

Gras trocknen mit Wärmepumpe

Bei kleinen Mengen möglich, jedoch mit viel Handarbeit verbunden

Jürg Baumgartner, Eidg. Forschungsanstalt für Agrarwirtschaft und Landtechnik (FAT), CH-8356 Tänikon

Um die Trocknungskapazität einer Heubelüftung zu erhöhen, gibt es neben dem altbekannten Ölofen zur Luftanwärmung auch Sonnenkollektoren ohne zusätzlichen Bedarf an Fremdenergie sowie Wärmepumpen. Diese erhöhen die Trocknungskapazität der Trocknungsluft im 24-Stunden-Betrieb bei allen Wetterbedingungen. Die Leistung einer entsprechenden Anlage, der zusätzliche Investitionsbedarf und der

Energieverbrauch pro 100 kg Heu wurden untersucht.

Nachdem die FAT bereits eine Luft-Luft-Wärmepumpe (FAT-Bericht Nr. 324 und 380) und eine Luftentfeuchter-Wärmepumpe (FAT-Bericht Nr. 370) einsetzte, kam ein System mit Luftentfeuchtung und/oder -anwärmung zur Anwendung. Die Thermodynamic-Wärmepumpe kann somit als Luftentfeuchter, Luft-Luft-Wärmepumpe oder als Kombination bei-

der Systeme eingesetzt werden (Abb. 1). Neben der Heu- und Emdkonservierung soll auch die Grastrocknung möglich sein.

Die Trocknungskapazität ist bei den meisten Wetterbedingungen von allen Systemen am höchsten. Der Energieverbrauch pro 100 kg Heu liegt über demjenigen mit Luft-Luft-Wärmepumpe und unter demjenigen mit Luftentfeuchter.

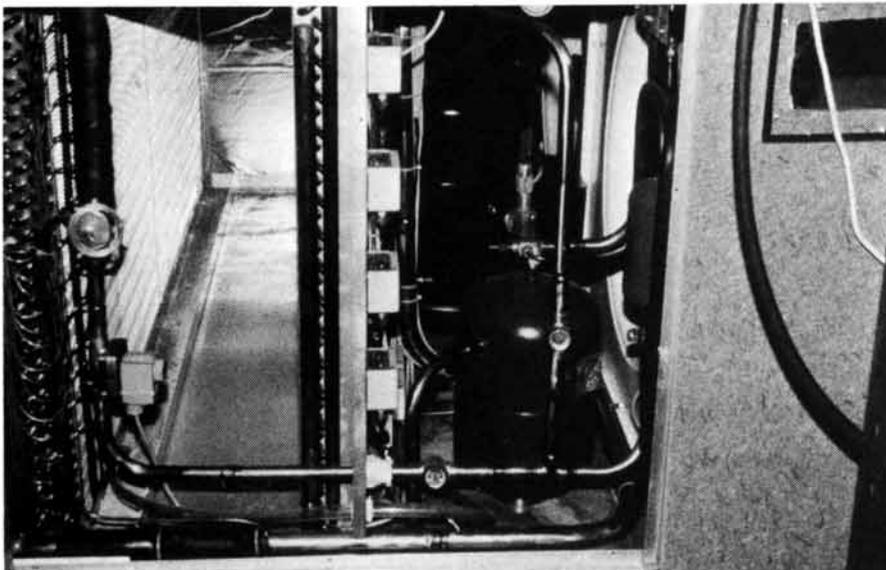


Abb. 1: Blick in die geöffnete Wärmepumpe. Die wichtigsten Elemente sind: Links das Kühlregister, in der Mitte der Heizradiator und rechts der Kompressor mit dem Druckbehälter.

Inhalt:	Seite
Problemstellung	2
Funktionsbeschreibung	2
Technische Daten und Preis	3
Versuchsverlauf	3
Versuchsergebnisse	4
Grastrocknung	5
Schlussfolgerungen	5

Problemstellung

Der Zustand der Trocknungsluft (Lufttemperatur und relative Feuchte) bestimmt in erster Linie ihre Fähigkeit, Wasser aus einem zu trocknenden Gut aufzunehmen. So ist es bekanntlich unmöglich, bei Regenwetter Heu mit normaler Aussenluft zu trocknen. Im Gegenteil: Unter solchen Bedingungen wird sich ein Heustock wieder befeuchten. Eine Wärmepumpe erlaubt hingegen die Heutrocknung rund um die Uhr. Wie hoch ist jedoch der zusätzliche Investitionsbedarf und wieviel Energie braucht es, um 100 kg Welkheu oder gar Gras zu trocknen?

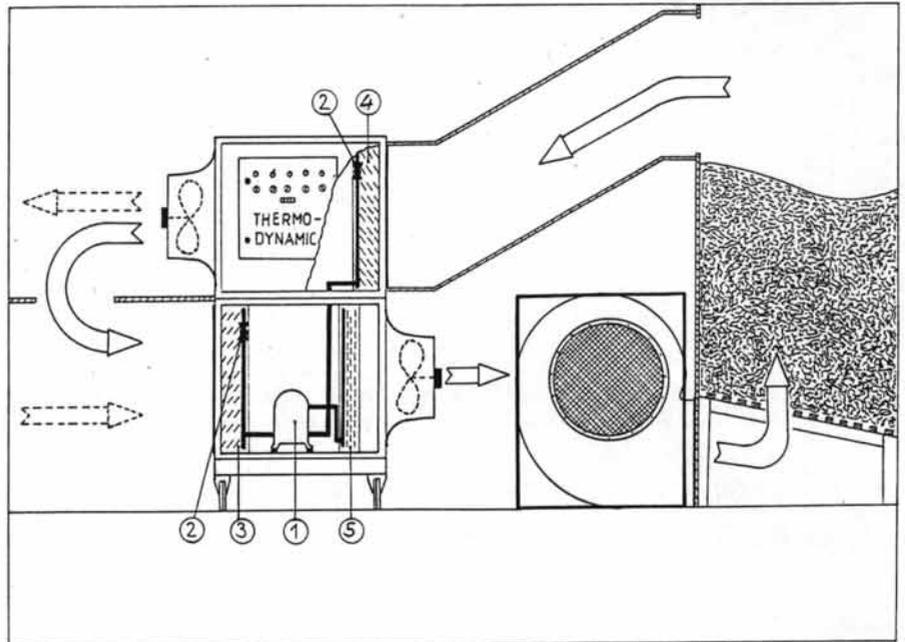


Abb. 2: Schema der Wärmepumpe: Es bedeuten: 1 = Kompressor mit Druckbehälter, 2 = Drossel, 3 = unteres Kühlregister für Luftentfeuchtung, 4 = oberes Kühlregister für Wärmeentzug aus der Stockabluft, 5 = Heizradiator.

Funktionsbeschreibung der Thermodynamic-Wärmepumpe

In der Regel arbeiten Luft-Luft-Wärmepumpe und Luftentfeuchter je mit einem Heiz- und Kühlregister, also mit zwei Wärmetauschern. Neu an der Thermodynamic-Wärmepumpe ist die Anzahl der Wärmetauscher. Dieses System (Abb. 2) besitzt neben dem Heizradiator (5) zwei Kühlregister (3, 4) und zwei Drosseln (2). Der Kompressor (1) weist zwei Drehzahl- oder Leistungsstufen auf.

Diese Kombination erlaubt den Einsatz von verschiedenen Betriebsarten. Von Hand einschaltbare Schalter auf dem Elektrokasten (Abb. 3) ermöglichen folgende Betriebszustände:

Luftentfeuchter

Ein Teilstrom der Umgebungsluft durchfließt das Kühlregister (3 in Abb. 2) des unteren Blocks der Wärmepumpe WP. Dabei kühlt sich die Luft ab und es wird Wasser auskondensiert. Im nachfolgenden Heizregister 5 wärmt sich die gesamte, vom Heulüfter angesaugte Luft an. Zuschaltbare Hilfsven-

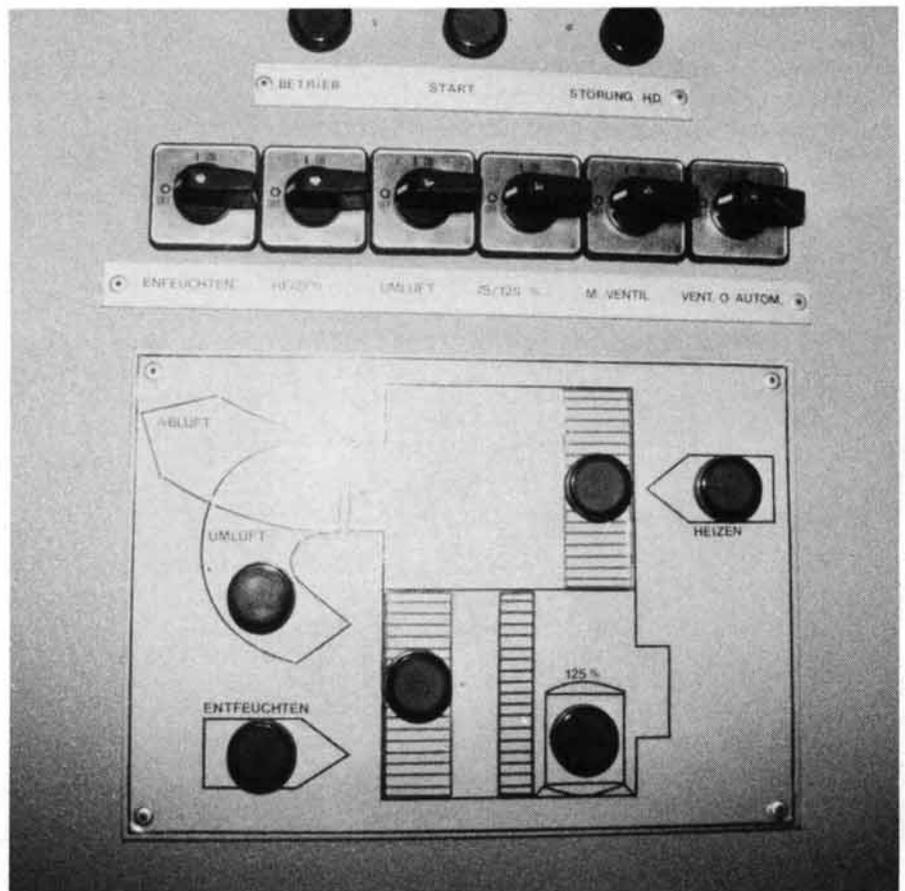


Abb. 3: Es lassen sich verschiedene Betriebszustände schalten. Diese werden durch Symbole und Signallampen dargestellt. Funktions- und Störanzeigeleuchten unterstützen den Landwirt.

tilatoren vermindern den Druckverlust durch das Ansaugen über zwei Radiatoren.

Luft-Luft-Wärmepumpe

Zwei Hilfsventilatoren saugen feuchte Stockabluft mit zwei beweglichen Schläuchen über ein Kühlregister 4 im oberen Block der WP an. Durch die Abkühlung scheidet die Luft viel Wasser aus, und die dabei entstehende Kondensationswärme wird über den WP-Kreislauf dem Heizregister 5 zugeführt. In dieser Betriebsart bleibt das untere Kühlregister 3 ausser Funktion. Zwei Schläuche führen die kalte, entfeuchtete Luft ins Freie.

Kombination von Luftentfeuchter und Luft-Luft-WP

Eine Kombination von Luftentfeuchter und zusätzlicher Anwärmung mit der Luft-Luft-Wärmepumpe lässt sich ebenfalls schalten. Der Betrieb erfolgt wahlweise mit Frischluft aus der Umgebung oder mit Umluft. Letztere Betriebsart wird vorteilhaft bei Umgebungstemperaturen nahe dem Gefrierpunkt gewählt.

Ein Steuergerät erlaubt auch einen automatischen Betrieb ohne Handschaltung. Je nach der relativen Luftfeuchtigkeit der Umgebungsluft werden die oben beschriebenen Betriebsarten angewählt. Die Schaltpunkte am Hygrostaten sind einstellbar.

Technische Daten und Preis der Wärmepumpe

Typ des Gerätes:	EH 204
Äussere Abmessungen:	
Breite:	1060 mm
Höhe (mit Fahrrollen):	2210 mm
Länge (inklusive Elektrokasten):	2310 mm
Heiz- und Kühlregister:	
Breite:	1810 mm
Höhe:	845 mm
Fläche:	1,53 m ²
1 Heizregister mit 3 Rohrreihen	
2 Kühlregister mit 4 Rohrreihen	
Hilfslüfter:	
Durchmesser:	550 mm
Flügelzahl:	4
Leistung:	770 W
2 Lüfter für Luftentfeuchterbetrieb	
2 Lüfter für Wärmepumpenbetrieb	

Nennleistung 2stufiger

Kompressor:	7.6/14.6 kW
Gewicht:	747 kg
Preis 1994 mit Elektrokasten montiert und verdrahtet, jedoch ohne Luftschläuche	Fr. 19 950.-

Versuchsverlauf

Im Frühjahr 1991 startete der erste Abtrocknungsversuch von Heu. Kurz nach Beginn fiel die Datenerfassungsanlage infolge einer technischen Panne aus. Deshalb fehlen die Mittelwertberechnungen der Sättigungsdefizite sowie der spezifische Wasserentzug beim Betrieb mit Wärmepumpe. Der zweite Versuch mit Heu und der dritte mit Emd im Herbst erfolgten planmässig.

Nach der Entleerung des Stocks wurden im Jahre 1992 der vierte und fünfte Versuch mit Heu und der sechste mit Emd durchgeführt. Beim siebten und achten Versuch diente leicht angewelktes Gras als Trocknungsgut.

Das eingeführte Welkheu wurde pro Ladewagen je zur Hälfte mit dem Greifer auf die beiden Versuchsheustöcke mit 50 m² Grundfläche verteilt. Auf der zweiten Anlage fanden Versuche mit Sonnenkollektor und Wärmespeicherung (FAT-Berichte Nr. 430) statt. Bei jedem Einfüllen wurde das Welkheu ge-

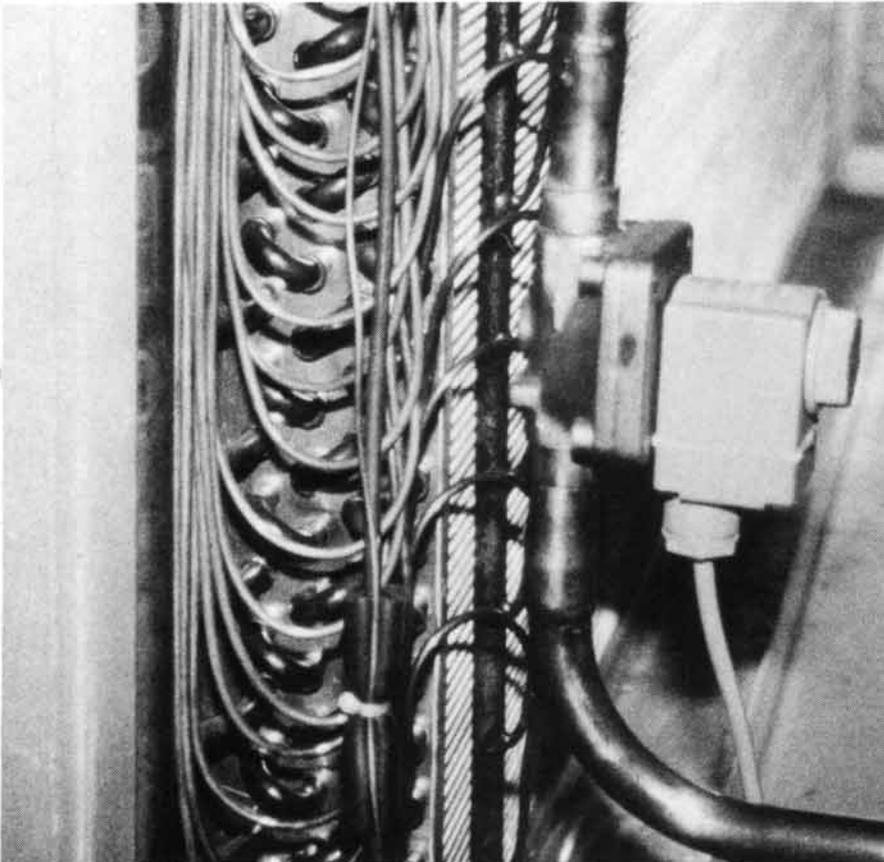


Abb. 4: Der Wärmeaustausch erfordert eine aufwendige Technik. Verschmutzung der Lamellen vermindert den Wärmetransport und erhöht den Registerwiderstand beim Durchfliessen der Luft.

Tabelle 1: Übersicht der Versuchsergebnisse 1991/92
(Durchschnittswerte Nr. 1 – 6 Heu und Emd, Nr. 7 und 8 Grastrocknung)

Versuch-Nr.		1* Heu	2 Heu	3 Emd	4 Heu	5 Heu	6 Emd	7 Gras	8 Gras
Einfüllgewicht	kg	5315	4267	9430	7636	8718	6485	3205	2511
TS beim Einfüllen	%	59,3	61,6	59,0	53,9	59,5	57,7	22,2	24,5
TS nach dem Trocknen	%	85,2	84,1	88,4	83,6	85,6	86,7	65,3	89,5
Sättigungsdefizit vor der WP	g/m ³	–	10,1	10,0	9,1	6,2	3,8	6,8	5,1
Sättigungsdefizit nach der WP	g/m ³	–	20,2	26,9	23,7	15,8	17,4	21,2	17,5
Sättigungsdefizit-Erhöhung	g/m ³	–	10,1	16,9	14,6	9,6	13,5	14,4	12,4
Sättigungsdefizit-Erhöhung	%	–	200	269	260	255	454	314	344
Laufzeit des Ventilators	h	108,3	46,4	62,5	61,9	106,2	54,7	19,3	82,4
Laufzeit der WP	h	23,2	17,8	47,5	29,4	48,1	40,7	19,3	52,7
Totaler Wasserentzug	kg	1615	1317	3435	2621	2859	2226	1324	2345
Stündlicher Wasserentzug	kg/h	14,9	28,4	55,0	42,3	26,9	40,7	68,6	28,5
Luftmenge Heulüfter	m ³ /s	5,6	5,2	4,5	5,3	4,8	4,3	4,2	4,1
Spez. Wasserentzug total	g/m ³	0,7	1,5	3,4	2,2	1,5	2,6	4,5	1,9
Spez. Wasserentzug mit WP	g/m ³	–	2,8	4,1	3,7	2,9	3,5	4,5	3,6
Stockdruck	mbar	1,6	2,4	4,6	2,3	3,8	5,9	6,2	6,4
Registerdruckverlust	mbar	1,1	1,0	0,8	1,1	0,9	0,7	0,7	0,7
Stockhöhe nach dem Einfüllen	m	0,9	1,6	2,8	1,1	2,8	3,2	3,2	3,5
Stockhöhe abgesetzt	m	0,8	1,4	2,3	0,9	2,3	2,7	2,9	2,9
Leistungsbedarf Heulüfter	kW	4,1	4,6	4,5	4,5	4,8	4,7	4,5	4,7
Leistungsbedarf WP	kW	16,4	20,1	15,4	16,4	20,5	15,5	15,6	16,3
Stromverbrauch/kg Wasser	Wh	512	435	293	290	524	399	300	527
Stromverbrauch dt/Heu	kWh	22,3	19,4	16,8	15,2	25,6	20,9	21,1	744,5

* Berechnungen nach Zählerständen und Waage, da Ausfall der Datenerfassungsanlage.

wogen und der Trockensubstanzgehalt (TS %) ermittelt.

Die Datenerfassungsanlage nahm alle zehn Minuten die Werte von Temperaturen, Luftfechtigkeiten, Luftmengen, Stockdrücke, usw. auf. Aus Lufttemperatur, Luftfeuchtigkeit und Barometer liess sich das Sättigungsdefizit berechnen. Sechs Messwerte pro Stunde ergaben einen Mittelwert. Für jede der acht Abtrocknungen wurden Durchschnittswerte über den ganzen Versuch berechnet (Resultate Tabelle 1).

g/m³ über die ganze Belüftungszeit mit und ohne WP (Durchschnitt = 1,8 g/m³). Dieser Wert liegt leicht über den bisher gemessenen Systemen.

Der Stromverbrauch pro kg entzogenes Wasser betrug im Minimum 290 Wh, im Maximum 527 (Durchschnitt =

410 Wh). Um 100 kg Heu zu trocknen, braucht es durchschnittlich 20 kWh. Dies entspricht einem Wert, der zwischen dem Durchschnittsverbrauch einer Luft-Luft-Wärmepumpe (15 kWh) und einem Luftentfeuchter (27 kWh) liegt.

Beurteilung der Versuchsergebnisse

Als massgebende Grösse für den Wasserentzug gilt das Sättigungsdefizit. Dieses erhöhte sich um das 2- bis 4,5fache, im Mittel um rund 300% oder um das 3fache. Der spezifische Wasserentzug schwankte von 2,8 bis 4,5 g/m³ (Durchschnitt = 3,1 g/m³) mit Wärmepumpenbetrieb und von 0,7 bis 3,4

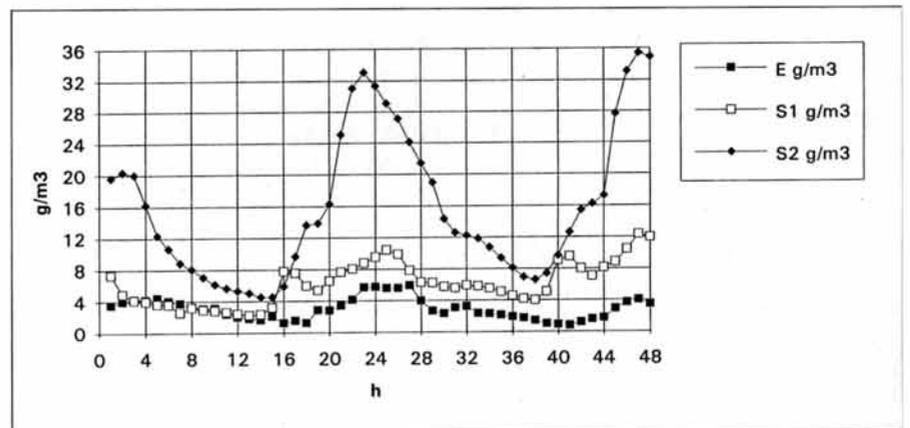


Abb. 5: Der Verlauf des Versuchs Nr. 5. Der spezifische Wasserentzug (E) zeigt Parallelen zum Sättigungsdefizit (S2) nach der Wärmepumpe im Verlaufe der 48-stündigen Trocknungszeit. Das «Arbeitsvermögen» der WP hängt sehr von den Klimazuständen, das heisst vom Sättigungsdefizit (S1) der Umgebungsluft ab.

Grastrocknung

Die Grastrocknung mit der Wärmepumpe bedingt folgende Voraussetzungen:

- Für einen Stock mit 50 m² Grundfläche darf erstmals nur 3 bis 4 t Gras eingefüllt werden.

- Die tägliche Nachfüllmenge beträgt höchstens 2 t Frischgut.

- Mindestens einmal pro Tag muss der Stock umgesetzt und neu verteilt werden. Der Zeitbedarf dafür beträgt zirka 30 Minuten.

Im Versuch Nr. 7 benötigte die Trocknung von leicht angewelktem Gras 21.1 kWh/100 kg Trockengut. In der Zeit von 19,3 Stunden erreichte das Gut erst einen Gehalt von 65% TS. Wenn unter gleichen Bedingungen fertig getrocknet würde, wären mindestens 40 kWh einzusetzen.

Im hohen Stromverbrauch des Versuchs Nr. 8 sind die Resttrocknung des Versuches Nr. 7, die Trocknung von 2511 kg Gras sowie die Übertrocknung des ganzen Dürrfutterstocks enthalten. Die Wärmepumpe arbeitete, bis das Gras auf zirka 84% TS abtrocknete. Es war dabei nicht zu vermeiden, dass der TS-Gehalt des ganzen Stocks über 88% stieg.

Ein weiteres Problem bildet die Rekondensationsschicht auf dem Stock. Die feuchte, warme Stockabluft scheidet einen Teil Wasser in den obersten 5 bis 10 cm aus. Diese nasse Zone muss durch eine Strohschicht abgedeckt und dann nochmals getrocknet werden. Bleiben feuchte Nester erhalten, sind Nachgärungen in Kauf zu nehmen.

Weitere Ergebnisse

Damit die Resultate mit andern Geräten vergleichbar sind, werden die Stundenwerte nach dem Sättigungsdefizit der Umgebungsluft (Ansaugluft des Kühlregisters) und nach dem TS-Gehalt des Welkheus klassiert. Tabelle 2 zeigt die Ergebnisse.

Im für die Heutrocknung besonders interessanten TS-Bereich von 60 bis 80% sind in den meisten Klimazuständen höhere Wasserentzugswerte zu er-

Tabelle 2: Erhöhung des Sättigungsdefizites der Umgebungsluft durch die Wärmepumpe und der Wasserentzug in g/m³ Luft, abhängig vom TS-Gehalt des Welkheus

TS in %	Sättigungsdefizit der Umgebungsluft in g/m ³				
	kleiner als 2.5	2.5 bis 5	5 bis 7.5	7.5 bis 10	grösser als 10
kleiner als 50	–	12,1/3,3	18,2/4,5	–	44,3/6,7
50 - 60	–	13,4/2,5	19,8/5,1	–	(45,1/6,2)
60 - 70	10,3/3,4	10,8/3,0	16,6/4,1	21,3/2,4	35,9/5,2
70 - 80	11,6/2,5	20,6/3,6	13,2/2,2	25,8/4,9	36,9/4,5
grösser als 80	–	15,3/2,5	21,2/4,1	19,1/2,6	29,6/3,3

Durchschnittliche Stromaufnahme der Wärmepumpe: 15,8 kW. Werte in Klammern sind Einzelwerte, bestehen jedoch aus sechs Messungen.

warten als bei Luft-Luft-Wärmepumpen und Luftentfeuchtern. Dies wird mit einem rund dreifach stärkeren Kompressor erreicht.

Schlussfolgerungen

Die Thermodynamic-Wärmepumpe vermochte das Sättigungsdefizit der Trocknungsluft der Heubelüftung um das 2- bis 4,5fache zu steigern. Die Trocknungsleistung erhöhte sich gegenüber der Kaltbelüftung (Wasserentzug durchschnittlich 1 g/m³ Luft während zwölf Stunden) auf das 3,5fache, da die Wärmepumpe rund um die Uhr eingesetzt werden kann. Mit der Wärmepumpe wurde die Trocknung auf einen TS-Gehalt von 82 bis 85% angestrebt. Die Endtrocknung erfolgte mit der Kaltbelüftung und mit einem Steuergerät.

Mit einem durchschnittlichen Stromverbrauch von 20 kWh pro 100 kg Dürrfutter ist mit einem 1,5fachen höheren Energiekonsum zu rechnen als bei der Kaltbelüftung. In Gegenden mit Nachtтарif werden die Stromkosten in etwa gleich sein, weil 40 bis 50% der Belüftungszeit in die Nacht- und Wochenendstunden mit billigem Strompreis fallen. Andererseits benötigt die Wärmepumpe mit dem Belüftungsventilator einen sehr hohen Anschlusswert von mindestens 20 kW (WP im Durchschnitt = 15,8 kW, Ventilator = zirka 4,5 kW) an das elektrische Netz. Eine zu knapp bemessene Anschlussleitung oder die Verrechnung von Spitzenstrom durch das örtliche EW können den Betrieb

einer solchen Anlage einschränken oder gar verunmöglichen.

Die Trocknung von Gras ist möglich, erfordert jedoch einen Stromverbrauch von mindestens 40 kWh pro 100 kg Trockengut. Dazu muss täglich eine halbe Stunde umgeschichtet, der Stock genau kontrolliert und am Schluss eine Strohschicht aufgebracht werden.

Bei der Planung einer Heubelüftung mit Wärmepumpe ist der zusätzliche Druckverlust von 0,7 bis 1,1 mbar einzurechnen. Der Investitionsbedarf der Wärmepumpe beträgt für eine Belüftungsanlage von 50 m² Grundfläche Fr. 19950.–. Er ist relativ hoch und zieht Jahresgrundkosten von Fr. 2834.– nach (6,7% Amortisation = Fr. 1367.–, 4,2% Zins = Fr. 838.–, 3% Reparaturen = Fr. 599.–, 0,15% Versicherungen = Fr. 30.–). Bei einem Mischpreis von Fr. 0.16/kWh (Tag- und Nachtтарif) kostet der Strom für die Trocknung (Wärmepumpe und Belüftungsventilator) von 100 kg Welkheu Fr. 3.20 und von 100 kg Gras Fr. 6.40.

An einen wirtschaftlichen Einsatz einer solchen Anlage ist nur in Betrieben mit extrem schlechten Trocknungsbedingungen bei der Heubereitung oder allenfalls als Ersatz für die Luftanwärmung mittels Ölofen zu denken. Eine Mehrfachnutzung mit Trocknung von weiteren landwirtschaftlichen Gütern wie Getreide, Körnermais, gehäckseltem Silomais, Trester usw. ist unbedingt anzustreben, um die hohen Jahresgrundkosten auf mehrere Produkte zu verteilen.