

Heutrocknungsverfahren im Vergleich

Alfred Pöllinger^{1*}

Zusammenfassung

Am LFZ Raumberg-Gumpenstein wurde ein über drei Versuchsjahre (2010 bis 2012) laufender Vergleich von vier verschiedenen Konservierungsverfahren - Rundballensilage, Bodenheu, Kaltbelüftungsheu, Warmbelüftungsheu (solarunterstützte Entfeuchtertrocknung) - für Grünlandfutter durchgeführt. Dabei stand die effiziente Heutrocknung mit einer Luft-Entfeuchteranlage mit 16 kW Anschlussleistung und mit einer modernen Steuerungs- und Regeltechnik ausgestattet - im Mittelpunkt des Interesses. Kombiniert wurde die Luft-Entfeuchteranlage mit einer solaren Unterdachabsaugungsanlage mit 410 m² Kollektorfläche. Die Stockgrundfläche wurde mit 96 m² gemessen und die Stockhöhe mit 6 m. Der Ventilator mit 22 kW Anschlussleistung lieferte max. 55.000 m³/h und bei reduzierter Frequenz - bei gleichzeitigem Entfeuchterbetrieb - und befüllter Box 30.000 m³/h. Die Kaltbelüftung wurde in einer 70 m² großen Heubox mit 3,90 m Boxenhöhe und einem Ventilator mit 5,5 kW durchgeführt. Die Einfuhrfeuchten lagen bei der Kaltbelüftungsvariante bei rund 25% (23 bis 34%) und bei der solarunterstützten Luft-Entfeuchtervariante bei rund 35% (30 bis 50%). Am Feld differenzierten sich die Verfahren einerseits durch unterschiedliche Feldliegezeiten, Bearbeitungsgänge und dadurch über die Höhe an Bröckel- und Rechverlusten. Die Feldliegezeiten schwankten zwischen den Schnitten am stärksten - von 2 (Silage, 2. Schnitt) bis 72 Stunden (Bodenheu, 4. Schnitt). Von Variante zu Variante lag im Schnitt jeweils ein Halbtage längere Feldliegezeit. Nur das Bodenheu konnte beim vierten Schnitt in der Regel nicht mehr bis zur lagerstabilen Entfeuchte von 13% am Feld fertig getrocknet werden. Hinsichtlich der Bearbeitungsgänge unterscheiden sich die Varianten vor allem bei der Anzahl der Zettvorgänge - durchschnittlich 1x bei der Silage, 2x bei der Warmbelüftung, 3x bei der Kaltbelüftung und 4x bei der Bodenheutrocknung. Die Varianten Bodenheuwerbung und Warmbelüftung unterscheiden sich hinsichtlich der Bröckel- und Rechverluste durchschnittlich um 190 kg TM/ha und Schnitt. Die Unterdach-Trocknungsdauer konnte sowohl mit der Kaltbelüftung als auch mit der Warmbelüftung im Durchschnitt deutlich unter der geforderten 72 Stundenmarke gehalten werden. Nur bei technischen Problemen - Überlastung des Stromkreises - 50 Ampere Sicherung

bei gleichzeitigem Entfeuchterbetrieb und Freischalten der vollen Ventilatorleistung - kam es vereinzelt zu längeren Einschalt Dauern.

Die Luftentfeuchteranlage konnte vor allem im Jahr 2012 und 2013 problemlos betrieben werden. Die Entfeuchterleistung erreichte im Einzelfall 60 l Wasserabscheidung pro Stunde (im Schnitt 35 l/Stunde).

Die Bröckel- und Rechverluste lagen beim Bodenheu mit 386 kg TM/ha und Schnitt deutlich am höchsten. Vom Futter der Entfeuchtertrocknungsvariante blieb um 190 kg TM/ha und Schnitt weniger an Bröckel- und Rechverlusten am Feld liegen (im Mittel 196 kg TM/ha und Schnitt).

Bei den Stromverbrauchsmessungen in den Jahren 2011 und 2012 wurden teilweise deutlich höhere Energieverbrauchswerte gemessen, als es in der Werbung verschiedener Firmen dargestellt wird. Die günstigsten Werte wurden dabei mit der Kaltbelüftung mit 1,4 Cent/kg Heu erreicht (0,4 bis 2,4 Cent/kg Heu - bei 15 Cent/kWh). Die solar-unterstützte Luftentfeuchtervariante lag im Mittel bei 2,9 (1,4 bis 4,5) Cent/kg Heu.

In einer abgegrenzten Kalkulation ist allerdings klar zu erkennen, dass die Fixkosten die deutlich höhere Kostenbelastung darstellen. Jedes Kilogramm auf einer Entfeuchteranlage getrocknete Futter wird mit durchschnittlich 5,5 Cent/kg Heu belastet, während es bei der Kaltbelüftung „nur“ 1,7 Cent/kg Heu sind. In dieser Kalkulation sind noch keine Gebäudekosten und Ein- und Auslagerungskosten eingerechnet, die für beide Heutrocknungsverfahren gleichermaßen zu kalkulieren wären. Um den Anforderungen hoher Grundfutterleistung auch auf dem Heubetrieb gerecht werden zu können, braucht es allerdings eine leistungsfähige und weitestgehend im Betrieb witterungsunabhängige (Nachtbetrieb, Schlechtwetter) Trocknungstechnik. Die höheren Kosten müssen über höhere Produktpreise und teilweise über eine Flächenprämie abgegolten werden. Die Bodenheutrocknung ist jedenfalls nur in den Sommermonaten Juni bis August ohne größeres Verlustrisiko möglich und keinesfalls für reine Heubetriebe als alleinige Konservierungsform geeignet.

Schlagnworte: Heutrocknung, Verfahren, Vergleich, Entfeuchter, Energiebedarf

¹ LFZ Raumberg-Gumpenstein, Institut für Artgemäße Tierhaltung und Tiergesundheit, Abteilung für Innenwirtschaft, Raumberg 38, A-8952 IRDNING

* Dipl.-Ing. Alfred PÖLLINGER, alfred.poellinger@raumberg-gumpenstein.at



Summary

At the federal research institute Raumberg-Gumpenstein four different grassland-forage conservation systems ((1) round bale silage, (2) hay making under field conditions, hay drying under artificial conditions - (3) without and (4) with an air heating equipment - roof solar collector combined with a heat pump dehumidifier) have been investigated over three years (2010-2012). The main focus was given to the heat pump dehumidifier technique. The test facility at the federal research institute Raumberg-Gumpenstein is a box dryer consisting of a centrifugal fan (22 kW) and a dehumidifier heat pump (16 kW) with the necessary control and regulation technology. The roof is designed as a solar collector with 410 m² net area. With a recirculation flap switching between roof suction and recirculation mode is possible. The area of the box dryer is 96 m² (steel grating) and the height is 6 m. The centrifugal fan achieves a performance of 55.000 m³.h⁻¹, maximum and 30.000 m³.h⁻¹ when both techniques were working (heat pump dehumidifier and the centrifugal fan). In this case the fan was regulated to make less rotations and to use less energy < 30 Ampere. The hay drying equipment without an air heating equipment (3) was a box with 71 m² area and boarded by 3.9 m high walls. This box was combined with a centrifugal fan (5,5 kW).

The dry matter content by harvesting the forage was different between the conservation systems. The dry matter content of the forage for the hay drying equipment without air heating was in the average by 75% (range between 77 and 66% DM Content) at the beginning of the artificial hay drying process. The forage which was filled in the box with the dehumidifier heat pump showed a DM content round about 65% (range 70 to 50% DM Content).

Differences were measured by the length of the field laying period (period between mowing and self loading trailer harvesting) between the conservation systems. The general range goes from two (silage, second cut) to 72 hours (conservation system (2), fourth cut). Under regular conditions forage for the conservation system (1) was harvested 10 hours, for the system (2) 24 hours, for the system (3) 33 hours and for the system (4) 45 hours after mowing. Hay making under field conditions is under Austrian weather conditions normally not possible in the autumn (September - October) and difficult in

spring time (May). There are also differences in working process between the systems. Forage for silage was tedded once a time, forage for the conservation system (2) was tedded two times, forage for the conservation system (3) three times and forage for the conservation system (4) was tedded four times in the average. Related to crumble losses by the forage preservation system (2) 386 kg DM.ha⁻¹.cut⁻¹ got lost, 190 kg DM more than by the forage preservation system (4).

Under regular conditions, the drying time under artificial conditions (3) and (4) was less than 72 hours. Conservation experts recommend no longer drying times than 72 hours should be used to prevent microbial damage. Only by technical problems with the dehumidifier heat pump the drying period was longer. During 2012 and 2013 there were no more technical problems. In this time the performance of the dehumidifier heat pump reached 60 l.h⁻¹, average 36 l.h⁻¹, the velocity of the air was 2,4 m.sec⁻¹ (through the dehumidifier register). The velocity should be not more than 3.0 m.sec⁻¹.

The energy consumption was measured too. The lowest energy consumption was measured by the forage preservation system (3) - 80 kWh.t⁻¹ DM. The energy demand for the humidifier pump heater system (4) was 170 kWh.t⁻¹ DM. The costs for electricity per Kilogramm hay differ between 0.4 and 2.4 Cent by hay making with system (3) and between 1.4 and 4.5 Cent by hay drying with system (2) - 15 Cent per kWh were calculated.

In a total cost calculation (hay drying technique - fan, dehumidifier pump, box, solar collector, regulation technique), you can see, that the fixed cost are more important than the variable cost (*table 10*). The fixed cost per Kilogramm hay are 5.5 Cent by the hay making system (2) and 1.7 Cent by the hay making system (3). The example was calculated without building and indoor crane costs. If you want to run a professional dairy farm, forage based on hay only, you must investigate in highly efficient hay drying techniques. The dehumidifier pump heat is one good possibility to achieve the goal of a high forage quality, less crumble losses also under difficult weather conditions in the spring time and in the autumn.

Key words: hay drying, technique, comparison, dehumidifier pump heater, energy demand

Einleitung

Die traditionelle Futterproduktion in der Rinderhaltung passierte vor mehr als 45 Jahren noch überwiegend auf der Herstellung von Dürffutter. Resch (2007) zeigt in einer Darstellung sehr gut die Verschiebung der Konservierungsverfahren von 1970 bis 2005 auf. 1970 wurde noch beinahe 80% des Winterfutters in Form von Heu konserviert. 2005 lag der Anteil des Dürffutters (Heu und Grummet) nur mehr bei 23%. In den letzten 10 Jahren hat sich allerdings der Markenname „Heumilch“ und „Heumilchkäse“ durch ein intensives Marketingprogramm und aufgrund geänderter Konsumentenverhaltens etablieren können. Dahinter stehen in Österreich über 8.000 Landwirtschaftsbetriebe, die ausschließlich auf die Heuwerbung angewiesen sind.

Die Anforderungen an die Grundfutterqualität haben sich im Zuge dieser Entwicklungen auch für Heubetriebe deutlich verschärft. Heute werden auch im Dürffutter Energiegehalte von 6,0 MJ NEL und Eiweißgehalte von 14% gefordert bzw. auf dem Hochleistungsbetrieb von den Fütterungsexperten erwartet.

Die Nährstoffanforderungen hoch leistender Milchkühe können durch die erreichbaren Energiegehalte von Bodenheu nicht erfüllt werden. Im Frühjahr gibt es für den ersten Schnitt meist nur wenige Erntegelegenheiten (Formayer *et al.*, 2000 und Luder, W., 1982). Kann der erste Schnitt wetterbedingt statt im Wachstumsstadium Ähren-/Rispenstadien erst Mitte bis Ende der Blüte gemacht werden, bedeutet das einen Verlust von ca. 0,6 MJ NEL pro kg Trockenmasse

(Gruber *et al.* 2009). Der Nutzungszeitpunkt beeinflusst den Rohfaser- und damit auch den Energiegehalt und den Rohproteingehalt des Grünlandfutters besonders stark.

Um diesen Anforderungen gerecht zu werden, haben sich bereits vor mehr als 40 Jahren die Heubetriebe von der Bodentrocknung, damals teilweise auch noch verbreitet von der Gerüsttrocknung, zur Unterdachttrocknung hin entwickelt. Anfänglich wurden Ziehschacht- und Giebelrostanlagen gebaut. Diese konnten den ständig steigenden Anforderungen an Durchsatzleistung, immer noch früheren Ernteterminen und kürzeren Feldliegezeiten und damit höheren Restfeuchtegehalten nicht mehr gerecht werden. Daraus entwickelte sich die klassische Kaltbelüftungsanlage als Kastentrocknung. Diese besteht aus einem Flachrost mit seitlichen Wänden und ist mit einem druckstabilen Radialventilator kombiniert.

Heute wollen die Heubetriebe die bereits angesprochene Grundfutterqualität mit Betriebsgrößen von teilweise über 60 ha zu maximal zwei Ernteterminen einfahren. Das braucht Anlagengrößen von 200 m² Stockgrundfläche und mehr und Stockhöhen bis zu 6 m. Gleichzeitig müssen die höhere Einfuhrfeuchte und damit der höhere Wassergehalt im Futter aber auch von der Trocknungsluft aufgenommen und abtransportiert werden können. Das wiederum macht die Luftanwärmung im spezialisierten Heubetrieb zu einem unverzichtbaren technischen Ausrüstungsdetail. Ölfeueungsanlagen haben dabei ausgedient. Heute werden Anlagen mit solarer Luftanwärmung, mit der Restwärmenutzung bei Biogasanlagen, Hackgut- oder Scheitholzbeheizung mit Register oder Entfeuchtertrocknungsanlagen - mit der die Luft nicht nur erwärmt, sondern am Verdampfer auch entfeuchtet wird - betrieben. Auch die Kombination von mehreren Luftanwärmungssystemen ist mittlerweile stark verbreitet.

Problemstellung

Für die betroffenen Landwirte ergeben sich aus diesen mittlerweile reichhaltigen Angeboten seitens der Industrie allerdings auch viele Fragestellungen - hinsichtlich Technik und der Anwendung. Neben den Investitionskosten - große Heutrocknungsanlagen sind mit über 200.000,- Euro zu kalkulieren - sind es vor allem Fragen nach dem Mehrertrag an Futterqualität, dem richtigen Einfuhrzeitpunkt, der richtigen Vorbehandlung (Mähen - Aufbereitung - Zetten - Schwaden - Ernten, Transportieren - Einlagern) und der Trocknungsprozessführung (Steuerungs- und Regeltechnik). Die Betriebsführer sind dabei oft mit sehr unterschiedlichen „Firmenphilosophien“ konfrontiert.

Material und Methoden

Am LFZ Raumberg-Gumpenstein wurden in den Jahren 2010 bis 2012 drei Heutrocknungsverfahren - die Bodenheutrocknung, die Kaltbelüftung und die Entfeuchtertrocknung - in Kombination mit solarer Luftanwärmung - miteinander verglichen. Aus landtechnischer

Sicht wurden die Verfahren hinsichtlich Maschineneinsatz am Feld, der Feldverluste, der baulich-technischen Aufwendungen und des Energiebedarfes analysiert. Aufgrund technischer Probleme an der Entfeuchtungsanlage im Jahr 2010 wird für die Interpretation der Ergebnisse dieses Erntejahr nicht berücksichtigt. Im Jahr 2013 wurden in der Entfeuchtertrocknung weitere Futterchargen von anderen Betriebsflächen und vor allem in größeren Mengen getrocknet.

Feldarbeiten und Fläche

Die Versuchsfläche - eine Dauerwiese mit rund 11 ha - wurde viermal genutzt. Im Jahr 2012 konnte aufgrund einer großflächigen Überschwemmung der 3. Schnitt nicht durchgeführt werden.

Die Fläche wurde jeweils mit zwei Front-Heck-Kombinationen, ab dem Jahr 2011 mit Mähauflbereiter (Zinken) gemäht. Unmittelbar nach dem Mähen wurde das Futter mit einem gezogenen Zettwender breit gestreut. In Abhängigkeit vom Abtrocknungsverlauf des Futters wurde das Futter der Konservierungsvarianten gezettet. In der Regel wurde das Futter für die Entfeuchterheuvariante (EH) nach dem Breitstreuen noch 1x, das Futter für die Kaltbelüftung (KH) noch 2x und das Futter für das Bodenheu (BH) noch 3x gewendet. Die Abweichungen mit geringerer Wendehäufigkeit ergaben sich meist beim 2. und 3. Schnitt, während beim 4. Schnitt bei jeder Variante um 1-2 Mal häufiger gewendet wurde. Die Einstellung des Zettwenders wurde so gewählt, dass der Mähswad mit rund 480 bis 500 U/min an der Zapfwelle breit gestreut wurde. Bereits beim zweiten Mal Wenden wurde nur mehr 380 bis 430 U/min an der Zapfwelle gearbeitet. Geschwaded wurde das Futter 0,5 bis 1,0 Stunden vor der Ernte. Zur Schwadarbeit wurde ein Mittelschwader mit Tastrad eingesetzt. Gefahren wurde mit rund 400 U/min an der Zapfwelle und einer Fahrgeschwindigkeit von 10 bis max. 12 km/h.

Die im Rahmen dieses Versuches eingesetzten Maschinen und Geräte sind in der *Tabelle 1* dargestellt.

Tabelle 1: Eingesetzte Maschinen und Geräte zur Futterbergung, Heuprojekt Raumberg-Gumpenstein 2010 bis 2013

Tätigkeiten Maschinen	Gerät, Type	Verwendungsbereich, verwendeter Traktor	Techn. Details
Traktoren	Fendt 310 Vario	Mähen, Ernten	77 kW
	Steyr Profi 4115	Mähen, Ernten	85 kW
	Steyr 975	Zetten	55 kW
	Fendt 209	Zetten, Schwaden	67 kW
Mähen	Krone EasyCut R 280 CV+ EasyCut 32 CV Float	Fendt 311 Vario	AB: 5,49 m ¹⁾
	Front-Heck-Kombination Pöttinger NovaCut 305 + NovaCut 305 Alpha Motion Front-Heck-Kombination	Steyr Profi 4115	AB: 5,68 m ¹⁾
Zetten	Lely Lotus 900 P	Steyr 975	AB: 9,0 m 380 - 500 U/min
Schwaden	Pöttinger EuroTop 620 Multitast	Fendt 209	AB: 5,90 400 U/min
Ernten	Pöttinger Ladeprofi IV	Steyr Profi 4115	29 DIN m ³
	Pöttinger Ladeprofi IV	Fendt 310 Vario	29 DIN m ³

AB= Arbeitsbreite, ¹⁾ mit 40 cm Überschnitt gerechnet

Geladen und eingefahren wurde das Futter mit zwei baugleichen, altersbedingt unterschiedlichen Ladewagen (siehe *Tabelle 1*). Die Ladewagen sind mit 31 Messern bestückt, davon waren in der Regel 6 Stück im Eingriff. Beim vierten Schnitt wurde ohne Messereinsatz gearbeitet. Einmalig waren alle Messer eingesetzt. Jede Fuhre wurde an der Brückenwaage in Gumpenstein verwogen und die Gewichte protokolliert.

Bodenheuerung

Die gesamte Versuchsfläche wurde mit zwei Mähwerkskombinationen gemäht, unmittelbar danach wurde das Futter breit gestreut. Das Bodenheu unterscheidet sich am Feld nur durch eine höhere Anzahl an Wendevorgängen - in Summe wurde das Bodenheu mindestens drei- und maximal sechsmal gezettet bzw. gewendet - und durch längere Feldliegezeiten. Im Durchschnitt lag das Bodenheu drei Tage am Feld, der Bereich erstreckte sich von zwei Tagen bis zu fünf Tagen. Der vierte Schnitt wurde in der Regel unter „künstlichen“ Bedingungen - d.h. das Futter wurde in einem überdachten Lagerplatz locker aufgelegt - endgetrocknet, obwohl fast alle Schnitttermine noch in der zweiten Septemberhälfte lagen.

Kalbelüftungsanlage und Betrieb

Das Futter für die Kaltbelüftung wurde nach dem Mähen in der Regel dreimal gewendet - der Bereich erstreckt sich von einmal bis fünfmal Zetten - und bei einem Trockenmassegehalt von rund 75 % geschwadet und danach eingefahren und gewogen. Das Futter wurde mit einem Heukran in die Heubox mit einer Grundfläche von rund 71 m² (8,7 x 8,15 m) eingelagert. Die Heubox hat eine Bauhöhe von 3,90 m und eine Brutto-Rosthöhe von 50 cm (lichte Höhe 45 cm). Daraus ergibt sich ein nutzbares Lager- und Trocknungsvolumen von 241 m³. Belüftet wird die Anlage mit einem Radialventilator Typ RE 901 mit 7,5/5,5 PS/kW Motorleistung. Im Prüfbericht der BLT Wieselburg (Prot. Nr. 011/72) wird bei einem Gesamtdruck von rund 1130 Pa noch eine Luftleistung von 3,9 m³/sec (14.000 m³/h) erreicht. Im praxisüblichen Arbeitsbereich von rund 490 Pa sind es bereits 7,8 m³/sec (28.200 m³/h). Mit diesem Lüfter wird bei der gegebenen Heuboxengröße 71 m² Grundfläche der notwendige Volumenstrom ausreichend abgedeckt.

Entfeuchter- und Solartrocknungsanlage (verändert nach Sattler, 2012)

Das Futter für die Entfeuchtertrocknung wurde nach dem Mähen in der Regel zweimal gewendet - der Bereich erstreckt sich von einmal bis viermal Zetten. Geschwadet und eingefahren wurde das Futter bei einem Trockenmassegehalt von rund 65%. Der Range erstreckte sich groß zwischen 50 auf 70% TM.

Diese Heutrocknungsanlage am LFZ Raumberg-Gumpenstein besteht aus einer Luftentfeuchter-Wärmepumpe und einem Lüfter mit der nötigen Steuer- und Regelungstechnik. Zusätzlich wurde nachträglich ein Solarkollektor in die gesamte Dachfläche des Mehrzweckversuchstalles eingebaut. Durch die Kombination der Luftentfeuchter-Wärmepumpe

und der solaren Luftanwärmung mit einer effizienten Steuerung soll der Energieaufwand und damit die variablen Kosten für die Heutrocknung minimiert werden.

Solarkollektor

Der Solarkollektor für die Heutrocknungsanlage wurde nachträglich in die Dachfläche des Mehrzweckversuchstalles integriert. Das Pfettendach wurde von innen mit Spanplatten als Verschalung ausgekleidet. Die Kollektorkanäle werden von der Abdeckung, den Balken und den Spanplatten gebildet. Die Pfettenhöhe beträgt 180 mm. Der Kollektor ist als freiliegender Absorber ausgeführt, d.h. das Dachabdeckmaterial (Welleternit) fungiert als Absorber. Das Absorptionsvermögen und die Wärmeleitfähigkeit dieser Absorberfläche sollen möglichst groß sein, um möglichst viel der absorbierten Energie an dessen Unterseite zu transportieren. Die Neigung der Dachflächen beträgt 20 Grad und die Ausrichtung ist Nord/Süd. Ein nach Süden ausgerichtetes Dach mit einer Neigung von 20 Grad kann während der Dürrfutterperiode die beste Wirkung erzielen. Die Nettofläche, die den Solarkollektor bildet, beträgt 410 m². Mit der Annahme einer Leistung von 200 W/m² und der Berücksichtigung der verringerten Leistung der Nordseite der Dachfläche nach *Tabelle 2* beträgt die Gesamtleistung der Dachabsaugung rund 71 kW. Die Kollektorfläche beträgt mehr als das Vierfache der Grundfläche der Heubox mit 96 m². Die Systemskizze (*Abbildung 1*) zeigt die Luftableitung durch den Solarkollektor und den Sammelkanal in die Lüfterkammer.

Heubox

Die Grundfläche der Heubox beträgt 96 m² bei einem Volumen von 576 m³ (L x B x H = 12,0x8x6x6 m mm). Die Belüftungsbox besteht aus Holzwänden mit Kantholzstehern, die mit einem U-Profil-Überleger eingerahmt sind. Der Rost besteht aus Baustahlgitter (CQS 100) mit darunter liegenden Auflegern (50 x 150 mm), die ihrerseits wieder auf Rundhölzern aufliegen. Die Rosthöhe beträgt 60 cm (Unterkante) und ist in der Höhenangabe der Box enthalten. Um seitliche Luftverluste zu vermeiden ist der Rost zur Einwandung hin in einer Breite von 60 cm geschlossen. Daraus ergibt sich ein tatsächliches Einlagerungsvolumen bis zum Boxenrand von 518,4 m³. Der Einblaskanal für das

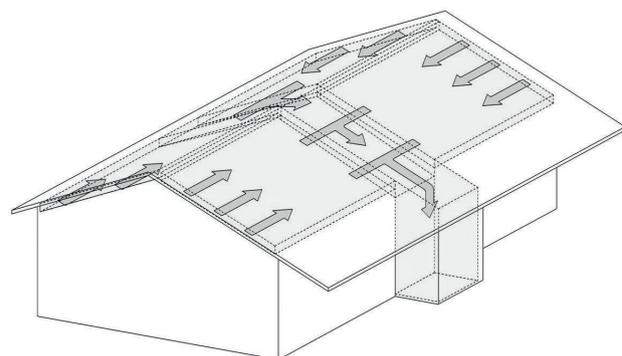


Abbildung 1: Solarkollektor LFZ Raumberg-Gumpenstein Pfettendach mit vier Kollektorfeldern auf zwei Dachflanken mit mittig angeordnetem Sammelkanal (Agroscope Reckenholz-Tänikon ART)

Gebläse befindet sich mittig angeordnet an der Nordseite der Box. Am oberen Boxenrand wurde bei jedem Versuchsdurchgang eine zusätzliche Boxenüberhöhung mit ca. 2 m Höhe bis unter die Brückenkranschiene montiert. Diese besteht aus Kompostvlies und wird auf am Boxenrand aufgesteckte Stahlrohre aufgezogen. Dieses dient dazu, die aus dem Heustock austretende Luft bei Umluftbetrieb möglichst in Richtung der Umluftklappe zu lenken. Dadurch sollte ein möglichst hoher Anteil an warmer, feuchter Luft wieder in den Umluftbetrieb zurück gebracht werden. In Vorversuchen mit einer Nebelmaschine konnte gezeigt werden, dass ohne Boxenüberhöhung ein zu hoher Anteil an feucht-warmer Luft im Heubergeraum verloren geht.

Ventilator

Den nötigen Volumenstrom liefert ein Ventilator SR 1000 mit einer Nennleistung von 22 kW. Dieser ist für Boxengrößen bis 220 m² geeignet und damit für die hier verwendete 96 m² Stockgrundfläche sehr groß dimensioniert. Die technischen Daten des Ventilators sind in der *Tabelle 2* dargestellt.

Tabelle 2: Technische Daten des Ventilators der Entfeuchter-Solaranlage, Heuprojekt am LFZ Raumberg-Gumpenstein 2010 bis 2014

Type	SR 1000 / 22 / 6 / RD 270
Baujahr	2011
Luftfördermenge max. in m ³ / h	55.000
Nennleistung PA, in kW	22
Nennstrom I _n , in Ampere	44,5
Spannung / Frequenz in V / Hz	400 / 50
Nennzahl in U / min	980

Luftentfeuchter-Wärmepumpe

Die verbaute Luftentfeuchter-Wärmepumpe der Firma Reindl Kältetechnik GmbH erfordert eine elektrische Anschlussleistung von 16 kW (technische Daten siehe *Tabelle 3*). Die Abmessungen betragen 2.000 x 2.150 x 110 mm (L x H x T). Die Nettoquerschnittsfläche der Register, die von der Trocknungsluft durchströmt werden, beträgt 4 m². Die Anordnung der Luftentfeuchter-Wärmepumpe erfolgt im Hauptstrom, d.h. der gesamte vom Gebläse angesaugte Trocknungsluftstrom muss den Entfeuchter passieren. Bei einem Luftdurchsatz von 35.000 m³/h (entspricht 0,10 m³/s * m² für die Heubox mit 96 m² Grundfläche), bedeutet das eine Strömungsgeschwindigkeit von etwa 2,4 m/s. Das Kältemittel wird von einem Schraubenverdichter mit integrierter Ölwanne komprimiert, der zwischen Verdampfer- und Kondensatorregister angeordnet ist. Die stufenlose Drehzahlregelung erfolgt automatisch geräteintern mittels Frequenzumformer in Abhängigkeit des Kältemitteldruckes. Der Entfeuchter kann sich so an Änderungen des Luftdurchsatzes anpassen und ungünstige Betriebszustände einschränken. Eine Vereisung des Verdampfers bei geringen Außentemperaturen kann so ebenfalls vermieden werden. Das Kondensat wird über eine Öffnung an der Geräteunterseite abgeführt. Am Schaltschrank kann eingestellt werden, unter welcher relativen Luftfeuchte der Entfeuchter abschalten soll. Der Entfeuchter ist für Heuboxen bis 160 m² bzw. für die Trocknung von 40 Stück Heurundballen ge-

eignet. Damit soll, je nach Ausgangsfeuchte, eine maximale tägliche Einfuhrleistung von 10-18 ha/Tag möglich sein.

Tabelle 3: Technische Daten der Luftentfeuchter-Wärmepumpe, Heuprojekt am LFZ Raumberg-Gumpenstein 2010 bis 2014

Type	SR 60 N MJR
Baujahr	2011
Kältemittel	R407c
Kältemittelmenge in kg	45
Spannung in V	400
E-Anschlussleistung in kW	16

Steuerung

Die Steuerung der Heutrocknungsanlage erfolgt mittels SPS-Steuerung und ist als Komfortsteuerung ausgeführt. In diesem Abschnitt werden die wichtigsten Funktionskreise erklärt und auf die steuerungsrelevanten Parameter eingegangen. Anfang 2012 wurde die Anlage auf eine Touch-Screen geführte Steuerungsoberfläche umgebaut.

Betrieb mit solarer Luftanwärmung

Meist wurde am früheren bis späteren Nachmittag die Ernte der EH-Variante bei noch guten Witterungsbedingungen durchgeführt. In diesem Fall wurde die gesamte, über die solare Luftanwärmung zur Verfügung stehende Energie genutzt und der Ventilator konnte mit der vollen Stromaufnahme (50 Hz, 44,5 A) gefahren werden. Je nach Feuchtegehalt des Futters und Stockhöhe wurden dabei 40.000 bis 55.000 m³/h Trocknungsluft durch den Heustock gedrückt.

Betrieb mit Entfeuchter-Wärmepumpe - Umluftbetrieb

Wenn die Ansaugtemperatur auf der Dachfläche nur mehr 3 °C über der Heustocktemperatur lag, wurde automatisch von solarer Unterdachabsaugung auf Umluftbetrieb umgeschaltet – Lüfterklappe offen – und die Entfeuchter-Wärmepumpe in Betrieb genommen. Gleichzeitig wurde der Ventilator automatisch auf 29 Ampere Stromaufnahme (Frequenz 44 Hz) reduziert. Erst nach der Betriebsfreigabe konnte der Entfeuchter auf Nennzahl anlaufen. Umgekehrt wurde der Steuerungskreislauf für die Umstellung von der Nachttrocknung oder Trocknungsluftführung bei Schlechtwetter mit Umluftführung auf die solare Unterdachabsaugung geschaltet. Bei mehr als 5°C Temperaturdifferenz zwischen (oberhalb der Heubox) innen und außen (Solardachtemperatur), wurde die Umluftklappe geschlossen und über das Solardach angesaugt. Etwas zeitverzögert wurde dann der Entfeuchter abgeschaltet und das Gebläse wurde freigegeben und konnte wieder mit maximaler Frequenz betrieben werden.

Messtechnik

Messfühler

Zur Beurteilung der Leistungsfähigkeit der Luftentfeuchter-Wärmepumpe wurden mehrere Sensoren zur Erfassung der Luftzustände während der Trocknungsdauer installiert. In *Abbildung 2* sind die Positionen der Messstellen markiert und in *Tabelle 4* sind die Sensoren und die damit gemessenen Größen angegeben.

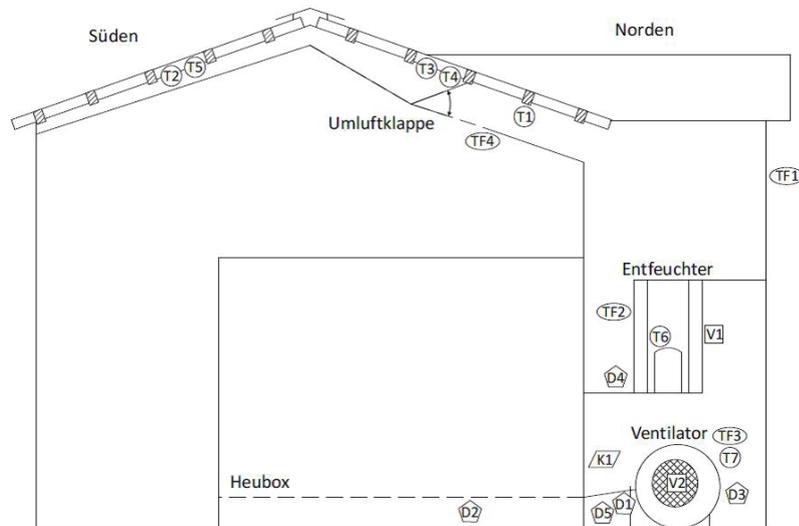


Abbildung 2: Messstellenplan der Anlage am LFZ Raumberg-Gumpenstein, Heuprojekt 2010 bis 2013

Entsprechend dem Messtechnikplan wurden für die Aufnahme der Messdaten Temperatursensoren, Temperatur-/Feuchtesensoren, ein Strömungsgeschwindigkeitssensor sowie ein Vibrationssensor verwendet. In der Lüfterkammer wurde ein Taupunktsensor installiert. Zur Druckmessung kamen für den statischen Druck Druckmessumformer und für den dynamischen Druck ein Prandtlrohr im Einblaskanal zum Einsatz.

Witterung

Die Witterungsverhältnisse während der Feldtrocknungsphase und für die Dauer der Unterdachttrocknung wurden den Datenaufzeichnungen der Klimastation der ZAMG in Gumpenstein entnommen. Diese Messdaten lagen im Stundenintervall vor. Für die Berechnung der Luftdaten wurde ein über die Beobachtungsdauer herrschender mittlerer Luftdruck von 940 hPa eingesetzt. Temperatur und relative Luftfeuchtigkeit der Außenluft wurden während der Belüftungsdauer auch von der Steuerung im Minutenintervall aufgezeichnet.

Stromverbrauch

Die Daten für den Stromverbrauch der Anlage wurden wie die Luftmessdaten im Minutenintervall während der Dauer der Trocknungsdurchgänge aufgezeichnet. Die Geräte hatten keine Betriebsstundenzähler. Die Laufzeit von Gebläse und Entfeuchter wurde daher mit den Luft- und Strommessdaten ermittelt.

Bestimmung der Bröckel- und Aufnahmeverluste

Die Bröckelverluste am Feld wurden unmittelbar nach der Ernte von den einzelnen Variante bestimmt. Dazu wurde die Gesamtfläche grob von West nach Ost in fünf Sektoren eingeteilt. Die Sektoren selbst wurden wiederum in vier Teilflächen geteilt, die den Versuchsvarianten Silage (S), Entfeuchterheu (EH), Kaltbelüftungsheu (KH) und Bodenheu (BH) entsprachen. Damit konnten lokale

Flächenunterschiede und der fortlaufende Trocknungsprozess gleichmäßig auf alle Varianten aufgeteilt werden.

Die Messstellen wurden rund 50-80 m vom jeweiligen Feldrand entfernt von Schnitt zu Schnitt flexibel, meist von derselben Versuchsperson festgelegt. Die Messstellen lagen jeweils links oder rechts vom Aufnahmeschwad. Damit wurden die Bröckel- und Aufnahmeverluste vom Mähen bis zum Schwaden erfasst. Pro Variante wurden 10 Messstellen abgesaugt - 5 Sektoren und je Sektor zwei Messstellen - eine an der Nordseite und eine an der Südseite.

Die Bestimmung erfolgte mit der Saugmethode. Dazu wurde ein Industriestaubsauger mit dem runden Saugschlauchende verwendet. Der Antrieb wurde mittels Notstromaggregat sichergestellt. Ein 1 m² großer Messrahmen wurde auf die abgeerntete Oberfläche gelegt. Dann wurde in langsamen

Hin- und Herbewegungen im Bodenabstand von 3-5 cm, das oberflächlich aufliegende Pflanzenmaterial abgesaugt. Das Absaugen wurde in beide Richtungen und in zweifacher Wiederholung durchgeführt. Die abgesaugten Pflanzenteile wurden vom Industriestaubsauger in beschriftete Papiersäcke geleert. Das Futter wurde anschließend in den Säcken verbleibend in der Trocknungsanlage auf Gewichtskonstanz (Heugewicht) getrocknet, einzeln gewogen und von einer

Tabelle 4: Messstellenübersicht

Sensor	Einheit	Beschreibung
Temperatur		
T1	°C	Solardachtemperatur
T2	°C	Dachtemperatur Südwest
T3	°C	Dachtemperatur Nordwest
T4	°C	Dachtemperatur Nordost
T5	°C	Dachtemperatur Südost
T6	°C	Temperatur in Entfeuchter
T7	°C	Taupunkttemperatur
Temp. / Feuchte		
TF1	°C/%	Temp. / Feuchte Außen
TF2	°C/%	Temp. / Feuchte vor Entfeuchter
TF3	°C/%	Temp. / Feuchte Lüfterkammer
TF4	°C/%	Temp. / Feuchte über Heu
Druck		
D1	Pa	Differenzdruck Heubox zu Lüfterkammer
D2	Pa	Differenzdruck Heubox Außen
D3	Pa	Differenzdruck Lüfterkammer zu Außen
D4	Pa	Differenzdruck vor/nach Entfeuchter
D5	Pa	Dynamischer Druck Prandtlrohr im Einblaskanal
Volumenstrom		
V1	m/s	Volumenstrom nach Entfeuchter
V2	m/s	Volumenstrom vor Gebläse
Kondensat		
K1	Liter	Kondensatabscheidung im Entfeuchter

Mischprobe die Trockenmasse aus der Heuprobe bestimmt. Der feine Erdanteil wurde händisch bei jeder Probe vor dem Einfüllen abgetrennt, was das nicht eindeutig möglich, wurden die Proben durch einen Windsichter gereinigt.

Ergebnisse

Abtrocknungszeiten am Feld

In der *Tabelle 5* sind die in den Versuchsjahren 2010 bis 2012 durchschnittlich gemessenen Feldliegezeiten der einzelnen Konservierungsformen aufgelistet. Insbesondere beim ersten, zweiten und dritten Schnitt kann die solarunterstützte Entfeuchterheu-Variante um einen Halbtage vor der Kaltbelüftungsvariante eingefahren werden. Durch die Kombination mit der solaren Unterdachtrocknung kann und soll damit die Ernte noch am Nachmittag bei guter Ausnutzung der Sonnenenergie durchgeführt werden. Dadurch ist es möglich und aus Energieeffizienzgründen notwendig, den Wärmekreislauf in der Trocknungsanlage noch vor den Abendstunden aufzuschaukeln und bei voller Ventilatorleistung bereits einen großen Wasseranteil aus dem Futter mitzunehmen. Dadurch kann der Entfeuchter bereits in einem optimaleren Wirkungsgradbereich mit der Arbeit beginnen. Die Feldliegezeiten für die Bodenheutrocknung zeigen genau die Problematik dieser Konservierungsvariante auf. Das Futter musste bereits beim dritten Schnitt durchschnittlich über zwei Tage am Feld trocknen. Beim vierten Schnitt - ab Mitte September - war mit dieser Konservierungsvariante kein lagerstabiles Heu mehr zu ernten. Die Versuchsfutterpartien wurden durchschnittlich nach 2,5 Tagen in der Futterhalle locker aufgelegt, um das Futter fertig trocknen zu lassen.

Tabelle 5: Durchschnittliche Feldliegezeiten der unterschiedlichen Konservierungsformen, vom Mähen bis zum Einfahren in den Jahren 2010-2012, Dauerwiese, Heuprojekt LFZ Raumberg-Gumpenstein

Varianten	Silage	EH	KH	BH
1. Schnitt	10,2	18,8	26,4	37,3
2. Schnitt	3,2	16,5	25,1	34,5
3. Schnitt	6,2	20,0	28,8	51,3
4. Schnitt	23,2	41,9	49,9	58,6 ¹⁾

¹⁾ Stundenwerte nicht realistisch, weil das Futter nach dieser Zeit noch feucht unter Dach locker aufgelegt wurde.

Ausgesuchte Ergebnisse zur solarunterstützten Entfeuchtertrocknung

In der folgenden Ergebnisdarstellung wird in erster Linie auf die Versuchsdurchgänge aus dem Jahr 2011 Bezug genommen. Aus diesem Abschnitt liegen die Trocknungsdaten bereits in ausreichend ausgearbeiteter Form vor. Anstelle des ersten Schnittes von der Versuchsfläche wurde ein Praxisversuch in die Auswertung mit hineingenommen.

Die Heudaten wurden für alle Schnitte ermittelt. Für den Praxisdurchgang wurden nach der Einlagerung keine Feuchtegehalte mehr ermittelt und die Stockhöhen wurden beim zweiten Durchgang nicht festgehalten. Bei den Durchgängen für die Fütterungsversuche konnten wegen der geringen Futtermengen nur die Füllhöhen in der Heubox

Tabelle 6: Heudaten aus dem Versuchsjahr 2011, Heuprojekt LFZ Raumberg-Gumpenstein (Sattler, 2012)

Parameter / Schnitte	Einheit	1P	2	3	4
Welkheumasse	kg	26395	11415	18255	13525
Einlagerungsfeuchte	% FN	32,5a	32,8	48,4	34,6
Trockenmasse	kg	17817	7671	9420	8845
Endfeuchte (7 d)	% FN	14,0b	16,8	17,6	14,7
Heumasse (Endfeuchte)	kg	20717	9220	11432	10370
Abzutrocknende Wassermasse	kg	5678	2195	6823	3155
Wasserdeckel	kg/m ²	59	23	71	33
Stockhöhe Einlagerung	m	3,5	-	2,0	1,5
Stockhöhe abgesetzt	m	2,5	-	1,8	1,4
Raumgewicht Einlagerung	kg/m ³	78,6	-	95,1	93,9
Raumgewicht abgesetzt	kg/m ³	86,3	-	66,2	77,2
Raumgew. Einlagerung TM	kg/m ³	53,0	-	49,1	61,4
Raumgew. abgesetzt (TM)	kg/m ³	74,2	-	54,5	65,8

bis maximal 2 Meter erreicht werden. Das Material vom Praxisdurchgang reichte immerhin für eine Füllhöhe von 3,5 m bei der Einlagerung (*Tabelle 6*).

Trocknung vom 30.5. bis 2.6., 1. Schnitt 2011

Für den Praxisdurchgang wurde eine größere Menge Futter vom 1. Schnitt gemäht, was eine Füllhöhe in der Box von 3,5 m ermöglichte. Die Belüftung wurde am 30.05. nach dem Aufbringen der ersten Schicht in der Box eingeschaltet. Wegen dem durch die geringe Schichtdicke niedrigen statischen Druck lag der Volumenstrom anfangs bei rund 50.000 m³/h und reduzierte sich bis zum Ende der ersten Dachabsaugungsperiode um 19:30 Uhr auf etwa 45.000 m³/h. Die Umschaltung auf den Umluftbetrieb aktivierte die Drehzahlbegrenzung des Lüfters und reduzierte den Volumenstrom auf 30.000 m³/h. Diese Reduktion ist beim Entfeuchterbetrieb notwendig, da die Luftgeschwindigkeit beim Durchströmen der Entfeuchterregister sonst zu hoch wäre. Bei der Umschaltung betrug die Temperatur in der Lüfterkammer noch 26°C bei einer relativen Luftfeuchte von nur 35%.

Die Temperaturdifferenz zwischen Heustock und Lüfterkammer betrug während dieser Dachabsaugungsphase durchschnittlich 4,2°C, die Abluftfeuchte über dem Heustock lag bei lediglich 60%. Während der nächtlichen Umluftphase mit Entfeuchterbetrieb stieg die rel. Luftfeuchte in der Lüfterkammer auf durchschnittlich 50%. Die Temperatur stieg anfänglich noch leicht an und fiel bis 06:50 Uhr auf 23°C ab, die minimale Außentemperatur während der Nacht betrug 12°C. Die Temperaturspreizung vor/nach Heu blieb konstant, die durchschnittliche Anwärmung durch den Entfeuchter lag bei 5,7°C.

Die Abkühlung der Luft durch Gebäudeundichtheiten lag demnach bei 1,5°C zwischen der Messstelle über Heu und vor dem Entfeuchter, die Abluftfeuchte steigerte sich auf 73%. Die Kondensatabscheidung am Entfeuchter begann um ca. 20 Uhr. Der Kippzähler registrierte durchschnittlich 0,46 l/min, was einer auf den Volumenstrom bezogenen Entfeuchtung von 0,94 g/m³ trockener Luft entspricht. Nach Umschaltung auf Dachabsaugung arbeitete der Entfeuchter weiter im Frischluftbetrieb bis zum Anlagenausfall um 08:35 Uhr für ca. eine Stunde. Nach erneutem Einschalten der Anlage lief die Dachabsaugung bis 17 Uhr mit 42.000 m³/h bei Schönwetter. Bei einer mittleren Abluftfeuchte

von 73% steigerte sich die Temperaturspreizung auf 7,0°C, was einer Wasserdampfaufnahme der Trocknungsluft von 3,9 g/kg entspricht.

Die zweite Umluftbetriebsphase dauerte bis 01.06. um 11:17 Uhr. Während dieser Zeit schaltete die Steuerung aber auch mehrmals kurzzeitig in den Frischluftbetrieb um, weil der Solardachsensord Temperaturänderungen registrierte, die die Umschaltbedingungen erfüllten. Das deutete auf eine zu geringe Schalthysterese hin. Die Kondensatabscheidung begann erneut eine halbe Stunde nach der Umschaltung, der mittlere Volumenstrom betrug 29.000 m³/h. Die Temperatur in der Lüfterkammer verlief ähnlich, eine Differenz zum Außentemperaturverlauf von etwa 10°C konnte aufrechterhalten werden. Der Wasserzähler registrierte 0,36 l/min bei einer Entfeuchtung von 0,75 g/m³. Die relative Abluftfeuchte von 67% wurde durch den Entfeuchter auf 48% reduziert und im Schnitt um 5,3°C angewärmt. Die Temperaturspreizung ging durch den fortgeschritteneren Trocknungsverlauf auf 3,7°C zurück. Ein um die Mittagszeit aufziehender Regenschauer beendete den Frischluftbetrieb um 12:10 Uhr. Die folgende kurze Umluftphase brachte nur mehr 0,25 l/min Kondensatabscheidung (Entfeuchtung 0,52 g/m³). Es folgte wieder eine Dachabsaugung bis 18 Uhr mit mehreren kurzen Umschaltvorgängen. Die letzte Umluftphase im Automatikmodus wurde am 02.06. um 14:55 Uhr nach 71 Betriebsstunden beendet.

Beim zweiten Schnitt war die Trocknungsperiode nur sehr kurz, es wurden nur 51,7 l Kondensat abgeschieden, weshalb dieser Versuchsdurchgang nicht extra besprochen wird.

Trocknung vom 12.8. bis 21.8., 3. Schnitt 2011

Die Anlage wurde am 12.08. um 15 Uhr für die Trocknung des 3. Schnittes eingeschaltet. Aufgrund des Schönwetters lief der Dachabsaugungsmodus mit 30°C und unter 50% relativer Luftfeuchte in der Lüfterkammer. Der Entfeuchter wurde erst am nächsten Tag um 15:30 Uhr eingeschaltet. Die erste Kondensatabscheidung am Entfeuchter wurde am 13.08. um 16:07 Uhr nach einer halben Stunde Entfeuchterlaufzeit während der Dachabsaugungsphase registriert. Die Umschaltung erfolgte bei 23°C Außentemperatur mit rund 80% relativer Luftfeuchte. Bei bedecktem Himmel und leichtem Regen erfolgte anfangs nahezu keine Anwärmung der Dachfläche. Die Trocknungsluft hatte nahezu Außenluftzustand bis zum Betriebsbeginn des Entfeuchters. Die Kondensationsleistung während der nächtlichen Umluftphase betrug durchschnittlich 0,8 l/min (1,6 g/m³). Die Temperaturdifferenz vor dem Entfeuchter zur Lüfterkammer betrug im Mittel 6,8°C.

Bei diesem Versuchsdurchgang kam es zu mehrmaligen Betriebsausfällen aufgrund des gleichzeitigen Betriebes der Entfeuchteranlage und des freigegebenen Ventilators und damit zu einer Überlastung der mit 50 A abgesicherten Stromversorgung.

Versuchsdurchgänge im Jahr 2012

Die Versuchsdurchgänge aus dem Jahr 2012 beziehen sich auf zwei erste Schnitte (19.-21. und 25.-30. Mai auf der Warmlufttrocknung), einem zweiten (29.-30. Juni) und einem vierten Schnitt (17.-21. September). Der dritte Schnitt

konnte aufgrund einer Überschwemmung nicht geerntet werden. Das stark verschmutzte Futter wurde gemäht und abtransportiert.

Beim ersten Schnitt und der Trocknung vom 19. bis zum 21. Mai herrschten optimale Trocknungsbedingungen, sodass mit der Trocknung bereits um 14:30 Uhr begonnen werden konnte. Über Nacht wurde keine Kondensatbildung gemessen und am 20. Mai wurde die Anlage um 18:00 Uhr auf Nachlüften für den kommenden Tag, den 21.5. umgestellt.

Der zweite Durchgang, ebenfalls ein 2. Schnitt auf einer Praxisfläche, wurde am 26.5. in die Trocknungsanlage eingefahren und diese um 15:30 Uhr in Betrieb genommen. Am zweiten Tag (27. Mai) wurde die Luft über die Dachabsaugung angewärmt und erreichte Einblasttemperaturen von über 30°C. Nachtsüber wurden über den Luftentfeuchter im Umluftbetrieb durchschnittlich 0,55 l/min (33 l/h) an Kondensat gebildet. Am 28.5. wurde an der Anlage sogar eine Wasserabscheidung von 0,7 l/min gemessen.

Der zweite Schnitt - Einlagerung am 29. Juni, Beginn um 15:00 Uhr - wurde am nächsten Tag nur bis 21:00 Uhr durchgehend belüftet. Über Nacht wurden nur 25 - 35 l/h an Wasser abgesondert. Allerdings wurde bis zum 5. Juli noch auf Nachlüften gearbeitet.

Der vierte Schnitt wurde am 17. September eingelagert und bis zum 21.9. belüftet. Vom 17. auf den 18. September wurden über Nacht 0,8 l/min (48 l/h) entfeuchtet. Höchstwerte von 60 l/min wurden vereinzelt ebenfalls gemessen.

Bröckelverluste

In der *Tabelle 7* sind die Bröckel- und Rechverluste aus allen drei Versuchsjahren (2010 bis 2012) zusammengefasst. Die Erntebedingungen waren bis auf einen Termin (3. Schnitt 2011) für alle Varianten optimal. Die für die Bröckelverluste wichtige Zettarbeit wurde in fast allen Fällen ebenfalls nach den erforderlichen Empfehlungen durchgeführt - nur so oft wie unbedingt notwendig mit einer hohen Drehzahl an der Zapfwelle beim Breitstreuen (470 bis 500 U/min) sowie einer geringen Drehzahl beim Wenden (380 U/min). Vergleicht man die Dürrfuttervarianten mit der Silage, bleibt die Warmbelüftungsvariante (solarunterstützte Entfeuch-

Tabelle 7: Bröckel- und Rechverluste auf einer Dauerwiese in kg TM/ha und Schnitt, Mittelwert aus den Jahren 2010 bis 2012, Heuprojekt LFZ Raumberg-Gumpenstein

Konservierungsverfahren	1. Schnitt	2. Schnitt	3. Schnitt	4. Schnitt	Mittelwert
Silage	160	169	127	162	154
Heu Entfeuchtertrocknung	234	204	155	191	196
Heu Kaltbelüftung	292	264	258	273	272
Heu Bodentrocknung	383	383	n.a.	392	386

n.a. = nicht auswertbar / fehlende Daten

tertrocknung) mit durchschnittlich nur 42 kg TM/ha und Schnitt an höheren Bröckelverlusten nur knapp dahinter, während es bei dem für die Kaltbelüftung geernteten Heu bereits 118 kg und im Vergleich zum Bodenheu bereits 232 kg TM/ha und Schnitt mehr Bröckelverluste sind. Stellt man den selben Vergleich innerhalb der Heutrocknungs-

verfahren an, dann bleiben bei der Variante Kaltbelüftung um 76 kg und bei der Bodenheuvariante um 190 kg TM/ha im Vergleich zur Entfeuchterheuvariante mehr an feinen Futterteilen am Feld liegen. Setzt man den Wert der Feinteile annähernd dem Kraftfutter gleich und berechnet daraus das Milchbildungspotenzial, dann unterscheidet sich die Entfeuchterheuvariante von der Bodenheuvariante um 1.520 l Milch, die pro Hektar und Jahr mehr am Feld liegen bleiben (190 x 2l/kg TM x 4 Schnitte).

Energieverbrauch und Kosten der Verfahren

Energieverbrauch

In der *Tabelle 8* für das Versuchsjahr 2011 und *Tabelle 9* für das Versuchsjahr 2012 sind die wichtigsten Daten zur Berechnung der Energiekosten aufgelistet. Das Versuchsjahr 2010 wurde aufgrund der technischen Schwierigkeiten und fehlenden Datensätze nicht in diese Auswertung

mit aufgenommen. Interessant und nicht ganz erklärbar ist die Tatsache, dass bei der Kaltbelüftung sowohl absolut, als auch relativ (spezifischer Energiebedarf in W/kg Wasserverdunstung) günstigere Abtrocknungsbedingungen gemessen wurden als bei der Warmbelüftung. Nur beim vierten Schnitt 2011 und beim ersten Schnitt 2012 war der spezifische Energiebedarf in W/kg abzutrocknenden Wassers bei der Entfeuchterheuvariante günstiger als bei der Kaltbelüftungsvariante.

Umgelegt auf die Energiekosten pro kg Heu schnitt die Kaltbelüftung mit Werten von 0,4 bis 2,4 Cent am günstigsten ab. Die Energiekosten für die solarunterstützte Entfeuchtertrocknung lagen hingegen zwischen 1,4 und Heu (kalkuliert mit 15 Cent/kWh).

Kosten

In *Tabelle 10* werden die beiden Unterdachtrocknungsverfahren, Kaltbelüftung und Warmbelüftung (solarunterstützte Entfeuchtertrocknung) hinsichtlich der Kosten (fixe und

Tabelle 8: Heudaten (Mengen, TM-Gehaltswerte und Energieverbrauchsdaten) der Schnitte im Jahr 2011, Heuprojekt LFZ Raumberg-Gumpenstein

Schnitt		1. Schnitt		2. Schnitt		3. Schnitt		4. Schnitt	
Ausgangsdaten	Einheit	Entf.	Kaltbel.	Entf.	Kaltbel.	Entf.	Kaltbel.	Entf.	Kaltbel.
Datum Einfuhr		18.5.	19.5.	28.6.	28.6.	12.8.	12.8.	23.9.	23.9.
Einfuhr FM	kg	16.225	4.065	11.415	7.950	18.255	13.345	13.525	4.380
TM	%	56,6	66,1	69,6	75,2	54,0	67,2	68,7	71,9
TM i.d.Box	kg	9.187	2.686	7.947	5.978	9.858	8.965	9.292	3.149
Heugewicht i.d. Box	kg	10.381	3.088	8.980	6.872	11.139	10.305	10.500	3.620
Wasser abzutrocknen	kg	5.844	977	2.435	1.078	7.116	3.040	3.025	760
Energieverbrauch									
pro Tonne TM	kWh	336	99	109	28	289	64	191	186
pro Tonne Heu	kWh	298	87	97	24	256	56	169	162
spez.Energiebed. Wasser	W/kg	529	273	356	156	400	189	586	771
Energiekosten (15 Cent/kWh)									
pro kg TM	Cent	5,0	1,5	1,6	0,4	4,3	1,0	2,9	2,8
pro kg Heu	Cent	4,5	1,3	1,4	0,4	3,8	0,8	2,5	2,4

Tabelle 9: Heudaten (Mengen, TM-Gehaltswerte und Energieverbrauchsdaten) der Schnitte im Jahr 2012, Heuprojekt LFZ Raumberg-Gumpenstein

Schnitt		1. Schnitt		2. Schnitt		4. Schnitt		
Ausgangsdaten	Einheit	Entf.	Kaltbel.	Entf.	Entf.	Kaltbel.	Entf.	Kaltbel.
Datum Einfuhr		19.5.	19.5.	26.5.	29.6.	29.6.	17.9.	18.9.
Einfuhr FM	kg	13.230	4.145	38.830	18.805	9.850	14.120	6.080
TM	%	56,6	66,1	60,2	62,4	75,9	65,2	72,8
TM i.d. Box	kg	7.491	2.739	23.358	11.727	7.475	9.208	4.427
Heugewicht i.d. Box	kg	8.465	3.095	26.395	13.251	8.447	10.405	5.002
Wasser abzutrocknen	kg	4.765	997	12.435	5.554	1.258	3.715	992
Energieverbrauch								
pro Tonne TM	kWh	87	66	146	140	25	306	111
pro Tonne Heu	kWh	77	57	129	124	22	271	97
spez.Energiebed. Wasser	W/kg	137	180	275	297	149	758	497
Energiekosten (15 Cent/kWh)								
pro kg TM	Cent	1,6	1,2	2,6	2,5	0,5	5,5	2,0
pro kg Heu	Cent	1,4	1,0	2,3	2,2	0,4	4,9	1,7

Anmerkung: 3. Schnitt ist wegen Hochwasser im Jahr 2012 ausgefallen

variable Kosten) miteinander verglichen. Die Investitionskosten stammen aus Kostenschätzungen und -vergleichen aus vergleichbaren Projekten in Österreich und der Schweiz. In der Kalkulation sind keine Gebäudekosten (Lager) und die Kosten für den Heukran enthalten, da diese Kosten in jedem Fall bei einem Heubergeverfahren zu tragen wären.

Entscheidenden Einfluss auf die Kostenbelastung pro kg Heu nehmen in erster Linie die Fixkosten. Diese können bei völliger Neuinvestition von Gebäude und Technik auf das Doppelte bis Dreifache steigen. Andererseits können diese bei größeren Betriebseinheiten auch deutlich sinken. In jedem Fall ist jedoch bei Anlagen mit Luftanwärmung von durchschnittlich 5 Cent Mehrkosten (gesamt) pro kg Heu auszugehen. Bei der Berechnung der variablen Kosten wurde für den Stromverbrauch ein Durchschnittswert aus den Versuchsaufzeichnungen herangezogen - 8 kWh pro 100 kg Heu für die Variante Kaltbelüftung und 10 kWh pro 100 kg Heu für die Warmbelüftung (solarunterstützte Entfeuchtertrocknung). Diese Werte decken sich mit älteren Literaturangaben bzw. liegen leicht darunter (Hilfiker, 1989; Laville-Studer, 1990). In dieser Berechnung ist allerdings der zu erwartende höhere Futterwert bzw. die geringeren Bröckelverluste, vor allem im Vergleich zur Bodentrocknungsvariante noch nicht enthalten. Für die entfallenen Feldarbeitszeiten - bei der Kaltbelüftung entfällt im Durchschnitt ein Zettvorgang, bei der solarunterstützten Entfeuchtertrocknung entfallen im Durchschnitt zwei Zettvorgänge, im Vergleich zur Bodentrocknung - können rund 0,8 Cent/kg Heu gegen gerechnet werden.

Literatur

Formayer, H., Weber, A., Eckhardt, S., Volk, G., Boxberger, J., Krompkolb, H., 2000: Endbericht zum Projekt „Ermittlung der verfügbaren Feldarbeitstage für die Landwirtschaft in Österreich“. BMLFUW, Wien.

Gruber, L., Resch, R., 2009: Mineralstoffversorgung von Milchkühen aus dem Grund- und Kraftfutter - Modellrechnungen auf Basis aktueller Analysen und Fütterungsempfehlungen. In: 36. Viehwirtschaftliche Fachtagung. Bericht LFZ Raumberg-Gumpenstein, 16.-17. April 2009, 41-75.

Tabelle 10: Kostenvergleich der Heutrocknungsverfahren

Investitionen	Einheit	Warm- belüftung	Kalt- belüftung	Anmerkungen
Ventilator - Investition	€	10.000	7.000	Warmbelüftung mit FU
Jährliche Belastung	€	665	949	ND 15 Jahre, 4%
Heubox, Rost, Kanäle - Investition	€	15.000	15.000	100 m ² Stockfläche, in Eigenleistung
Jährliche Belastung	€	942	942	ND 30 Jahre, 4%
Kollektor - Investition	€	10.000		250 m ² , in Eigenleistung
Jährliche Belastung	€	628		ND 30 Jahre, 4%
Entfeuchter - Investition	€	30.000		inkl. Steuerung
Jährliche Belastung	€	2.848		ND 15 Jahre, 4%
Summe Fixkosten/a	€	6.317	1.607	
Heuverbrauch/a	kg	146.900	146.900	20 ha Betrieb, 6.500 kg
TM Ertrag/ha.a				
Trocknungsmenge/a	kg	96.954	96.954	davon 2/3 Dürffutter
Fixkosten/kg Heu	Cent	5,50	1,70	
Energieverbrauch	kWh	10	8	pro 100 kg Heu
Variable Kosten/kg Heu	Cent	1,50	1,20	15 Cent/kWh
Gesamtkosten	Cent	7,00	2,90	pro kg Heu

Hilfiker, J., 1989: Betriebswirtschaftlicher Vergleich zwischen Bodentrocknung und Heubelüftung. FAT Bericht 371. Eidgenössische Forschungsanstalt für Agrarwirtschaft und Landtechnik, CH-8356 Tänikon.

Laville-Studer, K., 1990: Wie wirtschaftlich sind künstliche Heutrocknungsverfahren? FAT Bericht 384. Eidgenössische Forschungsanstalt für Agrarwirtschaft und Landtechnik, CH-8356 Tänikon.

Luder, W., 1982: Ermittlung der Erntegelegenheiten und des Verlustrisikos aufgrund von Klimadaten, dargestellt am Beispiel der Rauhfutterernte. Dissertation an der ETH Zürich, Diss.Nr. 6981. 37-71.

Pöllinger, A., 2003: Vergleich unterschiedlicher Heutrocknungsverfahren. Gumpensteiner Bautagung 2003. Bundesanstalt für alpenländische Landwirtschaft Gumpenstein, A-8952 Irnding.

Resch, R., 2007: Neue Futterwerttabellen für den Alpenraum. In: 34. Viehwirtschaftliche Fachtagung. Bericht HBLFA Raumberg-Gumpenstein, 19.-20. April 2007, 61-75.

Sattler, E., 2012: Untersuchung der Funktion einer Luftentfeuchter-Wärmepumpe in der Heubelüftung. Masterarbeit an der Universität für Bodenkultur, am H93 Department für Nachhaltige Agrarsysteme, H931 - Institut für Landtechnik. November 2012.

Wirleitner, G., Galler, J., Nydegger, F., Pöllinger, A., Van Caenegem, L., Weingartmann, H., Wittmann, H., 2009: Qualitätsheu durch einfache und kostengünstige Heubelüftung. ÖAG Sonderbeilage, Info 3/2009, Geschäftsstelle: LFZ Raumberg-Gumpenstein, 8952 Irnding.