

Separatdruck aus FAT-Mitteilungen Nr. 6/1978
in Schweizer Landtechnik Nr. 6/1978
Herausgegeben von der Eidg. Forschungsanstalt für
Betriebswirtschaft und Landtechnik CH 8355 Tänikon

Trocknen von Silomais – mit welchen Verfahren ?

F. Zihlmann

Im heutigen intensiven Futterbau wird in der Regel ein eiweissreiches Futter produziert, das einer Ergänzung durch kohlehydratreiches Futter bedarf. Im Silobetrieb kann dieser Nährstoffausgleich mit Mais-silage erreicht werden. Da in Hartkäseergebieten auf Silage verzichtet werden muss, suchen viele Landwirte nach Lösungen, bei welchen sie die gehäckselte Maispflanze trocken verfüttern können. Anfragen über diese Möglichkeit waren im letzten Jahr so zahlreich, dass wir es als angezeigt erachten, eine allgemeine Orientierung über mögliche Lösungen zu geben.

Allgemeine Probleme der Trocknung

Trocknen heisst, dem Produkt Wasser entziehen. Dies geschieht, indem wir Wärme und Luft zuführen, um das Wasser zu verdampfen und den Wasserdampf wegführen. Es gibt nun einige physikalische Daten, die wir kennen müssen, um den Trocknungsvorgang zu verstehen und um die Zweckmässigkeit einer Trocknungsanlage beurteilen zu können.

Wassergehalt und Wasserentzug

Der Anteil Wasser, der sich in einem Produkt vorfindet, wird meist als Feuchtigkeit (Feuchte) bezeichnet.

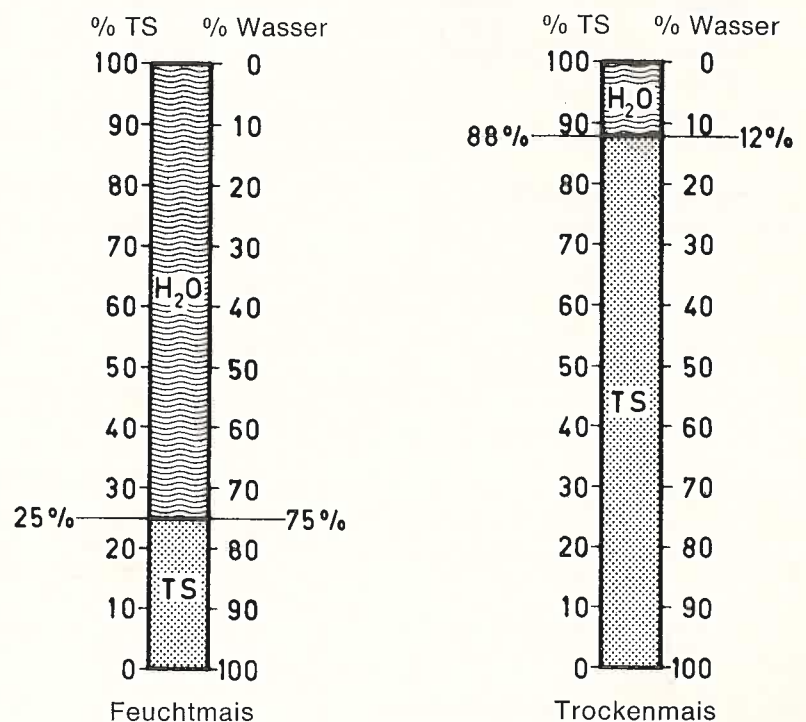


Abb. 1:
Wassergehalt von Feucht-
und Trockenmais

net und in Prozent angegeben. Silomais, den wir in unserem Falle nicht silieren, sondern trocknen, hat bei der Ernte 70 bis 80% Feuchtigkeit, nach der Trocknung im Mittel noch 12%. Die Zusammenhänge über den Wasserentzug und Wassergehalt gehen aus den Abbildungen 1 und 2 hervor.

Wenn ein Vergleich des Wasserentzuges mit anderen Produkten gemacht wird, wählt man mit Vorteil die Basis Trockengut. Tabelle 1 gibt eine Uebersicht über die häufigsten Trocknungsverfahren und den Wasserentzug bei verschiedenen landwirtschaftlichen Produkten. In erster Annäherung können wir allein vom Wasserentzug her beurteilen, welche von den

bekanntesten Trocknungsverfahren für die Maistrocknung in Frage kommen.

Energieaufwand

Das zu entziehende Wasser muss zunächst durch Wärmezufuhr verdampft werden. Um ein kg Wasser zu verdampfen, benötigen wir physikalisch 2,5 MJ (600 kcal). In der Regel wird als Energieträger die Luft benützt, welche erwärmt wird. Nun treten Energieverluste auf, sowohl beim Erwärmen der Luft, als auch bei der Luftförderung durch das Trocknungsgut. Eine wichtige Zahl für die Beurteilung einer

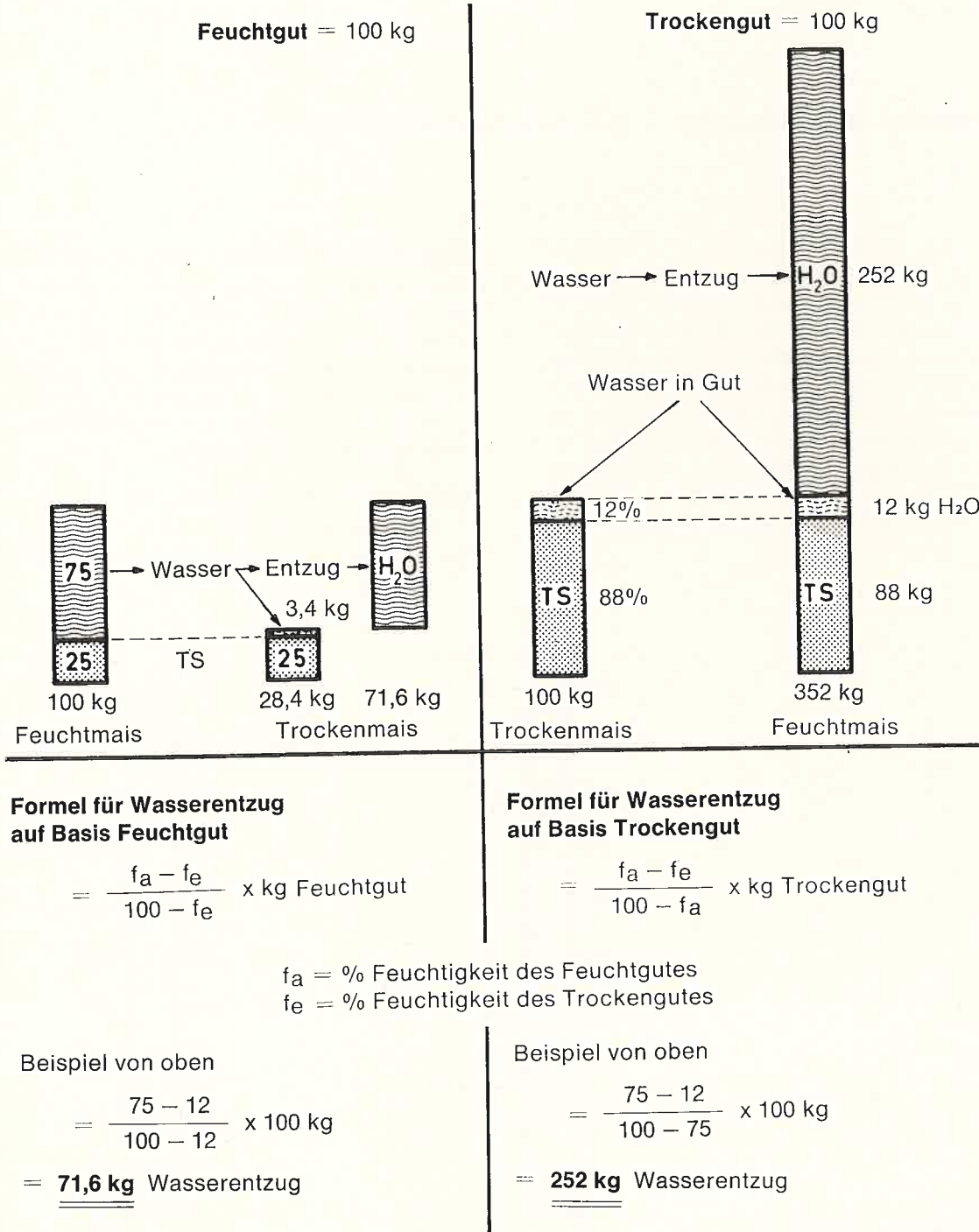


Abb. 2: Wasserentzug bei der Trocknung

Tabelle 1: Wasserentzug bei verschiedenen Trocknungsverfahren

Verfahren	f _a	f _e	Wasserentzug in kg pro 100 kg Trockengut
Heubelüftung			
mit Kaltluft	40	14	43,3
mit Warmluft	50	14	72,0
Getreidetrocknung			
mit Kaltluft	18	14	4,8
mit Warmluft	20	14	7,5
Körnermais	40	14	43,3
Heisslufttrocknung			
angewelktes Futter	60	12	120
Grastrocknung	82	12	389
Silomaistrocknung:			
im Mittel	75	12	252
beim Versuch	80	12	340

Trocknungsanlage ist der gesamte Energieaufwand für den Entzug pro kg Wasser.

In Tabelle 2 sind die häufig erreichten Werte des spezifischen Energieverbrauches von Anlagen angegeben.

Tabelle 2: Energieaufwand je kg verdampftes Wasser

Anlage	spez. Energieverbrauch MJ/kg H ₂ O	kcal/kg H ₂ O	Wirkungs- grad
Heubelüftung			
kalt	1–1,25	250–300	–
warm	7–8,4	1600–2000	30–40
Getreidetrocknung			
Durchlauf- trockner	4,6–6	1100–1400	42–55
Satzrockner	5,0–6,7	1200–1600	37–50
Heisslufttrocknung			
Anweilfutter	4,2–5	1000–1300	50–60
Gras	3,5–4	850–950	63–70

Die spezifische Verdampfungswärme (2,5 MJ / bzw. 600 kcal/kg) geteilt durch den spezifischen Energieverbrauch ergibt den Gesamtwirkungsgrad der Anlage. Gelegentlich wird der Wirkungsgrad der Heizanlage (Ofen) und des Trockners getrennt ausgewiesen. In diesem Falle erhalten wir den Gesamtwirkungsgrad der Anlage durch die Multiplikation der beiden Wirkungsgrade (Ofen und Trockner). Der grosse Unterschied im spez. Energieaufwand ist vor allem auf die Beschaffenheit und Arbeitsweise des Trockners zurückzuführen.

Bekanntlich steigt die Wasserdampfaufnahme der Luft mit der Temperatur. Das heisst auf die Praxis übertragen: Wenn der Warmluft im Trockner genügend Zeit zur Sättigung zur Verfügung steht, so ist der Energieaufwand pro kg Wasserverdampfung umso kleiner, je höher die Eintrittstemperatur in den Trockner ist.

Luftrate und Trocknungsleistung

Die notwendige Luftrate (Luftmenge pro Sekunde) richtet sich nach der Wasseraufnahme der Luft. Bei

der Kaltbelüftung von Heu entzieht ein Kubikmeter Luft im Mittel rund 1 g Wasser; bei einem Warmlufttrockner für Getreide liegt der Wasserentzug bei rund 5 g/m³ Luft und ist mit 200 bis 350 g/m³ am grössten bei einem Heisslufttrockner.

Nun ist es nicht so, dass die Trocknungsleistung einer Anlage einfach durch Erhöhung der Luftrate gesteigert werden kann. Für jeden Trocknertyp gibt es einen begrenzten Bereich, in welchem die Luftrate variiert werden darf. Wird die Luftrate über diesen Bereich erhöht, so geht sofort die Wasseraufnahme je Kubikmeter Luft zurück und es wird keine raschere Trocknung mehr erzielt, unter Umständen sogar eine langsamere.

Für jede Anlage gibt es einen bestimmten Bereich für die optimale Luftrate. Diese Luftrate mal die Wasseraufnahme der Luft ergeben die Trocknungsleistung.

Ventilatorleistung

Die Aufgabe des Ventilators bei der Trocknung besteht darin, die geforderte Luftrate durch die Trocknungsanlage zu drücken. Die Anlage und das Gut üben auf den Luftstrom einen Widerstand aus. Diesen Widerstandsdruck muss der Ventilator überwinden. Je kleiner der Betriebsdruck ist, umso kleiner ist der Leistungsaufwand des Ventilators, wie das aus folgender Gleichung hervorgeht.

$$\text{Antriebsleistung des Ventilators (kW)} = \frac{\text{Luftrate (m}^3\text{/s)} \times \text{Gesamtdruck (mbar)}}{10 \times \text{Wirkungsgrad des Ventilators}}$$

Anhand der besprochenen physikalischen Werte soll nun die Zweckmässigkeit der Trocknung von Silomais mit bekannten Trocknungsverfahren besprochen werden.

Silomaistrocknung

Gehäckselter Mais beginnt schon nach wenigen Stunden warm zu werden und nach rund 50 Stunden setzt starke Schimmelbildung ein. Eine Tagesernte sollte folglich innerhalb von 48 Stunden fertig getrocknet sein.

Damit es sich lohnt, einen Maishäcksler einzusetzen, sollten pro Erntetag mindestens 10 t Silomais eingebracht werden. Die minimale Trocknerleistung soll daher 200 kg Feuchtmals pro Stunde betragen.

In der nachfolgenden Betrachtung wird der technische Aufwand bei verschiedenen Trocknungsverfahren näher untersucht. Wir gehen von einem praktischen Versuch aus und übertragen die Ergebnisse modellmässig auf die verschiedenen Verfahren, nämlich:

- Satzrockner: Warmlüftungsanlage
Körnermaistrockner
Rundtrockner
- Durchlaufrockner: Bandtrockner
Trommelrockner

Dem Versuch liegen die Daten nach Tabelle 3 zugrunde.

Tabelle 3: Daten des Trocknungsgutes

Menge Silomais	10 t
Feuchtigkeit bei der Ernte	80%
Feuchtigkeit nach der Trocknung	12%
Wasserentzug	7,73 t
Menge trockener Mais	2,27 t
Wasserentzug pro t trockener Mais	3,4 t
spez. Gewicht von Feuchtmais	400 kg/m ³
spez. Gewicht von Trockenmais	120 kg/m ³

Die Feuchtigkeit des Silomaises bei unserem Versuch war verhältnismässig hoch.

Satztrocknung

Zur Satz- und Bodentrocknung werden alle jene Anlagen gezählt, bei welchen die Anlage auf einmal gefüllt und anschliessend die Füllung bis zur Lagerfähigkeit getrocknet wird. Man unterscheidet Zentralrohr- und Bodentrockner. Für die Silomais-Trocknung sind die Voraussetzungen beim Bodentrockner günstiger, besonders weil die Schichtdicke variiert werden kann. Das wesentliche Merkmal des Bodentrockners ist der Siebboden. Die Luft wird in den Raum unter den Siebboden geführt und von dort nach oben durch den Siebboden und das darauf geschüttete Gut gepresst.

In Tabelle 4 sind die wichtigsten Daten von drei verschiedenen Satz- und Bodentrocknern (Bodentrocknern) zusammengestellt.

Warmbelüftungsanlagen

In letzter Zeit wurde oft die Frage gestellt, ob eine Warmbelüftungsanlage für Heu auch zum Trocknen von Silomais eingesetzt werden kann. In den meisten

Fällen können die Ansprüche nicht erfüllt werden. Aus den technischen Daten in Tabelle 4 geht hervor, dass der Anlagedruck bei der Silomais-Trocknung doppelt so hoch ist als bei der Heubelüftung. Es müsste ein ausgesprochener Hochdruckventilator vorhanden sein, der für die Heubelüftung weniger geeignet ist. Die erforderliche Heizleistung des Ofens ist zum Trocknen von Silomais bedeutend höher als für die Heubelüftung. Da in vereinzelt Fällen eine Kombination mit der Heubelüftung möglich ist, hoffen wir mit den angeführten Kenndaten eine Planungshilfe zu geben.

Körnermaistrockner

Die Körnermaistrockner eignen sich prinzipiell auch gut für die Trocknung von Silomais. In der Regel ist die Trocknungsleistung an der untersten Grenze, wie es aus der Tabelle 4 hervorgeht. Um eine Tagesernte von 10 Tonnen Feuchtmais zu trocknen, muss die Anlage dreimal beschickt werden.

Rundrockner

Der Rundrockner ist primär auf Welkfutter ausgerichtet. Für die Silomais-Trocknung sind spezielle Anforderungen, wie sie unten besprochen werden, zu berücksichtigen.

Bei allen Satz- und Bodentrocknern ist streng darauf zu achten, dass das Futter gleichmässig verteilt wird, sonst bleiben feuchte Nester zurück. Die Endtrocknung bereitet aus folgenden Gründen Schwierigkeiten. Frisch eingefüllter Maishäcksel von einer Schütthöhe von 0,5 m wiegt 200 kg/m², nach der Trocknung haben wir nur noch 45 kg/m². Aus diesem Grunde muss der Betriebsdruck im Verlauf der Trocknung gesenkt

Tabelle 4: Silomais-Trocknung mit Satz- und Bodentrocknern

Daten der Anlage	Warmbelüftung ¹⁾	Körnermaistrockner ²⁾	Rundrockner ³⁾
Schütthöhe	0,5 m	0,5 m	0,65 m
Schüttfläche	50 m ²	16 m ²	38 m ²
Schüttgewicht	200 kg/m ² = 10 t	200 kg/m ² = 3,2 t	263 kg/m ² = 10 t
spez. Luftdurchsatz	0,2 m ³ /m ² /s	0,28 m ³ /m ² /s	0,2 m ³ /m ² /s
total Luftdurchsatz	36 000 m ³ /h	16 000 m ³ /h	28 000 m ³ /h
Anlagedruck	5–7 mbar (50–70 mm WS)	7–9 mbar (70–90 mm WS)	8–12 mbar (80–120 mm WS)
Antriebsleistung des Ventilators	12 kW	7,5 kW	15 kW
Heizleistung Ofen	1250 MJ/h (300 000 kcal/h)	1250 MJ/h (300 000 kcal/h)	2100/2900 MJ/h (5000 000/700 000 kcal/h)
Lufterwärmung	22–24° C	50–55° C	70–75° C
Energieaufwand und Trocknungsleistung			
mittlere thermische			
Energieabgabe	1050 MJ/h (250 000 kcal/h)	1050 MJ/h (250 000 kcal/h)	2430 MJ/h (580 000 kcal/h)
Antriebsenergie	43 MJ/h (12 kW)	27 MJ/h (7,5 kW)	54 MJ/h (15 kW)
spez. Wärmeverbrauch pro kg Wasserentzug	7,1 MJ/kg (1700 kcal/kg)	6,3 MJ/kg (1500 kcal/kg)	6,1 MJ/kg (1450 kcal/kg)
Wasserentzug	155 kg/h	167 kg/h	400 kg/h
Wasserentzug pro m ³ Luft	5 g/m ³	10,5 g/m ³	14 g/m ³
Trocknungsdauer	50 h/10 t	15 h/3,2 t = 47 h/10 t	20 h/10 t

¹⁾ Aufgrund technischer Zusammenhänge ermittelte Daten

²⁾ Versuche mit Körnermais auf Silomais umgerechnet

³⁾ Beim Versuch ermittelte Daten; jedoch umgerechnet auf 10 t Feuchtgut

werden; denn 0,1 mbar (1 mm WS) entsprechen einem Druck von 1 kg/m². Wenn der Betriebsdruck auf über 4 mbar (40 mm WS) liegt, so wird das Trockengut stellenweise angehoben und aufgewirbelt.

Durchlauftrockner

Für die Silomaistrocknung kommen vor allem die Band- und Trommeltrockner in Frage. In der Gegenüberstellung wird ein neuerer Typ Bandrockner, welcher speziell für die Trocknung von angewelktem Futter konzipiert ist, mit einem üblichen Grastrockner verglichen. Die technischen Unterschiede gehen aus Tabelle 5 hervor.

Tabelle 5:
Technische Daten für Band- und Trommeltrockner

	Bandrockner ¹⁾	Trommeltrockner ²⁾
Trocknungs- temperatur	145° C	900° C
Wasserver- dampfung (Grössenklasse)	1400 kg/h	2000 kg/h
Heizofen	6280 MJ/h (1,5 Mio kcal/h)	7120 MJ/h (1,8 Mio kcal/h)
Antriebsleistung mittlerer	33 kW	70 kW
Energieaufwand der Anlage	5990 MJ/h (1,34 Mio kcal/h)	7370 MJ/h (1,76 Mio kcal/h)
spez. Energie- verbrauch der Anlage	4,2 MJ/kg (1000 kcal/h)	3,69 MJ/kg (880 kcal/kg)
spez. Wasser- entzug ca. Trocknungszeit für 10 t Feuchtmais	39 g/m ³ 5,5/h	320 g/m ³ Luft 3,9/h

¹⁾ Der spez. Energieaufwand beim Bandrockner ist geschätzt, übrige Daten sind Firmenangaben.

²⁾ Die Daten sind aus Abnahmeprüfungen von Grastrocknungsanlagen übernommen und umgerechnet worden.

Die beiden Typen eignen sich gleich gut zum Trocknen von Silomais. Der wesentliche Unterschied liegt bei der Trocknungstemperatur. Der Trommeltrockner mit höherer Temperatur hat einen etwas kleineren spez. Energieverbrauch. Beim Bandrockner ist anzunehmen, dass das Futter schonender behandelt wird, weil er bei niedrigerer Temperatur arbeitet.

Schlussbetrachtung

Für einen Wirtschaftlichkeitsvergleich müsste man noch die Investitionskosten und die daraus entstehenden jährlichen Kosten ermitteln. Wir glauben im Rahmen dieser Betrachtung darauf verzichten zu können, weil ohnehin viele Annahmen getroffen werden müssten. Allein aus den technischen Zusammenhängen lassen sich die wichtigsten Schlussfolgerungen ziehen.

Es kommt wohl kaum vor, dass allein für die Silomaistrocknung eine eigene Anlage erstellt wird. Da-

her geht es in erster Linie darum, Trocknungsanlagen für andere Produkte zum Trocknen von Silomais einzusetzen. Bei den Durchlauftrocknern (Band- und Trommeltrocknern) treten keine besondere Erschwernisse auf. Die Silomaistrocknung im Herbst ermöglicht eine zusätzliche jährliche Auslastung. Die Grundkosten können auf eine grössere Menge getrockneten Gutes verteilt werden. Die Trocknungskosten pro dt Trockenmais dürften auf rund Fr. 25.— zu stehen kommen.

Ein Satzrockner kommt in Frage, wenn der Transportweg zu einem Durchlauftrockner zu weit ist. Die Leistung der Satzrockner ist bescheiden, so dass diese nur selten für Lohnarbeiten eingesetzt werden können. Der Bau einer eigenen Anlage ist wirtschaftlich vertretbar, wenn die Selbstkosten den Trocknungstarif von Durchlauftrockner nur unwesentlich übersteigen.

Es ist noch zu beachten, dass der Energieaufwand bei den Satzrocknern grösser ist als bei den Durchlauftrocknern, wie aus Tabelle 6 hervorgeht.

Tabelle 6: Energiekosten-, Oel und Stromverbrauch pro t Trockenmais

(Feuchtmais 20% TS, Trockenmais 80% TS)

Trocknungsverfahren	Oel kg/t	Strom kWh/t	Energie- kosten
Warmbelüftung	555	263	220.—
Körnermaistrockner	497	153	190.—
Rundrockner	482	128	182.—
Bandrockner	333	80	125.—
Trommeltrockner	290	119	113.—
Oelpreis 0,35 Fr./kg	Strom 0,10 Fr./kWh		

Bei einer hofeigenen Warmbelüftungsanlage erreichen allein die Energiekosten beinahe den Tarifansatz bei Grastrocknungsanlagen. Bevor man sich für den Bau einer hofeigenen Anlage entschliesst, sollten alle übrigen Möglichkeiten gut abgeklärt werden. Mit den zusammengestellten Daten hoffen wir eine Hilfe für die Abklärung der einschlägigen Fragen leisten zu können. Ein einfaches Rezept kann leider nicht abgegeben werden.

Seit dem 1. Januar 1978 werden in der Schweiz die neuen SI-Einheiten angewendet. Diese Neuerung bringt auf nationaler und internationaler Ebene eine bedeutende Vereinfachung der technischen Masseinheiten.

Im vorliegenden Beitrag werden folgende Einheiten verwendet:

- 1 MJ (Megajoule) = 239 kcal
- 1 J (Joule) = 0,239 cal
- 1 kWh = 860 kcal
- 1 mbar (Millibar) = 10,2 mm WS
- 1 bar = 1,02 at = 10200 mm WS
- 1 dt (Dezitonne) = 100 kg