

190 m² und Höhe $h = 4$ bis 5 m) bestimmt. In Abhängigkeit von Ballendichte, Futterart, Einlagerungsart und Anlagengröße strömen in den untersuchten Anlagen etwa 20 bis 80 % der Trocknungsluft durch das Hohlraumssystem ungesättigt an den Ballen vorbei. Für eine weitere Erhöhung der Treffsicherheit der K_v -Werte sind ergänzende Messungen an Großanlagen erforderlich. Die Widerstandsgleichung für Ballenschüttungen erhält somit nachfolgende Form:

$$\Delta p = C_f \cdot h \cdot \rho_B^k \cdot \left(\frac{\rho_B}{\rho_{B0}} \right)^m (v_S) \cdot \left(K_v \cdot \frac{v_S}{v_{S0}} \right)^n \quad (4)$$

Hierin bedeutet $v_{S0} = 1$ m/s. Der Exponent der Ballendichte ist geschwindigkeitsabhängig. Die ermittelten Werte für den Stoffbeiwert C_f und die Exponenten k , n und m weisen signifikante Unterschiede für Luzerne und Wiesen gras auf (Tafel 3).

Die gefundenen Zusammenhänge wurden in Belüftungs nomogrammen für Wiesengras- und Luzerneballen dargestellt.

Die Anwendungsmöglichkeit zeigt Bild 3 an einem Beispiel. Es ist der Druckabfall bei vorgegebenem Luftdurchsatz in einer Ballenschüttung vorauszubestimmen. Man beginnt hierbei im mittleren unteren Teildiagramm mit dem gegebenen Luftdurchsatz v_L (z. B. $28 \cdot 10^3$ m³/h) und ermittelt über die Stapelgrundfläche F (z. B. 40 m²) und über den Korrekturfaktor K_v (z. B. 0,7) die effektive Luftgeschwindigkeit v_B , mit der die Ballen durchströmt werden (im Beispiel 0,15 m/s). Über die Ballendichte ρ_B (z. B. 200 kg/m³) und den Wassergehalt des Gutes x_B (z. B. 0,5 kg/kg) erhält man den auf 1 m Stapelhöhe bezogenen Druckabfall $\Delta p/h$ (im Beispiel 22 mm WS). Die

Stapelhöhe h (z. B. 2 m) führt zu dem gesuchten Druckabfall Δp innerhalb der gegebenen Ballenschüttung (im Beispiel 44 mm WS). Somit ist gleichzeitig der Betriebspunkt des Lüfters mit $v_L = 28 \cdot 10^3$ m³/h und $\Delta p_{stat} = 44$ mm WS bestimmt. Er liegt außerhalb des Kennlinienbereiches des Lüfters LAN 900/9.

Aus den dargestellten Ergebnissen leiten sich für die Belüftungstrocknung von Hochdruckballen höhere Anforderungen an die Lüfterleistung ab. Der stündliche Luftdurchsatz sollte dabei etwa $60 \cdot 10^3$ bis $80 \cdot 10^3$ m³ bei einem statischen Druck von etwa 60 mm WS betragen. Die z. Z. der Landwirtschaft der DDR zur Verfügung stehenden Lüfter SK 8/900 und LAN 900 mit einem stündlichen Luftdurchsatz von $20 \cdot 10^3$ bis $30 \cdot 10^3$ m³ bei etwa 20 mm WS entsprechen nicht diesen Anforderungen.

Zusammenfassung

Druckabfallmessungen beim Belüften von Einzelballen führten zur Aufstellung von Widerstandsgleichungen und Belüftungs nomogrammen für Luzerne- und Grasballenschüttungen. Diese ermöglichen es, u. a. den Strömungswiderstand in Ballenbelüftungsanlagen rechnerisch vorauszubestimmen. Damit wurden Grundlagen für die Projektierung und für die zweckmäßige Nutzung dieser Anlagen geschaffen.

Literatur

TUREK, E.: Der Strömungswiderstand und der Trocknungsverlauf bei der Belüftungstrocknung von Welkgutballen. Dissertation an der DAL, Kommission Ökonomie und Mechanisierung, 1970. A 8066

Untersuchungen zur Verweilzeit des Gutes in landwirtschaftlichen Trommeltrocknern

Dipl.-Ing. J. DRÄGER

1. Problem

Für die weitere Erforschung der Vorgänge in landwirtschaftlichen Trommeltrocknern ist die Kenntnis der Verweilzeit des Gutes in der Trocknungstrommel und dessen Spektrum von Bedeutung. Aus der Form der Verweilzeit-spektren lassen sich allgemeine Charakterisierungsmerkmale für Trommeltrockner ableiten. Zur Gewährleistung gleichmäßiger Trocknungsbedingungen werden für die einzelnen Fraktionen der Trocknungsgüter jeweils schmale Verweilzeit-spektren gefordert.

Im Zuge der funktionellen Weiterentwicklung der landwirtschaftlichen Trocknungstechnik haben sich international 3 Trommeltrocknersysteme durchgesetzt, die sich hinsichtlich der Trommelbauart voneinander unterscheiden (Bild 1):

- Trommel mit Kreuzeinbauten
- Trommel mit Hubschaufeln und Staublenden
- Dreizugtrommel

Die Trommleinbauten haben die Aufgabe, den Wärmeübergang vom Trocknungsgas zum Gut zu verbessern. Sie zerlegen das Gut in mehrere kleine Teilhaufen, verteilen es gleichmäßig über den Trommelquerschnitt, geben ihm somit eine große Oberfläche und lassen es periodisch quer durch den Gasstrom hindurchrieseln. Der Weg, den die einzelnen Gutteilchen unter der Einwirkung des Gasstromes zurücklegen, hängt vorwiegend von der Beschaffenheit dieser Teilchen ab. So werden kleine, leichte Teile während eines Abrieselvorgangs weiter geschleppt als große, schwere. Während des Falles sind die Gutteilchen häufig wechselnden Kräften ausgesetzt, so daß sie ständig Quer- und Drehbewegungen ausführen. Auf Grund dieses Sachverhaltes läßt sich nicht eine bestimmte, sondern nur eine mittlere Verweilzeit des Gutes in der Trommel angeben

(„Verweilzeitwahrscheinlichkeit“). Da die Gasmenge beim Strömen durch Trocknungstrommeln um die aufgenommene Wasserdampfmenge größer wird und das Gut während des Trocknens Masse und Struktur ändert, entstehen weitere Abhängigkeiten. Eine exakte Berechnung der Schleppwirkung des Gasstroms bereitet daher große Schwierigkeiten. Zur Ermittlung der Verweilzeit-spektren des Gutes in Trocknungstrommeln wurden Messungen an Trommeltrocknern mit Hilfe radioaktiver Nuklide durchgeführt [1].

Für die zum Einsatz kommenden Trocknungsgüter wurde hierzu ein geeignetes Markierungsverfahren entwickelt. Methodik und Ergebnisse der Verweilzeitmessungen sind bereits in [1] erläutert.

In vorliegendem Beitrag werden die trockenstechnischen Erkenntnisse der Verweilzeitmessungen diskutiert.

2. Ergebnisse und Diskussion

Die untersuchten Trocknertypen lassen deutliche Unterschiede in den Verweilzeit-spektren des Gutes in der Trommel erkennen (Bild 2). Zur Messung der Verweilzeit-spektren wurde das mit dem radioaktiven Gold-Nuklid Au-198 markierte Gut am Eingang stoßförmig zugegeben. Da die einzelnen Gutteile unterschiedliche Aufenthaltswahrscheinlichkeiten besitzen, ergibt sich das Verweilzeit-spektrum als Wahrscheinlichkeitsdichte der Aufenthaltszeiten. Die gemessene relative Impulsrate (Bild 2) entspricht der in der jeweiligen am Trommelausgang gezogenen Probe enthaltenen Anzahl markierter Teile. Die mittlere Verweilzeit \bar{t} des Gutes in der Trommel wurde aus den gemessenen Verweilzeit-spektren errechnet. Sie entspricht dem Schwerpunktabstand

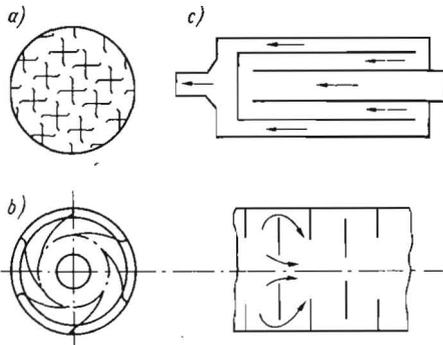


Bild 1. Bauarten von Trommeltrocknern; a) Trommel mit Kreuzeinbauten, b) Trommel mit Hubschaufeln und Staubblenden, c) Dreizugtrommel

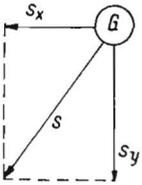


Bild 3. Zur Bewegung der Gutteilchen während des Abrieselns von den Trommleinbauten;

horizontaler Schleppweg $s_x = \frac{a}{2} \cdot t^2$

vertikaler Fallweg $s_y = \frac{g}{2} \cdot t^2$

Horizontalgeschwindigkeit $w_x = \frac{a}{g} s_y \cdot n \cdot k$

Darin bedeuten:

- t Zeit
- a, g Horizontal- bzw. Fallbeschleunigung
- n Trommeldrehzahl
- k Zahl der Abrieselungen je Trommelumdrehung,
- G Gutteilchen
- s Weg des Gutteilchens beim Abrieselvorgang

von der Nulllinie der von der Kurve eingeschlossenen Fläche.

Im Trommeltrockner mit kreuzförmigen Einbauten vom Typ UT 66-1 ergaben sich für die leichten Blatteile kürzere Verweilzeiten als für die schweren Stengelteile (Bild 2c, Kurve a und b). Im Trommeltrockner mit Hubschaufeln und Staubblenden vom Typ SB-1,5 wurden bei Grünfutter etwas kleinere mittlere Verweilzeiten als im Typ UT 66-1 gemessen (Bild 2b). Trotz der sehr hohen Trommeldrehzahl von 10 min⁻¹ ergab sich für die mittlere Verweilzeit von Zuckerrübenschnitzeln mit 52 min ein noch größerer Wert als im Trockner UT 66-1.

Der Trockner mit dem längsten Trommelweg, die Dreizugtrommel vom Typ MGF-U, wies bei Grünfutter mit durchschnittlich 3,5 min die kürzesten Verweilzeiten auf. Für die Trocknung von Hackfrüchten sind Anlagen dieses Typs bislang nicht vorgesehen.

Die Variationskoeffizienten sind relativ groß. Nur in der Dreizugtrommel beträgt der Variationskoeffizient bei Grünfutter ≈ 40 Prozent und im Trommeltrockner mit Kreuzeinbauten bei Hackfruchtschnitzeln nur rund 30 Prozent.

In der Trommel mit Hubschaufeln und Staubblenden ergaben sich sowohl bei Grünfüt als auch bei Hackfruchtschnitzeln sehr große Verweilzeitsschwankungen.

Die bei den Messungen gewonnenen Ergebnisse lassen sich wie folgt deuten:

Beim Transport von Schüttgütern durch horizontale Rohrleitungen werden prinzipiell drei Förderzustände unterschieden: Bei kleinerem Gutdurchsatz und leichten Gutteilchen fließt das Gut bei hohen Gasgeschwindigkeiten wie bei pneumatischer Förderung im Gasstrom mit. Wird die Gasgeschwindigkeit bei gleichem Gutdurchsatz vermindert, so bleibt nur ein Teil des Gutes im Gas, der Rest fließt als Strähne mit wesentlich kleinerer Geschwindigkeit am Rohrboden dahin. Beim dritten Förderzustand, wenn die Reibungskraft der Gutteilchen am Rohrboden größer ist als die Schleppkraft des Gases, bleiben die Gutteilchen am Rohrboden liegen.

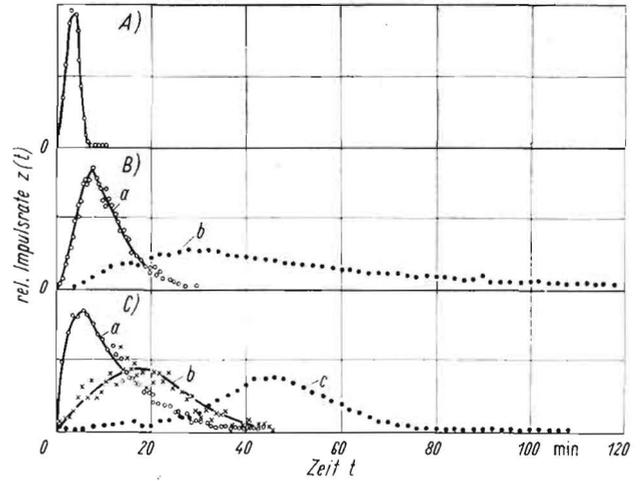


Bild 2. Verweilzeitspektren in Trommeltrocknern

A) Dreizugtrommel, Luzerne: $\bar{T} = 3,5$ min, $V_t = 39\%$

B) Trommel mit Hubschaufeln und Staubblenden;

a Kleegras: $\bar{T} = 10,4$ min, $V_t = 53\%$

b Zuckerrübenschnitzel: $\bar{T} = 52$ min, $V_t = 63\%$

C) Trommel mit Kreuzeinbauten;

a Lupine, Blatteile: $\bar{T} = 12,1$ min, $V_t = 72\%$

b Lupine, Stengelteile: $\bar{T} = 23,7$ min, $V_t = 43\%$

c Zuckerrübenschnitzel: $\bar{T} = 44,5$ min, $V_t = 32\%$

Der Transport des Gutes durch rotierende Trommeln stellt eine Überlagerung dieser drei Förderzustände dar. Die gemessenen kleinen Verweilzeiten in der Dreizugtrommel deuten jedoch darauf hin, daß die Förderung des Gutes hier vorwiegend pneumatisch freischwebend im Gasstrom erfolgte. Die Ursache hierfür ist in der hohen Gasgeschwindigkeit infolge der kleinen Strömungsquerschnitte der drei Züge zu sehen.

Bei den beiden anderen Trommeltypen bleibt der überwiegende Teil des Gutes, insbesondere bei den schweren Hackfrüchten, entsprechend dem erwähnten dritten Förderzustand unbewegt auf den Einbauten liegen. Der Transport des Gutes erfolgt nur während des Abrieselns. Stark vereinfacht läßt sich dieser Vorgang wie folgt erläutern:

Infolge der Rotation der Trommel rieselt das Gut ständig von Einbau zu Einbau. Während des Falles sind die Gutteilchen zwei Kräften ausgesetzt (Bild 3):

- der senkrecht nach unten wirkenden Schwerkraft und
- der infolge des Strömungswiderstandes horizontal wirkenden Schleppkraft.

Durch Überlagerung dieser beiden Kräfte bewegen sich die Gutteilchen in Strömungsrichtung auf einer geneigten Bahn schräg nach unten.

Durch Verknüpfung der Weg-Zeit-Gesetze der gleichmäßig beschleunigten Bewegung und des freien Falles läßt sich für die Horizontalgeschwindigkeit des Gutes in der Trommel eine näherungsweise Beziehung finden (Bild 3).

Folgende wesentliche Aussagen können getroffen werden:

- Die Horizontalgeschwindigkeit von Gutteilchen in der Trommel, bei denen die Reibungskraft an den Einbauten größer ist als die Schleppkraft des Gases, ist direkt proportional der Trommeldrehzahl.
- Je leichter die Gutteilchen sind, desto größer wird der horizontale Schleppweg je Trommelumdrehung und damit die Horizontalgeschwindigkeit. Dadurch wird gewährleistet, daß die leichten, schnell trocknenden Gutteilchen die Trommel eher verlassen als die schweren, langsamer trocknenden Teilchen.
- In Trommeltrocknern mit Hubschaufeln und Staubblenden, in denen das Gut je Trommelumdrehung nur einmal abrieselt, findet eine weniger intensive Durchmischung des Gutes mit dem Gasstrom statt als in Trommeln mit Kreuzeinbauten, in denen das Gut je Trom-

1. Aufgabenstellung

Die Heißlufttrocknung landwirtschaftlicher Produkte hat sich besonders im vergangenen Jahrzehnt beachtlich entwickelt.

Der erzielbare Gewinn eines Trockenwerkes ist stark von der Qualität des Trockengutes abhängig, die von der Frischgutqualität und von der korrekten Trocknungsführung bestimmt wird. Forschungsarbeiten im Rahmen der Tierernährung ergaben, daß insbesondere der Wassergehalt des Trockengutes und die Verdaulichkeit des Eiweißes korrelieren, weil durch die gemeinsame Ursache „Überhitzung“ einerseits die Eiweißstruktur geschädigt wird und andererseits eine Übertrocknung stattfindet. In der DDR wurde aufgrund dieser Zusammenhänge der Wassergehalt als qualitätsbestimmendes Merkmal in die „Anordnung über den Aufkauf und den Handel mit Trockengrünut“ aufgenommen. Die beste Qualitätsklasse erfordert 86 bis 92 Prozent Trockensubstanzgehalt.

Die Einhaltung der Toleranzen ist jedoch problematisch:

- Übertrocknetes Gut läßt sich mit großer Betriebssicherheit erzeugen,
- beim Anwachsen des Wassergehaltes auf etwa 9 bis 10 Prozent beginnen Schwierigkeiten in der Hammermühle, falls gemahlen wird;
- erst bei über 12 Prozent Wassergehalt können einwandfreie Preßlinge hergestellt werden.

Diese Zusammenhänge erfordern die Einhaltung enger Toleranzen für den Wassergehalt (Bild 1).

Der Automatisierung des Trocknungsprozesses fallen dabei bekanntlich vor allem folgende Aufgaben zu:

- Erhaltung der Trockengutqualität durch Erreichen eines weitgehend gleichbleibenden Betriebsablaufes und Einhalten der Wassergehaltstoleranzen;
- maximale Auslastung der Anlage durch möglichst enges Herangehen an die höchstzulässigen Betriebsparameter;
- maximale Betriebssicherheit durch gleichmäßigen Trocknungsbetrieb, Vermeiden von Havarien;
- Entlastung des Trockenmeisters von der ständigen Kontrolle der Meßinstrumente und der große Erfahrungen erfordernden Trocknerführung.

(Schluß von Seite 488)

melandrehung viermal abrieselt. Damit läßt sich die verstärkt aufgetretene Verklutung der Hackfruchtschnitzel, die zu den hohen Verweilzeitschwankungen führte, erklären.

Zusammenfassung

Die dargelegten Untersuchungen tragen dazu bei, das Förderverhalten landwirtschaftlicher Trommeltrockner weiter zu ergründen. Die kleinsten Verweilzeiten und die geringsten Verweilzeitschwankungen und damit die gleichmäßigsten Trocknungsbedingungen hatte bei Einsatz von Grünfutter der Dreizugtrommeltrockner aufzuweisen. Die nachgewiesenen hohen Verweilzeitschwankungen bei Einsatz von Hackfruchtschnitzeln im Trockner mit Hubschaufeln und Staublenden führen zu der Aussage, daß dieser Trocknertyp sich weniger gut zur Trocknung von Hackfrüchten als zur Trocknung von Grünfutter eignet.

Literatur

[1] Rettig, H. / Dräger, J.: Verweilzeitmessung an Trommeltrocknern der Landwirtschaft mit radioaktiven Nukliden. Deutsche Agrartechnik 20 (1970) H. 3, S. 149 bis 151. A 8112

Zur Lösung dieser Aufgaben wurden neben theoretischen Untersuchungen praktische Versuche mit selbst zusammengestellten und industriell projektierten Regeleinrichtungen an verschiedenen Trocknungsanlagen angestellt, in deren Ergebnis sich das Wissen über das Regelverhalten landwirtschaftlicher Trommeltrockner stark erweiterte. Im folgenden werden daraus einige theoretische Zusammenhänge und die Erfahrungen von einem automatisierten Trommeltrockner vermittelt.

2. Einige grundlegende Eigenschaften der Regelstrecke „Trommeltrockner“

2.1. Statisches Verhalten

Die statischen Kennlinien des Gleichstromtrocknungsprozesses stellen die Antwort der Austrittsgrößen des Trockners auf verschiedene Eintrittsgrößen dar. Am wichtigsten für die Automatisierung des Trocknungsprozesses sind die Zusammenhänge zwischen

- Heißlufttemperatur,
- Frischgutdurchsatz und
- Ablufttemperatur.

Bild 2 beschreibt die statischen Kennlinien des Zusammenhangs zwischen Trocknungslufttemperatur und Ablufttemperatur mit dem Verhältnis Gutdurchsatz : Luftstrom als

Bild 1. Qualität des Trockengutes und Betriebssicherheit in Abhängigkeit von der Trockengutfeuchte (schematisch)

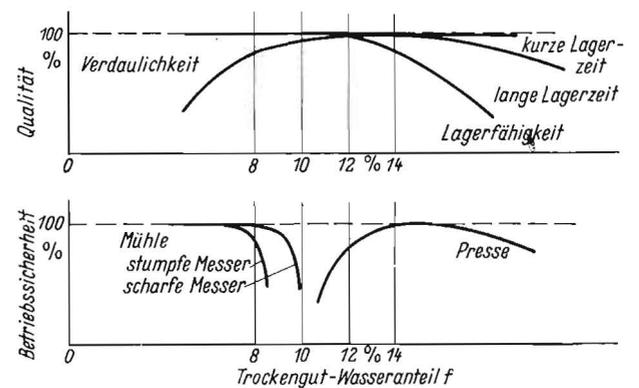


Bild 2. Statische Kennlinien der Regelstrecke Trocknungslufttemperatur-Ablufttemperatur; Gleichstromtrocknung, Gleichgewicht zwischen Trockengut und Abluft, $f_0 = 80\%$

