

Vergleich von Kapazität und Kosten verschiedener Unterdachtrocknungsverfahren

Franz Nydegger^{1*} und Gotthard Wirleitner²

Zusammenfassung

Die Milchproduktion ohne Einsatz von Silagen (Heumilch) erfordert qualitativ hochwertiges Dürrfutter. Die voralpinen Regionen sind bestens geeignet für die Grünland basierte Grundfutterproduktion. Allerdings sind der Bodentrocknung des Dürrfutters durch die Höhe und die Häufigkeit der in diesen Gebieten anfallenden Niederschläge enge Grenzen gesetzt. Dieses Wetterrisiko kann durch den Einsatz von Heubelüftungsanlagen, häufig zusätzlich ausgerüstet mit Sonnenkollektoren, Warmluftheizungen und/oder Luftentfeuchter wesentlich verringert werden. Auf Grund von Ergebnissen aus umfangreichen Versuchen erstellte Beratungsgrundlagen und Anwendungen dienen einer möglichst guten Auslegung und einem optimalen Betrieb der Anlagen. Ein Vergleich verschiedener Trocknungsverfahren basiert auf einer Dürrfutterproduktion für 60 Milchkühe. Es wird eine Belüftungsanlage mit einer Stockfläche von 2 * 150 m² und insgesamt 1400 m³ Lagervolumen vorausgesetzt. Die folgenden Verfahren werden verglichen:

Kaltbelüftung (KB), Stockfläche 2 * 150 m², 2 Ventilatoren

Belüftung ausgerüstet mit Sonnenkollektoren (Soko), Stockfläche 2 * 150 m², 2 Ventilatoren, Sonnenkollektoren 600 m²

Belüftung mit Luftentfeuchter kombiniert mit Sonnenkollektoren (LE+Soko),

Stockfläche 2 * 150 m², 2 Ventilatoren, Sonnenkollektoren 300 m²

Für jedes Verfahren werden die Trocknungskapazität, die Trocknungszeit, der Energiebedarf, der Investitionsbedarf und die Kosten berechnet.

Die Trocknungskosten lagen zwischen 55 h und 89 h. Der Wasserentzug bewegt sich zwischen 1.0 (Kaltbelüftung) und 1.9 (Luftentfeuchter) Gramm pro Kubikmeter Luftdurchsatz. Der Energiebedarf liegt zwischen 69 und 129 kWh pro Tonne Dürrfutter. Die Trocknungskosten werden durch die Zusatzgeräte um bis zu 57% erhöht. Verantwortlich dafür sind vor allem die im Vergleich berücksichtigten Kosten für Abschreibung, Zinsen und Reparaturen.

Schlagwörter: Heu-Trocknung, Solarenergie, Luftentfeuchter, Warmluftkollektoren

Summary

Farms with silage-free milk production are dependent upon high-quality dry forage. In areas close to the Alps, the production of field-dried forage is associated with substantial weather-related risks. For this reason, hay-ventilation facilities are in use. Solar collectors, air heaters and dehumidifiers are options for increasing drying power. Dimensioning of these components is very important for a successful and energy saving drying process.

Drying with unheated ambient air or with conditioned air by solar collectors, air heaters and dehumidifiers differs in terms of drying potential, drying time and drying costs. Specialized programs have been developed which are especially geared to advisers and planners, to aid in the planning of hay ventilation plants.

A comparison of the drying options is based on a hay production for 60 milking cows. The hay drying facilities comprises a drying area (2 * 150 m²) with slated floor, a total box-volume of 1400 m³ and fans. The following drying options are compared:

Ambient air drying (drying area 2 * 150 m², 2 fans)

Solar collector (drying area 2 * 150 m², 2 fans, solar collector 600 m²)

Solar collector and Dehumidifier (drying area 2 * 150 m², 2 fans, solar collector 300 m²)

For each option drying capacity, drying time, energy consumption, investments and costs are calculated using adequate software.

Drying time per drying load in hours varies between 55 h and 89 h roughly. Evaporation of water varies from 1.0 (ambient air) to 1.9 (dehumidifier) grams per cubic meter air flow rate. Energy consumption lies between 69 and 124 kWh per ton of dried hay. Total drying costs are increased by 57% by the options increasing drying capacity. This is mainly caused by costs for repayment, interest and repairs considered in this study.

Keywords: hay-drying, solar energy, dehumidifier, thermal air-collectors

¹ Agroscope, Institut für Nachhaltigkeitswissenschaften, Tänikon 1, CH-8356 ETTENHAUSEN

² Initiative Heubelüftung, Am Pfaffenbühl 8, A-5201 SEEKIRCHEN

* Agro-Ing. HTL Franz NYDEGGER, franz.nydegger@agroscope.admin.ch



Einleitung

Das Interesse von Konsumentinnen und Konsumenten an regional und authentisch erzeugten gesunden Produkten steigt. Dies eröffnet Landwirten die Chance, dass sich ihre, durch ein Label gezeichnete Produkte, von der Massenware abheben, mit dem Ziel dadurch einen besseren Erlöses und letztlich ein höheres Einkommen zu erzielen. Dazu ist die Produktion von Silage frei erzeugter Milch sogenannte „Heumilch“ eine Möglichkeit.

Zur Silage freien Milchproduktion ist in den meisten Gebieten Europas und speziell in den Alpen und Voralpenregionen eine Unterdachtrocknung (Heubelüftung) des Futters unumgänglich.

Heubelüftungsanlagen bestehen im Wesentlichen aus mindestens einer Heubox. Die Heubox ist in der Regel rechteckig, weist einen dichten Boden (ab ca. 50 m² bis ca. 200 m² Fläche) und dichte Seitenwände (ca. 5 m hoch) auf. In dieser Box befindet sich ein flächig aufgebauter Rost (ca. 50 cm über dem Boden) auf den das angewelkte, d.h. noch nicht ganz trockene Futter schichtweise eingebracht wird. Ein Ventilator bläst die Trocknungsluft unter den Rost. Die Luft strömt durch das Futter und nimmt dabei Wasser auf was zur Trocknung des Futters führt. Um die Trocknung zu beschleunigen können dem Ventilator Gerät wie Sonnenkollektoren (Dachabsaugungen), Luftentfeuchter und Warmluftregister vorgeschaltet werden.

Wie solche Anlagen fachgerecht geplant und betrieben werden ist in den Richtlinien zur Belüftungstrocknung dargestellt.

Damit die Heubelüftung zum Erfolg führt, ist es wichtig bereits bei der Planung Grundlegendes zu beachten und insbesondere den Unterschieden des Verfahrens im Vergleich zur Silage Bereitung Rechnung zu tragen. Einer der kritischsten Punkte ist die Notwendigkeit einer wesentlich stärkeren Vortrocknung des Futters (Anwelken) auf dem Feld vor dem Einbringen. Weiter gilt es die Trocknungskapazität einer Belüftungsanlage richtig einzuschätzen und nicht zuletzt auch die für die Anlage notwendigen Investitionen und die durch den Betrieb entstehenden Kosten im Auge zu behalten.

Material und Methoden

Trocknungskapazität

Wassergehalt des Futters

Das auf die Belüftungsanlage eingebrachte Futter enthält je nach Anwelkgrad auf dem Felde grosse Mengen Wasser (Abbildung 1). Bei einer Einfuhrfeuchte von 40% (60% Trockenmassegehalt) z.B. müssen pro Tonne lagertrockenes Heu (87% TM) 450 kg Wasser entzogen werden. Dies muss vor allem beim Umstellen von Silagebereitung auf Heubelüftung beachtet werden. Bei einem für die Silierung optimalen Feuchtegehalt des Futters von 65% (35% Trockenmassegehalt) enthält die Silage pro Tonne Trockenmasse Heu noch rund 1.5 t Wasser zu viel. Beim unbedingt notwendigen weiteren Anwelken bis rund 40% Feuchtegehalt muss also zusätzlich eine Tonne Wasser verdunstet werden.

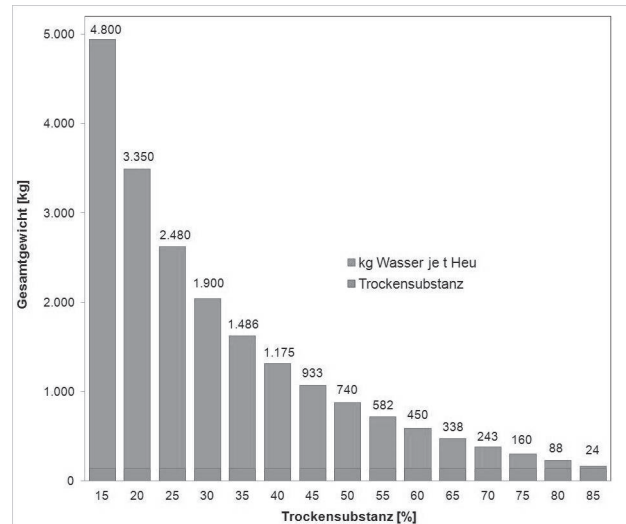


Abbildung 1: Abzutrocknende Wassermenge

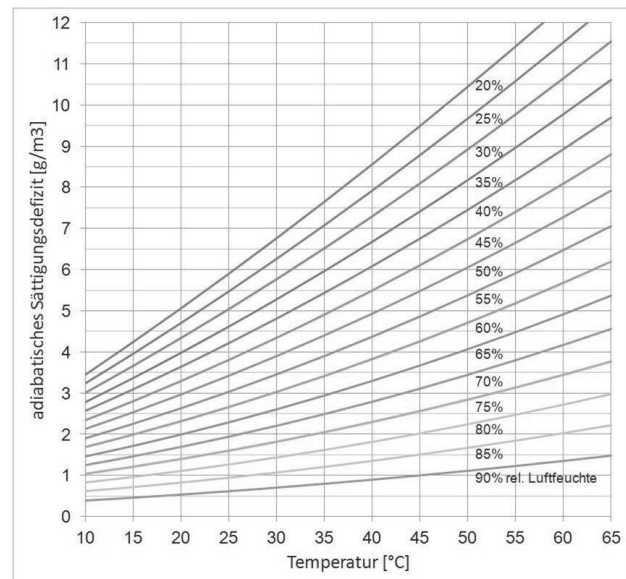


Abbildung 2: Das adiabatische Sättigungsdefizit berücksichtigt die Abkühlung der Trocknungsluft beim Trocknungsvorgang.

Wasseraufnahmevermögen der Luft

Das Wasseraufnahmevermögen der Luft (Sättigungsdefizit) ist abhängig von der Temperatur, der Luftfeuchtigkeit und in geringerem Masse dem Luftdruck. Der Trocknungsverlauf führt zu einer Abkühlung der Luft. Dieser Effekt wird im adiabatischen Sättigungsdefizit berücksichtigt (Abbildung 2). Die Berechnung wird mit einer nichtlinearen Regression vereinfacht.

Feuchtegleichgewicht

Trocknung erfolgt dann, wenn der Wasserdampfdruck des Trockengutes jenen der Luft übersteigt. Bei gleichem Wasserdampfdruck von Trockengut und Luft erfolgt keine Trocknung mehr. Durch Erwärmung steigt die Dampfdruckdifferenz und damit die Trocknungsgeschwindigkeit. Bei porösem Material erschweren feine Kapillaren die Trock-

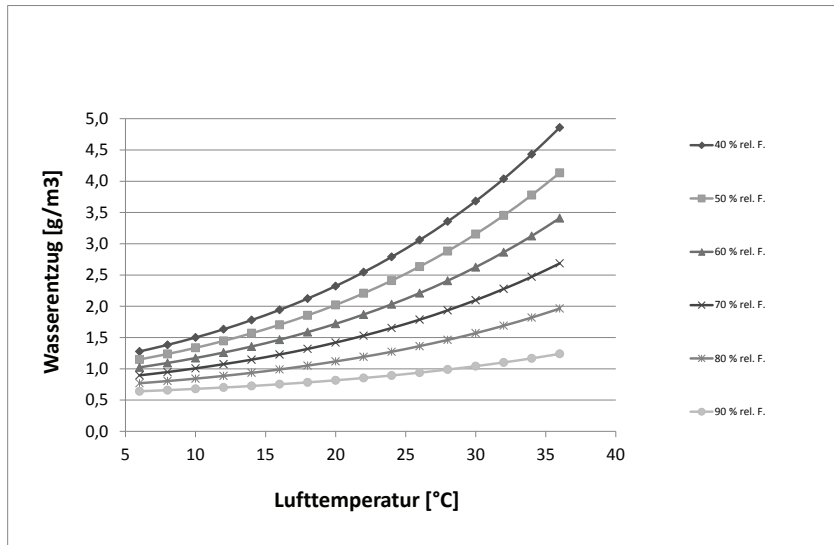


Abbildung 3: Wasserentzug in g/m³ Luft bei 60% TM (nach Baumgartner)

nung. Für jedes Trockengut lässt sich der, für eine Temperatur geltende Gleichgewichtszustand zwischen der relativen Feuchtigkeit der Luft und derjenigen des Trockenguts experimentell oder angenähert auch rechnerisch bestimmen und als „Sorptionsisotherme“ darstellen. Zum Trocknen von Heu auf Lagerfähigkeit von 12 bis 13% Wassergehalt muss die relative Luftfeuchtigkeit 45 bis 50% unterschritten werden. Ein Belüften unterhalb des Gleichgewichts führt demnach zu keiner Trocknung. Feuchte Luft kann sogar bereits trockenes Material wieder anfeuchten, allerdings nicht mehr entsprechend den Gleichgewichtswerten bei der Trocknung.

Wasserentzug

In langjährigen Versuchen der Forschungsanstalt Tänikon sowie in Versuchen am Lehr- und Forschungszentrum Raumberg-Gumpenstein konnten die Abhängigkeit des Wasserentzuges vom Wasseraufnahmevermögen der Luft und dem Trockenmassegehalt des aufgezeigt werden.

Berechnung des Wasserentzuges nach Baumgartner:

- A = Sättigungsdefizit der Trocknungsluft in g/m³
- B = TM-Gehalt des Futters in %
- C = Wasserentzug in g/m³
- $C = 2.972 + 0.1754 * A - 0.04095 * B$

Tabelle 1: Berechnungen zur Einfuhrmenge

Futterfläche	FF	ha
TM pro ha	TM _{ha}	kg/ha
Flächenertrag TM	TM _F	kg = FF*TM/ha
Heu	H	kg = TM _F /(1-TM _E /100)
TM Anfang	TM _A	% = TM _F /F _A *100 = FF*TM _{ha} /(TM _F /(1-TM _E /100)+S*WL)*100
TM End	TM _E	%
Wasserlast	WL	kg/m ²
Stock	S	m ²
WL-Stock	WL _S	kg = WL*S
Futter Anfang	FA	kg = H+WL _S = TMF/(1-TM _E /100)+S*WL
Trocknungszeit Charge tragbar	Z _T	h = (Z _T /75)*(WL _S /65)<1.255

Die Berechnung des Wasserentzuges in der verwendeten Software erfolgt mit Hilfe des adiabatischen Sättigungsdefizites und eines, insbesondere vom Trockenmassegehalt des Futters abhängigen Ausnutzungsgrades des Sättigungsdefizites. Die Berechnung berücksichtigt dadurch die in *Abbildung 3* (Wasserentzug) für einen Fall (60% TM) dargestellte Abhängigkeit vom Trockenmassegehalt des Futters.

Trocknungszeit (-dauer)

Für die Trocknungsdauer einer Futtercharge sind die abzutrocknende Wassermenge, der Wasserentzug pro Kubikmeter geförderte Luft und der Luftdurchsatz des Ventilators massgebend.

Angesichts der relativ geringen Wassermengen die pro Kubikmeter Luft entzogen werden (0 bis ca. 3 g/m³), sind grosse Luftdurchsätze der Ventilatoren gefordert. Für eine Stockgrundfläche von 100 m² werden 0.11 m³/m²*s oder rund 40 000 m³/h empfohlen (s. Richtlinien zur Belüftungstrocknung).

Die Berechnung Trocknungsdauer basiert somit auf den Werten, abzutrocknendes Wasser, Wasserentzug pro Kubikmeter Trocknungsluft und Luftdurchsatz des Ventilators pro Stunde.

Wasserlast

Aus FAT-Versuchen (FAT-Berichte 168, 1980) geht hervor, dass bei Kaltbelüftung beim erstmaligen Einfüllen die im Futter enthaltene Wassermenge nicht mehr als 50 Kilogramm Wasser pro m² Stockfläche betragen soll. Dieser Wert, Wasserdeckel oder Wasserlast genannt, zur Beurteilung der zulässigen Chargengrösse kann bei Verfahren mit Luftentfeuchtern oder Warmluftöfen entsprechend dem erzeugten höheren Sättigungsdefizit höher angesetzt werden. Bei Anlagen mit Sonnenkollektoren (Dachabsaugung) mit einer üblichen d.h. rund doppelt so grossen Kollektorfläche wie Belüftungsfläche kann mit rund 60 kg/m² und bei Luftentfeuchteranlagen mit einer doppelt so hohen Kompressorwie Ventilator Leistung mit rund 55 kg/m² gerechnet werden.

Energiebedarf

Der Energiebedarf errechnet sich aus der Stromaufnahme des Ventilators bei einem mittleren Betriebspunkt der Anlage sowie der Trocknungsdauer. Beim Betriebspunkt erzeugt der Ventilator eine Druckerhöhung, die den Druckverlust der Anlage genau kompensiert. Der tatsächliche Volumenstrom durch den Heustock ist daher durch den Betriebspunkt bestimmt. Ein dem Ventilator vorgeschaltetes Gerät (Sonnenkollektor, Luftentfeuchter oder Wärmeregister) erhöht den Druckverlust der Anlage, verschiebt also den Betriebspunkt. Zur Einhaltung des notwendigen Luftdurchsatzes ist deshalb eine entsprechend höhere Antriebsleistung des Ventilators notwendig. Bei Anlagen mit Luftentfeuchter ist zusätzlich der Energiebedarf des Luftentfeuchters zu berücksichtigen.

Für den optimalen Betrieb werden häufig Frequenzumwandler und automatische Prozess-Steuerungen eingesetzt.

Einführmenge

Die Einführmenge muss sich immer nach der Trocknungskapazität der Belüftungsanlage richten. Dies ist ein entscheidender Unterschied des Verfahrens Heubelüftung zum Verfahren Silage. Bei der Silage-Bereitung ist in erster Linie das vorhandene Volumen der Hoch- oder Flachsilo sowie die Schlagkraft der Erntekette massgebend dafür wie viel Futter an einem Tag eingebracht werden kann.

Bei der Heubelüftung kann ein „Überladen“ der Anlage zu einer starken Verlängerung des Trocknungsprozesses und allenfalls zu grossen Futterverlusten und entsprechendem Mehraufwand führen.

Für die Abschätzung der maximalen Einführmenge ist die sogenannte „Wasserlast“ hilfreich. Dieser Wert (kg Wasser pro m² Stockfläche) multipliziert mit der zur Verfügung stehenden Stockfläche ergibt die maximal einzuführende Wassermenge. Ein weiteres Kriterium ist die Trocknungsdauer.

Damit die Anlage nicht überladen wird, können die maximale Einführmenge (FA) sowie der minimale Trockenmassegehalt beim Einführen (TMA) ausgehend von der Schnittfläche (FF), dem Trockenmasse Ertrag pro ha (TMha), der Heustockfläche (S), dem Trockenmassegehalt nach der Trocknung (TME) und der maximalen Wasserlast (WL) des Verfahrens berechnet werden (s. *Tabelle 1*).

Bei Berücksichtigung der Trocknungsdauer als Kriterium für die mögliche Einführmenge kann auch berechnet werden, ob eine Charge für die Anlage tragbar ist. Sie ist dann tragbar, wenn die *Tabelle 1* dargestellte Bedingung unter Berücksichtigung der Trocknungszeit und der Wasserlast erfüllt ist.

Verfahrensvergleich

Der Verfahrensvergleich stützt sich auf die oben beschriebenen Grundlagen ab.

Die Berechnungen erfolgen auf Grund eines Beispielbetriebes mit 60 Milchkühen, silofreier Winterfütterung von 170 Tagen.

Bei einer Ration von 17 kg Trockenmasse (TM) Dürrfutter pro Kuh und Tag ergibt sich ein Dürrfutterbedarf von rund 170 Tonnen Trockenmasse pro Jahr. Dies entspricht bei einem Wiesenertrag von 9 Tonnen TM pro Hektar rund 19 Hektar Wiesland.

Der eingesetzte Wiesenertrag fällt üblicherweise mit 35% im ersten, 30% im zweiten, 20% im dritten und 15% im vierten Schnitt an (Agridea Betriebsplanung 2010) an. Anlagen müssen in erster Linie auf den ersten Schnitt ausgelegt werden. Im Vergleich wird deshalb vereinfachend von neun Chargen mit je einem Drittel des Ertrages ausgegangen. Daraus ergibt sich eine Chargengrösse von rund 32 Tonnen Frischmasse mit 60% Trockenmassegehalt. Dies setzt eine Heubelüftungsfläche von 300 m² mit einem Stockvolumen von rund 1400 m³ bei einer maximalen Füllhöhe von fünf Metern voraus.

Tabelle 2: Investitionsbedarf Trocknungsanlagen

Anlage Kalt-Belüftung, 300 m ²	m ²	€
2 Kaltbelüftung, zu 150 m ²	300	30.000
Arbeit	300	30.000
2 Ventilatoren	300	30.000
<i>Anlagepreis Komplett</i>		<i>90.000</i>
Anlage Soko-Belüftung, 300 m ²		
2 Kaltbelüftung, zu 150 m ²	300	30.000
Arbeit	300	30.000
2 Soko für 300 m ² Stockfläche	600	15.000
2 Ventilatoren	300	30.000
<i>Anlagepreis Komplett</i>		<i>105.000</i>
Anlage Luftentfeuchter-Soko-Belüftung, 300 m ²		
2 Kaltbelüftung, 150 m ²	300	30.000
Arbeit	300	30.000
1 Soko für 150 m ² Stockfläche	300	7.500
1 Ventilator	150	15.000
1 Luftentfeuchter	150	52.500
<i>Anlagepreis Komplett</i>		<i>135.000</i>

Berechnete Verfahren

Für die Trocknung kommen die folgenden Verfahren zum Einsatz:

- Kaltbelüftung (KB)
- Belüftung ausgerüstet mit Sonnenkollektoren (Soko)
- Belüftung mit Luftentfeuchter kombiniert mit Sonnenkollektoren (LE+Soko)

Bei den Varianten KB und Soko wird die ganze Stockfläche von 300 m², also beide Heustöcke gleichzeitig beschickt und mit je einem Ventilator betrieben.

Die Variante Soko wird in 75% der Laufzeit mit Soko und 25% als Kaltbelüftung betrieben. Dies trägt dem Umstand Rechnung, dass auch Zeiten ohne Sonnenschein überbrückt werden müssen.

Bei LE+Soko ergänzen sich LE und Soko, sie werden zu je 50% betrieben. Es steht ein Ventilator zur Verfügung, der jeweils einen der beiden Heustöcke belüftet. Mit Hilfe von Klappen wird einerseits zwischen Sonnenkollektor und Luftentfeuchter und andererseits zwischen den Stöcken umgeschaltet.

Alle Anlagen sind mit einer automatischen Steuerung ausgerüstet.

Die Berechnungen erfolgen mit Excel-Anwendungen der Autoren. In die Anwendungen sind die Ergebnisse aus den Versuchen der Forschungsanstalt Tänikon und dem Lehr- und Forschungszentrum Raumberg-Gumpenstein eingeflossen.

Bau und Investitionsbedarf für die Verfahren

Für den Vergleich wird der Investitionsbedarf für die direkt dem Verfahren zuzuordnenden Bauteile und Geräte berücksichtigt (*Tabelle 2*). Dies sind die Belüftungsboxen, der Sonnenkollektor, der Luftentfeuchter, die Steuerungen der Geräte und der Ventilator respektive die Ventilatoren. Weiter berücksichtigt ist der Arbeitsaufwand für den Bau

Tabelle 3: Trocknungsdauer, Energieverbrauch und Energiekosten

Parameter	Einheit	KB	Soko	LE-Soko
Einführmasse frisch pro Charge	kg	31.636	31.636	31.636
Trockenmassegehalt frisch	%	60	60	60
Heu (Trockenmassegehalt 87%)	kg	21.818	21.818	21.818
abgetrocknetes Wasser	kg	9.818	9.818	9.818
Motorleistung Ventilator	kW	17,6	23,4	14,4
Motorleistung LE	kW			32
Motorleistung mix	kW			30,4
Wasserentzug	g/m ³	1,0	1,5	1,9
Volumenstrom	m ³ /h	118.800	118.800	59.400
Strömungswiderstand im Mittel*	Pa	288	383	473
Wasserentzug	kg/h	119	178	113
Trocknungsdauer	h	86	55	89
Energieverbrauch total	kWh	1.513	1.283	2.716
Energieverbrauch Luftentfeuchter	kWh			1.427
Energieverbrauch pro kg entzogenes Wasser	kWh/kg H ₂ O	0,154	0,131	0,277
Energieverbrauch pro kg Heu	kWh/kg Heu	0,069	0,059	0,124
Energiepreis	€/kWh	0,16	0,16	0,16
Energiekosten	€	242	205	435
Energiekosten pro kg entzogenes Wasser	€/kg H ₂ O	0,025	0,021	0,044
Energiekosten pro kg Heu	€/kg Heu	0,011	0,009	0,020
Jahreskosten pro kg TM ohne Energie	€	0,48	0,56	0,72
Jahreskosten pro kg TM mit Energie	€	0,60	0,65	0,94
Jahreskosten pro kg Heu mit Energie	€	0,53	0,58	0,83

* bei 3 m Stockhöhe

der Anlage und die Montage der Geräte. Für die Berechnung der Jahreskosten wurde mit den folgenden Sätzen gerechnet:

Amortisation	5,00%
Zins	2,50%
Reparatur	1,50%
Versicherung	0,20%

Die Angaben basieren auf Schätzungen von lokalen unabhängiger Berater der Region Salzburg.

Ergebnisse und Diskussion

Trocknungsdauer, Energieverbrauch und Kosten

Die Berechnungen zu Trocknungsdauer, Energieverbrauch und Energiekosten sind in *Tabelle 3* zusammengestellt. Bei allen drei Verfahren wird eine Charge von 31.636 kg Futter mit einem Trockenmassegehalt von 60% eingeführt und auf 87% Trockenmassegehalt getrocknet. Auf Grund der unterschiedlichen Vorschaltgeräte (Sonnenkollektoren und Luftentfeuchter) tritt bei den Verfahren Soko mit 383 Pa und beim Verfahren LE-Soko mit 473 Pa ein, gegenüber dem Verfahren KB höherer Strömungswiderstand auf damit der notwendige Volumenstrom von 118.800 m³/h respektive 59.400 m³/h erreicht wird. Entsprechend liegt die Motorleistung des Ventilators beim Verfahren Soko bei 23 kW, dagegen beim LE-Soko nur bei 14 kW auf Grund der in diesem Falle nur halb so grossen aktiven Belüftungsfläche.

Die Motorleistung des LE beträgt 32 kW. Da dieser jedoch nur zu 50% der Belüftungszeit, d.h. bei schlechten Wetter-situationen und nachts in Betrieb ist, beträgt die mittlere Motorleistung rund 30 kW. Die berechneten Wasserentzugswerte zeigen die Unterschiede in der Trocknungska-

pazität der Verfahren auf und führen zu den unterschiedlichen Trocknungszeiten (Trocknungsdauer).

Die Verfahren KB und Soko mit gleichzeitiger Belüftung der ganzen Stockfläche weisen Trocknungsdauern von 86 h respektive 55 h aus. Es zeigt sich, dass auf Grund der Belüftung von nur einer Box von zwei vorhandenen die Trocknungsdauer beim Verfahren LE-Soko ca. gleich hoch ausfällt wie bei KB. Der wichtige Unterschied besteht aber darin, dass diese Trocknungsdauer praktisch wetterunabhängig ist. Deutliche Unterschiede treten beim Energieverbrauch auf. Am günstigsten steht das Verfahren Soko mit 1.283 kWh da, wogegen die Variante LE-Soko mit 2.716 kWh am meisten elektrische Energie benötigt.

Dies wirkt sich auch auf den Energieverbrauch pro kg entzogenes Wasser, pro kg Heu und die Energiekosten aus. Es zeigt sich wie in früheren ähnlichen Berechnungen auch, dass das Verfahren Soko in Bezug auf die Energiekosten pro kg Heu und pro kg entzogenes Wasser das günstigste Verfahren darstellt. Für einen objektiven Vergleich ist es weiter notwendig die Investitionen und die daraus resultierenden Jahreskosten zu berücksichtigen. Unter den aufgeführten Annahmen ergeben sich Jahreskosten (ohne Energie) pro kg Trockenmasse von € 0,48 bei KB über € 0,56 bei Soko bis € 0,72 bei LE-Soko. Unter Einbezug des notwendigen Energiebedarfes steigen die Jahreskosten pro kg Trockenmasse auf € 0,60 bis € 0,94. Die Differenz von € 0,34 zwischen den Verfahren KB und LE-Soko ist der Preis der für die grössere Produktionssicherheit und die geringere Wetterabhängigkeit bezahlt werden muss.

Maximale Einfuhrmenge und minimaler Trockenmassegehalt

Für die im Vergleich angenommene Situation kann auch die maximale Wasserlast für die zur Verfügung stehende Belüftungsfläche und daraus die maximale Einfuhrmenge pro Charge und der dabei zulässige minimale Trockenmassegehalt berechnet werden. Bei der KB beträgt die maximale Charge rund 36.800 kg mit mindestens 51,5% TM, bei den Varianten Soko rund 39.800 kg mit mindestens 47,7% TM und bei LE-Soko rund 31.700 kg mit 59,8% TM. Ein Vergleich mit den Annahmen in *Tabelle 3* zeigt, dass sowohl bei den Varianten KB als auch Soko noch eine Reserve in Bezug auf die Wasserlast besteht, wogegen diese bei LE-Soko bereits ausgereizt ist.

Fazit

Mit Hilfe der aufgeführten Grundlagen und Informationen zur betrieblichen Situation ist es möglich eine Schätzung der Trocknungskapazität und der Kosten verschiedener Trocknungsverfahren vorzunehmen. Je besser die Einfuhrmasse und der TM-Gehalt des eingeführten Futters geschätzt

werden kann, desto genauer ist auch die Berechnung der Trocknungsdauer und der Trocknungskosten möglich.

Die grösste Unsicherheit besteht bei der Einschätzung des Wettereinflusses auf den Trocknungsfortschritt besonders bei der Kaltbelüftung und etwas weniger beim Einsatz von Sonnenkollektoren. Geräte zur Konditionierung der Luft (Luftentfeuchter, Warmluftöfen etc.) können diese Unsicherheit wesentlich verringern.

Dabei sind allerdings die zusätzlichen Kosten nicht zu vernachlässigen. Der Vergleich zeigt, dass durch die Belüftung der gesamten Heustockfläche sowohl bei Kaltbelüftung als auch bei Sonnenkollektoren genügend kurze Trocknungsdauern erreichbar sind.

Beim Einsatz von Luftentfeuchtern wird in der Regel nicht die ganze Stockfläche gleichzeitig belüftet. Gründe dafür sind z.B. der hohe Investitionsbedarf und hohe notwendige elektrische Anschlusswerte. Wichtig ist auch die grosse Wetterunabhängigkeit des Verfahrens und dadurch die Möglichkeit Stöcke zeitlich gestaffelt zu belüften.

Die Kombination von Sonnenkollektoren und Luftentfeuchter ermöglicht eine effiziente Belüftung mit hohen

Entzugswerten bei günstigen Wetterbedingungen durch den Sonnenkollektor. Gleichzeitig steht mit dem Luftentfeuchter ein Gerät zur Verfügung zur Sicherstellung der Trocknung bei ungünstigen Wetterbedingungen.

Literatur

Richtlinien zur Belüftungstrocknung von Heu, 2014

Wirleitner, G., 2010: Qualitätsheu durch energieeffiziente Technik.

Baumgartner, J., 1991: Die Heubelüftung von A-Z, FAT-Berichte 406.

Nydegger, F., 1991: Sonnenkollektoren für die Heubelüftung, FAT-Berichte 407.

Baumgartner, J., 1989: Heu- und Maistrocknung mit Luftentfeuchter-Wärmepumpe, FAT-Berichte 370.

Weingartmann, H., 1989: Solarenergie bei der Unterdachtrocknung von Welkheu, ÖKL Landtechnische Schriftenreihe 149.

Baumgartner, J., 1987: Heu- und Maistrocknung mit Wärmepumpe, FAT-Berichte 324.

Baumgartner, J., 1980: Die Heubelüftung optimal bedienen, FAT-Berichte 168.