FAT-Berichte

Herausgeber: Eidg. Forschungsanstalt für Betriebswirtschaft und Landtechnik (FAT) CH-8356 Tänikon TG Tel. 052 - 47 20 25

August 1989 370

Heu- und Maistrocknung mit Luftentfeuchter-Wärmepumpe

Jürg Baumgartner

Im Anschluss an den Test einer Luft-Luft-Wärmepumpe (siehe FAT-Bericht Nr. 324) setzte die FAT einen Luftentfeuchter für die Heutrocknung und für die Trocknung von gehäckseltem Silomais ein. Im Gegensatz zur Luft-Luft-Wärmepumpe wird beim Luftentfeuchter ein Teil der Trocknungsluft vom Wasser befreit und anschliessend erwärmt. Die so durch den Luftentfeuchter aufbereitete Luft vermag auch während der Nacht und bei Regenwetter feuchtes Gut zu trocknen.

1. Einleitung

Um die Trocknungsleistung einer Heubelüftungsanlage zu erhöhen, gibt es mehrere Möglichkeiten:

- Die Trocknungsluft wird erwärmt. Dadurch sinkt die relative Luftfeuchtigkeit. Dies bewirkt ein erhöhtes Wasseraufnahmevermögen der Luft, das Sättigungsdefizit steigt. Das Sättigungsdefizit ist die Differenz des vorhandenen Wassergehalts der Luft bis zur vollen Sättigung bei 100% relativer Luftfeuchtigkeit (r.F.). Bei der Heubelüftung nimmt jedoch die Luft nie bis 100% r.F. Wasser auf. Das Trocknungsgut gibt zudem weniger Wasser an die Luft ab, wenn es beinahe trocken ist und weit mehr, wenn es sehr feucht ist.
  Verfahren mit Luftanwärmung sind: Luft-Luft-Wärmepumpe, Warmluftofen, direkt und indirekt mit Öl,- Propan- oder Biogasheizung, Zentralheizung mit Wärmeaustauscher, Sonnenkollektoren, usw.
- Die Trocknungsluft wird entfeuchtet. Die Wasserausscheidung geschieht durch Kondensation. Der absolute Wassergehalt sinkt, der relative beträgt bis zu 100%. Ohne die Trocknungsluft nach der Was-

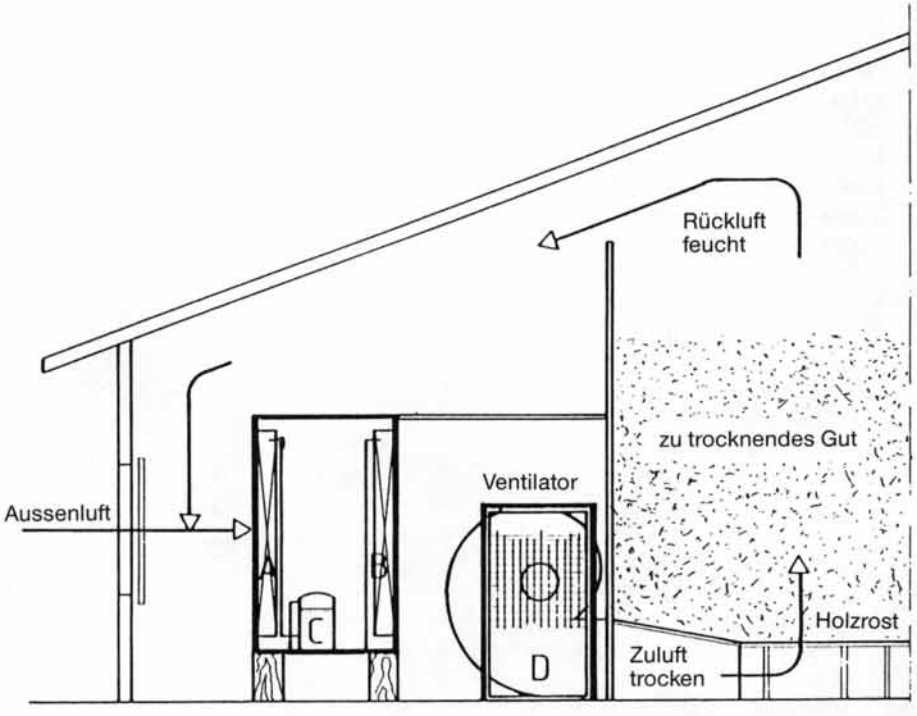

Abb. 1: Funktionsprinzip der BP-Luftentfeuchter-Wärmepumpe.

serkondensation wieder anzuwärmen, würde der Luftentfeuchter das Sättigungsdefizit nicht erhöhen.

- Eine weitere Möglichkeit besteht darin, die Stockgrundfläche genügend gross zu planen. Es sei an die Richtzahl von 7 – 8 m^2 Stockfläche pro GVE bei Heufütterung erinnert. Stöcke, die nach oder während der Heuernte herausgepresst werden müssen, sind zu klein dimensioniert und weisen eine zu geringe Trocknungsleistung bei Kaltbelüftung auf. Um die Trocknung zu beschleunigen, werden unter anderem auch Luftentfeuchter-Wärmepumpen eingesetzt.

2. Funktion der Luftentfeuchter-Wärmepumpe

Die Luftentfeuchter-Wärmepumpe besteht im wesentlichen aus dem Kühlregister A, dem Heizregister B und dem Kompressor C. Sie steht vor dem Heubelüftungsventilator D (Abb. 1).

Bei der Heu- und Emdtrocknung wird in der Regel mit Aussenluft getrocknet. Ungefähr 80% dieser Luft strömen durch das Kühlregister, und etwa 20% werden über einen Bypass zum Heizregister geleitet. Das Kühlregister entzieht der Luft Wärme. Durch die Abkühlung wird Wasserdampf der Luft ausgeschieden. Dabei entsteht Kondensationswärme. Der Kompressor transportiert die Wärme zum Heizregister. Dieses erwärmt die nun etwas trockenere Luft des Kühlregisters sowie die Luft des Bypass. Der Ventilator fördert die Trocknungsluft über den Zuluftkanal und Rost zum trocknenden Gut. Bei kalten Temperaturen unter etwa 7°C wird keine Aussenluft verwendet, weil die Gefahr der Vereisung beim Kühlregister eintritt. Die Anlage wird dann im Umluftbetrieb gefahren, das heisst, der Ventilator saugt die Stockabluft wieder an. Diese Betriebsart ist die Regel bei der Trocknung von Häckselmais.

Tabelle 1: Übersicht der Versuchsresultate 1987/88 (Durchschnittswerte) Emd/Heu

Versuch Nr.		1	2	3	4	5	6
Einfüllgewicht	kg	5303	2970	7564	13953	6917	7824
TS nach Einfüllung	%	67,3	55,6	60,6	39,5	65,3	48,8
TS nach Trocknung	%	88,4	87,5	88,3	84,8	89,1	88,0
Lufteintritt am Luftentfeuchter:							
Lufttemperatur	°C	20,2	14,6	17,3	12,2	9,5	9,1
Luftfeuchtigkeit	%	73,9	87,5	77,3	81,0	88,6	91,0
Sättigungsdefizit (100%)	g/m^3	5,9	2,0	4,8	2,9	1,3	1,3
Lufteintritt am Ventilator:							
Lufttemperatur	°C	25,2	20,9	23,0	17,8	16,1	15,5
Luftfeuchtigkeit	%	53,5	58,6	52,5	55,7	57,3	59,3
Sättigungsdefizit	g/m^3	12,0	8,3	10,9	7,4	6,3	5,9
Erhöhung Sättigungsdefizit:							
Absolut	g/m^3	6,1	6,3	6,1	4,5	5,0	4,6
Relativ	%	203	315	227	155	485	454
Laufzeit Belüftungsventilator	h	52,8	111,0	86,0	290,0	128,7	136,9
Laufzeit Luftentfeuchter	h	42,0	107,7	68,7	244,0	125,2	128,1
Totaler Wasserentzug	kg	1273	1018*)	2437*)	7445	2182*)	3290*)
Stündlicher Wasserentzug	kg/h	24,1	9,2	28,3	25,7	17,0	24,0
Luftmenge Ventilator	m^3/s	5,2	5,0	4,7	5,2	5,0	4,7
Spez. Wasserentzug	g/m^3	1,3	0,5	1,7	1,4	0,9	1,4
Stockdruck	mbar	2,1	2,5	3,6	3,7	4,5	5,2
Stockhöhe nach Einfüllen	m	1,2	1,7	2,9	1,2	2,5	3,6
Stockhöhe abgesetzt	m	1,1	1,6	2,4	1,0	2,1	2,9
Registerdruckverlust	mbar	0,7	0,6	0,5	0,7	0,7	0,6
Leistungsbedarf Ventilator	kW	2,9	3,1	3,2	4,5	4,6	4,6
Leistungsbedarf Luftentfeuchter	kW	6,5	6,7	6,8	5,3	5,3	5,3
Spez. Stromverbrauch	Wh/kg H_2O	335	1042	297	348	574	397
Stromverbrauch	kWh/dt Heu	10,6	56,2	14,3	39,9	24,7	30,1

*) Beim Durchströmen der Luft durch das Trockengut kann es übertrocknet werden, das heisst der TS-Gehalt steigt über 88%. Bei der Trocknung der folgenden Schicht wird ein Teil des Wassers umgelagert. Die Luft befeuchtet die unteren übertrockneten Schichten. Das Sättigungsdefizit dieser Luft ist aber noch genügend gross, um die oberste Schicht (Nassgut) abzutrocknen.

3. Technische Daten und Preis der BP-Luftentfeuchter-Wärmepumpe

Typ des Gerätes:	2030/I
Äussere Abmessungen:	
Breite:	1650 mm
Höhe:	1860 mm
Länge:	1140 mm
Heiz- und Kühlregister:	
Breite:	1280 mm
Höhe:	1610 mm
Fläche:	1,06 m^2
je 2 Rohrreihen	
Gewicht:	450 kg
Nennleistung Kompressor:	6 kW
Preise 1989:	
Gerät:	Fr. 17'900.–
Aussenfeuchtesteuerung	Fr. 240.–

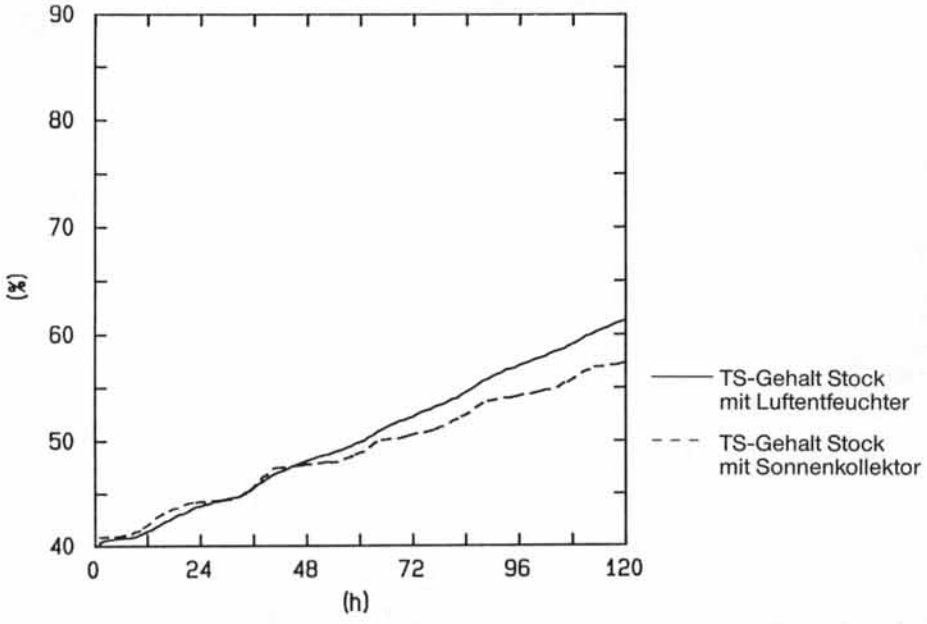

Abb. 2: Versuch Nr. 4. Bei schönem Wetter hat der Luftentfeuchter nur einen kleinen Vorsprung (ungefähr einen Tag) gegenüber der Abtrocknung mit Sonnenkollektor.

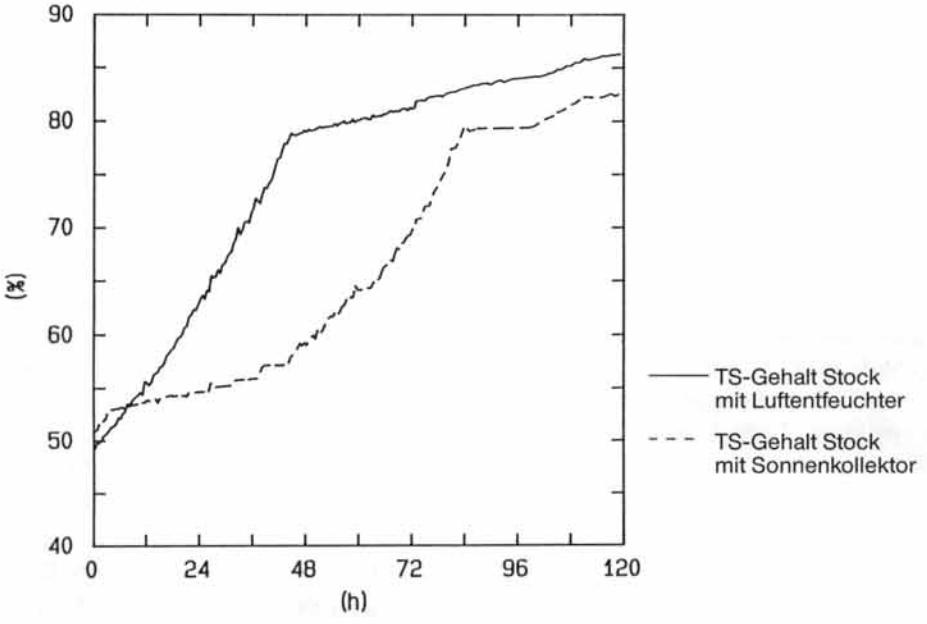

Abb. 3: Versuch Nr. 6. Bei regnerischem Wetter kann sich der Vorsprung auf mehrere Tage erstrecken, bis der TS-Gehalt des Stockes mit Sonnenkollektor-Belüftung auf den gleichen Wert kommt.

4. Heu- und Emdtrocknung

Die Versuche Nr. 1 bis 3 umfassten die Abtrocknungen von Emd im Sommer 1987 und die Versuche Nr. 4 bis 6 von Heu im Frühjahr 1988. Das eingeführte Welkheu wurde pro Ladewagen je zur Hälfte mit dem Greifer auf die beiden Versuchsheustöcke verteilt. Die Grundfläche beider Stöcke betrugen je 50 m^2 und wiesen eine Nettohöhe von 4,5 m auf. An der Anlage 1 erfolgte die Luftanwärmung mit einem Sonnenkollektor und an der zweiten mit der Luftentfeuchter-Wärmepumpe.

Bei jedem Einfüllen wurde das Welkheu gewogen und der Trokkensubstanzgehalt ermittelt. Alle zehn Minuten nahm ein Datenerfassungsgerät Temperaturen, Luftfeuchtigkeiten, Luftmengen, Stockdruck, Stockgewicht usw. auf. Aus Lufttemperatur, Luftfeuchtigkeit und Barometer liess sich das Sättigungsdefizit der Trocknungsluft berechnen. Die sechs Messwerte pro Stunde ergaben einen Stunden-Mittelwert.

Für jede der sechs Abtrocknungen wurden Durchschnittswerte berechnet. Eine Übersicht der Versuchsresultate 1987/88 enthält Tab. 1.

Wie bereits bei der Belüftung mit der Luft-Luft-Wärmepumpe festgestellt, trocknete auch das Welkheu mit dem Luftentfeuchter rascher ab als mit dem Sonnenkollektor. Bei schönem Wetter oder Versuch Nr. 4 (Abb. 2) war dies nicht so ausgeprägt wie bei kälterem und feuchterem Wetter des Versuchs Nr. 6 (Abb. 3).

Das für die Abtrocknung massgebende Sättigungsdefizit verbesserte sich mit dem Luftentfeuchter um das 1,5- bis 4,8fache.

Bei schönem Wetter resultierte in der Regel ein Wärmegewinn nur während der Nacht und am Vor-

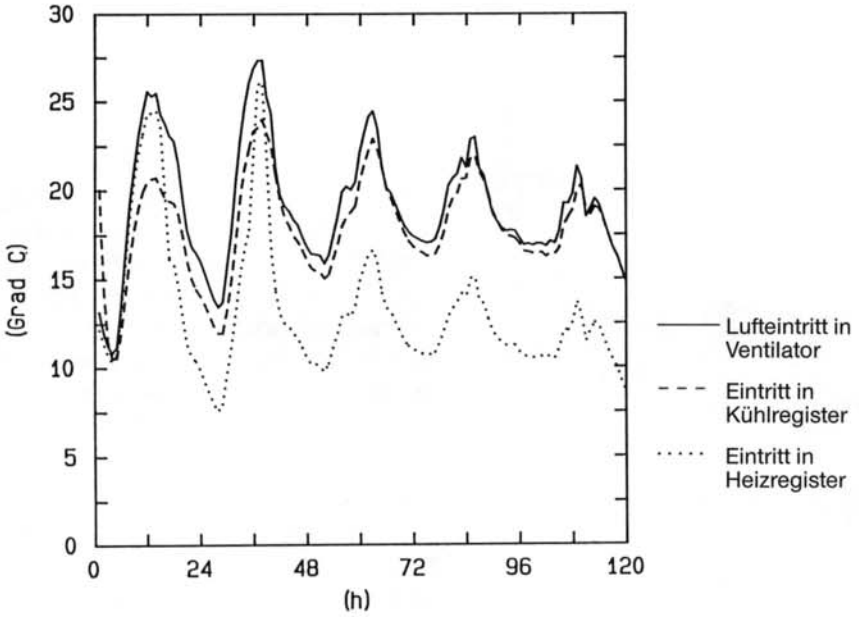

Abb. 4: Versuch Nr. 4. Der Verlauf der Lufttemperatur während einer Schönwetterperiode.

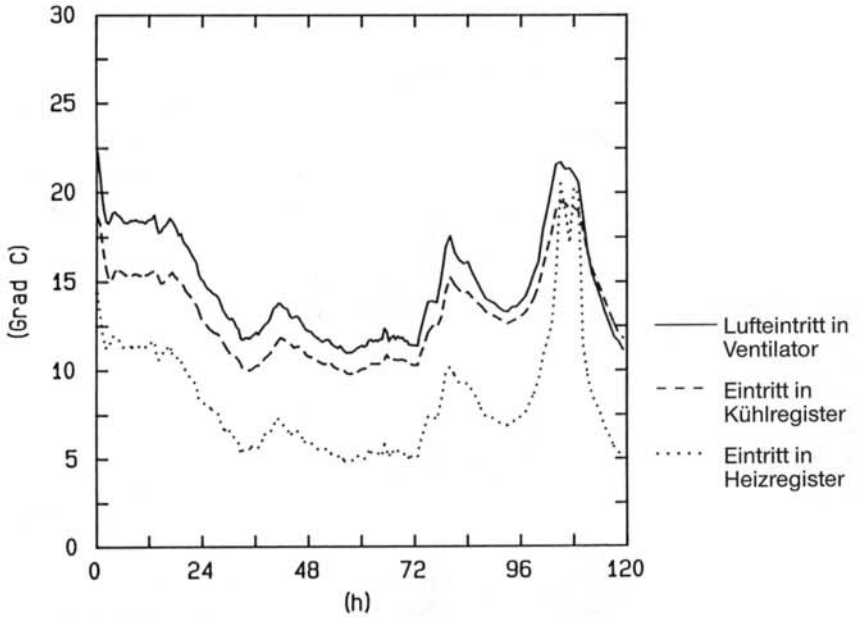

Abb. 5: Versuch Nr. 6. Aus diesem Verlauf der Lufttemperaturen ist die Schlechtwetterperiode ersichtlich.

mittag (Abb. 4). Die Sättigungsdefizit-Erhöhung beinhaltete neben der tieferen relativen Luftfeuchtigkeit auch die Temperaturdifferenz vom Lufteintritt in den Ventilator zum Lufteintritt der Aussenluft. Bei kühlerem Wetter fiel diese Differenz grösser aus (Abb. 5).

Die Laufzeit des Gerätes stimmten nicht immer mit derjenigen des Ventilators überein. Die Aussenfeuchtesteuerung (Mehrpreis Fr. 240.–) schaltete die Luftentfeuchter-Wärmepumpe aus, wenn die relative Luftfeuchte unter etwa 50% fiel.

Der spezifische Wasserentzug schwankte von 0,5 bis 1,7 g/m³ Luft. Der Mittelwert aller Versuche betrug 1,2 g/m³.

Bei schönem Wetter (Versuch Nr. 4) war kaum mit einem Wiederbefeuchten des Heus zu rechnen (Abb. 6). Lag das Sättigungsdefizit der Aussenluft längere Zeit knapp über 0 g/m³, so war mit einem ständigen Entfeuchten und Wiederbefeuchten des Heus zu rechnen (Abb. 7).

Der Stromverbrauch pro kg entzogenes Wasser schwankte von 297 bis 1042 Wh, und pro 100 kg getrocknetes Heu lag der Verbrauch bei 10,6 bis 56,2 kWh und einem Mittelwert von 27,2 kWh.

Damit die Resultate mit anderen Geräten vergleichbar sind, werden die Stundenwerte nach dem Sättigungsdefizit der Aussenluft (=Kühlregister-Eintritt) und nach dem TS-Gehalt des Welkheus klassiert. Die Ergebnisse zeigt Tab. 2.

5. Maistrocknung

Um gehäckselten Mais trocknen zu können, wurde nach Angabe der Lieferfirma die Fläche des Heustockes etwa um die Hälfte verkleinert (Abb. 8). Über dem Rost kamen gelochte Bleche zu liegen. Es musste auf eine dichte Einwandung, stark dimensionierte und dichte Luftkanäle im Hinblick auf den Luftdruck geachtet werden. Mit dem Greifer, bestückt mit einer Maisschaufel, erfolgten fünf Füllungen zu 2 bis 3,3 t. Die gesamte Trocknung erfolgte im Umluftbetrieb, das heisst die feuchte Abluft des Maisgutes wurde immer über das Kühlregister geleitet.

Tab. 3 enthält die Ergebnisse der Abtrocknungsversuche von Mais.

Der Umluftbetrieb erlaubte, die Trocknungsluft bei allen Versuchen fast konstant zu halten. Die Lufttemperaturen lagen im Mittel bei 18 bis 20°C und die relative Luftfeuchtigkeit bei rund 60%. Das Sättigungsdefizit erhöhte

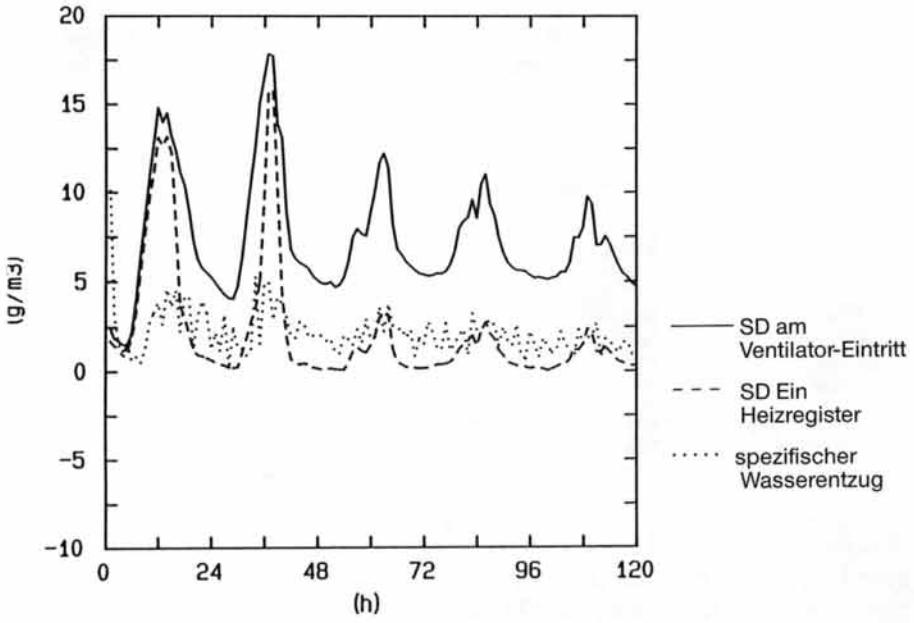

Abb. 6: Versuch Nr. 4. Die Erhöhung des Sättigungsdefizites durch den Luftentfeuchter und der Wasserentzug pro m³ Luft sind deutlich erkennbar.

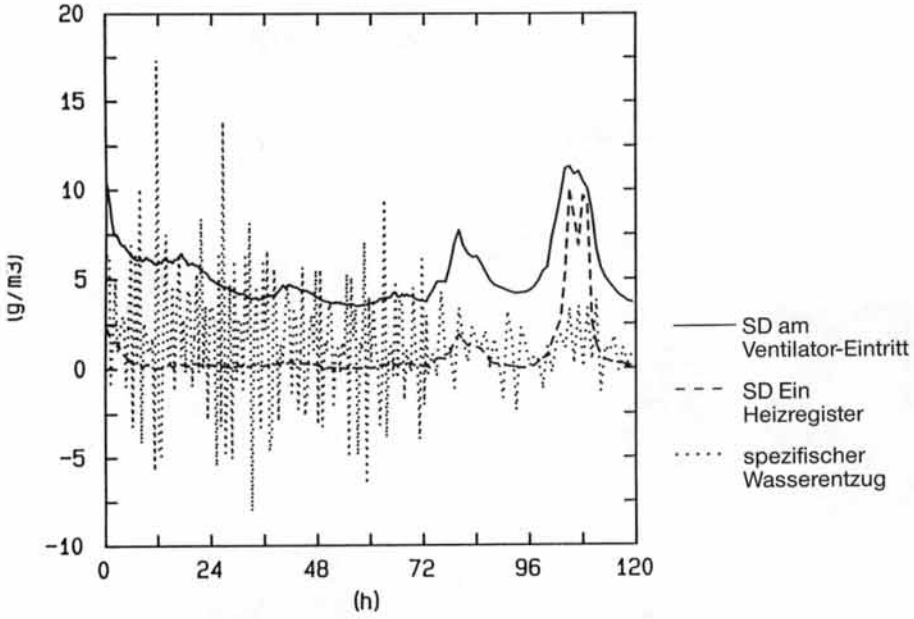

Abb. 7: Versuch Nr. 6. Das wechselnde Ent- und Befeuchten des Heus während einer Schlechtwetterperiode zeigt dieser Ausschnitt.

sich je nach Versuch um das 3,5- bis über 7,6fache.

Der spezifische Wasserentzug schwankte unter diesen Bedingungen nur gering und lag zwischen 1,6 bis 2,3 g/m³ Luft, im Mittel bei 1,9 g/m³. Dementsprechend wichen auch die Zahlen des spezifischen Stromverbrauchs mit 285 bis 388 Wh pro kg entzogenes Wasser nur geringfügig voneinander ab. Der kWh-Verbrauch pro 100 kg Trokkengut streute stark, da nicht alle Füllungen immer auf die Endfeuchtigkeit getrocknet wurden. Im Mittel war ein Stromverbrauch von 63,3 kWh pro 100 kg getrockneter Mais einzusetzen.

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 Trocknungsluft wurde vom Belüftungsventilator über das Kühl- und Heizregister angesaugt. Dies verursachte einen Registerverlust beim Heutrocknen von 0,5 bis 0,7 mbar. Beim Maistrocknen kamen noch Druckwiderstände der Luftrückführung von 0,8 bis 1,6 mbar dazu. Zusammen ergaben dies die Register- und Ansaugdruckverluste.

Maistrocknen bedingt einen druckstabilen Ventilator. Die Gesamtdrücke betrugen je nach Füllhöhe von 0,3 bis 1,2 m 5,2 bis 8,6 mbar. Die Luftrate pro m² Lochboden sank dabei von 0,21 auf 0,16 $m^3/s \cdot m^2$.

Damit auch die Maisversuchsresultate mit anderen Geräten vergleichbar sind, werden die Stundenwerte der Erhöhung des Sättigungsdefizites, des Wasserentzuges und des TS-Gehalts klassiert. Tab. 4 zeigt die Resultate.

6. Schlussfolgerungen

Die BP-Luftentfeuchter-Wärmepumpe vemochte das Sättigungsdefizit der Trocknungsluft im Durchschnitt um das 1,5- bis 4,8fache bei der Heubelüftung zu erhöhen, bei der Maistrocknung war es das 3,5- bis 7,6fache. Die Trocknungsleistung erhöhte sich gegenüber der Kaltbelüftung (Wasserentzug im Durchschnitt 1 g/m³ während zwölf Stunden) um das Doppelte, da mit dem Luftentfeuchter rund um die Uhr getrocknet werden kann. Die Trocknung von gehäckseltem Mais ist mit Kaltbelüftung allein nicht möglich.

Die Verwendung eines Steuerge-

Tabelle 2: Heutrocknung: Erhöhung des Sättigungsdefizites det Umgebungsluft durch den Luftentfeuchter und der Wasserentzug in g/m³ Luft, abhängig vom TS-Gehalt des Welkheus

	Sättigungsdefizit der Umgebungsluft in g/m³				
	kleiner als 2,5	2,5 - 5	5 - 7,5	7,5 - 10	grösser als 10
TS in %					
kleiner als 50	6,2/2,1	11,6/3,4	(15,0/1,6)	14,4/4,8	(13,9/4,2)
50 - 60	6,5/2,0	11,6/3,1	—	—	—
60 - 70	5,7/1,4	10,5/2,9	(11,7/2,2)	(15,1/2,0)	(16,6/3,6)
70 - 80	5,3/1,0	10,7/1,7	13,9/1,6	(14,9/1,1)	(14,0/1,8)
grösser als 80	6,0/0,5	12,0/1,1	14,5/1,1	14,1/1,1	17,5/0,5
Durchschnittliche Stromaufnahme des Luftentfeuchters: 5,7 kW					

Werte in Klammern sind Einzelwerte, bestehen jedoch aus sechs Messungen.

rätes ist bei der Heubelüftung angezeigt, weil bei schlechtem Wetter (zum Beispiel 5 bis 10°C Lufttemperatur und über 90% relative Luftfeuchtigkeit) das Gut dauernd ent- und befeuchtet wird. Dies würde auch den Stromverbrauch pro 100 kg Heu reduzieren, der mit einem Durchschnitt vom 27,2 kWh rund das Doppelte der Kaltbelüftung beträgt. In Gegenden mit Nachttarif werden die Stromkosten gleich sein, weil 40 bis 50% der Belüftungszeit in die Nacht- und Wochenendstunden mit billigem Strompreis fallen. Anderseits benötigt der Luftentfeuchter einen zusätzlichen, relativ hohen (4-kW-Ventilator und 6-kW-Luftentfeuchter) Anschlusswert von 10 kW an das elektrische Netz. Eine zu knapp bemessene Anschlussleitung oder die Verrechnung von Spit-

Tabelle 3: Übersicht der Versuchsresultate 1988 (Durchschnittswerte) gehäckselte Maispflanze

Versuch Nr.		1	2	3	4	5
Einfüllgewicht	kg	2254	2043	3018	3330	2123
TS nach Einfüllung	%	27,7	32,4	28,3	32,5	37,4
TS nach Trocknung	%	62,5	88,7	75,1	88,4	88,5
Lufteintritt am Luftentfeuchter:						
Lufttemperatur	°C	12,6	13,7	12,7	11,7	9,4
Luftfeuchtigkeit	%	89,7	82,6	88,5	91,9	99,0
Sättigungsdefizit (100%)	g/m³	1,2	2,2	1,5	1,0	0
Lufteintritt am Ventilator:						
Lufttemperatur	°C	18,0	19,6	19,0	19,2	17,7
Luftfeuchtigkeit	%	63,5	57,0	59,4	56,9	58,0
Sättigungsdefizit	g/m³	6,0	7,7	7,4	7,6	6,6
Erhöhung Sättigungsdefizit:						
Absolut	g/m³	4,8	5,5	5,9	6,6	6,6
Relativ	%	500	350	493	760	—
Laufzeit Belüftungsventilator	h	44,2	56,7	43,0	83,5	38,8
Laufzeit Luftentfeuchter	h	44,2	56,7	43,0	83,5	38,8
Totaler Wasserentzug	kg	1256	1595	1620	2515	1098
Stündlicher Wasserentzug	kg/h	28,4	28,1	37,7	30,1	28,3
Luftmenge Ventilator	m³/s	5,1	5,0	4,6	3,9	3,9
Spez. Wasserentzug	g/m³	1,6	1,6	2,3	2,2	1,9
Druck unter Gut inkl. Lochblech	mbar	2,9	3,7	5,2	7,4	7,3
Höhe nach Einfüllen	m	0,29	0,45	0,70	0,95	1,22
Register- und Absaugdruckverlust	mbar	2,3	2,0	1,8	1,3	1,3
Leistungsbedarf Ventilator	kW	5,4	5,7	5,4	5,5	5,5
Leistungsbedarf Luftentfeuchter	kW	5,3	5,2	5,3	5,3	5,3
Spez. Stromverbrauch	Wh/kg H_2O	374	388	285	359	384
Stromverbrauch	kWh/dt Gut	66,2*)	82,4	47,5*)	73,5	47,0

*) Nicht fertig getrocknet.

Tabelle 4: Häckselmais-Trocknung: Erhöhung des Sättigungsdefizites der Umluft durch den Luftentfeuchter und der Wasserentzug in g/m³ Luft, abhängig vom TS-Gehalt des Mais

	Sättigungsdefizit der Zuluft in g/m³ kleiner als 2,5	grösser als 2,5
TS in %		
kleiner als 30	6,2/2,0	–
30 – 40	7,0/2,4	14,4/3,2
40 – 50	7,6/2,3	12,6/3,1
50 – 60	6,5/1,7	(10,7/0,2)
60 – 70	6,7/1,7	12,3/1,9
70 – 80	5,9/1,7	10,9/1,3
grösser als 80	6,0/1,4	11,0/0,9
Durchschnittliche Stromaufnahme des Luftentfeuchters: 5,3 kW		

Werte in Klammern sind Einzelwerte, bestehen jedoch aus sechs Messungen.

zenstrom durch das örtliche EW können den Betrieb einer solchen Anlage einschränken oder gar verunmöglichen.

Bei der Planung einer Heubelüftung mit Luftentfeuchter ist der zusätzliche Druckverlust von 0,5 bis 0,7 mbar zu vernachlässigen. Soll die gleiche Anlage jedoch auch für die Maistrocknung eingesetzt werden, muss ein druckstabiler Ventilator mit mindestens 8 mbar Druck und einem 5,5-kW-Motor gewählt werden.

Der Investitionsbedarf des Luftentfeuchters ist für eine Anlagegrösse von 50 m² mit Fr. 18'140.– relativ hoch und bedingt Jahresgrundkosten von Fr. 2439.– (6,7% Amortisation = Fr. 1215.–, 3,6% Zinsanspruch = Fr. 653.–, 3% Reparaturen = Fr. 544.–, 0,15% Versicherung = Fr. 27.–). Die Energiekosten pro dt Heu betragen im Durchschnitt der Versuche von 27,2 kWh zu Fr. –.15 = Fr. 4.10 pro dt. Beim Maistrocknen mit einem Energieaufwand von durchschnittlich 63,3 kWh betragen die Stromkosten Fr. 9.50 pro dt. Die Differenz zu den Trocknungskosten in einer Grossanlage (Grastrocknung) darf nicht als Gewinn verbucht werden, weil für das täglich notwendige Umschichten des Maises 20 bis 30 Minuten Arbeitszeit eingesetzt werden müssen. Auf der anderen Seite ist der zusätzliche Investitionsbedarf (zum Beispiel Fr. 32.– pro 1 m² Lochblech für die Maistrocknung) aufzurechnen.

An einen wirtschaftlichen Einsatz einer solchen Anlage ist nur in Betrieben mit extrem schlechten Trocknungsbedingungen oder allenfalls als Ersatz für die Luftanwärmung mittels Ölofen zu denken. Eine Mehrfachnutzung (neben Heutrocknung auch Getreide- und Häckselmais-Trocknung) erlaubt es, die hohen Jahresgrundkosten auf mehrere Produkte zu verteilen.

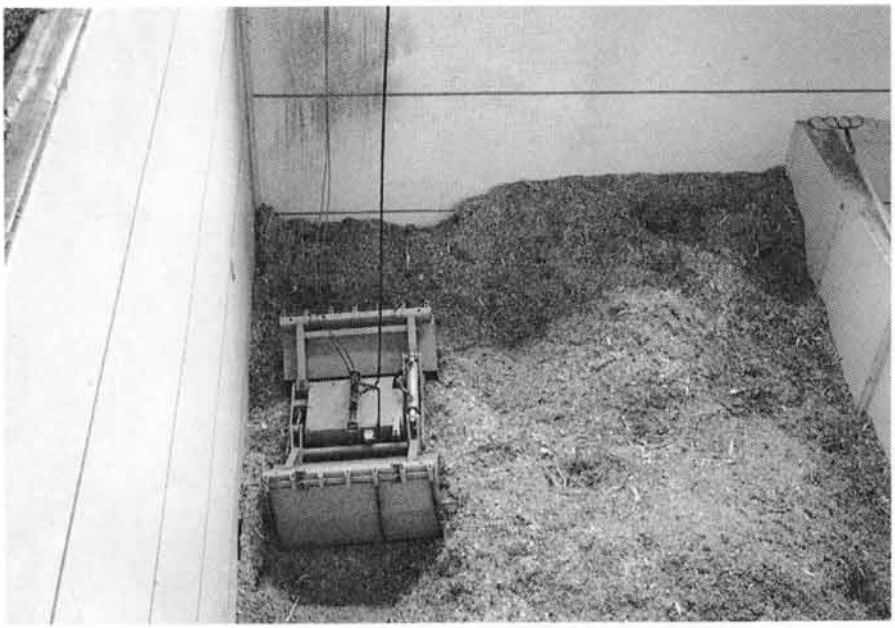

Abb. 8: Eine halbe Belüftungsfläche wurde mit zwei 2 m hohen Wänden ergänzt und der Rost mit Lochblechen belegt. Ein Greifer mit Schaufel diente zum Füllen und Entleeren dieser Anlage.