

Maistrocknung mit Luft-Luft-Wärmepumpe

Jürg Baumgartner

Landwirte in der Siloverbotszone konnten den gehäckselten Vollmais im Jahre 1988 in einer Grastrocknungsanlage zu einem durchschnittlichen Preis von Fr. 20.20 trocknen lassen. Als Alternative bleibt die hofeigene Trocknung mit der Luft-Luft-Wärmepumpe, mit der Luftentfeuchter - Wärmepumpe (siehe FAT-Bericht Nr. 370) oder

mit Luftanwärmung (zum Beispiel Warmluftofen mit Ölfeuerung).

Die Luft-Luft-Wärmepumpe trocknete mit einem Satzrockner eine Tonne Nassgut pro Tag. Beim Trocknen von Zuckerrüben-Pressschnitzeln sank die Leistung auf rund die Hälfte; der Stromverbrauch erhöhte sich über das Dreifache.

Anschliessend an die Heu- und Emdtrocknung (siehe FAT-Bericht Nr. 324) versuchten wir mit der Luft-Luft-Wärmepumpe und einem Spezialgerät gehäckselten Vollmais (Silomais) zu trocknen. Weil in einem Satzrockner (Abb. 1) die oberste Schicht beim Trocknen zusammenpappt, muss sie täglich ein- bis zweimal umgeschichtet werden. Ein uns zur Verfügung gestelltes Spezialgerät sollte das Umrühren mechanisch übernehmen. Diese Konstruktion befriedigte nicht. Im folgenden Jahr kam ein Trommelrockner (Abb. 2) zum Einsatz. Obwohl dessen Trocknungsleistung gut war, liess man auch diese Idee wieder fallen. Zuviel feines, feuchtes und trockenes Gut passierte den letzten Filter und verliess den Trockner. Das Reiben der Maisteile aneinander verursachte eine zusätzliche Mahlwirkung, so dass sich überall Staub ablagerte. Schliesslich wurde dann in der nachfolgenden Saison doch ein Satzrockner gemäss Abb. 1 mit der Luft-Luft-Wärmepumpe eingesetzt.

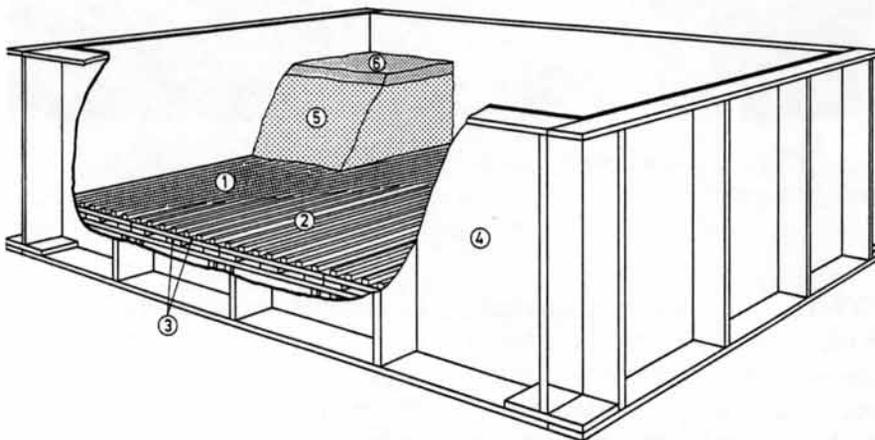


Abb. 1: Satzrockner für gehäckselten Vollmais: 24 m² Grundfläche und 2 m Höhe.

1 = Drahtgitter oder Lochblech
2 = Lattenrost oder Heubelüftungsroste
3 = Tragbalken

4 = Einwandung
5 = gehäckselter Vollmais
6 = feuchte Zone

1. Technische Daten und Preis der Anlage

Für die Maistrocknung muss nach Angabe der Lieferfirma die Grundfläche des Satzrockners ungefähr die Hälfte der Heustockgrundfläche betragen.

Der Satzrockner wurde in die bestehende Belüftungsanlage mit 50 m² Grundfläche eingebaut. Sie bestand aus folgenden Teilen: je 24 m² Rost und Lochblech, zwei Einwandungen und einem Luftzufuhrkanal. Der Investitionsbedarf für diesen Satzrockner betrug rund Fr. 5000.-, wovon Fr. 1700.- Arbeitskosten.

Als Luft-Luft-Wärmepumpe wurde ein modifiziertes Modell eingesetzt:

Typ des Gerätes: Hetroc HE 100

äussere Abmessung:

Breite: 1800 mm

Höhe:

2 × 1130 mm 2260 mm

Länge: 900 mm

Heiz- und Kühlregister:

Breite: 1500 mm

Höhe: 1060 mm

Fläche: 1,59 m²

3 Rohrreihen Heizregister

6 Rohrreihen Kühlregister

2 Abluftventilatoren

Nennleistung Gerät mit Abluftventilatoren: 7 kW

Preise 1989:

Gerät: Fr. 17 350.-

Luft-Glieder-

klappe: Fr. 1970.-

Kontroll-

manometer: Fr. 96.-

2. Maistrocknung

Die Versuche Nr. 1 bis 3 (Tab. 1) im Herbst 1988 umfassten die Abtrocknung von relativ trockenem gehäckseltem Vollmais mit 32 bis

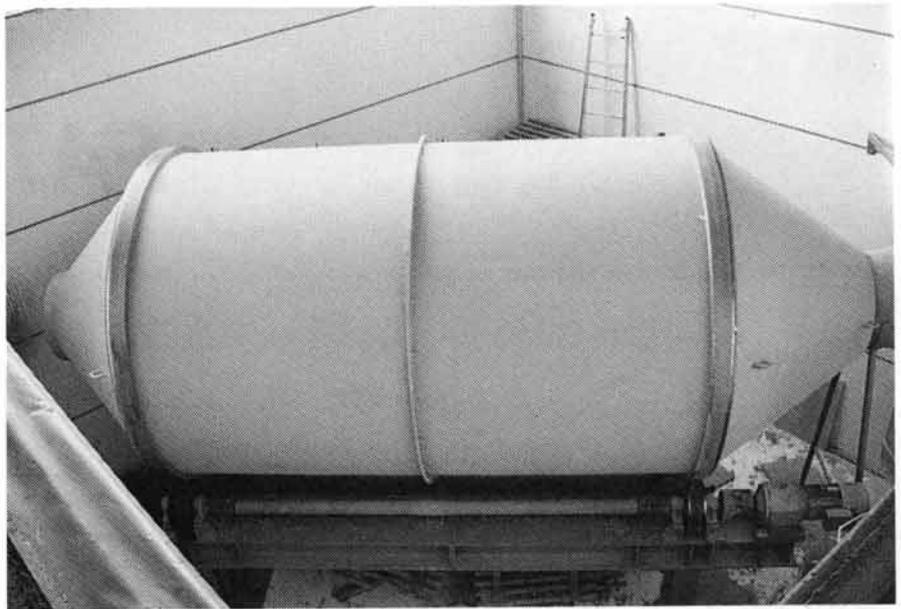


Abb. 2: Der Trommelrockner befriedigte nicht, weil viel feuchtes, feines Gut durch das Sieb an die Wand geblasen wurde und ausserhalb der Trommel nachgärte.

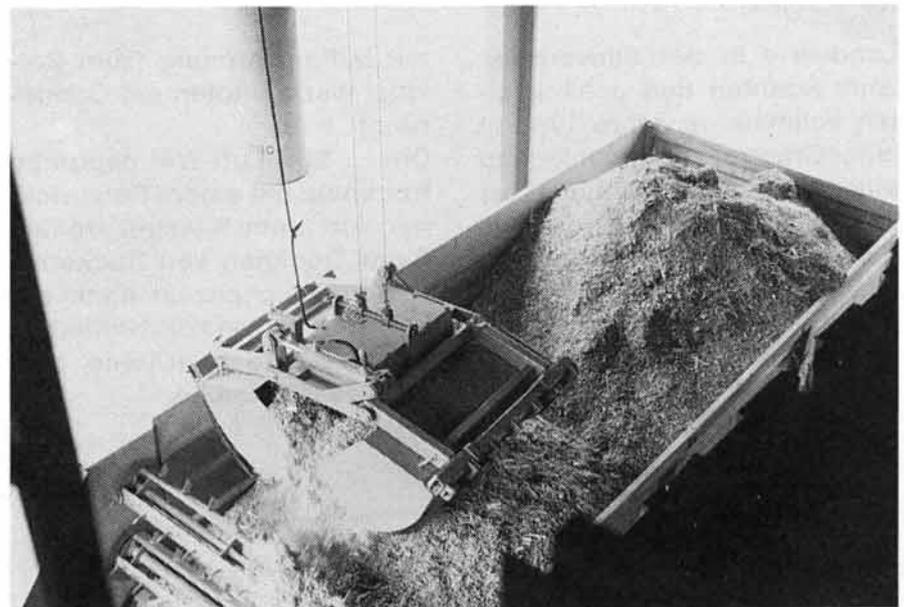


Abb. 3: Das Entleeren des Satzrockners und das Befüllen des Dosierwagens erfolgten problemlos.

40 % TS (Trockensubstanzgehalt) in Mengen von 2,9 bis 3,5 t. Nach Leerung des Trockners wurden nochmals zwei Füllungen von je 3,2 t mit sehr feuchtem Mais von 26 bis 27 % TS vorgenommen (Nr. 4 und 5). Nach erneuter Leerung erfolgte die Abtrocknung von 2,1 t Zuckerrübenschnitzel. Ein Grei-

fer mit Maisschaufel besetzte und leerte den Satzrockner (Abb. 3). Nach dem Einfüllen wurde von Hand mit der Gabel feinverteilt und täglich 20 bis 30 Minuten umgeschichtet. Tab. 1 enthält die Ergebnisse der Abtrocknungsversuche von Mais und Zuckerrübenschnitzel.

Tabelle 1: Übersicht der Versuchsergebnisse 1988 (Durchschnittswerte)
gehäckselte Maispflanze und Zuckerrübenschnitzel (ZR)

Versuch-Nr.		1	2	3	4	5	ZR
Einfüllgewicht	kg	3538	2887	2920	3206	3240	2052
TS nach Einfüllung	%	32,4	39,6	40,7	25,9	26,8	19,0
TS nach Trocknung	%	93,2	84,6	88,1	40,4	89,6	84,4
Lufteintritt an der Wärmepumpe:							
Lufttemperatur	°C	14,3	14,4	10,9	4,4	5,2	5,2
Luftfeuchtigkeit	%	83,1	84,4	84,3	71,4	79,5	83,0
Sättigungsdefizit (100%)	g/m ³	2,5	2,2	1,7	2,0	1,5	1,3
Lufteintritt am Ventilator:							
Lufttemperatur	°C	24,1	25,1	22,7	12,7	15,8	15,4
Luftfeuchtigkeit	%	45,2	43,4	40,0	41,2	40,2	42,4
Sättigungsdefizit	g/m ³	13,2	14,1	12,9	7,1	9,1	8,0
Erhöhung Sättigungsdefizit:							
Absolut	g/m ³	10,7	11,9	11,2	5,1	7,6	6,7
Relativ	%	528	641	759	355	607	615
Laufzeit Belüftungsventilator	h	67,8	37,7	56,1	48,4	150,1	96,1
Laufzeit Wärmepumpe	h	67,5	37,7	56,1	48,4	140,0	96,1
Totaler Wasserentzug	kg	2308	1405	1571	1146	3396	1590
Stündlicher Wasserentzug	kg/h	34,0	37,3	28,0	23,6	22,6	16,5
Luftmenge Ventilator	m ³ /s	3,0	2,7	2,3	2,5	2,0	2,1
Spez. Wasserentzug	g/m ³	3,2	3,8	3,3	2,7	3,1	2,2
Druck unter Gut inkl. Lochblech	mbar	2,5	3,0	3,3	1,4	1,9	0,2
Höhe nach Einfüllen	m	0,56	0,95	1,21	0,38	0,75	0,14
Registerdruckverlust inkl. Drosselung	mbar	1,2	1,0	0,9	1,5	2,3	3,7
Leistungsbedarf Ventilator	kW	2,0	2,0	2,0	1,7	1,9	1,9
Leistungsbedarf Wärmepumpe	kW	7,0	7,2	7,3	6,4	7,6	7,6
Spez. Stromverbrauch	Wh/kg H ₂ O	261	244	331	343	393	572
Stromverbrauch	kWh/dt tr. Gut	49,1	25,4	38,5	19,1*	137,9**	197,0

* erst auf 40% TS getrocknet

** inkl. Fertigtrocknen des Versuches Nr. 4

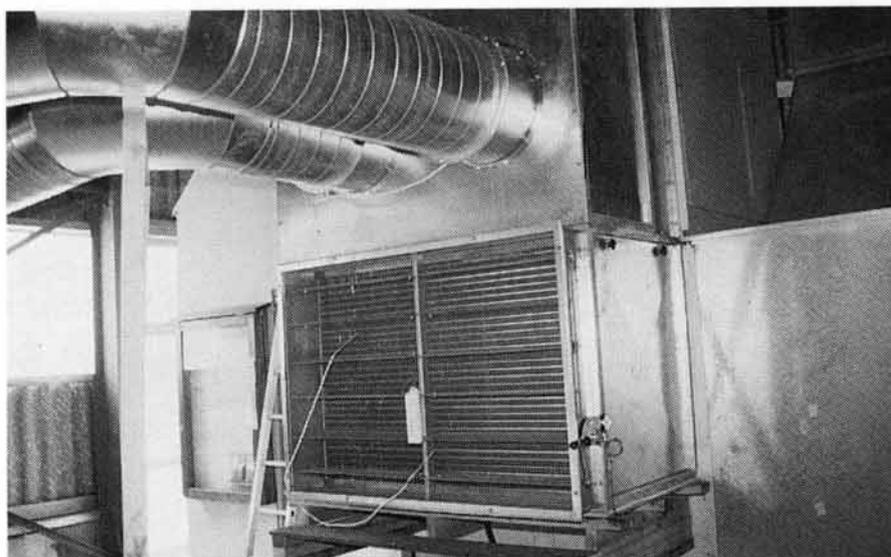


Abb. 4: Eine Klappe drosselte die angesaugte Luft vor dem Heizregister der Wärmepumpe. Zudem reduzierte ein Variator die Drehzahl und damit die Luftmenge des Lüfters.

Im Gegensatz zur Luftfeuchter-Wärmepumpe arbeitete die Luft-Luft-Wärmepumpe mit reduzierter Luftmenge. Dies bedingte, dass entweder ein zweiter Ventilator verfügbar oder dass die Drehzahl des Lüfter-Antriebmotors regelbar war. Auch die käufliche Luft-Gliederklappe (Mehrpreis Fr. 1970.-) drosselte die Luftmenge (Abb. 4).

Die reduzierte Luftmenge bewirkte eine Luftanwärmung um 8 bis 12°C, und das Sättigungsdefizit der Trocknungsluft erhöhte sich um das 3,6 bis 7,6-fache. Die warme Luft vermochte pro m³ Luft 2,7 bis 3,8 g, im Mittel 3,1 g Wasser zu entfernen. Diese mit Wasserdampf hochgesättigte Luft ver-

liess den Mais zeitweise als sichtbarer Dampf, der sich an kalten Wänden und Bauteilen des Trockners niederschlug. Ein Teil des Dampfes kondensierte auf der Oberfläche des Gutes und bewirkte eine zirka 5 cm dicke feuchte Schicht. Diese blieb bis zum Ende der Trocknung erhalten. Diese Schicht musste dann gut mit dem trockenen Mais vermischt werden. Eine am Schluss aufgebrauchte, zirka 10 cm dicke Schicht aus gehäckseltem Stroh erfüllte auch den Zweck, das restliche Wasser aus dem Mais zu entfernen.

Der spezifische Stromverbrauch schwankte von 244 bis 393 Wh pro kg verdampftes Wasser. Kältere Temperaturen beim Lufttritt in das Heizregister oder die Endtrocknung von zwei bis drei Füllungen bewirkten die höheren Werte. Der kWh-Verbrauch pro dt (100 kg) Trockengut streute stark, da nicht alle Füllungen auf dieselbe Endfeuchtigkeit abtrockneten und die Klimabedingungen unterschiedlich waren. Im Mittel berechneten wir 57,8 kWh Stromverbrauch pro 100 kg Trockengut.

Gehäckselter Mais setzt sich im Gegensatz zu Heu praktisch nicht, so dass die Höhe nach dem Einfüllen gleich bleibt. Mit zunehmendem Trocknungsgrad fiel der Druck unter dem Gut ab. Die Zahlen in Tab. 1 sind Mittelwerte und schwankten zum Beispiel im ersten Versuch von 3,4 bis 2,1 mbar. Der Belüftungsventilator saugte die Luft über das Heizregister an. Dies verursachte einen zusätzlichen Druckverlust von 1,0 bis 3,7 mbar. Die höheren Drücke traten beim manuellen Schliessen der Luft-Gliederklappe auf. Durch die gewollte Drosselung des Luftstromes stieg die Temperatur der Abluft beim Austritt aus dem Mais bzw. beim Eintritt in das Kühlregister. Damit wurde ein Vereisen der Kühlrohre verhindert. Mit Hilfe des Kontrollmanometers

Tabelle 2: Häckselmais-Trocknung: Erhöhung des Sättigungsdefizites der Zuluft durch die Wärmepumpe und der Wasserentzug in g/m³ Luft, abhängig vom TS-Gehalt des Mais und vom Sättigungsdefizit der Zuluft

	Sättigungsdefiziterhöhung der Zuluft (SD) und Wasserentzug (WE) in g/m ³	
	kleiner als 2,5	grösser als 2,5
	SD / WE	SD / WE
TS in %		
kleiner als 30	6,1 / 2,1	13,6 / 3,0
30 - 40	7,2 / 2,7	12,1 / 3,2
40 - 50	11,0 / 3,8	18,8 / 4,7
50 - 60	10,9 / 3,7	18,8 / 4,3
60 - 70	11,1 / 3,6	16,3 / 4,4
70 - 80	9,8 / 3,0	14,7 / 3,4
grösser als 80	9,6 / 2,6	17,4 / 3,3
Durchschnittliche Stromaufnahme der Wärmepumpe: 7,2 kW		

(Mehrpreis Fr. 96.-) stellte man die Klappen nach der Temperatur ein. Bei Aussentemperaturen um den Gefrierpunkt entstand jedoch die Gefahr, dass sich trotzdem Eis am Kühlregister bildete.

Damit auch die Maisversuchsergebnisse mit anderen Geräten vergleichbar sind, werden die Stundenwerte der Erhöhung des Sättigungsdefizites, des Wasserentzuges und des TS-Gehaltes klassiert (Tab. 2).

3. Trocknung von Zuckerrübenschnitzeln

Tab. 1 enthält auch die Resultate eines Abtrocknungsversuches von Pressschnitzeln. Der Versuch fand ab Mitte November statt, als Schnitzel zur Verfügung standen. Es konnte gerade noch ein Versuch durchgeführt werden (Vereisungsgefahr des Kühlregisters), bevor die Aussentemperaturen unter Null sanken.

Der einzelne Abtrocknungsversuch benötigte einen hohen Stromverbrauch von 197 kWh pro 100 kg trockene Schnitzel. Bei einem Strompreis von Fr. -15

(Tagesstrom Fr. -18, Nachtstrom Fr. -09) kostete dies Fr. 29.55. Bei einer Grastrocknungsanlage bezahlte man im Durchschnitt Fr. 29.60 als Trocknungslohn.

4. Schlussfolgerungen

Die Versuche Nr. 1 bis 5 mit gehäckseltem Vollmais zeigten, dass die Luft-Luft-Wärmepumpe in Verbindung mit einem Satz-trockner geeignet war, ungefähr 1 t Nassgut mit 30% TS pro Tag zu trocknen. Das Trocknen von Zuckerrübenschnitzeln ist dagegen nicht zu empfehlen, weil der Energieaufwand mit beinahe 200 kWh pro 100 kg trockene Schnitzel sehr hoch war und zirka dem Trocknungslohn in der Grastrocknungsanlage entsprach. Der Stromverbrauch beim Mais-trockner betrug durchschnittlich 57,8 kWh pro 100 kg Trockengut bei einem mittleren TS-Gehalt von 33% des Nassgutes. Das ergab Stromkosten von Fr. 8.65 pro dt.

Der durchschnittliche Wasserentzug belief sich auf 27,3 kg/h bei einem Leistungsbedarf von 7,2 kW für die Wärmepumpe. Mit

diesem Entzug kann der Satz-
trockner pro Saison zweimal be-
füllt werden. Dies reicht aus für
eine Trocknungskapazität von
33 t Nass- oder 11,25 t Trockengut
bei einer Trocknungsdauer von
33 Tagen.

Der zusätzliche Investitionsbedarf
für den Satz-
trockner und die Luft-
Gliederklappe bezifferte sich auf
rund Fr. 7000.-. Daraus resultier-
ten jährliche Kosten von Fr. 835.-
(6,7% Abschreibung = Fr. 467.-,
3,6% Zins = Fr. 252.-, 1,5% Repa-
raturen = Fr. 105.-, 0,15% Versi-
cherung = Fr. 11.-). Unter Einbe-
zug der Stromkosten ergab dies

Fr. 16.05 je dt Trockengut. Die Ko-
stendifferenz zum Trocknungs-
lohn einer Grossanlage betrug
somit Fr. 4.15 pro 100 kg trocke-
nem Mais oder Fr. 467.- pro Jahr.
Damit kann ein Teil der hohen Fix-
kosten der Wärmepumpe von Fr.
2260.- (FAT- Bericht Nr. 324) ab-
gedeckt werden. Die Mehrauf-
wendungen, verursacht durch
Befüllen und Entleeren des Satz-
trockners, Umschichten des
Mais und Überwachen der An-
lage, werden durch Arbeitszeitein-
sparungen beim Transport des
Nassgutes über die Grossanlage
aufgewogen.