

Intermittierende Konvektionstrocknung von Halmgut

Von Ilyas K. Tuncer, Erzurum, Türkei und Jens-Peter Ratschow, Göttingen*)

DK 664.8.047:631.365.036

Aufgrund des Anstiegs der Energiekosten und der zumindest langfristig zu befürchtenden Verknappung der Ressourcen muß nach Möglichkeiten gesucht werden, auch die Trocknung von Halmgut effektiver zu gestalten. Als eine Maßnahme der Energieeinsparung bietet sich die intermittierende Trocknung an. Bei Getreide führt sie bekanntlich zu einer Senkung der benötigten Energie.

In dieser Arbeit soll die Anwendung dieses Verfahrens bei der konvektiven Trocknung von Halmgut untersucht und dabei der optimale Rhythmus von Trocknungszeit zu Abschaltzeit ermittelt werden.

Wenngleich auch dieses Trocknungsverfahren bei Halmgut, wie die Versuche zeigten, zu keinem ökonomisch meßbaren Nutzen führt, so können doch die Ergebnisse zu einer sicheren Handhabung von Heubelüftungsanlagen mit erwärmter Luft dienen.

1. Einleitung

Wie bekannt, entspricht das Trocknungsverhalten pflanzlicher Produkte im wesentlichen dem kapillarporöser hygroskopischer Stoffe [1]. Eine gewisse Modifikation des Trocknungsverlaufs biologischer Produkte läßt sich auf ihre Inhomogenität und die mit der Wasserabgabe gekoppelte Schrumpfung zurückführen, Bild 1.

Bei Getreidekörnern bewirkt die Schrumpfung eine Verkrustung ihrer Oberflächen [3], so daß der Feuchteaustritt vorwiegend über die Kornansatzstellen erfolgt, solange keine Rißbildung der Schale eintritt [4]. Gräser schrumpfen dagegen weitgehend quer zur Hauptfaserrichtung. Es erfolgt eine deutliche Verminderung der Oberflächen der Blattspreiten und die Stengel nehmen vorwiegend in ihrem Durchmesser ab. Mit diesen Schrumpfungsvorgängen gekoppelt ist eine Erhöhung des Diffusionswiderstandes; die je Zeiteinheit verdunstete Wassermasse sinkt, und der spezifische Energieverbrauch steigt.

Nach dem Abtrocknen der Oberfläche dringt die Trocknungszone in das Innere des Trocknungsgutes vor. In dieser Phase liegt es bei diesen biologischen Produkten nahe, Belüftungspausen einzuschalten, um einen Feuchteausgleich zwischen den trockenen Randzonen und dem noch feuchteren Inneren eintreten zu lassen. Bei anschließendem erneutem Trocknen kann diese Feuchtigkeit aus den Randzonen dann leichter abgeführt werden. Die Trocknungsluft

Das Vorhaben wurde freundlicherweise von der Deutschen Forschungsgemeinschaft gefördert, wofür auch an dieser Stelle gedankt sei.

*) Dr. sc. agr. Ilyas Kurtulus Tuncer war in der Zeit vom 1.7.1974 bis 31.1.1975 Gastwissenschaftler am Landmaschinen-Institut (Direktor: Prof. Dr.-Ing. F. Wieneke) der Georg-August-Universität Göttingen. Dr. sc. agr. Jens-Peter Ratschow ist wissenschaftlicher Assistent an diesem Institut.

ist stärker gesättigt und die Trocknungsenergie besser genutzt. So konnte Oxley [5] nachweisen, daß das Verfahren der intermittierenden Trocknung bei Getreide zu einer Erhöhung der Trocknungsintensität oder, was gleichbedeutend ist, zu einer Verminderung der Trocknungsenergie führt, Bild 2. Sehr kurze Trocknungszeiten von 2 min Dauer führen bei langen Abschaltzeiten von 2 h (Kurzvenzug a, Bild 2) zu hohen Feuchteabgaben.

In den eigenen Versuchen sollte die Effektivität dieses Verfahrens bei der Belüftungstrocknung von Halmgut untersucht werden.

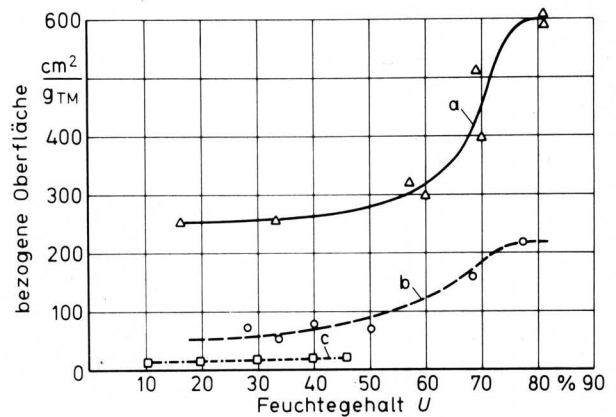


Bild 1. Die bezogene Oberfläche von Lieschgras und Weizen als Funktion des Feuchtegehalts.

- a nur Blätter (Lieschgras)
- b ganze Pflanze (Lieschgras)
- c Weizenkörner (nach Dietrich [2])

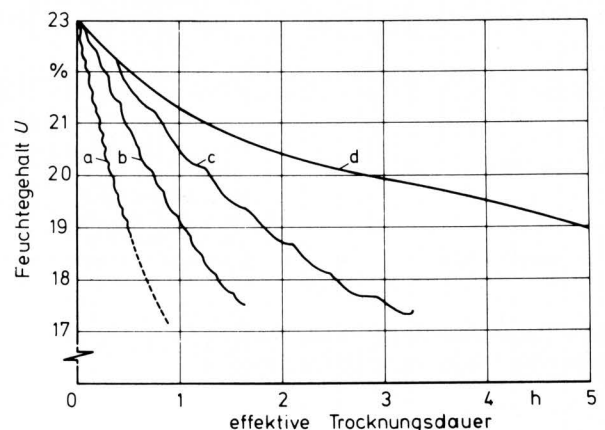


Bild 2. Feuchtegehalt in Abhängigkeit von der effektiven Trocknungsdauer bei der intermittierenden Trocknung von Getreide, nach Oxley [5].

- a 16 Perioden zu 2 Minuten Belüftungszeit
 - b 13 Perioden zu 8 Minuten Belüftungszeit
 - c 8 Perioden zu 24 Minuten Belüftungszeit
 - d kontinuierliche Trocknung
- Pausenzeiten bei a bis c: 2 Stunden

Versuchs-Nr.	Anfangswerte der Probe		Werte der Trocknungsluft			Behälter Bezeichnung	Trocknungsverlauf	
	Masse kg	Feuchtegehalt U_a %	Durchsatz m^3/m^2s	Temperatur ϑ_t °C	relative Feuchte φ %		Verhältnis der Zeitabschnitte $\frac{\text{Trocknungszeit}}{\text{Abschaltzeit}}$	Länge der Zeitabschnitte min
1	30	52	0,1	20	60 ÷ 53	a b c d	3 : 1	15 : 5 45 : 15 90 : 30 Dauerbelüftung
2	23,5	59	0,1	20	55 ÷ 50	a b c d	2 : 1	10 : 5 30 : 15 60 : 30 Dauerbelüftung
3	30	62	0,1	20	60 ÷ 55	a b c d	1 : 1	5 : 5 10 : 10 30 : 30 Dauerbelüftung
4	30	62	0,1	40	45 ÷ 38	a b c d	3 : 1	15 : 5 45 : 15 90 : 30 Dauerbelüftung
5	30	41	0,1	40	45 ÷ 40	a b c d	2 : 1	10 : 5 30 : 15 60 : 30 Dauerbelüftung
6	24	43	0,1	40	45 ÷ 38	a b c d	1 : 1	5 : 5 10 : 10 30 : 30 Dauerbelüftung
7	30	72	0,1	80	50 ÷ 35	a b c d	3 : 1	15 : 5 45 : 15 90 : 30 Dauerbelüftung
8	30	60	0,1	80	50 ÷ 35	a b c d	2 : 1	10 : 5 30 : 15 60 : 30 Dauerbelüftung
9	30	67	0,1	40	50 ÷ 45	a b c d	nach 9 h Dauerbelüftung intermittierende Belüftung im Verhältnis 3 : 1	45 : 15 45 : 15 90 : 30 Dauerbelüftung
10	30	65	0,1	50	50 ÷ 45	a b c d	nach 10 h Dauerbelüftung intermittierende Belüftung im Verhältnis 2 : 1 und 3 : 1	45 : 15 30 : 15 60 : 30 Dauerbelüftung
11	30	67	0,1	30 30 50 50	55 ÷ 50 50 ÷ 45	a b c d	{ 11 h Dauerbelüftung + intermittierend 45 : 15 min + Kaltbelüftung Dauerbelüftung + Kaltbelüftung { 11 h Dauerbelüftung + 9 h intermittierend 45 : 15 min + Kaltbelüftung Dauerbelüftung + Kaltbelüftung	

Tafel 1. Zusammenstellung der wichtigsten Versuche zur intermittierenden Trocknung von Halmgutstapeln.

2. Intermittierende Trocknung dünn-schichtiger Halmgutlagen im Klimaschrank

Ein für diese Versuchsreihe typisches Ergebnis zeigt Bild 3. Der Trocknungsverlauf der intermittierend und der kontinuierlich

getrockneten Halmgutproben macht deutlich, daß über die gesamte Versuchsdauer betrachtet, nahezu eine gleiche Massenabnahme zu verzeichnen ist.

Die Wasserabgabe der intermittierend getrockneten Halmgutprobe selbst schwankt jedoch stark; denn mit der Zunahme der relativen Luftfeuchte während der Abschaltzeit sinkt die Trocknungsgeschwindigkeit, um dann nach dieser Phase des Feuchteausgleichs bei erneuter Belüftung deutlich über den Werten der kontinuierlich getrockneten Halmgutprobe zu liegen.

Bei niederen Feuchtegehalten tritt während der Abschaltzeit eine Wiederbefeuchtung ein. Diese Adsorption setzt bekanntlich dann ein, wenn der Dampfdruck der umgebenden Luft über dem im Halmgut liegt. Die Spitzenwerte der Trocknungsgeschwindigkeiten nach den Abschaltzeiten lassen indes erkennen, daß in der Tat ein Feuchteausgleich aus dem Gutsinneren in die Randzonen erfolgt sein muß.

Die vorstehenden Ergebnisse der intermittierenden Trocknung dünn-schichtiger Halmgutproben ermutigten dazu, diese Versuche auch auf die Trocknung von Halmgutstapeln auszudehnen. Die einzelnen Versuche dieser Versuchsreihe sind in **Tafel 1** aufgeführt.

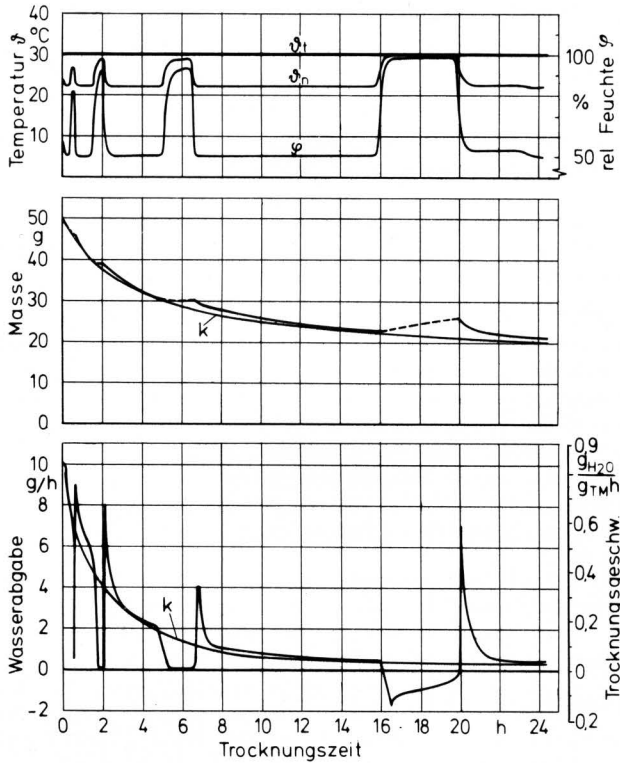


Bild 3. Verlauf der wichtigsten Größen bei der intermittierenden Trocknung dünn-schichtiger Halmgutproben im Klimaschrank, nach *Lehmann* [6].

Einlagerungsfeuchte des Halmgutes $U = 80\%$
 ϑ_t Eingangstemperatur
 ϑ_n Ablufttemperatur
 φ relative Luftfeuchte
i intermittierende Trocknung
k kontinuierliche Trocknung (Vergleichsprobe)

3. Intermittierende Trocknung von Halmgutstapeln

In Tastversuchen konnte geklärt werden, daß unter einem Verhältnis von 1 : 1 zwischen Trocknungszeit und Abschaltzeit keine Erhöhung der Trocknungsintensität im Vergleich zur kontinuierlichen Trocknung erzielt werden kann. Deshalb wurde dieses Verhältnis als Schwellenwert angesehen. Daneben wurden Versuche mit den Intervallen 2 : 1 und 3 : 1 durchgeführt, da diese eine Verbesserung der Trocknungsintensität erwarten ließen.

Im Gegensatz zu den Körnerfrüchten, bei deren Trocknung nach *Oxley* [5] entsprechend den relativ langen Diffusionswegen und damit hohen Diffusionswiderständen lange Abschaltzeiten von 1 bis 3 h bei etwa 3 min Belüftungszeit für einen effektiven Feuchteausgleich nötig sind, scheinen bei der Trocknung von Halmgut lange Belüftungszeiten mit relativ kurzen Abschaltzeiten gewählt werden zu müssen.

Die Versuche 1 bis 8, **Tafel 1**, zeigten, daß ein Verhältnis 3 : 1 von Trocknungszeit zu Abschaltzeit mit den Zeiten 45 min zu 15 min eine Erhöhung der Trocknungsintensität gegenüber der Dauerbelüftung bewirkt. Bei einem Verhältnis von 2 : 1 stellen sich die Zeiten von 60 min Trocknung und 30 min Abschaltzeit als den anderen gewählten Intervallen überlegen heraus. Aus diesem Grunde wurden diese Verhältnisse in den Belüftungsprogrammen der Versuche 9 bis 11, **Tafel 1**, gewählt.

Weiterhin zeigten die Versuche 1 bis 8, daß eine intermittierende Trocknung während des Abschnitts der konstanten Wasserabgabe, also der Zeitspanne von Belüftungsbeginn bis zum Austritt der Trocknungszone aus dem Halmgutstapel, nicht sinnvoll ist. Die Dauer dieser kontinuierlichen Trocknung wird von der Höhe des Trocknungspotentials, der Einlagerungsmasse und -feuchte bestimmt. Der Zeitpunkt des Austritts der Trocknungszone aus dem Stapel wird durch eine Erhöhung der Ablufttemperatur angezeigt und kann auch visuell an einer Änderung der Farbe festgestellt werden. Nach dem Austreten der Trocknungszone wird die intermittierende Trocknung eingesetzt. Sie erbringt, wie die Ergebnisse für den Versuch 9 der **Tafel 1** in den **Bildern 4 und 5** zeigen, eine leichte Verkürzung der effektiven Trocknungszeit. Diese Feststellung trifft auch für die Versuche 10 und 11 zu, die im intermittierenden Teil des Trocknungsprogramms bei einem Verhältnis von 45 min Trocknungszeit und 15 min Abschaltzeit getrocknet wurden.

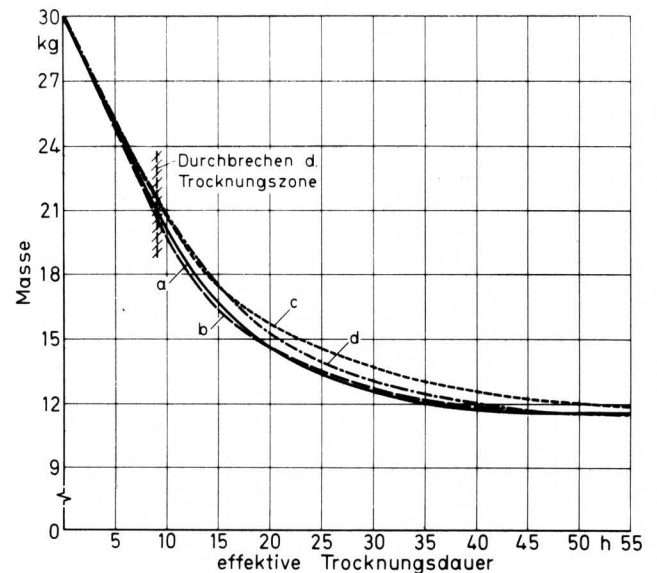


Bild 4. Masse der Probe als Funktion der effektiven Trocknungsdauer.

Einlagerungsfeuchte $U_a = 67\%$
a und *b* 9 h Dauerbelüftung
dann intermittierend
45 min Trocknungszeit
15 min Abschaltzeit
c 9 h Dauerbelüftung
dann intermittierend
90 min Trocknungszeit
30 min Abschaltzeit
d durchgehend belüftet

Diese Beobachtungen werden durch **Bild 6** belegt, in dem über der effektiven Trocknungsdauer der spezifische Wärmeverbrauch für Versuch 9 aufgetragen ist. Deutlich steigt dieser nach dem ersten Trocknungsabschnitt von 9 Stunden Dauer — also nach dem Durchbrechen der Trocknungszone — wegen der größer werdenden Verdunstungswiderstände an. Die Kurvenzüge der Chargen *a* und *b* liegen entsprechend den **Bildern 4 und 5** günstiger als die

der Vergleichschargen c und d; denn das Trocknungsgut der Proben a und b weist ja jeweils zum gleichen Zeitpunkt nach dem Abschnitt der Dauerbelüftung geringere Feuchtegehalte als das Material der Varianten c und d auf. Somit stehen dem Verdunstungsstrom der Proben a und b längere Diffusionswege im Einzelteil und damit höhere Widerstände schon zu früheren Zeitpunkten als den Vergleichsproben entgegen.

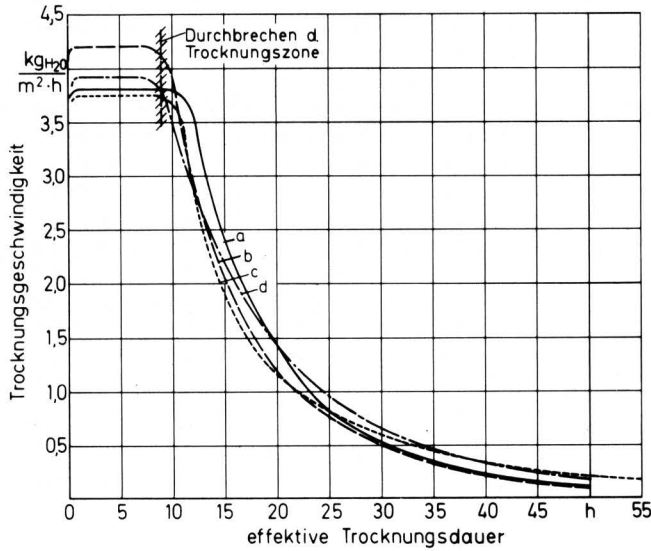


Bild 5. Trocknungsgeschwindigkeit in Abhängigkeit von der effektiven Trocknungsdauer.
Leg. wie bei Bild 4.

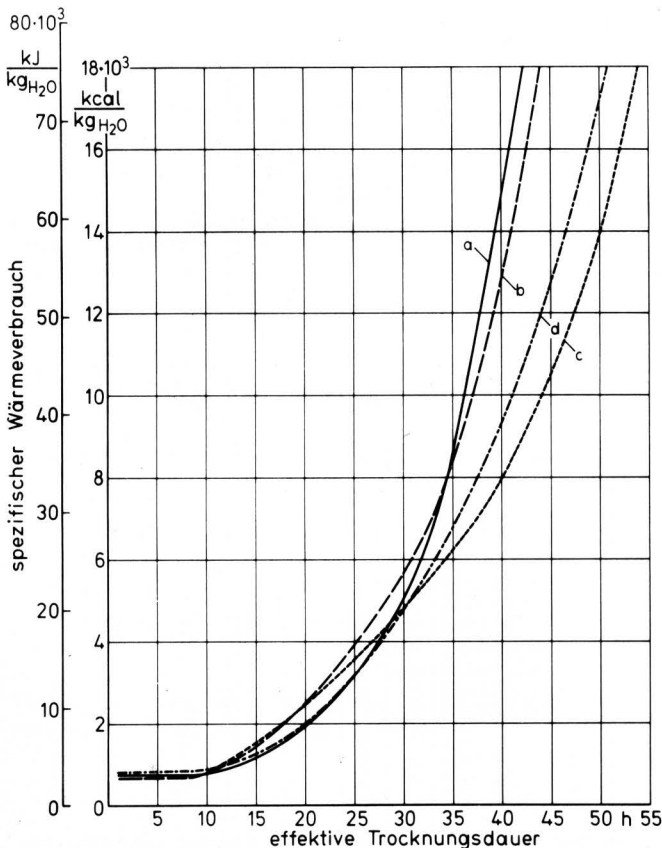


Bild 6. Spezifischer Wärmeverbrauch als Funktion der effektiven Trocknungsdauer bei der konvektiven Trocknung von Halmgutstapeln. (Versuch 9 nach Tafel 1)

Eine weitere Möglichkeit, die Trocknungsenergie zu senken, wurde ebenfalls untersucht. Ausgehend von der Überlegung, den Energieinhalt des bereits teilweise getrockneten Halmgutstapels zu nutzen, wurde das Halmgut in Versuch 11 nach der intermittierenden Trocknung kalt belüftet. Die gespeicherte Wärmemenge innerhalb des Heustocks von etwa 1 m Einlagerungshöhe ist jedoch aufgrund der niederen mittleren spezifischen Wärme von 1,2 kJ/kg K (0,29 kcal/kg K) bei einem angenommenen mittleren Feuchtegehalt des Halmgutes von 20 % so gering, daß kein nennenswerter Trocknungseffekt zu verzeichnen war. Bei Stapelhöhen von etwa 6 m sind aber immerhin schon 7 - 8 % der für die Resttrocknung benötigten Wärmeenergie vorhanden; diese kann durch das Nachbelüften für die Trocknung der oberen Halmgutlagen bis 50 cm Stärke und etwa 40 % Feuchtegehalt genutzt werden.

4. Zusammenfassung

Die intermittierende Trocknung von Halmgut wurde mit dem Ziel der Energieeinsparung und damit des Senkens der Trocknungskosten untersucht.

Deutlich zeigte sich, daß während des Abschnitts der konstanten Wasserabgabe eine Dauerbelüftung sinnvoll ist. Tritt die Trocknungszone aus dem Halmgutstapel aus, so kann eine intermittierende Trocknung mit einem Rhythmus von etwa 45 min Belüftungszeit und 15 min Abschaltzeit eine geringe Energieeinsparung bewirken. Die im Halmgut gespeicherte Wärmeenergie kann bei Stapelhöhen um etwa 6 m für die Resttrocknung der oberen Halmgutlagen durch anschließendes Kaltbelüften genutzt werden; etwa 8 % der benötigten Energie für die Resttrocknung können dann eingespart werden.

Schrifttum

Bücher sind durch ● gekennzeichnet

- [1] ● *Wieneke, F.*: Technologische Grundlagen der Halmfuttermitteltrocknung. Fortschr.-Ber. VDI-Z. Reihe 14, Nr. 11, Düsseldorf: VDI-Verlag 1970.
- [2] *Dietrich, N.*: Warmlufttrocknung von naturfeuchtem und künstlich befeuchtetem Weizen-Einzelkorn. Landtechnische Forschung Bd. 7 (1957) Nr. 5, S. 140/46.
- [3] *Jaeschke, L.*: Mechanismus der Feuchtigkeitsbewegung bei der Trocknung von Gütern mit verkrusteten Oberflächen. Chemie-Ingenieur-Technik Bd. 36 (1964) Nr. 5, S. 449/55.
- [4] *v. Nordenskjöld, R.*: Konvektive Trocknung des Einzelteils einiger botanischer Produkte. Unveröffentlichter Institutsbericht des Landmaschinen-Instituts der Universität Göttingen, 1972.
- [5] *Oxley, T.A.*: The movement of heat and water in stored grain. Cereal Chemistry Bd. 17 (1940), S. 84/100.
- [6] *Lehmann, D.*: Intermittierende Trocknung von Halmfuttermitteln. Unveröffentlichter Institutsbericht des Landmaschinen-Instituts der Universität Göttingen, 1971.
- [7] *Koschatzky, R.*: Experimentelle Untersuchungen über die spezifische Wärme von Körnermais, Gräsern und Leguminosen. Grundl. Landtechnik Bd. 23 (1973) Nr. 4, S. 99/105.