

# Qualitätsheu durch energieeffiziente Technik

Gotthard Wirleitner<sup>1\*</sup>

## Zusammenfassung

Entsprechend der derzeitigen wirtschaftlichen Lage bietet sich in Grünlandgebieten für bäuerliche Betriebsgrößen eine kostenbewusste, aber auch schlagkräftige Erzeugung von hochwertigem wirtschaftseigenen Futter an. Dabei ist ein moderater Einsatz von Energie von der Kostenseite, aber auch von der Belastung des Stromnetzes wichtig. Die besondere Qualität von hochwertigem Heu wirkt sich im Erlös für Heumilch und Heumilchprodukte aus. Daneben ergeben sich Vorteile durch den weitgehenden Ersatz von Kraftfutter, durch Einschränkung von Ernteverlusten und des Pilzbefalls bei der Heubereitung und durch höhere Grundfutteraufnahme.

Entscheidende Maßnahmen für eine effiziente Heutrocknung liegen einerseits in der Beachtung physikalischer Vorgänge wie etwa dem Feuchtigkeitsgleichgewicht zwischen der relativen Luftfeuchte und der Feuchtigkeit eines Trockengutes, des Weiteren in einer strömungsgünstigen Gestaltung der Trocknungsboxen oder der Auswahl passender Ventilatoren. In den letzten Jahren konnten die spezifischen Energiekosten durch Solarenergienutzung und besseren Einsatz von Wärmepumpen stark gesenkt werden. Solare Luftkollektoren erreichen weitaus höhere Wirkungsgrade als übliche Brauchwasserkollektoren, Luftentfeuchter-Wärmepumpen haben im Vergleich mit herkömmlichem Wärmepumpeneinsatz höhere Leistungszahlen. Besonders erfolgversprechend erscheint die Kombination von Fotovoltaik mit Solar-Luftkollektoren und eine automatische Steuerung von Ventilator sowie Entfeuchter samt Umschaltung von Frischluft- auf Umluftbetrieb.

Nach einer aktuellen Berechnung liegen die Gesamtkosten einer Heubereitung mit Einsatz von Luftentfeuchter und Solar-Dachabsaugung teilweise unter den Kosten für eine vergleichbare Gärfutter-Variante.

*Schlagwörter:* Heu, Heubelüftung, Heutrocknung, Solarenergie, Luftkollektoren, Luftentfeuchter, Fotovoltaik, Netzbelastung

## Summary

According to the current economic situation a cost-conscious and powerful production of high value own forage is advised for small and medium grassland-farms. In order to keep costs low and in aspect to limitations of the electrical power grid a moderate energy input is important. The special quality of premium hay provides higher revenues from milk and dairy products. Further advantages are the replacement of concentrates, the reduction of crop losses, the prevention of fungal infestation and a higher forage intake.

The observance of physical processes like the equilibrium moisture between air and hay is essential for effective hay-drying, as well as aerodynamic shaped hay-boxes or the selection of suitable fans. Recently, energy costs could be reduced substantially by application of solar energy and improved application of heat pump-dehumidifiers. Solar-air collectors are far superior to conventional processing-water collectors. Dehumidifiers are working under better coefficients of performance than conventional heat pumps.

Especially effective is the combined application of photovoltaics with thermal air-collectors and the application of an automated control system for fan, dehumidifier and to switch between operating modes fresh air and closed circuit air.

Recent calculations have shown that the total costs of hay production using thermal solar collectors and a dehumidifier can be lower than total costs based on ensilage.

*Keywords:* hay, hay-drying, hay aeration, solar energy, thermal air-collectors, dehumidifier, photovoltaics, power grid-load

## Einleitung – Die aktuelle Situation

Steigende Preise für Energie und Futtermittel bestimmen heute bei einem niedrigen Milchpreis die wirtschaftliche Lage in den Grünlandgebieten. Zukunftsforscher wie etwa HORX (2005) verweisen darauf, dass in der Zukunft jene Betriebe verschwinden werden, die so wirtschaften, wie es

die Masse derzeit macht. Dabei geben langfristig steigende Nahrungsmittelpreise oder der Trend nach Qualitätsprodukten gerade in der Landwirtschaft durchaus Anlass zu einem Optimismus. Die technische Entwicklung in der bäuerlichen Landwirtschaft wird demnach durch einen sparsamen Umgang mit Energie, aber gleichzeitig auch mit Rücksicht auf die Arbeitskosten und Ressourcen an Arbeit

<sup>1</sup> Initiative Heubelüftung, Am Pfaffenbühel 8, A-5201 Seekirchen

\* Ansprechpartner: Prof.i.R. Dipl.-Ing. Gotthard Wirleitner, email: [g.wirleitner@aon.at](mailto:g.wirleitner@aon.at)

durch Schlagkraft gekennzeichnet sein. Hohe Produktqualität ist die Alternative zu billiger Massenproduktion. Das steigende Gesundheitsbewusstsein der Konsumenten unterstützt diese Richtung.

Aus einem guten Grünlandbestand, einer schonenden Vortrocknung am Boden und einer nachfolgenden wirksamen Unterdachttrocknung ist in günstigen Lagen eine Energiekonzentration in der Größenordnung von 6 MJ NEL/kg Heu-Trockenmasse erreichbar. Die Trockenmasseaufnahme je Tier liegt über derjenigen von Silagefutter, weil Gärsäuren die Fresslust begrenzen. Die Schlagkraft der Heuernte kann sich heute durchaus mit der Gärfutter-Variante messen. Nach der Empfehlung des „Heu-Pioniers“ Karl Neuhofer soll die gesamte Erntefläche je Schnitt in 2 bis 3 Tagen bewältigt werden. Nach Berechnungen von HERZOG (Landwirtschaftskammer Salzburg, 2008) ist eine derartige Heu-Variante gegenüber der Gärfutterbereitung unter Berücksichtigung aller Kosten bei vorhandenen Gebäuden eindeutig im Vorteil, bei erforderlichen Neubauten ist der Unterschied gering.

### Maßnahmen zur Sicherung der Qualität

Schlecht getrocknetes Heu riecht muffig und ist braun oder grau verfärbt. Bronchialasthma oder die „Farmerlunge“ sind bekannte, vor allem durch Kontakt mit pilzbefallenem Heu verursachte Erkrankungen.

Die relative Luftfeuchtigkeit ist nach HEISS und EICHNER (2002) ein entscheidendes Indiz für das Auftreten von Pilzen, Hefen und Bakterien in Trockengütern (Abbildung 1). Erst ab etwa 60 % relativer Luftfeuchtigkeit ist die Vermehrungstätigkeit von Pilzen, Hefen und Bakterien unproblematisch. Enzymatische Veränderungen und Veratmung im Trockengut gibt es aber auch unterhalb dieser Grenze.

Entscheidend für eine gute Heuqualität ist das Einbringen des Welkheus vor dem Einsetzen umfangreicher Bröckelverluste, also möglichst mit einem Trockensubstanzgehalt unterhalb von 70 bis 65 % (Abbildung 2). Wichtig ist aber auch ein wirksames Trocknen auf einen Trockensubstanzgehalt von mindestens 87 % innerhalb von 70 bis 80 Stunden – nie über 4 Tage hinaus. Restfeuchte kann die Ursache einer Erwärmung bis hin zur Selbstentzündung

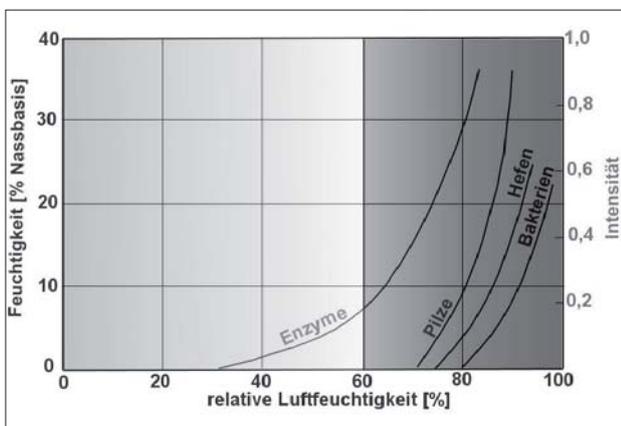


Abbildung 1: Einfluss der Luftfeuchtigkeit auf Mikroorganismenaktivität (nach HEISS und EICHNER 2002)



Abbildung 2: Grobschätzung des Trockenmassegehalts: links Frischgut, bei 40 % welke Blätter, bei 60 % zeigt die Wringprobe und bei 65 % zeigt die Nagelprobe keinen Saftaustritt mehr, bei 70 % lassen sich Blätter zerreiben

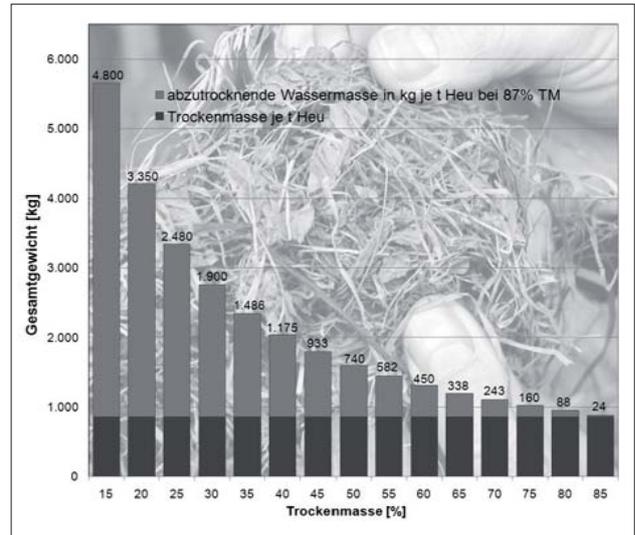


Abbildung 3: Die Menge des abzutrocknenden Wassers hängt stark vom Anfangs-Trockenmassegehalt ab

des Heus werden. Wegen der langsameren Trocknung von Stängelanteilen ist ein mehrfaches kurzes Nachbelüften nach der eigentlichen Trocknung zweckmäßig. Wichtig erscheint eine Sicherung des Trocknungsverlaufes auch bei Schlechtwetter durch Luftanwärmung oder Entfeuchtung. Der Einbau einer Dachabsaugung zur Luftanwärmung sollte zum Regelfall werden.

Bei der Trocknung von frisch gemähtem Wiesengras mit knapp 20 % Trockenmasse (TM) müssen je t Trockenheu von 87 % TM 3,35 t Wasser abgeführt werden (Abbildung 3). Bei Welkheu von 60 % TM beträgt die abzutrocknende Wassermenge noch 450 kg je t. Grob gerechnet steht je 10 bis 15 % weniger TM eine Verdoppelung der Menge des abzutrocknenden Wassers oder der dazu erforderlichen Energie gegenüber. Von der Kostenseite hat daher die Vortrocknung am Boden große Bedeutung. Eine kurze Vortrocknungszeit ist dagegen wegen der Bröckelverluste, aber auch zur Begrenzung des Wetterrisikos von Vorteil. Das Einbringen von „Eintagesheu“ kann manchmal aus Witterungsgründen sinnvoll sein.

### Das Feuchtigkeitsgleichgewicht beachten!

Bei porenhaltigen organischen, aber auch nichtorganischen Materialien besteht ein Gleichgewicht zwischen deren Wassergehalt und der relativen Luftfeuchtigkeit. Deshalb kann Heu mit Außenluft bei Regenwetter nicht bis zur Lagerfähigkeit getrocknet werden. Zum Trocknen von Heu auf Lagerfähigkeit von rund 87 % Trockenmasse ist bei 20°C beispielsweise eine maximale Luftfeuchtigkeit von

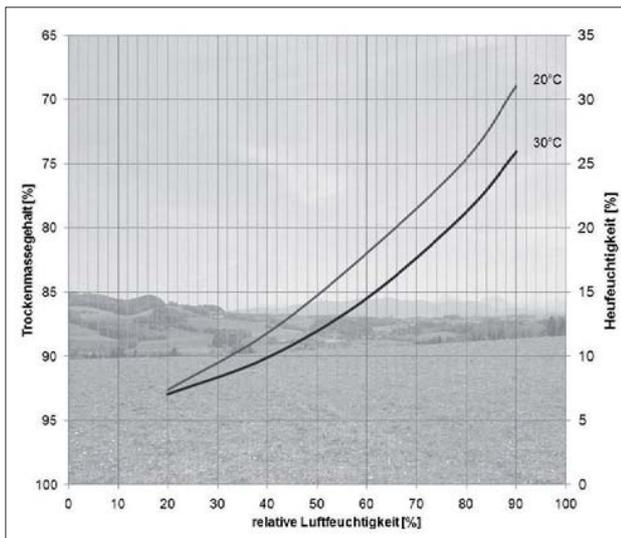


Abbildung 4: Sorptionsisothermen von Wiesenheu (Daten nach SEGLER 1958)

höchstens 50 % Voraussetzung (Abbildung 4). Bei 80 % relativer Luftfeuchtigkeit ist nur eine Trocknung bis etwa 76 % Trockenmasse möglich. Ist die Luft feuchter, so wird trotz Belüftung nicht mehr getrocknet, das Heu kann sogar in geringem Umfang wieder Wasser aufnehmen.

Das Belüften führt also nur dann zu einer Trocknung, wenn eine relative Luftfeuchtigkeit unterhalb der Gleichgewichtskurve herrscht. Aus Sicherheitsgründen muss jedoch belüftet werden, wenn die Temperatur im Heu durch Selbsterwärmung über 35°C steigt.

Wegen des Feuchtigkeitsgleichgewichts trocknet das Heu nicht gleichmäßig, sondern schichtweise. Die bis zum Feuchtigkeitsgleichgewicht getrocknete Schicht wandert im Laufe der Zeit in Strömungsrichtung der Luft weiter. Bei niedriger Außentemperatur kann die feuchte Trocknungsluft an der Heustockoberfläche kondensieren und eine Schimmelbildung verursachen. Eine derartige Kondensationszone kann sich besonders auch bei Warmlufttrocknung einstellen.

## Die Planung der Trocknungsboxen

Es hat sich als zweckmäßig erwiesen, dass die Belüftungsboxen jeweils einen ganzen Schnitt des Betriebes fassen können. Kritisch ist meist der erste Schnitt. Nach erfolgreicher Trocknung kann dann das Heu umgelagert oder aus dem Stock heraus zu Ballen gepresst werden. Damit sind die Belüftungsboxen zum Beginn des nächsten Schnittes wieder verfügbar. Nach einer groben Faustregel sollten je ha Chargen-Mähfläche rund 20 bis 30 m<sup>2</sup> belüftete Fläche zur Verfügung stehen.

Während früher oft strömungsungünstige abgewinkelte Luftführungskanäle und Flachrostanlagen mit geringer Rosthöhe gebaut wurden, so sind jetzt Kastentrockner mit dichten Seitenwänden, einem mindestens 50 cm hohen Bodenrost und kurze, groß dimensionierte Luftzufuhrkanäle empfehlenswert.

Der Kanalübergang unter den Bodenrost soll einen möglichst großen Querschnitt haben. Der Abstand Rost – Sei-

tenwand sollte je nach Größe der Box bei etwa 60 bis 90 cm liegen. Meist wird heute einfach der Bodenrost wandseitig um das genannte Maß mit Verlegeplatten abgedeckt (Abbildung 5).

Es ist zu bedenken, dass für eine einigermaßen gleichmäßige Durchlüftung die Höhe der ersten Heuschicht zumindest einen halben Meter betragen soll. Je nach der erforderlichen Schlagkraft kann es daher sinnvoll sein, große Trocknungsboxen (z.B. über 150 bis 200 m<sup>2</sup>) zu unterteilen.

Anstelle eines Holz-Lattenrostes werden neuerdings gerne Baustahlmatten mit 100 × 100 mm Maschenweite und etwa 8 mm Drahtstärke (z.B. ÖNORMAQ 82) verwendet. Damit wird der Bodenrost weniger leicht durch Greiferzinken beschädigt. Die Matten werden überlappend ohne Befestigung verlegt. Eine ausreichende Rosthöhe ab etwa 50 cm ist entscheidend für den Druckausgleich und damit für die Gesamtfunktion der Anlage. In die Trocknungsbox ragende, nach hinten fliehende Gebäudeteile wie z.B. Zangenbinder sollen wegen sonst entstehender Leckluft vertikal verschalt werden (Abbildung 6).

## Die Auswahl des Ventilators

Erfahrungsgemäß haben Probleme mit Heubelüftungen ihre Ursache oft in zu wenig druckstabilen Ventilatoren. Ein maximaler Druck von etwa 1.600 Pa hat sich bei Boxenbe-

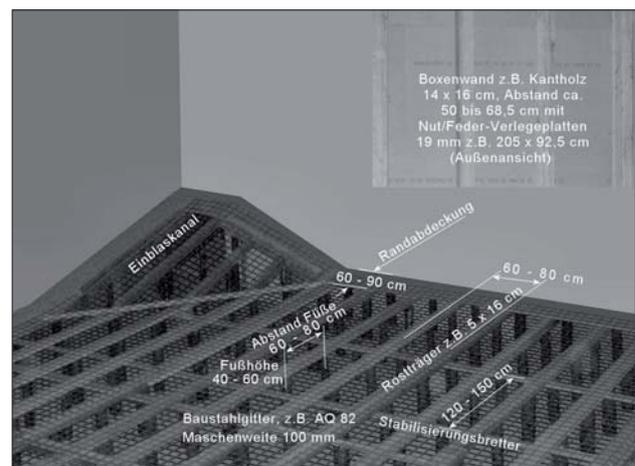


Abbildung 5: Beispiel für die Gestaltung des Bodenrosts. Als Rostträger werden oft auch Kanthölzer mit 10 × 10 cm Querschnitt verwendet

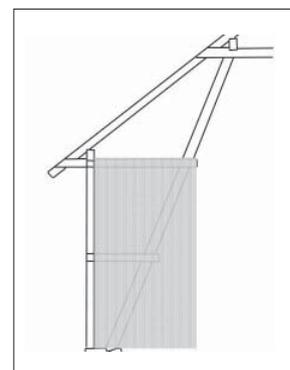


Abbildung 6: Nach unten fliehende Gebäudeteile verkleiden!

lüftung als zweckmäßig erwiesen, um auch den Saugdruck eines Dachkollektors oder den Strömungswiderstand von Wärmetauschern überwinden zu können. Grob kann man von 100 bis 240 Pa Druckverlust je m Heu-Durchströmweg ausgehen. Bei herkömmlicher Rundballenbelüftung sind insgesamt maximale Drücke um 1.500 bis 1.900 Pa zweckmäßig. Gräser- und kräuterreiches oder grobstängeliges Heu (z.B. Luzerne) erfordert einen geringen, ein kleereicher Bestand oder eine kurze Schnittlänge dagegen einen hohen Druck. Günstig hat sich bei Ladewagen eine Anzahl von 7 bis 10 Messern erwiesen.

Der in einer Anlage herrschende statische Druck lässt sich leicht mit Hilfe eines teilweise mit Wasser gefüllten U-Rohres messen (Abbildung 7). Das Rohr wird mit einem Plastikschlauch verbunden, dessen Ende unterhalb des Bodenrostes senkrecht zur Strömungsrichtung der Luft mündet oder besser, dessen Ende mit einem Stopfen verschlossen ist, aber kurz davor drei am Umfang regelmäßig verteilte Bohrungen aufweist. 1 mm Wassersäule entspricht dem Druck von 9,81 (rund 10) Pascal (Pa) oder 0,1 mbar. Den statischen Druck misst man am besten unterhalb des Bodenrostes der Trocknungsbox.

Zur Begrenzung des Strömungswiderstandes, aber auch zur Gewährleistung einer ausreichenden Durchlüftung

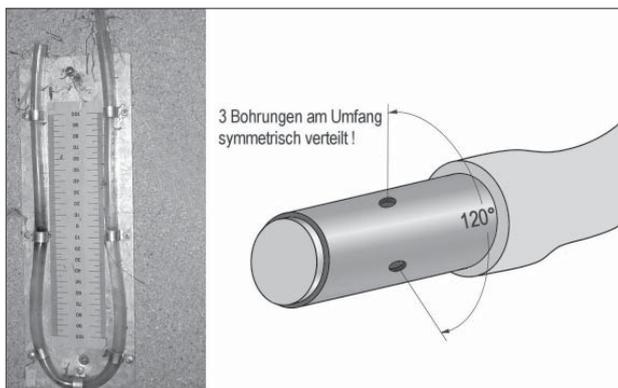


Abbildung 7: Links U-förmiger Schlauch, rechts Schlauchende zur Messung des statischen Druckes unterhalb des Bodenrostes

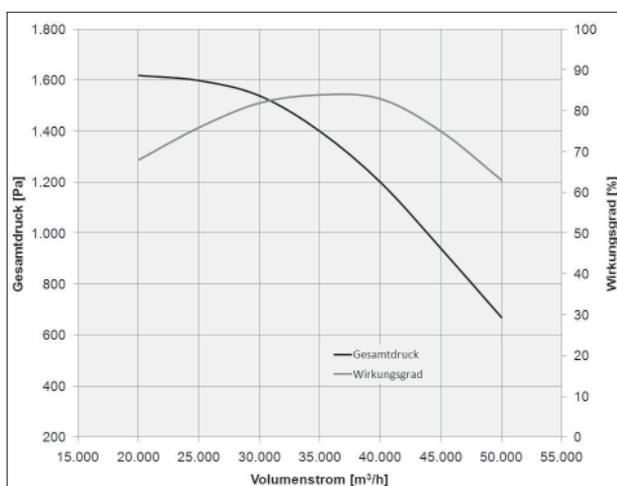


Abbildung 8: Kennlinien eines Ventilators

des Heus muss die Förderleistung („Volumenstrom“) auf die belüftete Fläche abgestimmt werden. Bewährt sind Werte von 0,11 m<sup>3</sup> Luft/m<sup>2</sup> belüfteter Fläche und Sekunde (Bereich 0,07 bis 0,13 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>\*s<sup>-1</sup>). Es ist zu beachten, dass eine Erhöhung des Volumenstromes je Quadratmeter belüfteter Fläche zu einem überproportionalen Anstieg des erforderlichen Ventilatordruckes führt. Eine Verdoppelung des Volumenstromes von 0,1 auf 0,2 m<sup>3</sup> Luft/m<sup>2</sup> erhöht beispielsweise den Gegendruck rund auf das Dreifache!

Oft wird die Nennförderleistung auf der Basis eines, für den Trocknungsbetrieb zu niedrigen Druckes angegeben. Der beste Wirkungsgrad wird meist nicht zugleich mit dem größten Druck erreicht, sondern bei erheblich geringem Volumenstrom (Abbildung 8). Daher erscheint eine Druckreserve sinnvoll, auch um bei übergroßen Erntemengen das Zusammensacken des Heustocks zu vermeiden. Ventilatoren mit einseitigem Lufteintritt sind allgemein eher druckstabiler als solche mit zweiseitiger Ansaugung („Doppelflüter“). Nicht selten wird die Leistung von Ventilatoren und anderen Elektrogeräten durch die Hausanschluss-Sicherung („Panzer-Sicherung“) begrenzt (Tabelle 1).

Zunehmend werden Belüftungsanlagen mit einem Frequenzumformer ausgerüstet (Abbildung 9). Damit ist es möglich, die Drehzahl des Ventilators und damit Förderleistung und Druck stufenlos zu verändern und an Betriebsbedingungen anzupassen. Eine Drosselung der Förderleistung kann beispielweise bei geringer erster Schichthöhe oder gegen Ende der Trocknung vorteilhaft sein. Auch der Einschaltstromstoß lässt sich mit diesen Umformern verringern. Mit Rücksicht auf eine Luftanwärmung sollten Elektromotoren zum Ventilatorantrieb eine Temperaturstabilität (z.B. bis 65°C) aufweisen.

Tabelle 1: Anschlusswerte für Elektrogeräte bei verschiedenen Sicherungen

| Sicherung | möglicher Anschlusswert |
|-----------|-------------------------|
| 25 A      | 14,4 kW                 |
| 32 A      | 18,4 kW                 |
| 50 A      | 28,7 kW                 |
| 63 A      | 36,2 kW                 |
| 80 A      | 43,9 kW                 |

Werte gültig für Leistungsfaktor  $\cos \varphi = 0,83$



Abbildung 9: Frequenzumformer



Abbildung 10: Abladen und Lockern mit dem Dosierladewagen

## Bedienung und Beschickung der Anlage

Entscheidend für den Erfolg der Heubelüftung ist eine gleichmäßige, lockere Beschickung der Trocknungsbox. Verdichtete Stellen werden schlecht durchlüftet. Ein Betreten des Heustockes ist daher möglichst zu vermeiden. Besonders günstig wirkt eine Auflockerung des eingefahrenen Welkheus über die Walzen der Dosiervorrichtung eines Erntewagens (Abbildung 10). Teleskopverteiler und Greiferanlagen führen zu vergleichbar hohen Heustockdichten.

Ein häufiger Fehler bei der Heubelüftung ist das Aufbringen einer zu hohen Welkheuschicht. Extreme Schichthöhen bewirken ein rasches Zusammensacken des Heustockes und entsprechende Verdichtungen, die eine gleichmäßige Durchlüftung erschweren. Entscheidend für die mögliche Schichthöhe ist vor allem der Trockenmassegehalt des Feuchtheus. Nach Schweizer Empfehlungen sollte ein Wert („Wasserdeckel“) von 50 kg Wasser je m<sup>2</sup> Stockfläche nicht überschritten werden. Die Schichthöhe einer Charge sollte zumindest bei Kaltbelüftung 1,5 m nicht übersteigen. Bei leistungsfähigen Anlagen mit Warmbelüftung oder Luftentfeuchtung sind auch 2,5 m Schichthöhe tragbar.

Der Ventilator soll bereits während der Anlagenbeschickung und danach während der ersten 24 Stunden durchlaufen, um ein Zusammensacken des Heustocks zu vermeiden. In weiterer Folge soll dann belüftet werden, wenn die relative Feuchtigkeit der Trocknungsluft unterhalb des Feuchtigkeitsgleichgewichts liegt und die Heustocktemperatur unterhalb von 35°C bleibt. Bei Kaltbelüftung könnte das bedeuten, dass nach einiger Laufzeit bei Regenwetter oder während der Nacht der Ventilator nur im Intervallbetrieb läuft oder bei bereits relativ trockenem Futter abgeschaltet wird. Bei Selbsterwärmung über 35°C ist aus Sicherheitsgründen unbedingt zu belüften.

Automatische Steuerungen erleichtern die Bedienung. Die Funktionsweise der angebotenen Steuergeräte ist unterschiedlich. Einfache Steuerungen messen die Heustocktemperatur und meist auch die relative Luftfeuchtigkeit. Bei hoher Luftfeuchte wird damit auf Intervallbetrieb geschaltet. Steuergeräte für Anlagen mit Luftentfeuchter schalten

diesen bei geringer saugseitiger Luftfeuchtigkeit ab oder ändern die Drehzahl des Kältekompressors stufenlos z.B. anhand des Kältemitteldruckes. In Entwicklung befinden sich automatische Steuergeräte für Entfeuchteranlagen, die einerseits vor einer Überschreitung des vorhandenen elektrischen Anschlusswertes schützen oder zusätzlich eine Umschaltung von Frischluftbetrieb auf Umtrieb und umgekehrt ausführen. Eine Endabschaltung der Anlage ist entweder durch eine Erfassung der Heufeuchtigkeit möglich oder einfacher zeitgesteuert mit einer Intervall-Nachbelüftung. In letzterem Fall lässt sich das Ende der Trocknung grob anhand eines fehlenden Temperaturanstiegs bei abgeschaltetem Lüfter feststellen. Bei trocknungsfähiger Luft kann man die Heufeuchtigkeit durch den Temperaturunterschied der Trocknungsluft vor und nach dem Trockengut oder durch eine Änderung der absoluten Luftfeuchtigkeit im Heu oder knapp darüber ermitteln. Eine Direktmessung der Heufeuchtigkeit über Sensoren ist wegen deren Messfehler, der Notwendigkeit mehrerer Mess-Stellen und wegen der Beschädigungsgefahr der Sensoren problematisch.

Das bewusst unterbrochene Belüften von feuchtem Heu mit dazwischenliegenden Selbsterwärmungsphasen führt durch Veratmung von Nährstoffen zu einem Qualitätsverlust. Im Extremfall wird das Heu braun, es wird zwar teilweise gerne gefressen, bringt aber wenig Milchleistung. Der bewertete Nährstoffverlust übersteigt den Energieaufwand für eine Luftanwärmung in der Höhe der Selbsterwärmung. Das mehrmalige Einbringen kleiner Halbheumengen etwa im Abstand eines Tages noch vor der Durchtrocknung des Heustocks verringert die Trocknungskosten gegenüber der Trocknung einer einzigen großen Partie.

## Die Trocknungsfähigkeit der Luft

Lufttemperatur und Luftfeuchtigkeit bestimmen die Trocknungsfähigkeit der Luft (Abbildung 11). Auf die tatsächliche Wasseraufnahme der Luft hat aber auch die Feuchtigkeit des Trockengutes einen Einfluss. Nach Erreichen der Gleichge-

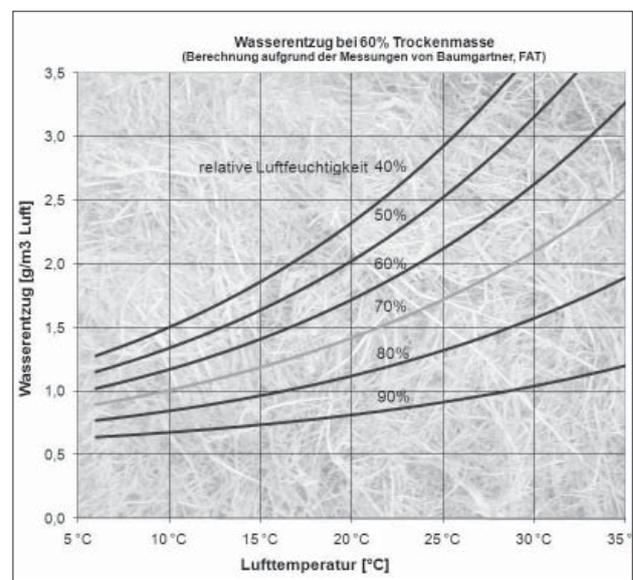


Abbildung 11: Wasserentzug in g/m<sup>3</sup> Luft bei 60 % TM

wichtsfeuchte kommt die Trocknung ganz zum Erliegen, bereits vorher verringert sich die Trocknungsgeschwindigkeit.

Wegen der mit der Trocknung einhergehenden Abkühlung der Luft ist die mögliche Wasserhaltefähigkeit der Luft weit geringer, als bei konstanter Temperatur. Die Ursache ist der Entzug der Verdampfungswärme des Wassers (0,68 kWh je kg Wasser). 1°C Abkühlung entspricht rund 0,47 g/m<sup>3</sup> Wasseraufnahme.

Wegen des Wärmeentzugs aus der Luft ist der spezifische Energieaufwand für die Heubelüftung meist erheblich kleiner als die erforderliche Verdampfungswärme. Bei Kaltbelüftung streut der Energieaufwand um 0,25 kWh/kg Wasser.

Wenn sich im Lauf eines Trocknungsvorgangs das Feuchtigkeitsgefälle des Trocknungsgutes gegenüber der Luft entsprechend dem Gleichgewichtszustand vermindert, dann nimmt auch die Luft immer weniger Wasser auf. Insgesamt wird also auch das unter Berücksichtigung der Abkühlung mögliche („adiabatische“) Sättigungsdefizit der Luft nicht ausgeschöpft. In der Praxis kann mit einer Ausnutzung des Sättigungsdefizits von etwa 50 bis 70 % gerechnet werden. Das wiederholte Beschicken einer Trocknungsanlage mit kleinen Füllmengen innerhalb weniger Tage kann den Ausnutzungsgrad verbessern.

Eine Anwärmung der Luft oder eine Entfeuchtung mit einer Wärmepumpe erhöht die Wasseraufnahmefähigkeit der Trocknungsluft beträchtlich. Bei Kaltbelüftung und üblichen Luftfeuchtwerten nimmt 1 m<sup>3</sup> Luft ungefähr 0,8 bis 1,1 g Wasser auf. Der spezifische Energieaufwand liegt bei ständiger Warmbelüftung um 1 bis 1,4 kWh je kg abzutrocknendes Wasser.

## Warmbelüftung mit Heizanlagen

Zur Verbesserung der Trocknungsfähigkeit bieten sich oft vorhandene Gebäudeheizungen oder mobile ölbefeuerte Heizgeräte an. Bei Warmwasserheizungen wird die Wärme über handelsübliche Wärmetauscher an die Trocknungsluft übergeben.

Für die Luftanwärmung sind allerdings beträchtliche Heizleistungen notwendig: Die Erwärmung von 1 Kubikmeter Luft um 1 Grad erfordert eine Energie von rund 1,2 kJ = 0,33 Wh (Wattstunden). Je 1 m<sup>3</sup>/s Luftförderleistung und 10 Grad Anwärmung beträgt die notwendige Heizleistung rund 12 kW. Bei 10 m<sup>3</sup>/s und einer üblichen Anwärmung um 7 Grad ergeben sich z.B. etwa 85 kW Heizleistung (Abbildung 12)! Die Heizleistung für zwei Gebäude-Wohneinheiten liegt aber meist nur bei 30 bis 40 kW, so dass die mögliche Anwärmung der Belüftungsluft begrenzt ist. Bei Biogasanlagen kann die Abwärme der Stromaggregate ideal zur Luftanwärmung genutzt werden, wenn die Distanz von Anlage und Heustock überbrückbar ist. Wärmetauscher sollten so dimensioniert werden, dass die Luftgeschwindigkeit bezogen auf die Tauscherfläche 3 bis 4 m/s beträgt. Damit sind 0,7 bis 0,9 m<sup>2</sup> Fläche je 10.000 m<sup>3</sup>/h erforderlich.

In der Praxis wird zur Begrenzung der Heizkosten ein Warmluftofen oft nur zugeschaltet, wenn die Trocknungsfähigkeit der Außenluft nicht ausreicht. Praxisnah

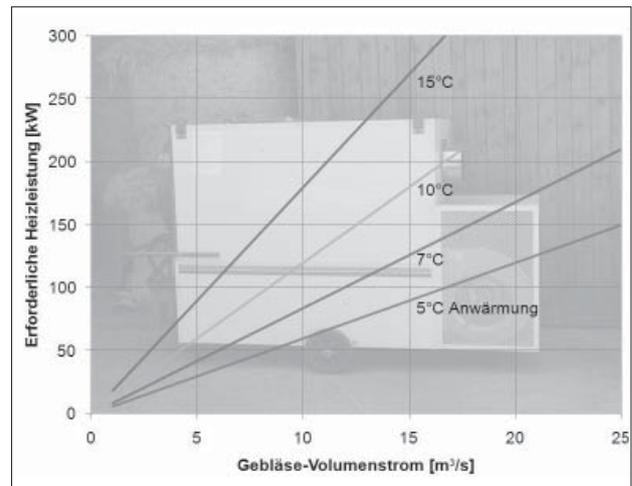


Abbildung 12: Erforderliche Heizleistung in Abhängigkeit der Luftförderleistung und Anwärmung der Luft

sind 40 % Zuschaltung im Verhältnis zur Ventilatorlaufzeit. Bei Doppelflutern ist darauf zu achten, dass die Warmluft beidseitig gleichmäßig zum Ventilator fließt. Andernfalls ist im Heustock ein unterschiedlicher Trocknungserfolg zu erwarten. Ein Betonboden unter dem Rost sollte wärmeisoliert werden.

## Warmbelüftung mit Sonnenkollektoren

Einfache, in bestehende Dachkonstruktionen integrierte Luftkollektoren erreichen wegen der geringen Anwärmung der Außenluft weit bessere Wirkungsgrade, als übliche Brauchwasserkollektoren.

Typisch sind Wirkungsgrade von 30 bis 50 %, bei transparenter Abdeckung sogar über 60 %. Ohne Abdeckung liegen Blechdächer bei Wirkungsgraden bis zu 50 %. Bei einer Dachdeckung mit Faserzement-Wellplatten beträgt der Wirkungsgrad um 40 %, bei Ziegeldeckung um 35 %.

Empfehlenswert ist eine Dachkollektorfläche in der Größe von der doppelten bis dreifachen belüfteten Fläche. Günstig sind flache Dachneigungen, eine Abweichung von der idealen Südausrichtung bringt im Sommer überraschend wenig Leistungseinbuße (Tabelle 2).

Bei Pfettendächern wird beim Bau der Dachabsaugung die Pfettenunterseite luftdicht verschalt, die Luft strömt

Tabelle 2: Ausnutzungsgrad der Sonneneinstrahlung in Abhängigkeit von Dachneigung und Südausrichtung. 20° Südausrichtung = 100 % (NYDEGGER 1991)

| Exposition<br>(Abweichung von Süden)<br>Grad | Dachneigung |     |     |     |     |
|--|-------------|-----|-----|-----|-----|
|  | 10°         | 20° | 30° | 40° | 50° |
| 0 (Süd)                                      | 98          | 100 | 99  | 96  | 89  |
| 30   | 97          | 99  | 98  | 94  | 88  |
| 60   | 95          | 94  | 92  | 89  | 83  |
| 90 (West/Ost)                                | 91          | 88  | 84  | 79  | 72  |
| 120  | 88          | 81  | 73  | 65  | 57  |
| 150  | 86          | 76  | 65  | 52  | 39  |
| 180 (Nord)                                   | 85          | 74  | 62  | 47  | 32  |

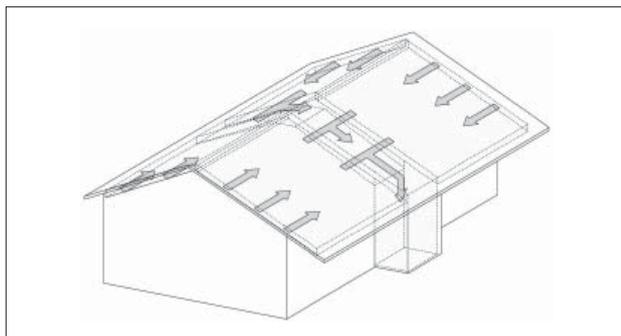


Abbildung 13: Sonnenkollektor im Pfettendach mit vier Kollektorfeldern auf zwei Dachflanken und einem mittigen Sammelkanal (Agroscope Reckenholz-Tänikon ART)

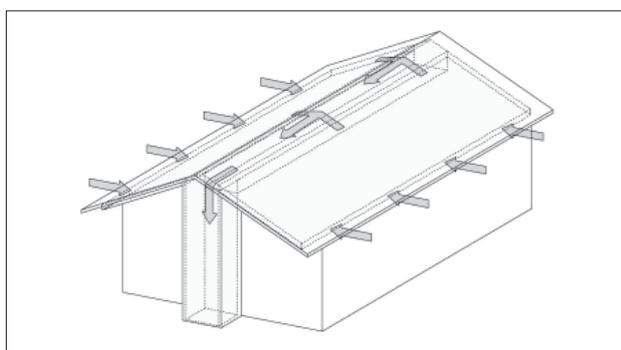


Abbildung 14: Skizze einer Sonnenkollektoranlage im Sparrendach mit zwei Kollektorfeldern (Agroscope Reckenholz-Tänikon ART)

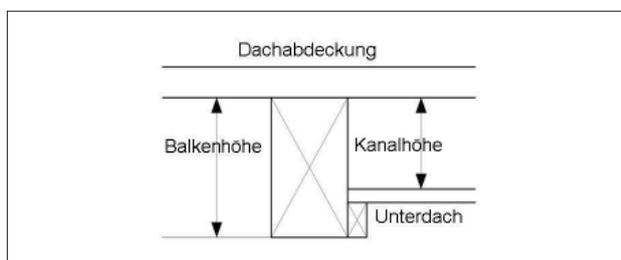


Abbildung 15: Die Kollektorkanäle werden meist aus den Pfetten- oder Sparrenzwischenräumen, der Dachabdeckung und einer Unterverschalung gebildet. Die Kanalhöhe bestimmt die Luftgeschwindigkeit im Kollektor (Agroscope Reckenholz-Tänikon ART)

zwischen den Pfetten giebelparallel (Abbildung 13). Beim Sparrendach bringt man die Unterschaltung meist zwischen den Sparren an, die Luft strömt entlang der Sparrenzwischenräume nach oben oder unten (Abbildung 14). Hier kann die ideale Luftgeschwindigkeit im Kollektor von etwa 4 bis 6 m/s leicht durch die Wahl der Kanalhöhe eingestellt werden (Abbildung 15). Beim Pfettendach ist dies meist nur durch die Lage des Sammelkanals möglich.

Vorteilhaft ist die Unterteilung in gleich große Kollektorfelder, weil damit die Höhe der Kollektorkanäle gleich groß bleiben kann und unterschiedliche Anwärmungen vermieden werden. Der Druckverlust sollte in allen Fällen möglichst im Bereich unter 100 Pa liegen. In Sammelkanälen sollte dazu die Luftgeschwindigkeit unter 4 m/s

bleiben. Der gesamte Saugdruckverlust sollte in allen Fällen im Bereich möglichst unter 100 Pa liegen. Bei einer nach außen zu öffnenden Tür der Lüfterkammer kann man auf einfache Weise den Saugdruck überprüfen: Die zum Öffnen nötige Kraft an der Türschnalle sollte 10 bis 12 kg nicht übersteigen.

Insgesamt ist bei Nutzung der Solartechnik eine solide Planung wichtig. Dazu steht auch entsprechende Software zur Verfügung.

## Fotovoltaik mit Hybridkollektoren

Eine ideale Kombination von thermischen Luftkollektoren läßt sich mit Solarzellen zur Stromerzeugung erreichen. Solarzellen setzen in der Praxis rund 10 bis 15 % der Sonnenenergie in Elektrizität um. Durch eine Kühlung der Solarpaneel-Unterseite kann deren Wirkungsgrad je °C um fast 0,5 % gesteigert werden. Dabei bleibt der thermische Wirkungsgrad der Kollektoren praktisch unverändert.

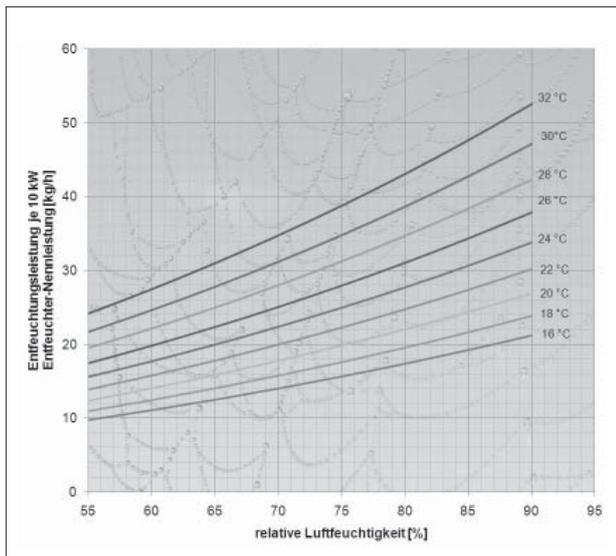
Entweder werden Solarpaneele auf bestehende Dächer aufgesetzt, spezielle Paneele können aber auch die Dachdeckung ersetzen. Derzeit noch hohe Kosten und fehlende oder geringe öffentliche Förderungen behindern in Österreich diese optimale Technik. Momentan kann man mit 2 bis 4 Euro/Wp, bei grob 10 m<sup>2</sup> je kWp = 2.000 bis 4.000 Euro/kWp oder 200 bis 400 Euro/m<sup>2</sup> rechnen (Wp = Watt peak, also Spitzenleistung).

## Wärmepumpen

Für Trocknungszwecke werden Wärmepumpen meist als Luftentfeuchter betrieben. Dabei wird in einem ersten Wärmetauscher (Verdampfer) der Luft Wärme entzogen. Nach Unterschreiten des Taupunktes kondensiert daraufhin ein Teil der Luftfeuchtigkeit. In einem nachgeschalteten Wärmetauscher (Kondensator) wird die vorher entzogene Wärme samt der Abwärme des Antriebsaggregats und der Kondensationswärme wieder zugeführt. Die Luft ist daher etwas wärmer, als die dem Verdampfer zugeführte Luft. Entscheidend ist die Verringerung der relativen und auch der absoluten Luftfeuchtigkeit. Damit ist wie auch durch Luftanwärmung eine wirkungsvolle Trocknung möglich.

Durch Zwischenkühler nach dem Verdampfer wird bei einigen Entfeuchtern deren Kondensationsleistung verbessert. Eine weitere entscheidende Verbesserung bringt ein stufenlos regelbarer Kompressorantrieb über Frequenzumformer, als Regelgröße kann der Kältemitteldruck dienen. Auf diese Weise kann sich der Entfeuchter auf Änderungen des Luftdurchsatzes anpassen, ungünstige Betriebszustände lassen sich einschränken und ebenso kann eine Vereisung des Verdampfers bei geringen Außentemperaturen vermieden werden. Die Kondensleistung von Luftentfeuchtern ist extrem stark von Lufttemperatur und der relativen Luftfeuchtigkeit abhängig (Abbildung 16). Bei Luftfeuchtigkeiten unterhalb von 40 % und zudem geringer Temperatur beträgt die Kondensleistung nur einen kleinen Bruchteil des maximalen Wertes.

Damit ist der Erfolg mit Luftentfeuchtern eng mit den Betriebsbedingungen verknüpft. So erklären sich auch unterschiedliche Praxisbeurteilungen. Wichtig ist auch die



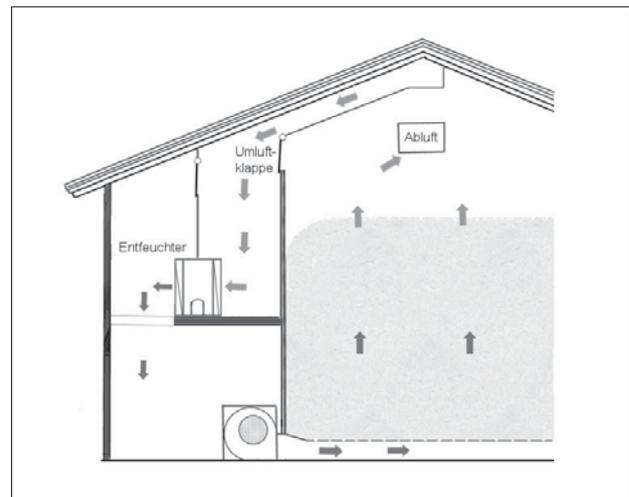
**Abbildung 16: Die Entfeuchtungsleistung ist stark von der Luftfeuchtigkeit und der Temperatur abhängig! Unterhalb von 50 % rel. Luftfeuchtigkeit ist die Wirkung gering.**

Abstimmung des Luftdurchsatzes damit im Verdampfer der Taupunkt und damit eine Kondensation erreicht werden kann.

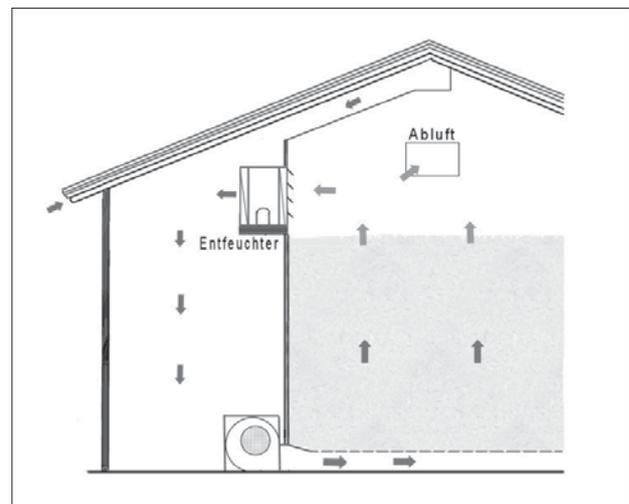
Grundsätzlich kann entweder Frischluft entfeuchtet und angewärmt werden, oder es wird die Trocknungsluft im mehr oder weniger geschlossenen Kreislauf geführt. Bei günstigem Wetter ist die Frischluftvariante im Vorteil. Nachtsüber oder bei Schlechtwetter ist jedoch die Umluftvariante günstig, weil damit die Voraussetzungen für die Leistungsfähigkeit des Entfeuchters gegeben sind. Im Umluftbetrieb baut sich je nach Gebäude-Wärmedämmung und Entfeuchterleistung eine Lufttemperatur von oft 30 bis 45°C auf, zugleich herrscht hohe relative Luftfeuchtigkeit. Verdampfervereisungen sind dabei ausgeschlossen. Nachteilig ist jedoch, dass die Trocknungsleistung hauptsächlich von der Entfeuchtungsleistung des Aggregats abhängt. Bei ständigem Umluftbetrieb ist daher im Vergleich zur Ventilatorleistung oft die doppelte Kompressorleistung des Entfeuchters sinnvoll, im Frischluftbetrieb kann dazu 50 bis 100 % der Ventilatorleistung reichen. In der Praxis hat sich gezeigt, dass für das Aufschaukeln der Temperatur im Umluftverfahren die durch eine Dachabsaugung bewirkte bessere Wärmedämmung sehr von Vorteil ist. Das gilt besonders wieder bei bescheidenen elektrischen Anschlusswerten der Anlage.

Insgesamt erscheint daher eine Kombination von Frischluft- und Umluftbetrieb zweckmäßig. Das lässt sich auf einfache Weise mit einer Umschaltklappe erreichen (Abbildung 17). Mit einer neuen Anlagensteuerung kann die Bedienung dieser Umschaltklappe automatisiert werden. Typischerweise empfiehlt sich das Umschalten im Bereich von 20 bis 25°C.

Eventuelle Wärmetauscher von Heizanlagen oder Abwärme sollen grundsätzlich immer nach einem Entfeuchter angeordnet werden. Bei geringen Entfeuchterleistungen wird manchmal Bypassluft zwischen Verdampfer und Kondensator



**Abbildung 17: Anlagenschema mit Luftentfeuchter und Dachabsaugung (Variante Entfeuchtung im Hauptstrom)**



**Abbildung 18: Anlagenschema mit Luftentfeuchter im Nebenstrom und Dachabsaugung**

sator zugemischt, damit der Taupunkt erreicht werden kann. Es ist aber auch möglich, den Entfeuchter im Nebenstrom zu betreiben, so dass nur ein Teil der Trocknungsluft entfeuchtet wird (Abbildung 18).

Wegen des geringen Temperaturunterschieds zwischen Verdampfer und Kondensator ist bei Entfeuchtern die sogenannte Leistungszahl meist höher, als bei konventionellen Wärmepumpen zur Gebäudeheizung oder Warmwasserbereitung. Die Leistungszahl gibt dabei an, wieviel mal mehr Energie bzw. Leistung am Kondensator gegenüber der Kompressor-Antriebsenergie (bzw. -Leistung) entsteht. Die typische Leistungszahl von Wärmepumpen für Heizzwecke liegt um den Wert 3, bei Luftentfeuchtern jedoch sogar bei 4 bis 6.

Die Streubreite des spezifischen Energiebedarfs für Luftentfeuchter dürfte heute bei gezieltem Einsatz im Bereich von 0,20 bis 0,45 kWh/kg Wasser liegen. Unterhalb von 40 bis 50 % relativer Luftfeuchtigkeit schaltet man den Entfeuchter aus Kostengründen besser ab. Dies wird teilweise automatisch durch einen Hygrostaten erreicht.

In *Tabelle 3* ist der Energiebedarf je t Heu auf eine Trocknung von 63 % auf 87 % TM bezogen! Bei Mischverfahren mit Entfeuchter oder Heizofen wurde ein mittlerer Anteil von etwa 40 % Zuschaltung berechnet. Ein höherer Laufzeitanteil, aber auch ungünstige Bedingungen können zu einer Verdoppelung der Richtwerte führen (*Abbildung 19*)!

### Kosten

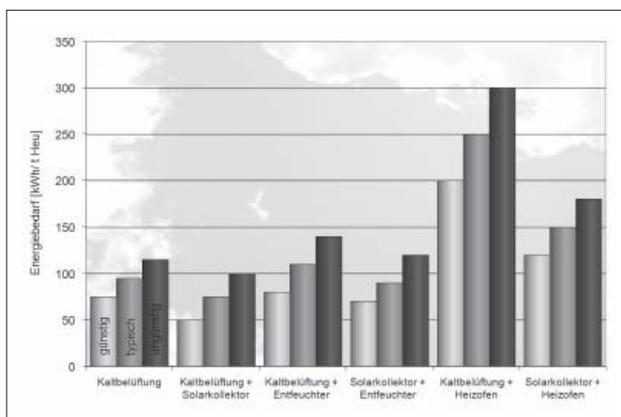
Bemerkenswert ist ein von HERZOG (2008) erstellter Kostenvergleich für einen Betrieb mit 35 ha Grünland (davon 10 ha Weide). Danach verursacht die Heu-Variante gegenüber der Silowirtschaft deutlich höhere Investitions- und auch Gesamtkosten (*Tabelle 4*). Bei Berücksichtigung des Mehrverzehrs von Heu und aktueller Förderungen sowie des Qualitätszuschlages für Heumilch ist jedoch die Heu-Variante bei vorhandenem Bergeraum deutlich der Gärfuttervariante mit Fahrsilo oder Rundballensilage überlegen. Bei Einrechnung der Kosten für den Bau eines Bergeraumes ist die Heu-Variante nur geringfügig teurer. Eine Rundballen-Ganzjahressilage bringt höhere Kosten als die Heuwirtschaft, wenn deren Vorteile bewertet werden.

Bei mehreren Betrieben mit Luftentfeuchter aus dem Salzburger Flachgau wurden variable Trocknungskosten in der Größenordnung von 0,5 bis 1,7 Cent/kg Heu angegeben. Das deckt sich durchaus auch mit theoretischen Berechnungen. Im Vergleich dazu liegt der Qualitätszuschlag für „Heumilch“ bei bis zu 3 Cent/kg Milch (*Abbildung 20*).

Insgesamt ist also das große Interesse der Bauern an schlagkräftigen und zugleich sparsamen Heubelüftungsanlagen auch wirtschaftlich gerechtfertigt. Zudem sind in Zukunft durch eine verbesserte Steuerungstechnik und verstärktem Einsatz von Solarenergie weitere Energieeinsparungen zu erwarten.

**Tabelle 3: Energiebedarf für die Trocknung von Heu bei unterschiedlichen Verfahren**

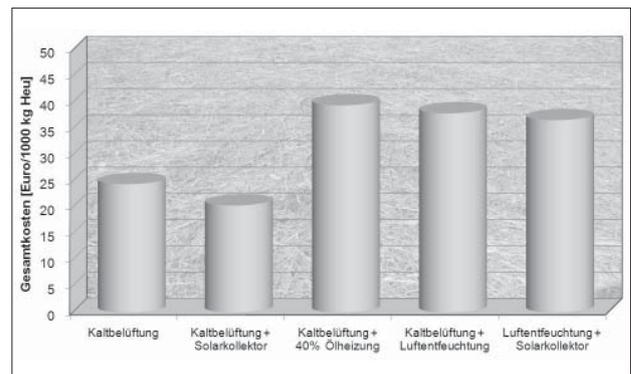
| Verfahren                | Energiebedarf [kWh/kg Wasser] | Energiebedarf [kWh/t Heu] |
|--------------------------|-------------------------------|---------------------------|
| Kaltbelüftung            | 0,25                          | 95 (75 bis 115)           |
| Kaltbel.+ Solarkollektor | 0,17                          | 65 (40 bis 90)            |
| Kaltbel. + Entfeuchter   | 0,27                          | 105 (60 bis 130)          |
| Solarkoll.+ Entfeuchter  | 0,20                          | 90 (70 bis 120)           |
| Kaltbel. + Heizofen      | 0,80                          | 23 l Öl + 75 kWh          |



**Abbildung 19: Spezifischer Energiebedarf verschiedener Verfahren**

**Tabelle 4: Gesamtkosten für einen Modellbetrieb mit 25 ha Grünland** (Berechnung von HERZOG 2008)

| Heu         |             | Fahrsilo         |                       | Rundballensilage |                       |
|-------------|-------------|------------------|-----------------------|------------------|-----------------------|
| mit Halle   | ohne Halle  | Ganzjahressilage | Winterfütterung 200 d | Ganzjahressilage | Winterfütterung 200 d |
| 40.802 Euro | 26.708 Euro | 31.400 Euro      | 29.264 Euro           | 33.441 Euro      | 34.208 Euro           |



**Abbildung 20: Gesamtkosten je 1000 kg Heu bei Trocknung von 60 % auf 87 % TM** (Preisbasis Jänner 2009, Stromtarif 13 Cent/kWh, Ölpreis 0,6 Euro/l, ohne Kosten der Heuwerbung und ohne Gebäudekosten, jedoch mit Kosten für Dachabsaugung)

### Literaturverzeichnis

HEISS, R. und K. EICHNER, 2002: Haltbarmachen von Lebensmitteln: Chemische, physikalische und mikrobiologische Grundlagen der Verfahren. Springer Verlag, 384 S.

HERZOG, H., 2008: Kostenvergleich Heuvariante mit Entfeuchter, Fahrsilo, Rundballensilage (Excel-Kalkulation), Landwirtschaftskammer Salzburg, <http://www.bmlfuw.gv.at/article/articleview/76942/1/4996/> [letzter Zugriff am 08.01.2010]

HORX, M., 2005: Wie wir leben werden – Unsere Zukunft beginnt jetzt. Campus Verlag, 397 S.

NYDEGGER, F., 1991: Sonnenkollektoren für die Heubelüftung. Plänen und Realisieren. FAT-Berichte 407, Schriftenreihe Agroscope Reckenholz-Tänikon ART, 20 S.

SEGLER, G., 1968: Fortschritte in der Heubelüftungstechnik, Landtechnik

### Weiterführende Literatur

BAUMGARTNER, J., 1991: Die Heubelüftung von A bis Z. FAT-Berichte 406, Schriftenreihe Agroscope Reckenholz-Tänikon ART, 32 S.

HOLPP, M., 2004: Trocknung von Rundballen. Machbarkeit und Wirtschaftlichkeit. FAT-Berichte 616, Schriftenreihe Agroscope Reckenholz-Tänikon ART, 12 S.

„Initiative Heubelüftung“, Webadresse: <http://www.agroscope.admin.ch/bau-tier-arbeit/01034/index.html?lang=de>

MALTRY, W. und E. PÖTKE, 1963: Landwirtschaftliche Trocknungstechnik. VEB Verlag Technik Berlin, 524 S.

NYDEGGER, F. und G. WIRLEITNER unter Mitarbeit von J. GALLER, A. PÖLLINGER, L. Van CAENEGEM, H. WEINGARTMANN und H. WITTMANN, 2009: Qualitätsheu durch effektive und kostengüns-

tige Belüftung. Publikation der Österreichischen Arbeitsgemeinschaft für Grünlandwirtschaft, 12 S. Onlineversion verfügbar unter der Webadresse: <http://www.heumilch.at/download/qualitaetsheu.pdf>. Aus dieser Publikation wurden Bilder und Textpassagen für diese Schrift verwendet!

PÖLLINGER, A., 2005: Die Rundballentrocknung. Heutrocknungsseminar, Vortragsmanuskript

WEINGARTMANN, H., 1988: Solarenergie bei Unterdachrocknung von Welkheu. Landtechnische Schriftenreihe des Österreichischen Kuratoriums für Landtechnik ÖKL, H. 149