

Heißlufttrocknung und Wärmeenergiebedarf

Dr. sc. techn. W. Maltry, KDT, Institut für Mechanisierung Potsdam-Bornim der AdL der DDR

1. Zielstellung

Die Kosten für die Energieträger zur Wärmeerzeugung in den landwirtschaftlichen Trockenwerken machen einen beachtlichen Teil der gesamten Trocknungskosten aus. Bei den Anlagen des Typs UT 66 beträgt dieser Anteil bis zu 40 Prozent, die größeren Anlagen UT 67 und UT 71 haben einen noch höheren Anteil, weil einige andere spezifische Kostenarten niedriger liegen.

Wegen der großen Bedeutung der energiewirtschaftlichen Aufwendungen der Volkswirtschaft für die mit hohen Investitionen verbundene landwirtschaftliche Trocknungstechnik ist es erforderlich, die bestehenden wissenschaftlich-technischen Zusammenhänge aufzudecken und die Energieanwendung zu optimieren. Der vorliegende Aufsatz soll ein Beitrag zu diesem Ziel sein.

2. Die Aufwendungen an Wärmeenergie für den Grundprozeß „Trocknen“

Beim konvektiven Trocknen wird die in der Feuerung erzeugte Wärme an die Trocknungsluft übertragen, die sie jetzt ihrerseits wegen der bestehenden Temperaturdifferenz an das kühlere feuchte Gut überträgt. Die Wärme wird hauptsächlich zur Verdunstung bzw. Verdampfung des im Gut enthaltenen Wassers verbraucht, ein kleinerer Teil der in der Feuerung erzeugten Wärme führt zur Erwärmung des zu trocknenden Gutes und zur Wärmeabstrahlung vom Trockner. Ein spürbarer Teil der Wärme verbleibt in der Abluft. Da je t Trockneraustraggut umso weniger Wasser verdampft werden muß, je trockener das feuchte Trockneraufgabegut ist, stellt das Vorwelken eine wirksame Maßnahme zur Verminderung des Wärmebedarfs je t Trockengut dar. Beispielsweise bedeutet bekanntlich ein Vorwelken von $f = 80$ Prozent auf $f = 70$ Prozent eine Verminderung der im Trockner je t Trockengut auszutreibenden Wassermenge um mehr als $1/3$ (Bild 1).

Für einen bestimmten Wassergehalt des angelieferten Gutes geht es jedoch im Trockenwerk um die Beeinflussung des spezifischen Wärmebedarfs je 1 kg zu entziehenden Wassers. Diese Problematik soll im folgenden näher erörtert werden.

3. Die Vorgänge im Gleichstrom-Trommeltrockner

Die Temperatur der Heißluft nimmt im Trockner zunächst rasch, später immer langsamer ab, die Luft wird gleichzeitig mit dem aus dem Gut verdunsteten Wasser beladen. Die Temperatur des Gutes steigt anfangs rasch an, verharrt längere Zeit auf einem nahezu konstanten Wert (Kühlgrenztemperatur) und steigt erst dann wieder an, wenn das Gut weitgehend ausgetrocknet ist (Bild 2). Was die Heißluft an Energie in Form fühlbarer Wärme (sie entspricht der Temperatursenkung) verliert, gewinnt sie im wesentlichen durch den Übergang des Wassers von der gehobenen, flüssigen Phase zur dampfförmigen Phase. Die Intensität der Trocknung wird durch die jeweilige Temperaturdifferenz zwischen Trocknungsluft und Gutoberfläche bestimmt, d. h. das Gut trocknet am Trommelanfang am schnellsten und am langsamsten am Trommelende bzw. im Ausfallgehäuse. Luft und Gut streben einem gemeinsamen Gleichgewichtszustand zu, bei dem weder Temperatur noch Dampfdruckunterschiede zwischen Luft und Gut herrschen; dieser Zustand ist nur bei unendlich großer Trommellänge erreichbar. Der tatsächliche Trocknungsprozeß muß vorher abgebrochen werden, wobei der gewünschte Endwassergehalt des Gutes ($f_a = 8$ bis 14 Prozent) erreicht sein muß. Eine nähere Analyse der Bedingungen für den Abbruchzustandspunkt im bekannten Mol-

lier-h,x-Diagramm (früher: i,x-Diagramm) erbrachte folgende wichtige Erkenntnisse:

— Das Verhältnis der Differenzen zum Gleichgewichtszustand muß für den Wassergehalt des Gutes (bezogen auf Trockensubstanz), den Wassergehalt der Luft und die Trocknungslufttemperatur etwa gleich sein:

$$\frac{t_{Le} - t_{gl}}{t_{La} - t_{gl}} = \frac{u_e - u_{gl}}{u_a - u_{gl}} = \frac{x_{gl} - x_e}{x_{gl} - x_a} \quad (1)$$

t Temperatur in °C

u Wassergehalt des Gutes in kg Wasser je kg Trockensubstanz

x Wassergehalt der Luft in kg Wasserdampf je kg trockene Luft

Index e Eintritt in den Trockner

Index a Austritt aus dem Trockner

Index gl Gleichgewicht bei unendlich lang gedachtem Trockner

Index L bezogen auf Luft

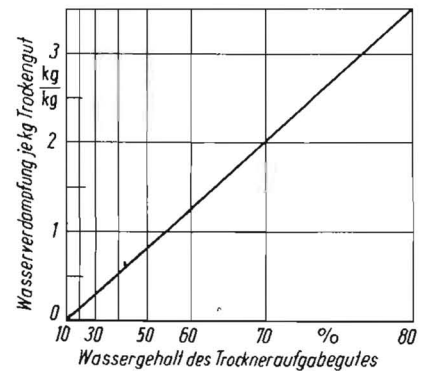


Bild 1. Abhängigkeit der Wasserverdampfung je kg Trockneraustraggut vom Wassergehalt f_e des Trockneraufgabegutes ($f_a = 10$ Prozent)

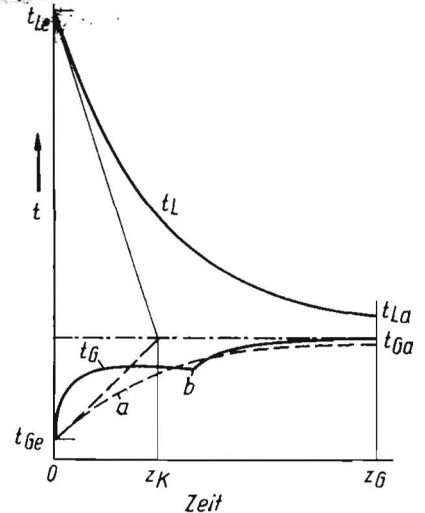


Bild 2. Trocknungslufttemperatur und Temperatur des Gutes im Gleichstromtrockner (schematisch); a Verlauf bei $c_G = \text{konst.}$, b 1. Knickpunkt

- Die Feuchtigkeit des austretenden Gutes muß über dem Gleichgewichtspunkt liegen, die austretende Luft muß trockener und wärmer sein, d. h.

$$u_a > u_{g1} \quad (2)$$

$$x_a < x_{g1} \quad (3)$$

$$t_{La} > t_{g1} \quad (4)$$

- Je besser der Ausgleich zwischen Luft und Gut am Austritt ist, ein umso niedrigerer spezifischer Wärmeverbrauch je 1 kg Wasser ist zu erwarten
- Je größer die verbleibende Temperaturdifferenz zwischen Luft und Gut am Austritt ist, umso größer ist die Wasserverdunstungsleistung je kg Gut im Trockner und je m³ Trommolvolumen.

Die letzten beiden Bedingungen können zunächst nicht unabhängig voneinander optimiert werden. Es existieren zwei Grenzfälle für die Fahrweise des Trocknungsprozesses

- Maximale Trocknerleistung bei hoher Trommeldrehzahl, kurzer Aufenthaltszeit des Gutes, relativ hoher Ablufttemperatur und damit relativ hohem spezifischen Wärmebedarf je 1 kg Wasser
- Minimaler spezifischer Wärmebedarf je 1 kg Wasser bei möglichst weitgehendem Ausgleich zwischen Luft und Gut, was zu niedrigeren Ablufttemperaturen und langen Verweilzeiten des Gutes im Trockner führt.

In beiden Fällen kann der gleiche Trockengutwassergehalt erreicht werden.

Um energiewirtschaftliche Empfehlungen für die Praxis geben zu können, müssen folgende Fragen geklärt werden:

- Welche Werte des spezifischen Wärmeaufwands sind im Trommeltrockner überhaupt erreichbar?
- In welchem Bereich liegt der optimale Kompromiß zwischen minimalem Energieaufwand und maximalem Gutsdurchsatz?

Die Antwort auf diese Fragen ist mit Hilfe von sogenannten Charakteristiken aufzuspüren, das sind Diagramme, deren Koordinaten jeweils ein Maß für die Leistung bzw. für die spezifischen Aufwendungen sind.

4. Charakteristiken des landwirtschaftlichen Trommeltrockners

Das Maß für die energetischen Aufwendungen des Trocknungsprozesses ist der spezifische Wärmeaufwand je 1 kg ausgetriebenen Wassers q .

Als Maß für die Leistung im Verhältnis zum technischen Aufwand eines Trockners müssen zwei Größen betrachtet werden. Die mittlere logarithmische Temperaturdifferenz zwischen Luft und Gut Δt_m ist ähnlich wie beim Wärmeübertrager ein gut geeignetes Maß für die in einem bestimmten Trockner an das Gut übertragbare Wärmeleistung und damit für die Wasserverdampfung des eigentlichen Trockners. Ein weiteres Maß für die Bewertung der gesamten Trocknungsanlage ist die Wasserbeladung der Trocknungsluft Δx , denn die Einrichtungen des Lufttransports, wie Luftleitungen, Lüfter und Zyklo, können umso kleiner ausgelegt werden, je größer die Wasseraufnahme der Trocknungsluft ist.

Unter Berücksichtigung verschiedener Voraussetzungen (darunter Sorptionsisothermen landwirtschaftlicher Trocknungsgüter, maximal zulässige Guttemperatur, Eintrittsfeuchte $f_e = 80$ Prozent, Austrittsfeuchte = 10 Prozent) wurden zwei Charakteristiken des Trocknungsprozesses ermittelt (Bilder 3 und 4), wiederum unter Zuhilfenahme des Mollier-h,x-Diagramms. Aus den beiden Diagrammen lassen sich wichtige Schlußfolgerungen für die Optimierung der Trocknerfahrweise ziehen.

Die Größe λ im Diagramm über den Einfluß der mittleren Temperaturdifferenz Δt_m (Bild 3) entspricht dem natürlichen Logarithmus des Verhältnisses der Differenzen zum

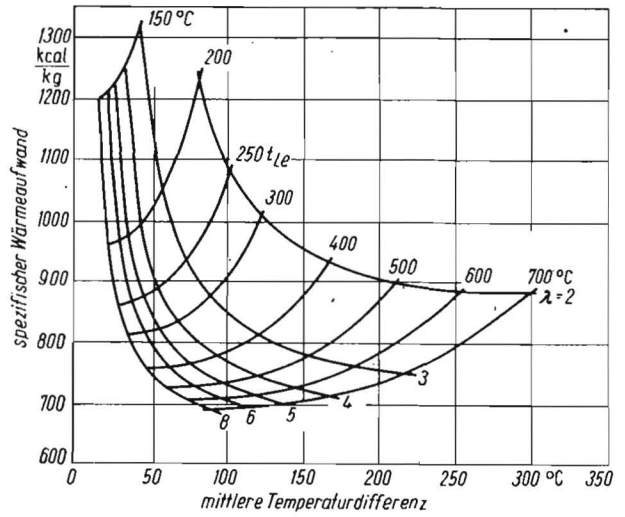


Bild 3. Spezifischer Wärmebedarf je kg Wasserverdampfung und mittlere logarithmische Temperaturdifferenz für verschiedene Heißlufttemperaturen und verschiedene Werte der Rechengröße λ (= natürlicher Logarithmus des Verhältnisses nach Gl. (1))

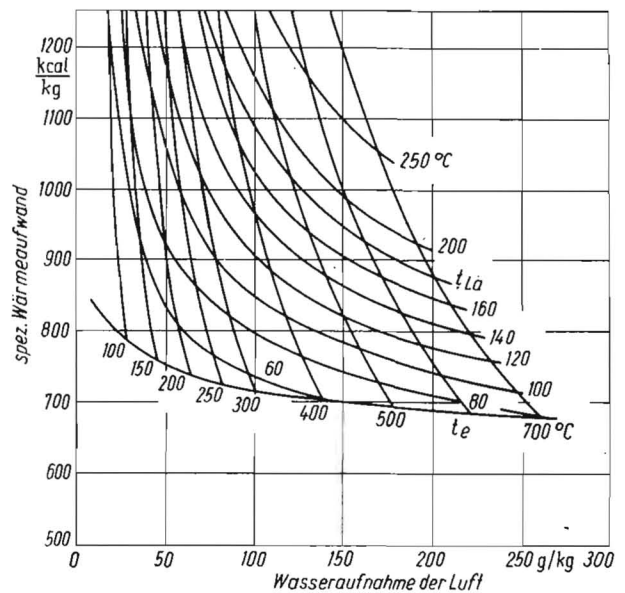


Bild 4. Spezifischer Wärmebedarf je kg Wasserverdampfung und Wasseraufnahme der Trocknungsluft für verschiedene Heißluft- und Ablufttemperaturen

Gleichgewichtszustand nach Gl. (1). Für $f_e = 80$ Prozent ($u_e = 4,00$ kg/kg) und $f_a = 10$ Prozent ($u_a = 0,111$ kg/kg) beträgt $\lambda_{\min} = \ln(4,00/0,111) = 3,58$, also knapp 4.

Bei milder werdender Trocknung, d. h. bei größerer Gleichgewichtsfeuchte u_{g1} und geringerer Differenz $u_a - u_{g1}$ wächst der λ -Wert gegenüber λ_{\min} an.

Aus der Charakteristik ergibt sich eindeutig, daß für λ -Werte oberhalb 4 die Heißlufttemperatur den Haupteinfluß auf den spezifischen Wärmebedarf ausübt, während der λ -Wert vorwiegend die wirksame Temperaturdifferenz und damit die Trocknerleistung beeinflusst. Bei 700 °C Heißlufttemperatur ist der spezifische Wärmeverbrauch des eigentlichen Trocknungsprozesses nicht unter etwa 700 kcal/kg zu bringen. Durch Falschluf, Feuerungsverluste und Abstrahlung entsteht für die gesamte Trocknungsanlage allerdings ein etwas höherer Betrag, erfahrungsgemäß mehr als 800 kcal/kg. Die Heißlufttemperatur hat bis etwa 500 °C einen besonders großen Einfluß auf den spezifischen Wärmebedarf, so daß bei der Trocknung empfindlicherer Güter, z. B. Welkgut,

Ganzpflanzen oder Getreide, zwangsläufig ein höherer spezifischer Wärmebedarf in Kauf genommen werden muß; Bild 3 ist zur quantitativen Bewertung dieser Zusammenhänge geeignet. Für ein Trockneraufgabegut mit etwa $f_e = 80$ Prozent (nicht gewelktes Grüngetreide, Hackfrüchte) kann aus Bild 3 die Empfehlung abgeleitet werden, im Interesse einer hohen Trocknerleistung einen möglichst niedrigen λ -Wert anzustreben. Das ist möglich durch

- höchstmögliche Heißlufttemperatur, bei der noch keine Verbrennungen auftreten
- größtmöglichen Gutedurchsatz, bei dem noch $f_a = 8$ bis 14 Prozent erreicht wird.

Das Zusammenwirken von Heißluft- und Ablufttemperatur ist in der Charakteristik an der Wasseraufnahme der Luft Δx auf der x-Achse (Bild 4) ablesbar. Die untere dick ausgezogene Grenzlinie entspricht dem nicht erreichbaren Fall, daß die Abluft 100prozentig wasserdampfgesättigt ist.

Man erkennt aus dem Diagramm, daß im Bereich oberhalb 500 °C Heißlufttemperatur eine Fahrweise, die bei gleicher Heißlufttemperatur zu 10 grd höherer Ablufttemperatur führt, etwa 20 kcal Wärmebedarf je kg Wasser mehr erfordert; gleichzeitig sinkt die Wasseraufnahme der Luft, so daß für die gleiche Wasserverdampfung ein größerer Luftstrom erforderlich wird.

Andere Überlegungen zeigten, daß mit der Ablufttemperaturerhöhung eine praktisch gleich große Steigerung der maximalen Guttemperatur einhergeht, die ihrerseits im Interesse der Erhaltung der Nährstoffe, insbesondere der Verdaulichkeit des Eiweißes, einen bestimmten Betrag nicht überschreiten darf. Auch aufgrund dieser Zusammenhänge ist die automatische Konstanthaltung der Ablufttemperatur eine vorteilhafte und wohlbegründete Maßnahme.

Zusammengefaßt lassen die beiden dargestellten Charakteristiken folgende energiewirtschaftliche Aussagen und Empfehlungen zu:

- Das Schnittgut ist vorzuwelken.
- Im eigentlichen Trocknungsaggregat ist der spezifische Wärmebedarf bei Heißlufttemperaturen bis etwa 1000 °C praktisch nicht unter $q = 700$ kcal/kg zu bringen. Hinzu kommen die unvermeidlichen Wärmeverluste der Feuerung und durch Abstrahlung. Trockner mit $q = 800$ kcal/kg sind als energiewirtschaftlich sehr gut einzuschätzen. Prospektangaben ausländischer Trockner mit Werten unter $q = 800$ kcal/kg dürften auf Messungen beruhen, die bei besonders günstigem, heißem Sommerwetter durchgeführt wurden.
- Von der Fahrweise her ist der spezifische Wärmebedarf lediglich über die Heißlufttemperatur spürbar beeinflussbar.
- Es ist stets maximale Trocknungsleistung bei vernünftig hohen Ablufttemperaturen anzustreben; höherer Gutedurchsatz erhöht den spezifischen Wärmebedarf nur unwesentlich
- Je höher die Ablufttemperatur ist, umso höher ist auch die maximale Trockenguttemperatur. Der vernünftige Bereich der Ablufttemperatur liegt zwischen etwa 100 °C (bei $t_{Le} = 500$ °C) und 160 °C (bei $t_{Le} = 1000$ °C)
- Höhere Ablufttemperaturen bedeuten neben der Qualitätsgefährdung einen höheren spezifischen Energieaufwand
- Zu niedrige Ablufttemperaturen führen zu einer verminderten Wasserverdampfungsleistung des Trockners, weil sich der λ -Wert erhöht.

5. Zusammenfassung

Die landwirtschaftliche Heißlufttrocknung ist ein investitions- und energieintensives Verfahren der Futterkonservierung. Zur energiewirtschaftlichen Optimierung sind deshalb

solche Fahrweisen des Trocknungsprozesses zu finden, die eine hohe Trocknungsleistung bei niedrigem spezifischem Wärmebedarf je kg Wasser gewährleisten. Hierzu wurden Charakteristiken des Trocknungsprozesses aufgestellt, die den spezifischen Wärmeaufwand als Ordinate, die mittlere logarithmische Temperaturdifferenz bzw. die Wasseraufnahme der Luft als Abszisse und verschiedene Betriebsgrößen als Parameter enthalten, darunter die Heißlufttemperatur. Aus den Charakteristiken konnte deutlich gemacht werden: höhere Heißlufttemperaturen beeinflussen die Wirtschaftlichkeit günstig, die Wasserverdampfung wirkt sich auf den spezifischen Wärmebedarf nur unwesentlich aus, Trockner mit einem auf den Brennstoff bezogenen spezifischen Wärmeaufwand von 800 kcal/kg sind als sehr gut einzuschätzen.

Literatur

Maltry, W.: Beitrag zur Thermostatik, Thermodynamik und Regelungstechnik von Trocknungsprozessen, insbesondere des landwirtschaftlichen Heißlufttrocknungsprozesses. Diss. B, TU Dresden 1971. A 9506

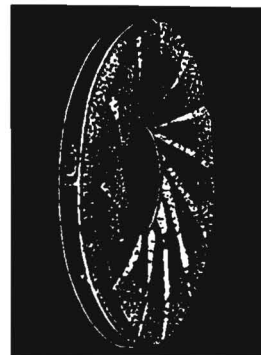
Achtung Pflegedienst!

Bis zu 35% werden vom jährlichen Ölaufkommen Ihres Betriebes eingespart durch unsere

ÖL-SEPARATOREN VEB ZENTRIFUGENBAU

8122 Radebeul-Ost, Gartenstraße 35 Telefon: Dresden 75672

ORANO



**Mühlensteine
in allen Größen
Rationell**

durch weiches Herzstück
Vorschrotbahn
Feinmahlbahn und
halbweiche Luftfurchen

**Deshalb der
Schrotstein von
höchster Wirtschaftlichkeit**

Referenzen stehen zur Einsicht zur Verfügung.

Rechtzeitige Bestellung sichert baldige Erledigung Ihres Auftrages.

Neu: Hartvermahlungsstein mit weichen Furchen und mit weichem Herz

Reparatur und Herstellung

ORANO-MÜHLENBAU

Norbert Zwingmann, Mühlenbaumeister
5821 Thamsbrück (Thüringen)

Telefon: Bad Langensalza 28 14