein dafür maßgebend ist. Bei manueller Schaltung der Heizstufen müßte die für die Bedienung der Anlage verantwortliche AK in mindestens stündlichem Abstand die relative Luftfeuchtigkeit feststellen und die entsprechenden Heizstufen zu- und abschalten. Damit wäre ein sehr hoher Arbeitskräfteaufwand erforderlich. Ein optimaler Einsatz der Heizstufen ist nur mit Hilfe einer automatischen Schalteinrichtung möglich.

### Berechnung der Belüftungszeit

Neben dem richtigen Einsatz der Luftvorwärmaneinrichtung ist es wichtig, die notwendige Belüftungszeit für einen Trocknungsprozeß zu kennen. Die theoretisch notwendige Belüftungszeit läßt sich berechnen.

Um für die Praxis ein einfach zu handhabendes Mittel zur Bestimmung der notwendigen Belüftungszeit zu besitzen, wurden Diagramme aufgestellt [2].

Folgender Rechenweg führte zu den Diagrammen:

Ausgegangen wurde von der Wasseraufnahmefähigkeit der Luft, die man aus dem Mollier-*i,x*-Diagramm ermittelt. Die Wasseraufnahmefähigkeit von 1 m<sup>3</sup> Luft in Abhängigkeit von der Temperatur und von der Getreidefeuchtigkeit erhält man mit der Beziehung:

$$\Delta x = (x - x') \cdot \rho \text{ [kg/m}^3\text{]}$$

*x* Wassermenge je kg trockene Luft

*x'* Wassergehalt der Luft bei Sättigung

$\rho$  Dichte der Luft

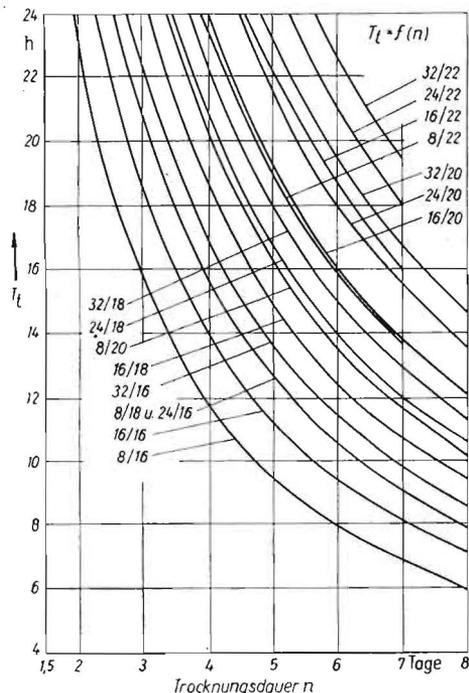
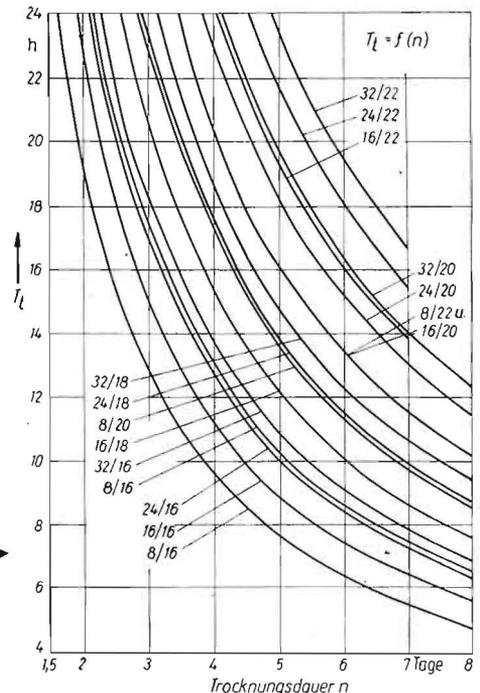


Bild 1. Täglich notwendige Belüftungsstunden in Abhängigkeit von der Trocknungsdauer für verschiedene Getreidemengen und -feuchtigkeiten bei einer Lufttemperatur von 15°C; die Randzahlen bedeuten: Getreidemenge [t]/Getreidefeuchtigkeit [%]

Bild 2. Täglich notwendige Belüftungsstunden in Abhängigkeit von der Trocknungsdauer für verschiedene Getreidemengen und -feuchtigkeiten bei einer Lufttemperatur von 20°C; die Randzahlen bedeuten: Getreidemengen [t]/Getreidefeuchtigkeit [%]



Die zur Trocknung erforderliche Luftmenge ergibt sich nach der Beziehung:

$$m = 1,1 \cdot \frac{m'}{\Delta x}$$

$$m' = \frac{(f_0 - f_1)}{100 - f_1} \cdot m'' \cdot 1000 \text{ [kg/t]} \quad (1)$$

Es bedeuten:

- $m$  erforderliche Luftmenge in  $\text{m}^3/\text{t}$  Getreide,
- $m'$  aufzunehmende Wassermenge in  $\text{kg}/\text{t}$ ,
- $m''$  Gesamtmenge des feuchten Getreides in  $\text{t}$ ,
- $f_0$  Ausgangsfeuchtigkeit des Getreides in  $\%$ ,
- $f_1$  Endfeuchtigkeit des Getreides in  $\%$  ( $= 14\%$ )

Nachdem man die vom Gebläse bei verschiedenen Silofüllungen geförderten Luftmengen kennt, kann man die notwendige Gesamtbelüftungsstundenzahl feststellen. Zur Berechnung dient folgende Formel:

$$T = \frac{M'}{M} \cdot \frac{m}{3600} \text{ [h]}$$

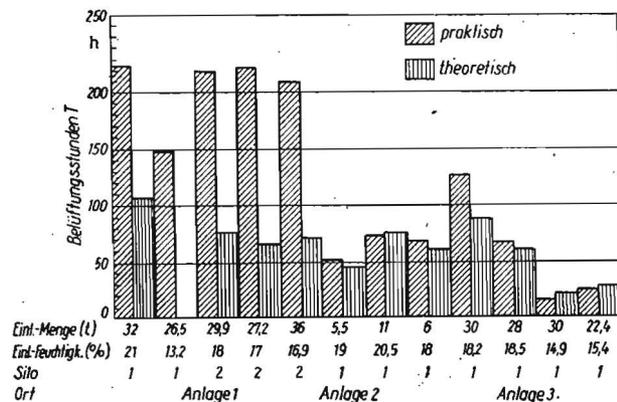


Bild 3. Gegenüberstellung der praktischen und theoretischen Belüftungsstunden in drei verschiedenen Anlagen

Darin bedeuten:

- $T$  notwendige Belüftungszeit in h,
- $M'$  Einlagerungsmenge in t,
- $M$  geförderte Luftmenge in  $\text{m}^3/\text{s}$

Es ist vorteilhaft, Getreide mit einem Feuchtigkeitsgehalt über  $14\%$  nicht länger als sechs bis sieben Tage zu lagern. Diese Bedingung ist ausschlaggebend für die täglich notwendige Belüftungsstundenzahl.

$$\text{Mit der Beziehung } T_t = \frac{T}{n}$$

- ( $T_t$  täglich notwendige Belüftungszeit [h];
- $n$  höchstzulässige Trocknungsdauer [Tage])

kann man Diagramme der täglich notwendigen Belüftungszeit in Abhängigkeit von der Trocknungsdauer aufstellen (Bild 1 und 2). Kurvenparameter sind Lufttemperatur, Getreidemenge im Silo und Getreideausgangsfeuchtigkeit.

Die Diagramme ermöglichen es, die täglich notwendige Belüftungsstundenzahl zu ermitteln, wenn man die Anzahl der Trocknungstage vorgibt. Anderenfalls ist es ebenso möglich, die voraussichtliche Trocknungsdauer abzulesen, wenn man täglich eine bestimmte Anzahl Trocknungsstunden vorgibt.

Die Kurven wurden für eine Lufttemperatur von  $15^\circ\text{C}$  (Bild 1) und von  $20^\circ\text{C}$  (Bild 2) ermittelt. Eine differenziertere Aufteilung der Kurven ist nicht notwendig, da für die Trocknungsperiode nur ein auf Grund der augenblicklichen Wittersituation geschätzter Temperaturdurchschnittswert für die Ermittlung der notwendigen Trocknungsstunden herangezogen werden kann.

Es ist zu empfehlen, am Tage nur bis max. 14 h zu belüften. Die günstigste Belüftungszeit liegt zwischen 7 Uhr und 21 Uhr, da während dieser Zeitspanne erfahrungsgemäß die für die Trocknung günstigsten Luftfeuchtigkeitsverhältnisse herrschen. Weil in dieser Zeit die niedrigsten Luftfeuchtigkeitswerte liegen, kann man meist ohne Luftvorwärmung arbeiten, d. h. die Trocknungskosten werden relativ niedrig. Um auf jeden Fall in sechs bis sieben Tagen den Trocknungsprozeß abzuschließen zu können, muß bei einer 32-t-Füllung eines Zentralrohrsilos mit Getreide von  $22\%$  Feuchtigkeits-

gehalt, eine Lufttemperatur von  $15^\circ\text{C}$  vorausgesetzt, etwa 24 h täglich, also durchgehend, belüftet werden. Zum anderen genügen aber für eine 16prozentige 8-t-Füllung schon täglich 8 h Belüftungszeit. Es wäre zu unwirtschaftlich, in jedem Fall täglich 24 h zu belüften, weil damit ein zu großer Aufwand an Heizenergie für die Luftvorwärmung notwendig würde. Für eine möglichst einfache und wirtschaftlich günstige Lösung bietet sich der Kompromiß an, die Kurvenschar in zwei Gruppen unterschiedlicher Belüftungszeit einzuteilen. Das zu der einen Gruppe gehörende Getreide wird täglich 15 h belüftet, während man die zur anderen Gruppe gehörenden Silofüllungen durchgehend belüften muß.

Die nachfolgend zusammengestellten Silofüllungen gehören zu der Gruppe, bei der 15 h zu belüften ist:

Füllung [t]	8	8	8	8	16	16	16	24	24	32	32
Getreidefeuchtigkeitsgehalt [%]	16	18	20	22	16	18	20	16	18	16	18

Zur zweiten Gruppe, bei der man durchgehend zu belüften hat, gehören folgende Silofüllungen:

Füllung [t]	16	24	24	32	32
Getreidefeuchtigkeitsgehalt [%]	22	20	22	20	22

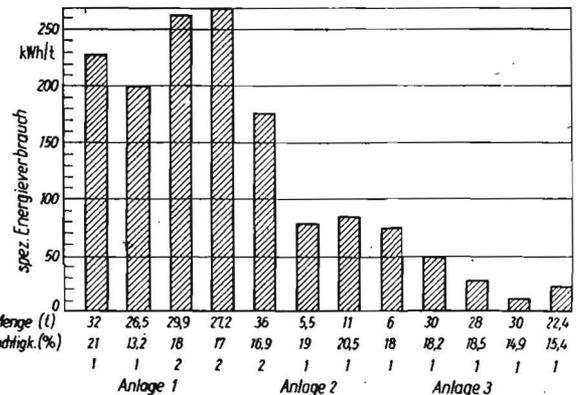


Bild 4. Spezifischer Energieverbrauch bei der Kaltbelüftung von Getreide

Mit Hilfe einer Schaltuhr und einer Stern-Dreieck-Anlaßschaltung ist es leicht möglich, den Betrieb der Zentralrohrsilos zu erleichtern. Mit Hilfe der Aufstellung kann man feststellen, ob täglich 15 h belüftet wird oder durchgehend, und es genügt dann eine einmalige Einstellung der Schaltuhr. Außerdem kann in der Aufstellung für jede Silofüllung die entsprechende Trocknungsdauer vermerkt sein, so daß die Bedienungsperson schon beim Einschalten des Gebläses weiß, nach welcher Zeitspanne etwa die Trocknung abgeschlossen sein wird.

Zum Zwecke einer weiteren Erleichterung bei der Bedienung der Belüftungsanlagen müssen die Heizstufen automatisch in Abhängigkeit von der relativen Luftfeuchtigkeit zu- und wieder abgeschaltet werden.

### Ergebnisse von Untersuchungen in der Praxis

Eine im Institut für Landtechnische Betriebslehre entwickelte Schalteinrichtung wurde in der Trocknungsperiode 1962 erprobt. Das Gerät, bei dem die Luftfeuchtigkeit mit Haarhygrometer bestimmt wird, arbeitete einwandfrei. Im Rahmen der Versuche wurden mehrere Zentralrohrsilosanlagen für Messungen und Untersuchungen herangezogen. Die Ergebnisse von drei Anlagen seien hier erwähnt.

Es waren zu ermitteln:

- die Betriebsstunden der Gebläse,
- die Betriebsstunden der Heizstufen,
- die relative Luftfeuchtigkeit in Abhängigkeit von der Zeit und

der spezifische Elektroenergieverbrauch.

Um vorhandene Unterschiede bei der Belüftung festzustellen, wurden die Anlagen verschiedenartig betrieben. Bei der Anlage 1 lief der Trockenprozeß unbeeinflusst ab. Man überließ das Ein- und Ausschalten dem für die Zentralrohrsilosanlage verantwortlichen Speichermeister, der von der Richtigkeit seiner Belüftungsmethode überzeugt war. Die Schaltung der Anlage 2 erfolgte ebenfalls von Hand, wobei nach den vorher erwähnten Belüftungsgesichtspunkten verfahren wurde. Die Anlage 3 wurde mit einer für diesen Zweck konstruierten automatischen Schalteinrichtung aus-

gerüstet, um die theoretisch notwendige Belüftungszeit und den richtigen Einsatz der Heizstufen genau einzuhalten (Bild 3).

Die Untersuchungen zeigten, daß bei allen Trockenprozessen in der Zentralrohrsilanlage 1 viel zu lange belüftet wurde. Am extremsten kommt das bei der zweiten Füllung des Silos 1 zum Ausdruck. Dort wurden noch 150 Lüfterstunden verschwendet, obwohl der eingelagerte Hafer schon trocken war (Getreidefeuchtigkeit = 13,2%). In der gleichen Zeit und mit dem gleichen Aufwand hätte man zwei andere Füllungen mittlerer Feuchtigkeit (Ausgangsfeuchte = 18%) trocknen können.

Alle anderen Getreidefüllungen wurden um ein Zwei- bis Vierfaches zu lange belüftet. Leider handelt es sich im Fall der Anlage 1 um keine Einzelercheinung, denn Messungen in verschieden willkürlich gewählten Zentralrohrsilanlagen im vergangenen Jahr zeigen, daß häufig zu lange belüftet wird.

Fragt man nach den Ursachen dieser Fehlbelüftungen, so kann man mehrere Gründe anführen:

1. Die verhältnismäßig komplizierten theoretischen Grundlagen der Trocknungsvorgänge bei der Getreidetrocknung sind dem Bedienungspersonal oft nicht bekannt. Sehr unterschiedliche und falsche „Belüftungsmethoden“ sind die Folge.
2. Da es sich beim Getreide um ein sehr wertvolles Gut handelt, hat man Angst vor der Verantwortung. Man belüftet deshalb viel zu viel als vermeintlich zu wenig.
3. Oft ist zu wenig Interesse und Zeit vorhanden, um den Betrieb der Getreidebelüftung ständig zu überwachen.
4. Technische Mängel an den Anlagen treten auf. Das bezieht sich vorwiegend auf die vorhandenen Luftvorwärmaggregate (Schalter, Sicherheitsvorrichtungen). Häufig ist auch die Luftsackverstellrichtung in mangelhaftem Zustand.

Die handgesteuerte Anlage 2 und die automatisch gesteuerte Anlage 3 bewiesen die Richtigkeit der Berechnungen. Bei der Zentralrohrsilanlage 3 stimmten die theoretischen und die praktischen Belüftungszeiten gut überein. Bei der handgesteuerten Anlage traten gegenüber dem optimalen Betrieb kleinere Abweichungen auf, die trotz des hohen Arbeitszeitaufwandes nicht zu vermeiden sind.

Der spezifische Elektroenergieverbrauch (Bild 4) bei der Getreidekaltbelüftung ist unterschiedlich. Er hängt wesentlich von der Benutzung der Heizstufen ab. Bei richtigem Einsatz der Heizstufen wurde bei der Zentralrohrsilanlage 2 ein durchschnittlicher spezifischer Elektroenergieverbrauch von = 70 kWh/t ermittelt, wobei allerdings nicht die günstigsten Bedingungen vorherrschten. Aus betrieblichen Gründen mußte immer auch in der Nacht belüftet werden, und der Füllungsgrad war fast immer sehr gering. Mit steigendem Füllungsgrad sinkt aber theoretisch der spezifische Energieverbrauch.

Bei der Zentralrohrsilanlage 1 lag der spezifische Elektroenergieverbrauch bei 220 kWh/t, wobei gleiche Ausgangsbedingungen wie beim Betrieb der Anlage 2 (Getreidefeuchtigkeit 18% bis 20%, Luftfeuchtigkeit annähernd gleich) vorlagen. Der Silofüllungsgrad war sogar bedeutend günstiger als bei der Anlage 2. Bei der Anlage 1 waren vier Zentralrohrsilos in Betrieb. In den beiden gemessenen Silos wurden 1962 151,6 t Getreide getrocknet, so daß für die vier Silos zusammen eine jährliche Durchsatzmenge von = 300 t angenommen werden kann. Durch richtige Belüftung wären der Volkswirtschaft allein durch diese eine Zentralrohrsilanlage 300 · 150 kWh = 45000 kWh erhalten geblieben. Rechnet man mit einem Arbeitspreis von 0,08 DM/kWh, ergäbe das eine Einsparung von 3600 DM/Jahr. Eine automatische Schalteinrichtung ist sicher nicht teuer, d. h. der Anschaffungspreis hätte sich schon im ersten Jahr amortisiert (Tafel 1).

Mit der automatischen Schalteinrichtung wurden sehr gute Ergebnisse erzielt. Ein Vergleich des spezifischen Elektroenergieverbrauchs der Zentralrohrsilanlagen 1, 2 und 3 zeigt den Vorteil der automatisch gesteuerten Anlage.

Der etwas höhere spezifische Elektroenergieverbrauch bei der Anlage 2 gegenüber der Anlage 3 ist im wesentlichen mit der Temperaturdifferenz von 10 °C zu erklären. Außerdem wurde bei der Zentralrohrsilanlage 2 nachts belüftet, bei der Anlage 3 nicht.

Tafel 1. Vergleich des spezifischen Energieverbrauchs bei unterschiedlichen Bedingungen

	Anlage 1	Anlage 2	Anlage 3
getrocknet von...bis...	9.8...18.8.	26.8...31.8.	4.8...10.8.
Einlagerungsmenge [t]	29,9	30,0	28,0
Einlagerungs- feuchtigkeit [%]	18,0	18,2	18,5
durchschn. Luft- feuchtigkeit [%]	70	70	70
durchschn. Temperatur [°C]	17	15	25
Elektroenergie- verbrauch [kWh/t]	259	47,7	22,5

## Empfehlungen für die Praxis

Es ist nicht damit zu rechnen, daß die automatischen Schalteinrichtungen schnell und in größerem Umfang eingeführt werden können. Deshalb sollten die vorgeschlagenen Diagramme mit den Kurven der notwendigen Belüftungszeit in Abhängigkeit von den Ausgangsdaten überall in der Praxis popularisiert werden. Außerdem ist es notwendig, dem Bedienungspersonal eine genaue Anleitung über den Einsatz der Heizstufen zu geben.

Vor dem Beginn der Trocknungsperiode ist die Siloanlage unbedingt technisch zu überprüfen und in Ordnung zu bringen. Dabei ist ganz besonders darauf zu achten, daß der Luftsack in einwandfreiem Zustand ist, und daß man ihn mühelos in jede Stellung bringen und in ihr festhalten kann.

Es wird weiterhin empfohlen, die Getreideoberfläche einzuebnen. Dazu muß der Silo oben offen sein. Es sollte eine Neukonstruktion eingeführt werden, mit deren Hilfe das Getreide um das Zentralrohr herum geschüttet wird, so daß sich der Berg rings um das Zentralrohr bildet.

Bezüglich der Feuchtigkeitsprobeentnahme ist darauf hinzuweisen, daß man in allen Höhen Proben entnehmen muß, die getrennt zu prüfen sind.

Bei Silos in geschlossenen Räumen wurde folgendes beobachtet: Wenn die Tore noch vor Sonnenuntergang bei tagsüber niedriger Luftfeuchtigkeit geschlossen werden, steigt die Luftfeuchtigkeit im Raume wesentlich langsamer an, als bei geöffneten Toren. Es wird deshalb empfohlen, den Raum immer dann zu schließen, wenn die Luftfeuchtigkeit im Freien zu steigen beginnt. Mit dieser Methode kann für die Nachtbelüftung mindestens eine Heizstufe eingespart werden.

## Zusammenfassung

Untersuchungen ergaben, daß die Getreidekaltbelüftung in Zentralrohrsilos in der Praxis häufig sehr fehlerhaft durchgeführt wird. Dadurch wird Elektroenergie verschwendet, und die Trocknungskosten werden wesentlich hoch.

Ausgehend von theoretischen Grundlagen der Trocknung wird der richtige Einsatz der Luftvorwärmheizstufen erläutert, und es werden Diagramme dargestellt, die Auskunft über die täglich notwendige Belüftungsstundenzahl geben. Es ist zweckmäßig, täglich maximal etwa 14 h zu belüften, um die Trocknung möglichst billig durchzuführen. Ist allerdings die Getreideausgangsfeuchtigkeit sehr hoch und der Silo halb bis voll gefüllt, muß durchgehend belüftet werden. Es werden Vorschläge für eine optimale Nutzung der Anlagen unterbreitet.

## Literatur

- [1] WINTER, R.: Grundlagen und Erfahrungen über den Einsatz von Zentralrohrsilos zur Körnertrocknung. Dt. Agrartechnik (1961)
- [2] BUSCHKOWSKI, E.: Untersuchungen an Zentralrohrsilanlagen hinsichtlich des Elektroenergieverbrauches. Großer Beleg - Institut für Landtechnische Betriebslehre der TU Dresden - 1962

A 5382