



Heu- und Maistrocknung mit Wärmepumpe

Jürg Baumgartner

Das Mähen von Heugras, das Bearbeiten des Futters auf dem Feld und das Einbringen des Welkheues können heute mit leistungsfähigen Maschinen erledigt werden. Oft verursacht jedoch die Heubelüftung einen Engpass in der Futterkonservierung. Der Unterdachtrocknung mit natürlicher Ansaugluft sind vom Klima her enge Grenzen gesetzt. So ist es in der Regel während der Nacht und bei Regenwetter kaum möglich, dem Futter Wasser zu entziehen. Um die Wasseraufnahmefähigkeit der Trocknungsluft zu verbessern, kann die Luft entweder erwärmt oder entfeuchtet werden. Die Hetroc-Luft-Wärmepumpe nutzt die erste Möglichkeit.

1. Einleitung

Um die Trocknungsleistung einer Heubelüftungsanlage zu erhöhen, kann die relative Luftfeuchtigkeit durch eine Luftanwärmung gesenkt werden. Dies bewirkt ein erhöhtes Wasseraufnahmevermögen der Luft,

oder das Sättigungsdefizit nimmt zu. Das Sättigungsdefizit ist die Differenz des vorhandenen Wassergehaltes der Luft bis zum theoretisch möglichen bei 100% relativer Feuchtigkeit. Beim Trocknungsvorgang wird jedoch die Luft nie auf 100% befeuchtet. Zudem gibt die Pflanze das Wasser bei höherem TS-Gehalt langsamer ab als bei feuchtem Futter.

Die Luftanwärmung zur Trocknungsbeschleunigung ist schon lange bekannt. Im vergangenen, nassen Frühjahr 1987 wurden wieder zahlreiche **Warmluftöfen** mit Ölheizung eingesetzt, um schlechte Heustöcke und Verluste zu vermeiden. Nachteile dieses Systems sind:

- Der Energiepreis schwankt stark.
- Die Verbrennung von Erdöl ist nicht mehr zeitgemäss.
- Schlecht gewartete Öfen stossen Schadgase aus.
- Die provisorische Aufstellung erhöht die Brandgefahr.
- Um eine Wasserverschmutzung durch Lecköl zu vermeiden, ist eine Tankanlage erforderlich.

Die in Dächern eingebauten **Sonnenkollektoren** bewirken

ebenfalls eine Luftanwärmung. Gegenüber einer Kaltbelüftung weisen sie je nach Auslegung fast eine doppelte Trocknungsleistung auf. In der Nacht und bei Regenwetter zeigen sie aber keine Wirkung.

Geräte, die teilweise die Luft vom Wasser befreien und sie zugleich noch etwas anwärmen, heissen **Luftentfeuchter-Wärmepumpen**. Ein Vertreter dieses Systems steht zurzeit an der FAT in Prüfung.

Als Alternative zur Ölofenheizung kann die **Luft-Luft-Wärmepumpe** angesehen werden. Das Hetroc-Gerät wurde im Jahre 1985 für die Emdrocknung und im Frühjahr 1986 für die Heuernte an der FAT-Versuchsanlage eingesetzt (Abb.1).

2. Funktion der Hetroc-Wärmepumpe

Abb. 2 zeigt die Wirkungsweise der Wärmepumpe. Die Umgebungsluft (1) wird durch den Ventilator (2) der Belüftung durch das Heizelement (3) angesaugt. Dabei muss der Lüfter

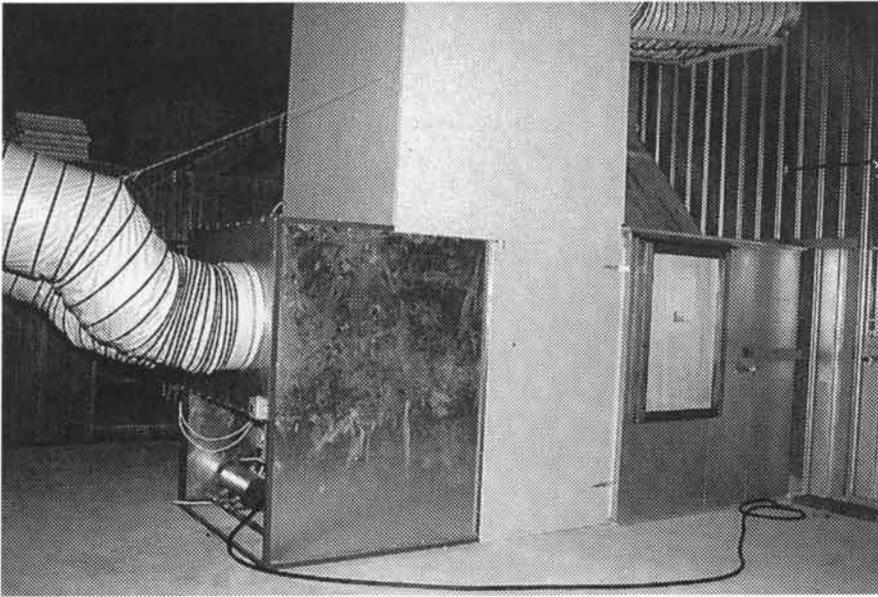


Abb. 1: Aussenansicht der Luft-Luft-Wärmepumpe in der FAT-Versuchshalle mit Rück- und Abluftschläuchen.

(2) den zusätzlichen Druckverlust im Heizregister (3) überwinden. Die erwärmte Luft wird durch den Ventilator über den Luftkanal und das Rostsystem

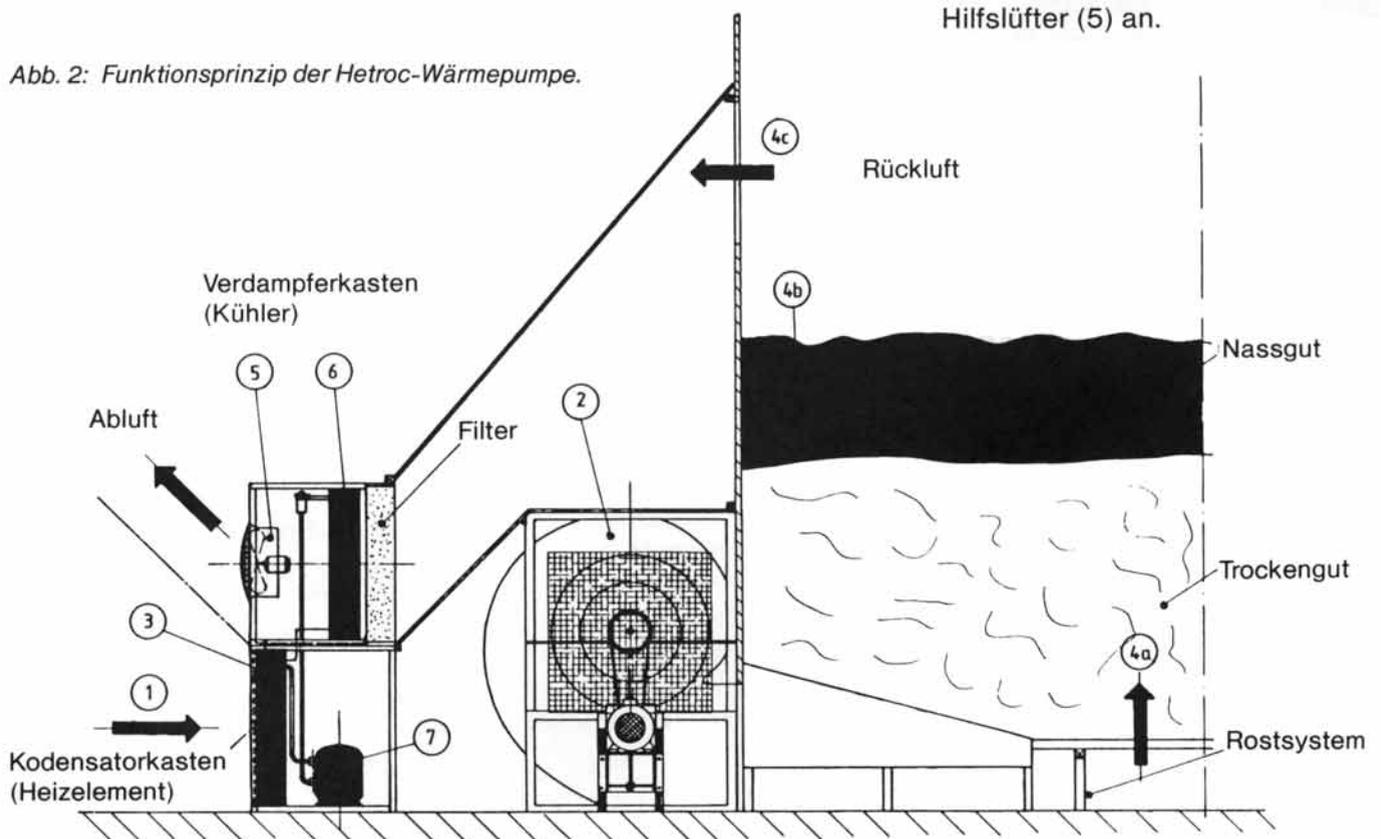
durch den Stock (4a) und das zuletzt eingebrachte Nassgut (4b) geführt. Beim Durchströmen der Trocknungsluft durch das Welkheu wird sie befeuch-

tet. Ein Teil der Abluft (4c) wird mit zwei Hilfsventilatoren (5) ins Freie geführt. Dabei passiert die feuchte Rückluft einen Filter und ein Kühlregister (6). Dieses Register entzieht der Luft Wärme. Dabei kühlt sich die Rückluft meistens unter den Taupunkt ab und es wird zusätzlich Kondensationswärme gewonnen.

Die Funktion gleicht derjenigen eines Kühlschranks. Bei diesem liegt der Zweck beim Kühlen des Inhaltes (Wärmeentzug aus den Lebensmitteln und dem Innenraum). Die Abwärme ist Nebensache. Bei der Wärmepumpe ist die gewonnene Wärme wichtig. Die abgekühlte und trockene Luft hingegen ist Nebensache und wird ins Freie geblasen.

Als Massstab von Wärmepumpen dient die Leistungsziffer. Diese gibt das Verhältnis von der erzeugten Wärmeleistung (Temperaturdifferenz und Luftmenge durch das Heizregister) zur aufgenommenen Leistung des Kompressors (7) und der Hilfslüfter (5) an.

Abb. 2: Funktionsprinzip der Hetroc-Wärmepumpe.



3. Technische Daten und Preis der Hetroc-Wärme-Pumpe

Typ des geprüften Gerätes: HE 100
 Abmessungen: Breite: 1645 mm
 Höhe: 2300 mm
 Länge: 900 mm
 Gewicht (ohne Luftschläuche): 496 kg
 Nennleistung Kompressor+ Hilfsventilatoren: 6 kW
 Preis 1987 (ohne Luftschläuche): Fr. 16'850.-

4. Versuchsdurchführung und -resultate

Die Versuche Nr. 1, 2 und 3 umfassten die Abtrocknungen von Emd im Sommer 1985 und die Versuche Nr. 4 und 5 von Heu im Frühjahr 1986. Das eingeführte Welkheu wurde pro Ladewagen je zur Hälfte mit dem Greifer auf die beiden Versuchsheustöcke verteilt.

An der Anlage 1 erfolgte die Luftanwärmung mit einem Sonnenkollektor und an der zweiten mit der Luft-Luft-Wärmepumpe.

Bei jedem Einfüllen wurde das Welkheu gewogen und der Trockensubstanzgehalt ermittelt. Alle zehn Minuten wurden Temperaturen, Luftfeuchtigkeiten, Luftmenge, Stockdruck usw. gemessen. Aus Lufttemperatur, Luftfeuchtigkeit und Barometer liess sich das Sättigungsdefizit berechnen. Die sechs Messwerte pro Stunde wurden zu einem Mittelwert zusammengezogen.

Für jeden Versuch wurden Durchschnittswerte ermittelt. Eine Übersicht der Versuchsergebnisse 1985/86 enthält Tab. 1.

Tabelle 1: Übersicht der Versuchsergebnisse 1985/86 (Durchschnittswerte)

Versuch-Nr.		1	2a	2	3	4a	4b	5
Einfüllgewicht	kg	8272	5433	5433	7200	13669	13669	4847
TS nach Einfüllen	%	58,6	66,4	65,8	74,1	45,6	45,6	61,8
TS nach Trocknung	%	88,0	86,3	88,0	88,0	87,1	88,0	87,5
Lufteintritt am Heizelement:								
Lufttemperatur	°C	20,4	22,0	22,5	16,8	15,0	13,2	15,4
Luftfeuchtigkeit	%	71,2	73,4	76,0	80,0	77,2	79,4	84,1
Sättigungsdefizit (100%)	g/m ³	6,4	6,0	5,9	4,0	3,7	3,1	2,9
Lufteintritt am Ventilator:								
Lufttemperatur	°C	27,3	29,5	29,5	24,2	21,5	18,4	20,5
Luftfeuchtigkeit	%	47,1	46,9	49,9	50,9	52,2	58,8	60,7
Sättigungsdefizit	g/m ³	16,3	17,4	16,8	13,0	11,1	8,7	8,1
Erhöhung Sättigungsdefizit:								
Absolut	g/m ³	9,9	11,4	10,9	9,0	7,4	5,6	5,2
Relativ	%	255	290	285	325	300	381	379
Laufzeit Belüftungsventilator	h	72,5	22,3	28,1	26,6	188,0	209,4	57,2
Totaler Wasserentzug	kg	2764	922 ¹⁾	1144 ¹⁾	533 ¹⁾	6384	6454	1204 ¹⁾
Stündlicher Wasserentzug	kg/h	38,1	41,3	40,7	20,0	34,0	30,8	21,0
Luftmenge Ventilator	m ³ /s	5,1	4,8	4,8	4,4	5,0	5,1	5,7
Spez. Wasserentzug	g/m ³	2,1	2,4	2,4	1,3	1,9	1,7	1,0
Stockdruck	mbar	2,2	2,9	2,9	4,0	3,9	4,0	4,9
Stockhöhe nach Einfüllen	m	1,1	2,4	2,4	3,8	1,7	1,7	2,5
Stockhöhe abgesetzt	m	0,9	2,0	2,0	3,4	1,4	1,4	2,0
Registerdruckverlust	mbar	1,5	1,4	1,4	1,2	1,2	1,3	1,6
Leistungsbedarf Ventilator	kW	3,5	3,6	3,6	3,7	4,6	4,7	6,5
Leistungsbedarf Hetroc-Gerät	kW	7,0	6,3	6,3	6,4	5,7	5,7	6,0
Spez. Stromverbrauch	Wh/kg H ₂ O	276	239	245	503	304	336	590
Stromverbrauch	kWh/dt Heu	13,8	-	6,9	4,4	-	30,7	20,9
Leistungsziffer Hetroc-Gerät		5,8	6,4	6,3	5,9	6,5	5,3	5,6

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

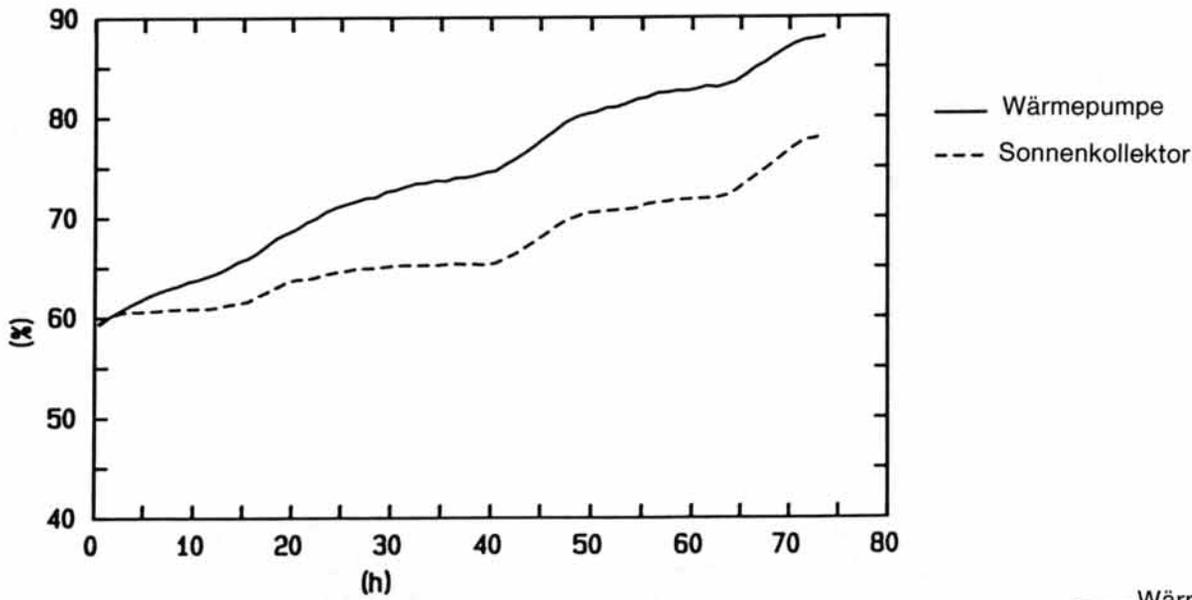


Abb. 3: Versuch-Nr. 1, TS-Gehaltsverlauf nach dem Einfüllen.

5. Beurteilung der Versuchsergebnisse

Der Versuch Nr. 1 fiel in eine Schönwetterperiode, der Versuch Nr. 4 nach dem vierten Tag in eine ausgesprochen schlechte. Die Zunahme des Trockensubstanzgehaltes nach dem Einfüllen der Versuche 1 und 4 zeigen die Abb. 3 und 4. Die Trocknungsleistung der Belüftung mit Wärmepumpe ist derjenigen mit Sonnenkollektor deutlich überlegen, da erstere unter guten Bedingungen rund um die Uhr bis zum TS-Gehalt von 88% laufen kann. Bei beiden Belüftungen wurden Intervall-Steuergeräte eingesetzt. Der Versuch Nr. 4 hat gezeigt, dass ohne Steuergeräte bei kaltem und feuchtem Wetter Wiederbefeuchtungen des Heues möglich sind.

Der Verlauf des Sättigungsdefizites beim Eintritt der Luft in das Heizregister und in den Ventilator sowie den entsprechenden Wasserentzug stellen die Abb. 5 und 6 dar. Sie zeigen, dass kurz-

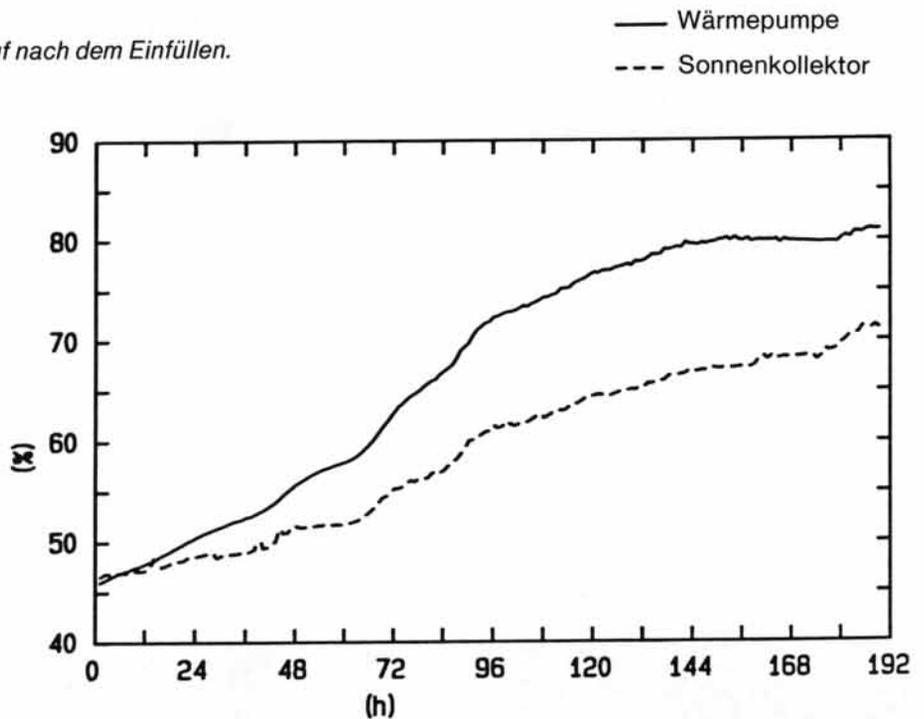


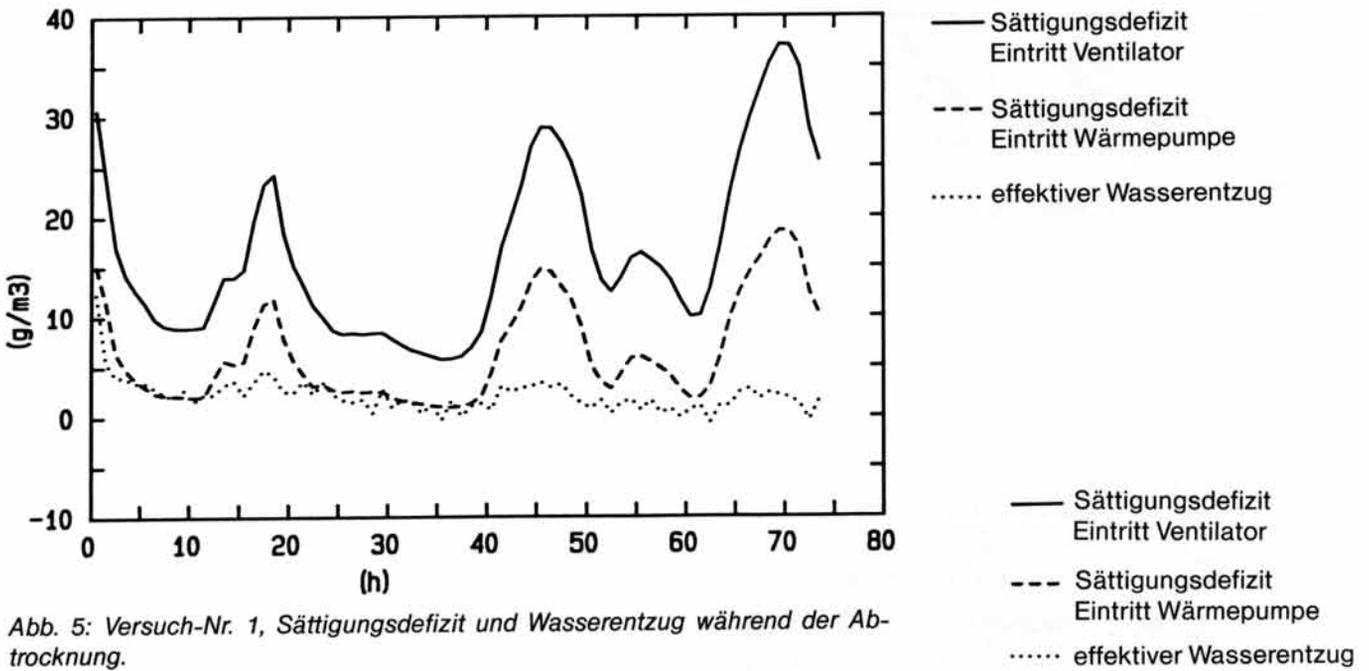
Abb. 4: Versuch-Nr. 4, TS-Gehaltsverlauf nach dem Einfüllen.

zeitige Sättigungsdefizitspitzen keinen grossen Anstieg des Wasserentzuges nachziehen. Bei längerdauernden Schlechtwetterperioden lässt sich ein Wiederbefeuchten des Stockes nicht vermeiden, sofern eine Selbstwärmung des Heues ausgeschlossen wird.

Die Abb. 7 und 8 enthalten den Temperaturverlauf beim Ein- und Austritt in das Heiz- und Kühlregister. Abb. 8 zeigt, dass unter

schlechten Wetterbedingungen die Austrittstemperatur beim Kühlregister auf den Gefrierpunkt sinken kann. Nach Angaben des Herstellers wird das Kühlregister vergrössert und ein Regler eingebaut. Diese Massnahmen sollen in Zukunft eine Vereisung verhindern.

Versuch Nr. 2 und 4 wurden zweifach ausgewertet. Nr. 2a und 4a beinhalten nur den Dauerbetrieb, während in Nr. 2



und 4 auch die Intervallzeiten eingeschlossen sind. Die Unterschiede im Wasserentzug und im Stromverbrauch betragen bis zu 10%.

Deutlich schlechter wird der Wasserentzug, wenn mit zu hoher Luftmenge belüftet wird (Versuch Nr. 5). Der Stockdruck und die Lüfterleistung sowie der Stromverbrauch nehmen zu. Dieser Fall wird dann eintreten, wenn ein zu kleines Gerät an eine Belüftungsanlage montiert wird, sei es aus Kostengründen oder weil nur ein kleiner elektrischer Anschlusswert vorhanden ist.

6. Weitere Ergebnisse

Damit die Resultate mit anderen Geräten vergleichbar sind, werden die Stundenwerte nach dem Sättigungsdefizit der Hallenluft (Ansaugluft des Heizregisters) und nach dem TS-Gehalt des Welkheues klassiert. Die Ergebnisse zeigt Tab. 2.

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

TS in %	Sättigungsdefizit der Umgebungsluft in g/m ³				
	kleiner als 2,5	2,5–5	5–7,5	7,5–10	grösser als 10
kleiner als 50	12,9/4,0	15,9/5,2	–	–	–
50–60	9,1/2,8	13,9/3,6	18,8/3,3	23,5/4,5	29,3/5,3
60–70	9,1/2,3	11,6/2,5	14,7/3,1	19,3/3,2	26,6/4,5
70–80	6,3/0,8	10,8/1,9	16,3/2,1	18,4/2,8	26,3/3,3
grösser als 80	5,7/0,7	8,8/1,0	13,5/1,4	18,9/2,8	29,4/2,8
Durchschnittliche Stromaufnahme der Wärmepumpe: 6,1 kW					

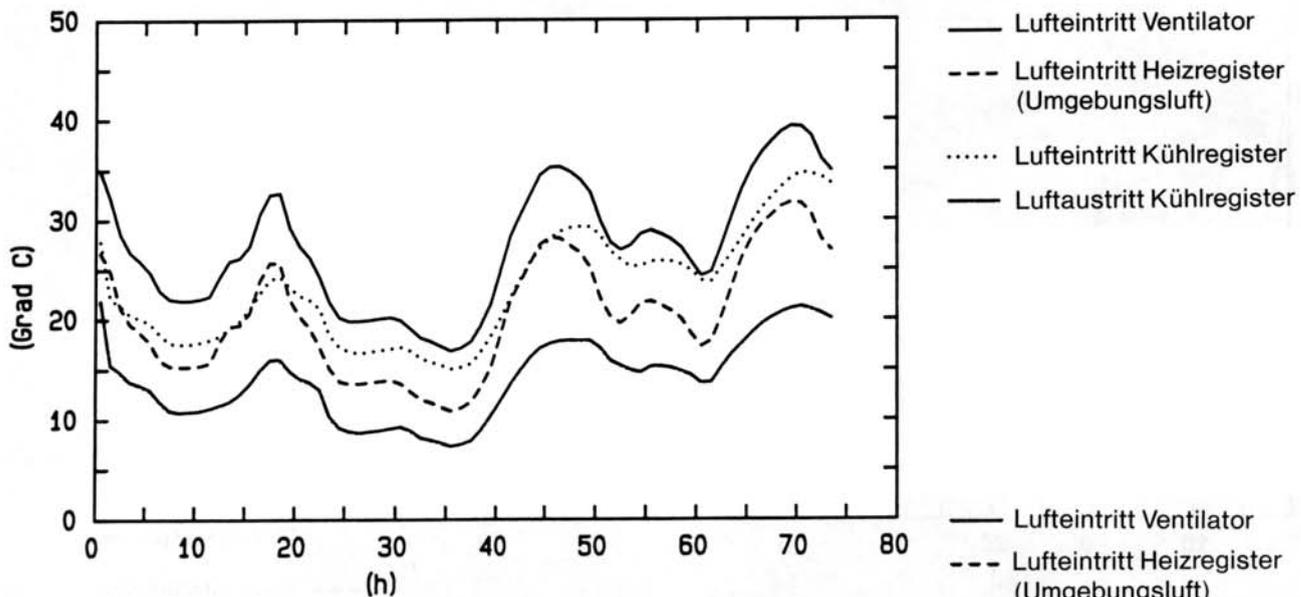


Abb. 7: Versuch-Nr. 1, Verlauf der Lufttemperaturen über die Versuchsdauer.

7. Maistrocknung

Zwei Abtrocknungsversuche mit gehäckseltem Mais haben nicht befriedigt. Der für die Trocknung benützte Prototyp (Trockner mit Rührwerk) wird nicht weiter entwickelt. Es hat deshalb keinen Zweck, diese Versuchsergebnisse zu publizieren.

Mit einem neuen Trockner wird im Herbst 1987 versucht, Mais zu trocknen. Das Problem liegt beim Zusammenbacken des Nassgutes, wenn es nicht mehrmals pro Tag umgeschichtet wird.

8. Schlussfolgerungen

Die Hetroc-Luft-Wärmepumpe vermochte das Sättigungsdefizit der Trocknungsluft im Durchschnitt um das 2,5- bis 3,8fache bei der Heubelüftung zu erhöhen. Die Luftanwärmung schwankte von 5,1° C bis 7,5° C, je nach Temperatur der ange-

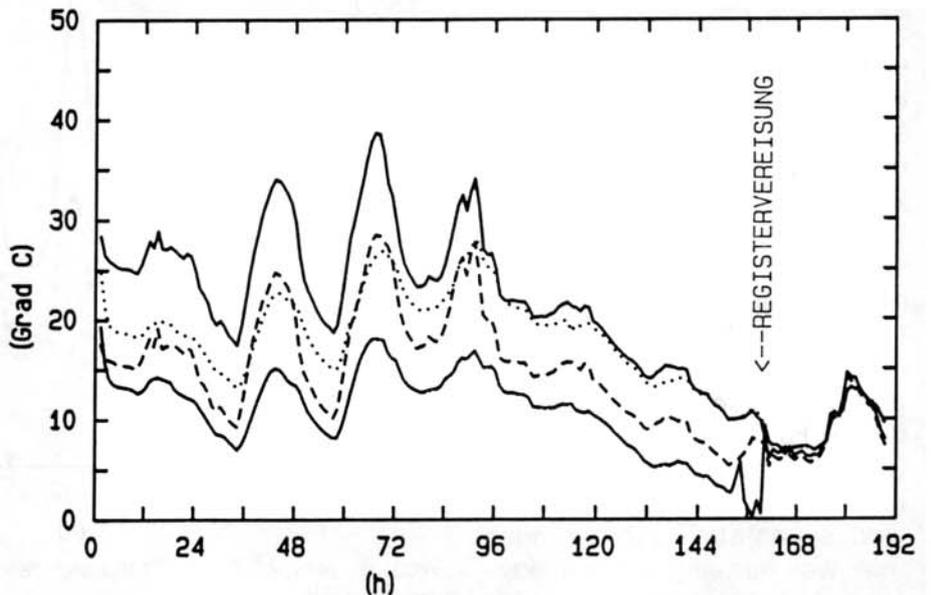


Abb. 8: Versuch-Nr. 4, Verlauf der Lufttemperaturen über die Versuchsdauer.

saugten Luft und den Klimabedingungen.

Die Trocknungsleistung erhöhte sich gegenüber der Kaltbelüftung (Wasserentzug im Durchschnitt 1 g/m³) um mindestens das Doppelte, da mit der Wärmepumpe rund um die Uhr getrocknet werden kann. Die Verwendung eines Steuergerätes ist angezeigt, weil bei schlechtem Wetter (zum Beispiel 10° C

und 90% relative Luftfeuchtigkeit) und fast trockenem Futter das Heu wieder befeuchtet würde.

Bei der Planung einer Heubelüftung mit Wärmepumpe ist ein Druckverlust von 1,2 mbar bis 1,6 mbar zu berücksichtigen. Dieser Registerverlust des Heizelementes hing neben der Luftmenge auch von der Registerverschmutzung ab.

Der Stromverbrauch von 4,4 kWh bis 30,7 kWh pro dt Heu sowie der spezifische Stromverbrauch pro kg entzogenes Wasser von 239 Wh bis 590 Wh lagen im Rahmen einer Kaltbelüftung. In Gegenden mit Nachttarif werden hingegen die Stromkosten niedriger, weil 40% bis 50% der Belüftungszeit in die Nacht- und Wochenendstunden mit billigem Strompreis fallen. Andererseits benötigt die Wärmepumpe einen zusätzlichen relativ hohen (3,5 kW Ventilator + 6 kW Wärmepumpe) Anschlusswert an das elektrische Netz. Eine zu knapp bemessene Anschlussleitung oder die Verrechnung von Spitzenstrom durch das örtliche EW können den Betrieb einer Wärmepumpe ein-

schränken oder gar verunmöglichen. Für diese Fälle will die Herstellerfirma andere Antriebsarten anbieten.

Die Leistungsziffern von 5,3 bis 6,5 der Hetroc-Wärmepumpe sind gegenüber ähnlichen Produkten überdurchschnittlich.

Der Investitionsbedarf der Wärmepumpe für diese Anlagegrösse ist mit Fr. 16'850.- relativ hoch und bedingt Jahresgrundkosten von Fr. 2260.- (6,7% Amortisation = Fr. 1125.-, 3,6% Zinsanspruch = Fr. 605.- 3% Reparaturen = Fr. 505.-, 0,15% Versicherung = Fr. 25.-). Die Betriebskosten pro dt Heu betragen im Durchschnitt der Versuche mit einem Verbrauch von 15,3 kWh à Fr. -.15 = Fr. 2.30 pro dt. Geht man davon aus, dass

die geprüfte Wärmepumpe zwei Stöcke à zirka 250 m³ pro Saison trocknen kann (20 bis 25 GVE), betragen die Fixkosten pro dt Heu Fr. 4.50 zuzüglich Fr. 5.10 für die Belüftungsanlage entsprechend Fr. 9.60 pro dt.

An einen wirtschaftlichen Einsatz einer solchen Anlage ist nur in Betrieben mit extrem schlechten Trocknungsbedingungen und allenfalls als Ersatz für die Luftaufheizung mittels Ölofen in Verbindung mit einer Erhöhung der Grundfutterqualität und einer damit verbundenen Verbesserung der Grundfuttermilchleistung oder aber für Mehrfachnutzung (Getreide- und Maistrocknung) zu denken.