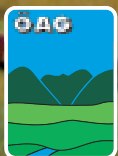


Dient Heu als alleiniges Futtermittel, ist eine effiziente Belüftungstrocknung unumgänglich. Mittlerweile gibt es unterschiedliche Möglichkeiten der Trocknung. Die folgende Unterlage soll eine Hilfestellung bei der Planung einer Trocknungsanlage bieten.

Richtlinien für die Belüftungstrocknung von Heu



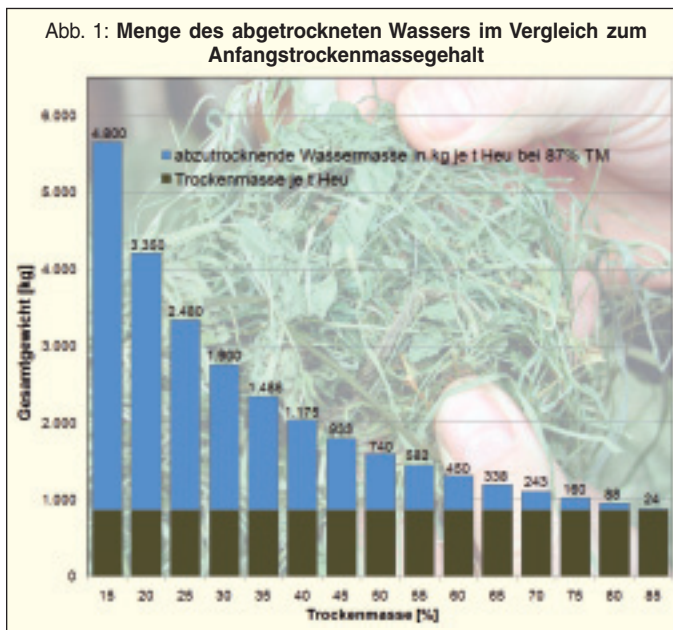
Gotthard WIRLEITNER unter Mitarbeit von Christian ASCHAUER, Susanne JAKSCHITZ-WILD, Matthias KITTL, Karl NEUHOFER, Franz NYDEGGER, Johannes OSTERTAG, Alfred PÖLLINGER, Reinhard RESCH und Stefan THURNER

Die Heubelüftung hat gegenüber der Bodentrocknung entscheidende Vorteile. Bei der Heubelüftung sind die Bröckel- und Atmungsverluste gering. Außerdem wird durch die verkürzte Trocknungszeit die Vermehrung und Tätigkeit von Pilzen und Bakterien eingeschränkt. Für eine sichere Lagerung des Heus ist ein Trockenmassegehalt von 87–88 % notwendig. Bei ungünstigem Wetter kann dieser Trockenmassegehalt mittels einfacher Kaltbelüftung nicht erreicht werden. Daher, aber auch zur Erhöhung der Schlagkraft, hat sich in letzter Zeit die Trocknung mit erwärmter oder entfeuchteter Luft durchgesetzt. Damit können Energiekonzentrationen im Bereich um 6 MJ NEL/kg Trockensubstanz erreicht werden. Die Energiekonzentration ist von der Zusammensetzung des Pflanzenbestandes und des Erntezeitpunktes abhängig. Der optimale Erntezeitpunkt ist im Stadium des Ähren-/Rispschiebens der Leitgräser. Heu erlangt daher als hochwertiges Grundfutter wieder Bedeutung, auch weil es nahezu keine sporenbildenden Bakterien enthält.

Der Energieaufwand zur Heutrocknung kann durch Nutzung von Solarenergie und Wärmepumpentechnik gegenüber einer Trocknung mit fossilen Energieträgern wesentlich eingeschränkt werden. Eine CO₂-neutrale Luftanwärmung mit Holzhackgut oder Stückholz ist für manche Betriebe eine Alternative, ebenso die Nutzung von Abwärme. In Zukunft wird die Kombination von Fotovoltaik mit thermischen Luftkollektoren in Form einer Dachabsaugung Bedeutung erlangen. Damit kann der Wirkungsgrad der Stromerzeugung gesteigert werden. Der bescheidene spezifische Energieaufwand für eine Loseheu-Trocknung in Boxen oder für die Trocknung von Pressballen erfordert aber immer noch erhebliches Feingefühl. Dabei ist vor allem auf die Anlagenbedienung und die Futterernte, insbesondere bei geringen Trockenmassegehalten im Erntegut, ein Augenmerk zu legen. Dazu ist eine gute Planung der Trocknungsanlage entscheidend für den Erfolg.

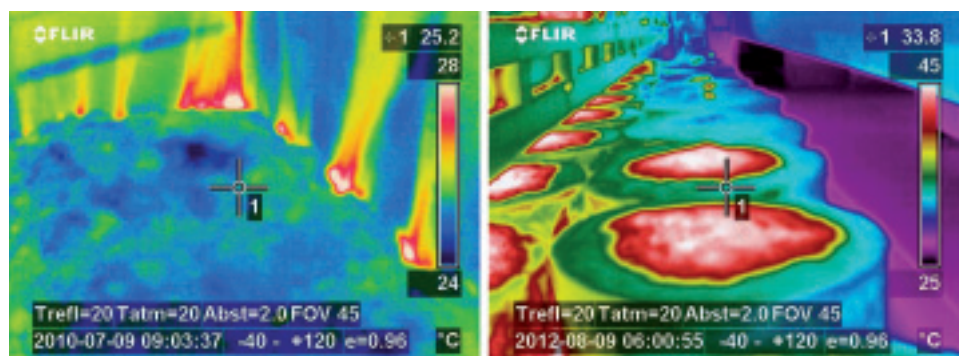
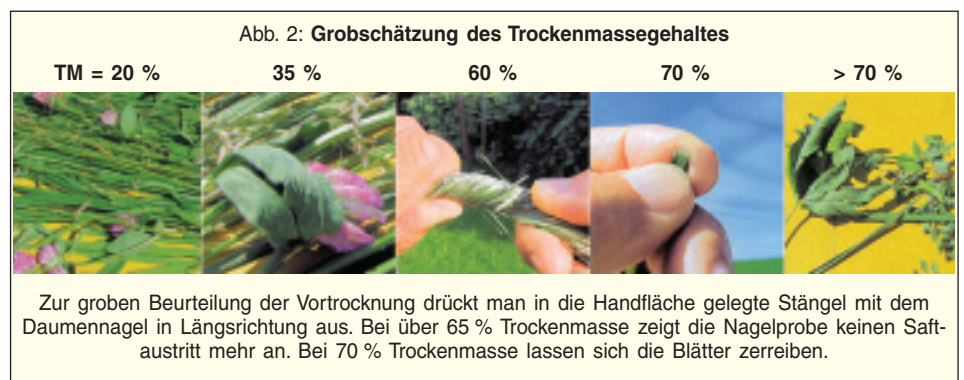
Vortrocknung am Boden entscheidend

Frisches Grünfutter enthält rund 80 % Wasser, also nur 20 % Trockensubstanz. Bei der Trocknung müssen



deshalb 4 kg Wasser pro kg Trockenmasse oder umgerechnet 3,35 kg Wasser je kg Heu abgeführt werden (siehe Abb. 1). Vortrocknetes Belüftungsheu mit 60 % Trockenmasse enthält nur mehr rund 0,67 kg Wasser je kg Trockenmasse. Der wesentliche Teil der Trocknung passiert damit am Feld. Die Vortrocknung bestimmt also ganz entscheidend die Kosten für die daraufhin folgende Unterdachtrocknung. Eine um rund 10 % höhere Feuchtigkeit des Belüftungsheus führt zur Verdoppelung der abzutrocknenden Wassermenge. Zum Trocknen von erntefrischem Gras z.B. in einer Heißlufttrocknung, muss

te die Zapfwelldrehzahl auf 380–420 U/min und bei einem dritten Durchgang auf 340–400 U/min reduziert werden. Nacheinander folgende Bearbeitungen sollten nicht in gleicher Fahrtrichtung, sondern eher über Kreuz erfolgen. Bei grobstängeligen Futter bringen Mähauflbereiter eine erhebliche Verkürzung der Trocknungszeit um 1 bis 6 Stunden bei gleichzeitiger Einsparung eines Zettvorganges. Eintagesheu kommt aus Kostengründen eher nur bei ungünstigem Wetter für die Heubelüftung in Frage. Zur groben Beurteilung der Vortrocknung drückt man in die Handfläche gelegte Stängel mit



dem Daumnagel in Längsrichtung aus. Bei über 65 % Trockenmasse (= unterhalb von 35 % Feuchtigkeit) tritt am Stängelende kein Wasser mehr aus (siehe Abb. 2).

Gleichmäßig durchlüften

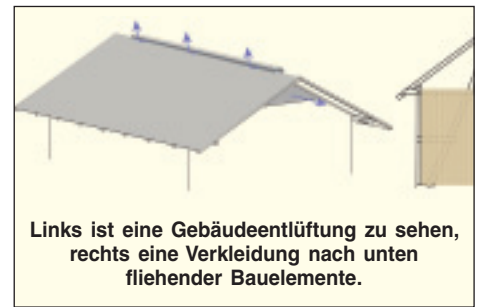
Entscheidend für den Trocknungserfolg ist bei Boxentrocknung ebenso wie bei Trocknung von Pressballen eine gute Durchlüftung. Verdichtete Stellen werden umströmt und verderben leicht, dagegen führen Lockerbereiche durch Kaminbildung zu starken Luftverlusten. Solche können auch entlang von Boxenwänden, besonders bei geringer Füllhöhe auftreten. Wird das Belüftungsheu bereits im Ladewagen durch drei bis acht Messer geschnitten, kann die gleichmäßige Beschickung verbessert werden. Ist das Futter sehr jung, ist dieser Vorgang entbehrlich. Bei der Kranbeschickung sollte die Greiferzan-ge abgesenkt und rüttelnd bei gleich-

zeitiger Seitwärtsbewegung geöffnet werden. Durchgehende Höhenmarken an der Boxenwand zeigen das Erntevolumen an. Ungleiche Beschickungshöhen lassen sich auch besser von der Kranbühne aus erkennen. Je mehr die Boxenfläche von einem quadratischen Querschnitt abweicht, umso wichtiger ist eine ausreichende Rosthöhe. Empfehlenswert ist eine lichte Rosthöhe ab 50 cm. Durch gezielte Anordnung der Rostträger lassen sich tote Ecken ausgleichen. Zum Druckausgleich sollen die Rostträger grundsätzlich eher quer zur Einströmrichtung stehen (siehe Abb. 3).

Im oberen Bereich des Einströmkanals kann durch die Abdeckung mit Baustahlgitter oder durch Bremsleisten der statische Druck erhöht werden. Die Boxenwand wird meist mit feuchtebeständigen OSB- oder MDF-Verlegeplatten mit etwa 18 mm Stärke verkleidet. Zur Verstrebung eignen sich Kanthölzer mit 16 x 14 cm Querschnitt. Die Verstrebung kann vertikal oder horizontal erfolgen.

vertikal oder horizontal erfolgen. Empfehlenswert ist eine vertikale Verstrebung in Verbindung mit einem Breitflansch-Stahlträger an der Oberseite. Dabei können die o-

Bei der Ausführung der Boxenwände ist eine vertikale Kantholz-Verstrebung mit einem Breitflansch-Stahlträger an der Oberseite empfehlenswert.



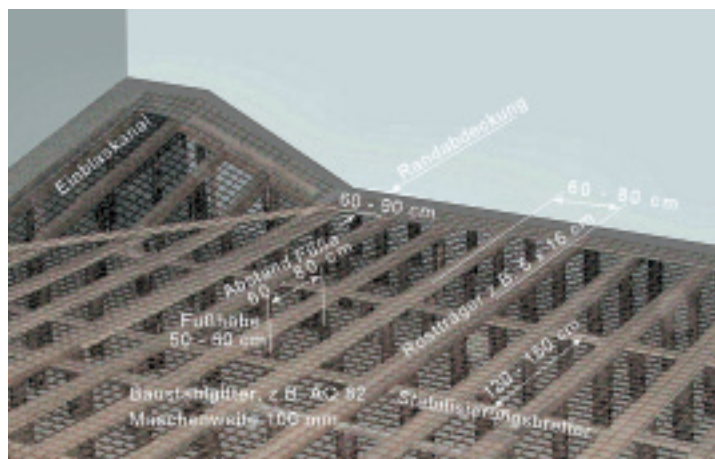
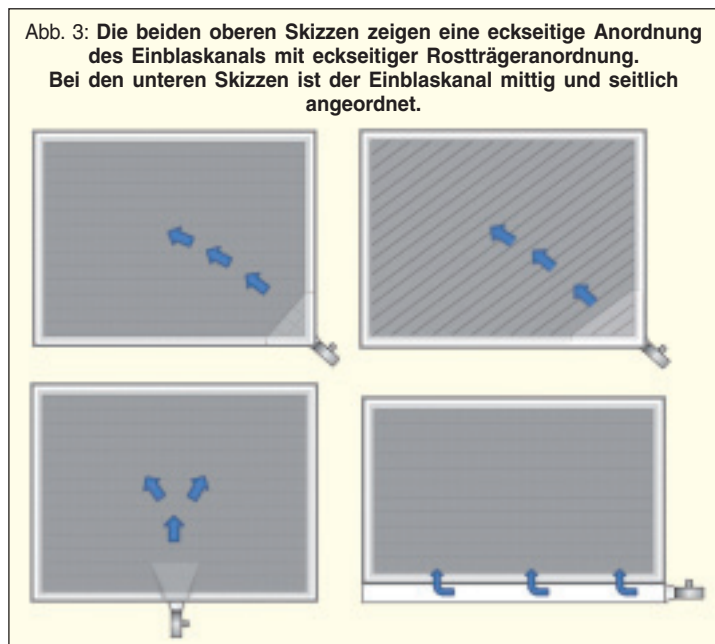
ren Enden der vertikalen Kanthölzer zwischen den Flanschflächen eingeschoben werden.

Bei Entfeuchterbetrieb ist eine Wärmeisolierung des Gebäudes, des Boxenbodens und von Lüftungskanälen sowie weiterer durch Kondensatausfall gefährdeter Flächen, an denen eine übermäßige Abkühlung der warmen und feuchten Luft erfolgt, empfehlenswert. Wichtig ist eine wirksame Gebäudedeckung. Sogar im Entfeuchter-Umluftbetrieb sollte etwas Feuchtigkeit nach außen gelangen können. Feuchte Luft hat eine geringere Dichte als trockene, daher sollten Entlüftungsöffnungen oben angeordnet sein. Aus Tabelle 5 sind weitere Daten zur Boxentrocknung zu entnehmen.

Boxenanlagen richtig dimensionieren

Wichtig ist es, die Boxen- mit den Ernteflächen sowie einem eventuell erhöhten Grundfutterbedarf abzustimmen.

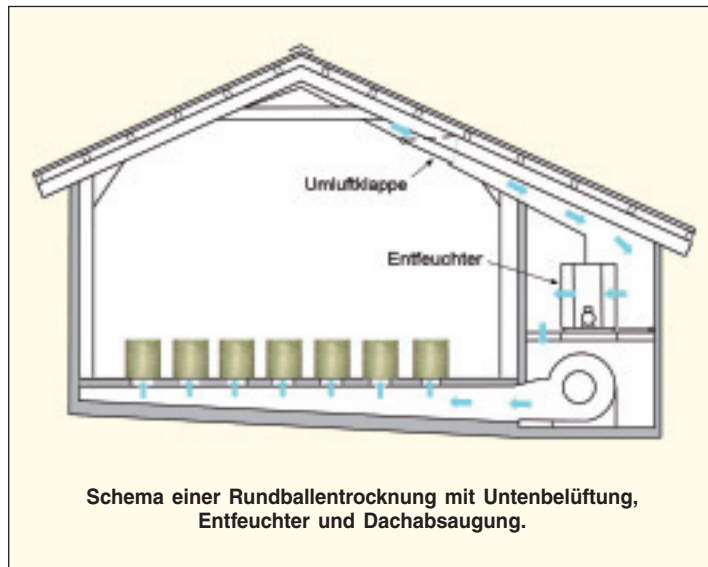
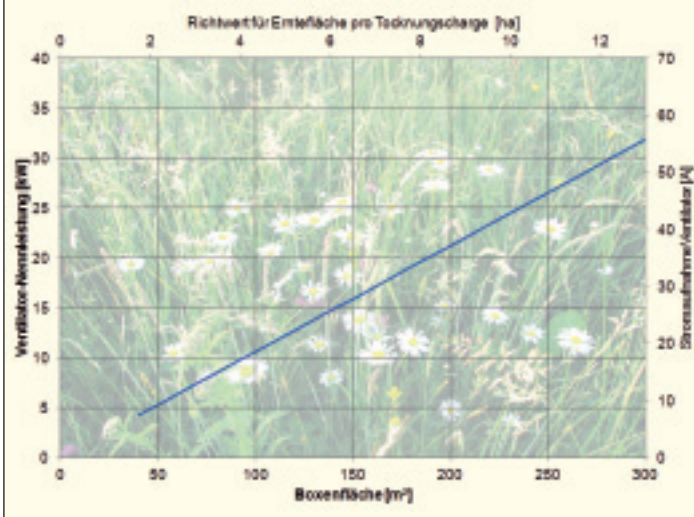
Einer groben Faustregel entsprechend, sollten je Hektar Mähfläche pro Trocknungscharge rund 14–24 m² zu Verfügung stehen. Je Hektar Fläche pro Schnitt sollten 6–10 m² belüftete Fläche oder mindestens 30 m³ Boxenvolumen vorhanden sein. Um eine erste Mindestbeschickungshöhe von 1–1,5 m zu erreichen, sollten Belüftungsboxen auch nicht zu groß dimensioniert werden.



Beispiel für die Gestaltung des Bodenrosts.



Abb. 4: Optimale Boxendimensionierung



Schema einer Rundballentrocknung mit Untenbelüftung, Entfeuchter und Dachabsaugung.

Boxenflächen über 250–300 m² Größe sollten eher unterteilt werden (siehe Abb. 4). Die Trocknungsgeschwindigkeit hängt bei gleicher Temperatur stark vom Luftdurchsatz (Luftvolumenstrom) ab. Bei sehr starker Durchlüftung können feine Pflanzenkapillaren nicht ausreichend schnell Wasser nachführen. Das ist besonders bei grobstängeligem Belüftungsheu möglich. Zudem steigt der Druckbedarf mit der Luftgeschwindigkeit überproportional an. Außerdem bilden sich leicht „Kamine“, durch die

Trocknungsluft ungenutzt abströmt. Erfahrene Heutrockner erkennen beim Barfußgehen am Heustock bei laufendem Ventilator den Trocknungszustand und eventuelle Kaminbildungen. Für Loseheu hat sich ein Luftvolumenstrom von rund 0,11 m³/m² und Sekunde bei einem Spielraum von 0,07–0,14 m³/m² und Sekunde (ca. 240–500 m³/m² und Stunde) als zweckmäßig erwiesen. Der Richtwert des Volumenstromes soll zumindest bei halber Heustockhöhe erreicht werden. Bei voller Stockhöhe nimmt man eine Verringerung des Luftdurchsatzes auf 0,07 m³/s und m² in Kauf. Auch im Entfeuchter-Umluftbetrieb ist ein Luftdurchsatz unterhalb von 0,11 m³/s und m² sinnvoll.

und lockere Ballen sind oft wenig stabil, am ehesten noch bei Pressen mit Stabgurt. Zum Pressen sollte ein breiter Doppelschwad gebildet werden.

Die Trocknungsluft wird bei Rundballen meist über einen betonierten Bodenkanal oder über einen aus Holz bzw. Blech gefertigten Kanal zugeführt. Dieser Kanal sollte wärmegegedämmt werden, dazu reichen 30 mm-Hartschaumplatten. Außer bei Betonkanälen sollte eine Dämmung immer auf der kalten Seite angebracht werden. Alternativ zu ortsfesten Kanälen werden auch flexible Polyamid-Schläuche in Verbindung mit Stahlblech-Zwischenringen verwendet. Mit Zwischenringen können auch zwei Ballenlagen übereinander belüftet werden. Bei alleiniger Untenbelüftung ist das direkte Aufeinanderstellen zweier Ballen problematisch, eventuell ist dies möglich, wenn die unteren Ballen bereits zum Teil trocken sind.

Bei Untenbelüftung auf einem fixen Kanal setzt man die Ballen auf ein „Ballenloch“ mit rund 14 cm überstehen-

Faustzahlen zur Boxentrocknung

- erforderliche belüftete Fläche 6–10 m² je ha Erntefläche pro Schnitt oder 14–24 m² je ha Erntefläche pro Trocknungscharge
- Strömungswiderstand bei Wiesen-gras 100–240 Pa/m Heustockhöhe, abhängig von Erntegut, spezifischem Volumenstrom und Schnittlänge
- spezifischer Volumenstrom (z.B. 0,11 m³/s*m² belüftete Fläche); zu große Werte führen vor allem bei geringer Beschickungshöhe zu Kaminbildung und Luftverlust, zu niedrige Werte bringen eine geringe Schlagkraft. Eventuell Frequenzwandler zur stufenlosen Drehzahlvorwahl des Lüfters verwenden.
- Ventilator-Volumenstrom typischerweise 11 m³/s (= 39.600 m³/h) pro 100 m² belüftete Fläche (bei halber Heustockhöhe), Mindestwert bei voller Stockhöhe 0,07 m³/s und m².
- Ventilator-Antriebsleistung 11 kW je 100 m² belüftete Fläche oder 0,75 kW/ha Schnittfläche
- Heizleistung bei Warmbelüftung 12,5 kW je m³/s Ventilator-Volumenstrom und 10 °C Anwärmung

Besonderheiten bei der Pressballenbelüftung

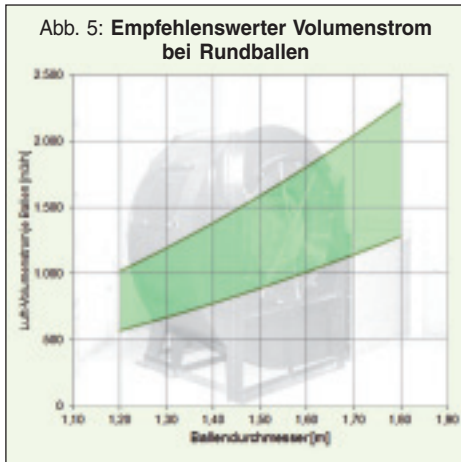
Die Trocknung von Pressballen ist schwieriger als jene von Loseheu. In letzter Zeit konnten aber sogar Quaderballen erfolgreich unter Dach getrocknet werden. Belüftbare Rundballen sollten eine möglichst gleichmäßige Dichte in allen Richtungen aufweisen. Das ist mit Pressen bei variabler Kammer besser machbar. Grundsätzlich sollte der Pressdruck niedrig eingestellt werden. Je nach Fabrikat kann dieser bei 60 bis 80 bar liegen. Die Ballendichte sollte nicht erheblich über 130 kg Trockenmasse/m³ hinausgehen. Dies entspricht einer Dichte im lagerfähigen Zustand von rund 150 kg/m³. Zumindest im äußeren Ballen-Stirnbereich sollte man bei belüftbaren Ballen die ganze Hand mit ausgestreckten Fingern noch einstoßen können. Der Ballendurchmesser sollte im Bereich von 1,3–1,8 m liegen. Wichtig ist ein ideales Verhältnis von Ballendurchmesser zur Einströmöffnung (Ballenloch) von rund 1: 0,76 oder Ballendurchmesser minus 40 cm. Sehr große



Die Trocknungsluft kann statt über einen betonierten Bodenkanal oder über Kanäle aus Holz oder Blech auch mittels flexibler Polyamid-Schläuchen und Stahlblechzwischenringen zugeführt werden.



Bei alleiniger Untenbelüftung ist das direkte Aufeinanderstellen zweier Ballen problematisch. Bei Untenbelüftung auf einem fixen Kanal setzt man die Ballen auf ein „Ballenloch“ auf.



dem Blechkranz auf. Je nach Ballenart ist eine Abdeckung der oberen Stirnseite erforderlich.

Grundsätzlich sollten Rundballen bei Untenbelüftung während der Trocknung einmal gewendet werden. Kritisch ist meist die obere Außenzone der Ballen. Große Ballenanlagen mit mehr als drei Reihen und erheblich über 18–20 Ballen pro Reihe werden besser unterteilt. Bei Pressballen ist eine rasche Trocknung mit besonders druckstabilen Ventilatoren sehr wichtig. Auf 1 m² Stirnfläche bezogen sollte der Luftdurchsatz zwischen 0,14 und 0,28 m³/s

Faustzahlen für Ballentrocknung:

- spezifischer Volumenstrom im Ballen 0,14–0,30 m³/s*m² Ballen-Stirnfläche oder je nach Ballendurchmesser 800–2.000 m³/h Luft je Ballen
- maximaler Ventilatorruck mindestens 1.300–1.600 Pa
- Ventilator-Nennleistung ca. 0,4–0,7 kW/Ballen oder knapp 3 kW/ha Chargenfläche
- Heizleistung ca. 3,3–6,3 kW/Ballen je 10 °C Anwärmung
- Durchmesser der Zuströmöffnung 0,76-facher Ballendurchmesser oder Ballendurchmesser minus 40 cm (= ca. 90–145 cm), Dichtring am Boden (oder auch am Deckel) etwa 14 cm hoch

liegen. Je nach Ballendurchmesser rechnet man mit 850–2.000 m³/h pro Ballen (siehe Grafik 3). Die Luftgeschwindigkeit sollte am Kanaleingang 8–12 m/s nicht übersteigen.

Den richtigen Ventilator auswählen

Der Ventilator soll den erwünschten Luftdurchsatz beim Gegendruck des Trockengutes und eventueller weiterer Strömungswiderstände sicherstellen. Bei fixer Antriebsdrehzahl stellen sich je nach Widerstand automatisch ein bestimmter Druck und ein entsprechender Luftvolumenstrom ein. Sinkt der Strömungswiderstand, so steigt der Luftdurchsatz, und umgekehrt. Die Krümmung der Ventilatorschaufeln bietet nur bei einem bestimmten Luftdurchsatz wenig eigenen Strömungswiderstand. Hier erreicht der Wirkungsgrad einen Bestwert. Die Antriebsleistung ist typischerweise wider Erwarten

beim maximalen Druck oft geringer als freiausblasend ohne Gegendruck.

Bei Loseheu kann man je Meter Stockhöhe bei einem spezifischen Volumenstrom von 0,11 m³/s und m² mit einem statischen Druck von 100–240 Pa rechnen. Dazu kommt eventuell der Druckverlust einer Dachabsaugung (ca. 75–120 Pa) oder von Entfeuchtern (ca. 70–100 Pa) und Wärmetauschern (ca. 50–80 Pa). Hohe Werte ergeben sich bei Kleeheu vom ersten Schnitt, besonders bei kurzer Schnittlänge und hoher Feuchtigkeit. Grobstängeliges Belüftungsheu, wie etwa Luzerne, bringt dagegen wenig Gegendruck.

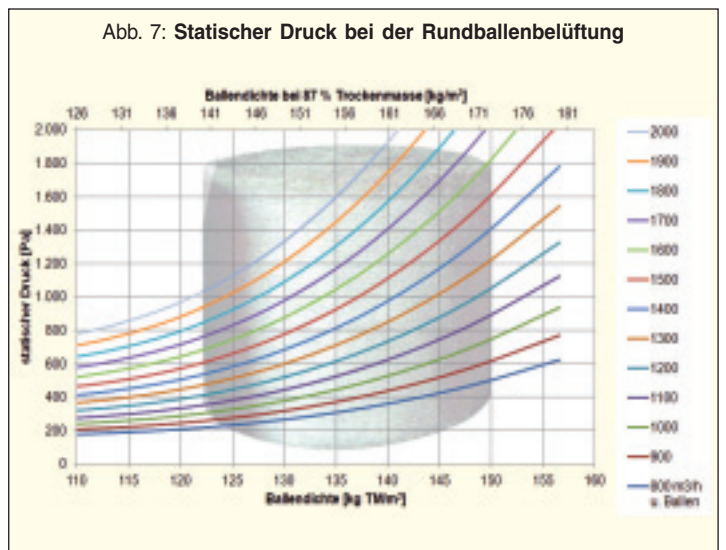
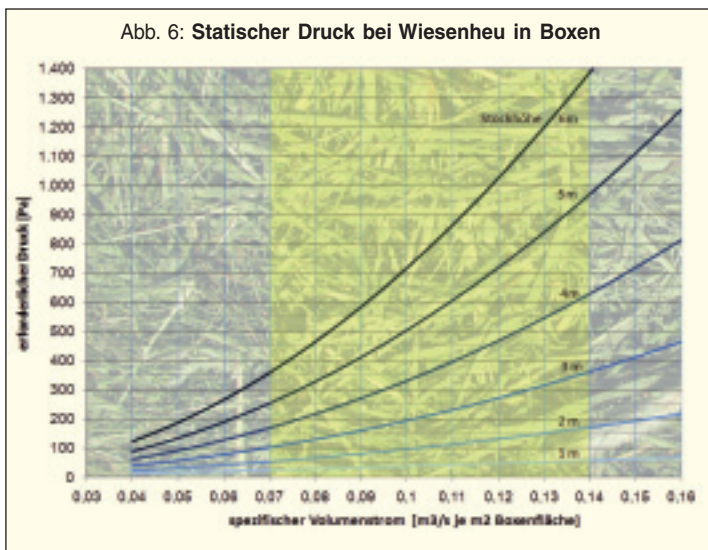
Einen wesentlichen Einfluss auf den Druck hat der auf die Fläche bezogene Luftdurchsatz. Der maximale Druck des Ventilators sollte eine Reserve von mindestens 200 Pa bieten. Insgesamt ergibt das typischerweise bei Boxentrocknung einen maximalen Gesamtdruck von 1.000–1.600 Pa (siehe Abb. 6).

Bei Rundballen kann man mit einem statischen Druck von 650–1.400 Pa rechnen (siehe Abb. 7). Zweiseitig ansaugende Ventilatoren („Doppelflüter“) sind meist weniger druckstabil als einseitig saugende Typen.

Zur Anpassung von Druck und Volumenstrom an Trockengut oder Wetter kann die Drehzahl von Ventilatoren mit Frequenzwandlern verändert werden.

In der Praxis wird die Netzfrequenz von 50 Hertz eher nur im Bereich von 40 bis 60 Hertz verändert (siehe Tab. 1). Die Ventilatoreigenschaften werden am besten durch Kennlinien dargestellt.

Je nach Bedingungen liegt der Betriebspunkt an verschiedener Stelle der



Druck-Kennlinie, nämlich dort, wo sich ein dem Ventilatorruck entsprechender Gegendruck einstellt. Im Diagramm ist das der Schnittpunkt mit der Widerstandslinie (siehe Abb. 8). Bei logarithmischen Diagrammskalen wird die Widerstandslinie eine Gerade. Meist werden mit Rücksicht auf die Polzahl von Elektromotoren oder auf Frequenz-

wandler Druck-Kennlinien für verschiedene Drehzahlen eingetragen. Zusätzlich ist auch der Leistungsbedarf an der Antriebswelle abzulesen.

Mit Rücksicht auf mögliche Temperaturen der Trocknungsluft sollten Antriebsmotoren eine hohe Temperaturbeständigkeit haben. Diese wird am Typenschild neuerdings als PTC-Wert (z.B. 150 °C) angegeben.

Tab. 1: Motordrehzahl bei unterschiedlicher Frequenz

Motorausführung	typische Drehzahl in U/min bei Direktantrieb		
	40 Hz	50 Hz	60 Hz
4-polig	1.180	1.480	1.770
6-polig	780	970	1.160
8-polig	580	720	865

Nach einem groben Richtwert kann bei Boxentrocknung mit einer Motorleistung von 1,1 kW/m² Boxenfläche gerechnet werden, bei Rundballentrocknung mit etwa 0,4–0,65 kW je Ballen. Oft wird die Leistung von Ventilatoren und anderen Elektrogeräten durch die

Tab. 2: Elektrischer Anschlusswert	
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 $\cos \varphi = 0,83$

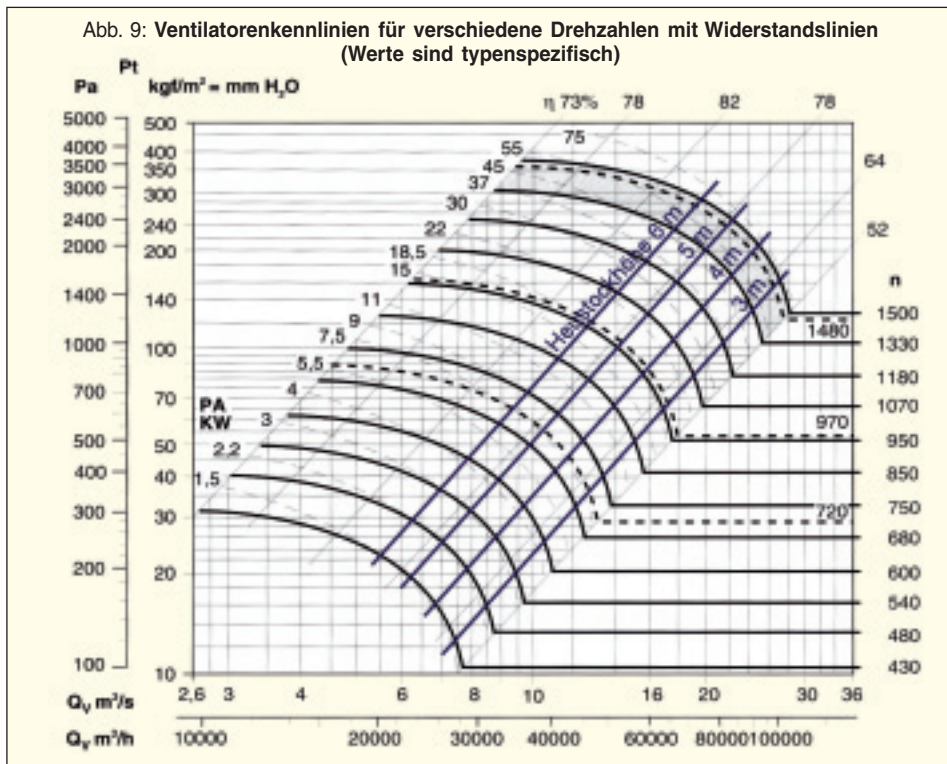
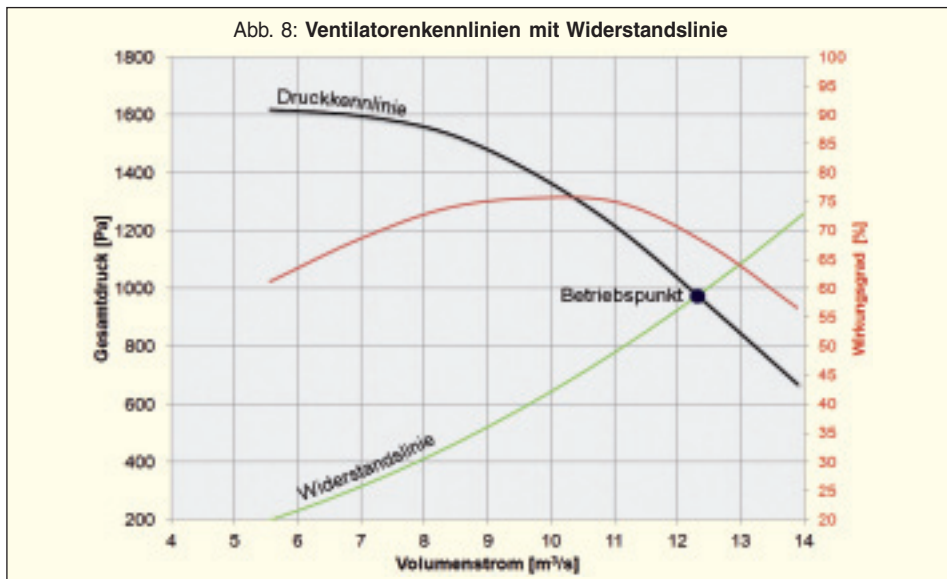
Hausanschluss-Sicherung („Panzersicherung“) begrenzt.

Belüften ist nicht gleich Trocknen

Trocknung erfolgt dann, wenn der Wasserdampfdruck des Trockengutes jenen der Luft übersteigt. Durch Erwärmung oder Entfeuchtung erhöht sich die Dampfdruckdifferenz und damit die Trocknungsgeschwindigkeit. Für jedes Trockengut kann der für eine Temperatur geltende Gleichgewichtszustand zwischen der relativen Feuchtigkeit der Luft und jener des Trockenguts bestimmt und als „Sorptionsisotherme“ dargestellt werden.

Zum Trocknen von Heu auf Lagerfähigkeit von 87–88 % Trockenmasse muss die relative Luftfeuchtigkeit 45–50 % unterschreiten (siehe Abb. 11). Wird das Heu unterhalb des Gleichgewichtszustandes belüftet, führt das demnach zu keiner Trocknung. Feuchte Luft kann sogar bereits trockenes Material wieder anfeuchten. Dies ist allerdings nicht mehr entsprechend den Gleichgewichtswerten bei der Trocknung möglich. Wenn durch Selbsterwärmung die Temperatur im Heu über 35 °C ansteigt, muss als Brandschutzmaßnahme belüftet werden. Wegen des Feuchtigkeitsgleichgewichts bilden sich im Trockengut Schichten.

Nach einer bereits auf den Gleichgewichtszustand getrockneten Schicht folgt eine Zone, in der Wasser abgetrocknet wird (siehe Abb. 10). In einer darüber liegenden Zone bleibt das Trockengut feucht, weil die Luft bereits gesättigt ist. Bei niedrigen Temperaturen



η = Wirkungsgrad, n = Drehzahl, P_a = aufgenommene Leistung in kW



kann sich sogar durch das Mischen der feuchten Luft mit der Umgebung eine Kondenschicht bilden. Wegen der Gefahr einer raschen Vermehrung von Pilzen und Bakterien im Belüftungsheu sollte daher die Trocknungszeit höchstens 60–80 Stunden betragen, bei Balltrocknung sogar nur 40–60 Stunden.

Trocknungsgeschwindigkeit berechnen

Die Trocknungsgeschwindigkeit wird weitgehend vom Sättigungsdefizit der Luft bestimmt. Dieses Sättigungsdefizit verändert sich je nach Temperatur und relativer Feuchte der Luft. Bei der Trocknung kühlt sich die Luft durch den Entzug der Verdunstungswärme des freigesetzten Wassers ab. Daher kann nicht das volle, für gleichbleibende Temperatur geltende Sättigungsdefizit genutzt werden. Aufgrund der Abkühlung kann man auch die tatsächliche Wasseraufnahme berechnen: Das beste Unterdachtrocknungsverfahren lohnt sich nicht, wenn nur minderwertiges Futter zur Verfügung steht. Im Gegensatz zum gesamten Sättigungsdefizit spricht man hier vom adiabatischen Sättigungsdefizit (siehe Abb. 12). In der Praxis wird auch das adiabatische

Sättigungsdefizit nicht voll ausgenutzt, vor allem gegen Ende der Trocknung. Grob kann man bei Heubelüftung mit einer Ausnutzung von 45–65 % rechnen.

Bei Kaltbelüftung liegt die praktische Wasseraufnahme erfahrungsgemäß nur bei 0,8–1,2 g/m³ Luft. Eine Luftanwärmung um 5–6 °C führt zu einer Verdoppelung der Wasseraufnahme. Dasselbe bewirkt eine Verringerung der relativen Luftfeuchte um rund 15 %.

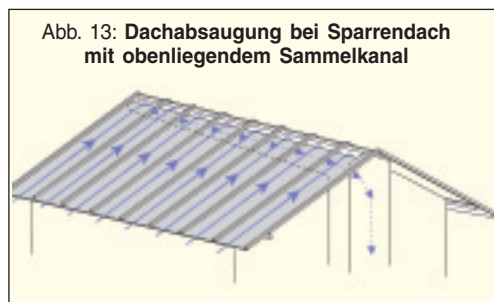
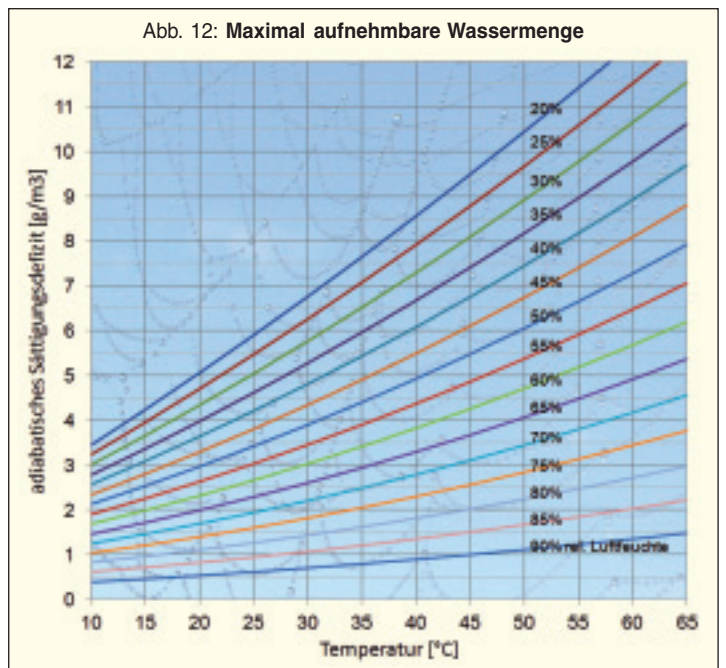
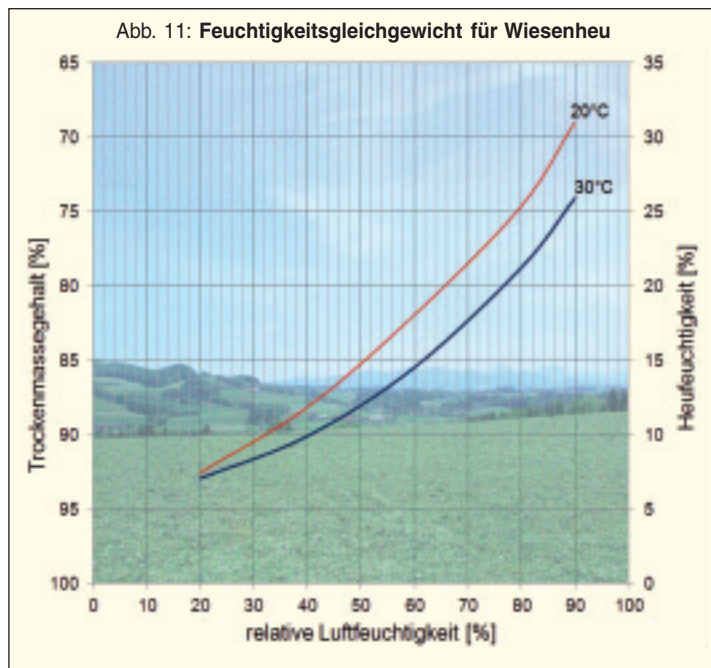
Mit Solarwärme trocknen

Die Nutzung der Sonnenwärme sollte bei keiner Planung übersehen werden. Meist bietet sich bei Gebäuden ohne große Umbauten eine Dachabsaugung unterhalb der vorhandenen Dachdeckung an. Bereits ohne transparente Abdeckung können unterhalb einer Trapezblechdeckung Wirkungsgrade bis zu 50 % erreicht werden. Bei Faserzement-Wellplatten beträgt der Wirkungsgrad um 40 %, bei Ziegeldeckung um 36 %. Je m² Dachfläche kann man grob mit 250–300 W nutzbarer Wärmeleistung rechnen.

Voraussetzung für eine Dachabsaugung ist eine dichte Unterschalung des

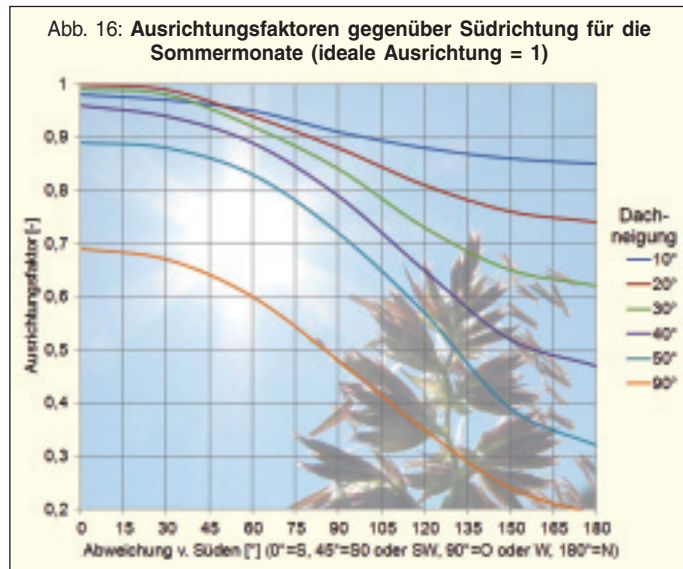
Daches bei einer Luftgeschwindigkeit im Bereich von 3–6,5 m/s. Empfehlenswert ist eine Dachkollektorfläche in der Größe ab der doppelten bis dreifachen belüfteten Fläche. Ein Luftvolumenstrom von 100–200 m³/h/m² Dachfläche hat sich bewährt. Sehr lange Kollektorflächen (im Verhältnis zur Saugbreite) sind zu vermeiden. Auch bei vorhandenem Blinddach ist eine Dachabsaugung möglich. Dazu muss bei innenliegendem Sammelkanal ein Streifen des Blinddaches über dem Sammelkanal entfernt werden. Eventuell ist eine größere Höhe der Lattung oder Konterlattung (je nach Art der Luftführung) über dem Blinddach erforderlich. Während der Sommermonate ist eine Dachneigung von 20 Grad wegen des hohen Sonnenstandes ideal. Abweichungen von der idealen Südausrichtung verringern die Wärmeleistung im Sommer bei flacher Dachneigung nur wenig. Damit sind sogar flache nordseitige Dachhälften sinnvoll nutzbar. In Sammelkanälen soll die Luftgeschwindigkeit unter 4 m/s gehalten werden. Insgesamt soll der erforderliche Saugdruck 100–150 Pa nicht übersteigen.

Eine besonders interessante Lösung ist die Kombination von Fotovoltaik mit einer Dachwärmenutzung. Dabei be-



wirkt eine Kühlung der Solarmodule je 1 °C einen um fast 0,5 % besseren elektrischen Wirkungsgrad. Die Wärmeleistung unterhalb der Module ist fast mit jener bei Blechdächern vergleichbar. Während der Stillstandzeit der Trocknung sollte entweder für eine natürliche Luftströmung unterhalb der Module oder für eine Kühlung mit Axiallüftern geringer Leistung gesorgt werden (siehe Abb. 17 und 18).

Axiallüfter können auch zur Speisung und Entladung von Wärmespeichern für Solaranlagen verwendet wer-



kostengünstig zur Verfügung. Bei Entfeuchtern ist oftmals mit einem vergleichsweise höheren Preis pro kWh Energie zu rechnen. Oft ist auch der dazu nötige elektrische Anschlusswert dafür nicht vorhanden.

Warmluftöfen brauchen allerdings auch eine nicht unwesentliche elektrische Leistung. Bei der Aufstellung müssen örtliche Brandschutzvorschriften beachtet werden. Die Warmluft wird meist durch flexible Polyamidschläuche geführt. Bei Schlechtwetter können sich bei Warmbelüftung und man-



◀ Eine interessante Lösung ist die Kombination von Fotovoltaik mit einer Dachwärmenutzung.

Die Trocknungsdauer kann mit Warmluftöfen wesentlich verkürzt werden.

Abb. 17: Fotovoltaik auf bestehendem Dach mit horizontaler Luftführung und seitlichem Sammelkanal

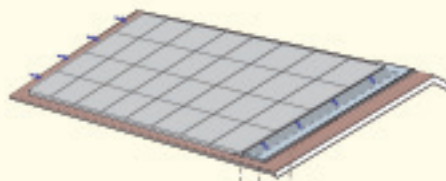
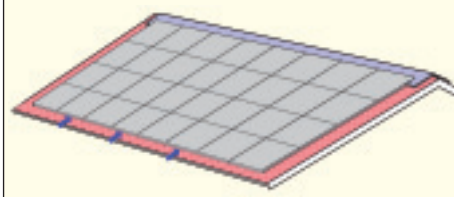


Abb. 18: Fotovoltaik auf bestehendem Dach mit Luftführung giebelwärts und Giebelabdeckung



Faustzahlen für Dachwärmenutzung:

- Kollektorfläche = mindestens doppelte belüftete Fläche
- nutzbare Leistung je m² Kollektorfläche bei 800 W/m² Einstrahlung bei freiliegendem Kollektor etwa 200–350 W/m², bei transparent abgedecktem Kollektor etwa 350–460 W/m²
- optimale Luftgeschwindigkeit im Kollektor 4–6 m/s
- Luftgeschwindigkeit in Sammelkanälen möglichst nicht über 4–5 m/s
- Der saugseitige Druckverlust sollte unter 100 Pa liegen.



gelhafter Gebäudeentlüftung oberflächliche Kondensationsschichten bilden.

Trocknen mit Luftentfeuchter

Mit Luftentfeuchter-Wärmepumpen kann der spezifische Energieaufwand zum Trocknen gegenüber einer Luftanwärmung deutlich gesenkt werden. Die Wirkung ist aber weitgehend von den Einsatzbedingungen, insbesondere von Temperatur und Luftfeuchte, abhängig. Unterhalb von 35–40 % relativer Luftfeuchtigkeit, aber auch bei Temperaturen unterhalb von 10 °C ist ein Entfeuchterbetrieb wenig wirksam. Im Gegensatz zur reinen Luftanwärmung wird auch die absolute Luftfeuchtigkeit und damit die Gefahr von Oberflächenkondensation verringert. Durch Abkühlung der Luft im Verdampfer unterhalb des Taupunktes wird Wasser abgeschieden. Am Kondensator führt die vorher entzogene Wärme mit der Kondensations- und Aggregatabwärme zu 2–8 °C Anwärmung. Unterhalb von etwa 8–10 °C Außentemperatur kann es sogar zu einer Verdampfervereisung kommen. Dies lässt sich aber durch eine Heißgasrückführung vermeiden. Wichtig ist auch die Abstimmung des Luft-

den. Besonders geeignet erscheinen gut wärmedämmte Kiesspeicher mit Korngrößen im Bereich von 35–60 mm.

Trocknen mit Warmluftofen oder Wärmetauscher

Mit angewärmter Luft in Verbindung mit Warmluftöfen oder Abwärmenutzung kann die Trocknungsdauer wesentlich verkürzt werden. Gelegentlich kann auch eine im Sommer stillgelegte Gebäudeheizung über einen Wärmetauscher genutzt werden. Die erforderliche Heizleistung wird aber oft unterschätzt. Je 10.000 m³ Luft pro Stunde benötigt man für 10 °C Anwärmung rund 33 kW Heizleistung (siehe Abb. 19). Eine starke Anwärmung um mehr als 15–20 °C erscheint aus Gründen der Energieeffizienz oder auch mit Rücksicht auf das Trockengut nicht sinnvoll. Problematisch können bereits Lufttemperaturen oberhalb von 50 °C über mehrere Tage sein. Der spezifische Energieaufwand zum Abtrocknen von 1 kg Wasser liegt bei Luftanwärmung meist im Bereich von 0,9–1,6 kWh und damit relativ hoch. Brennholz oder Abwärme aus Kraft-Wärmekopplung (z.B. von Biogasanlagen) steht aber oft

Abb. 19: Erforderliche Heizleistung bei Warmluftöfen

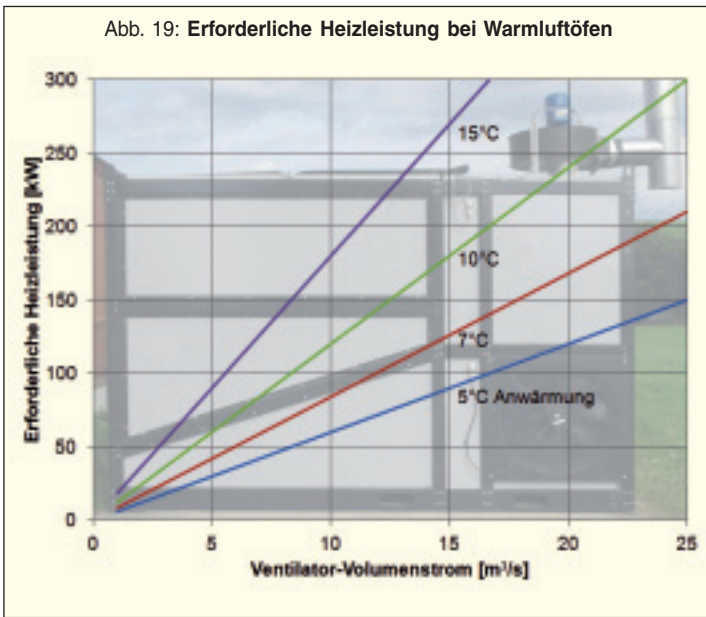
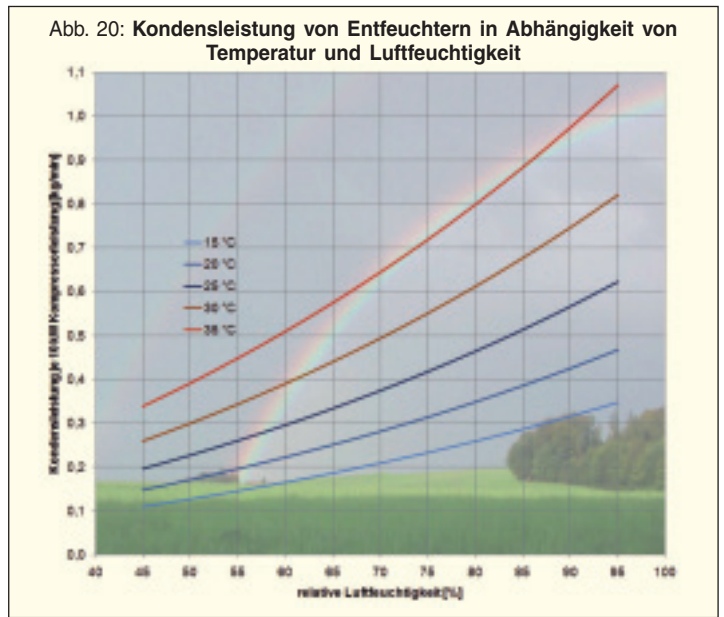


Abb. 20: Kondensleistung von Entfeuchtern in Abhängigkeit von Temperatur und Luftfeuchtigkeit



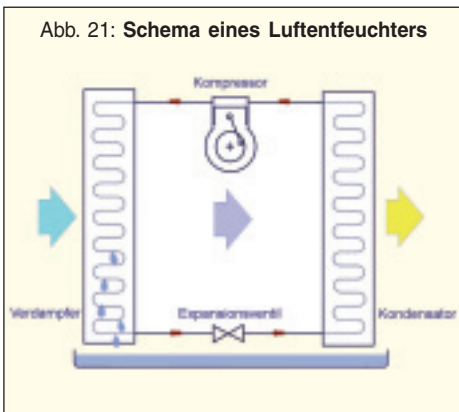
durchsatzes durch den Entfeuchter. Bei zu großem Luftdurchsatz kann eventuell der Taupunkt nicht mehr erreicht werden. Ein sehr geringer Luftdurchsatz führt, ebenso wie eine hohe Ansaugtemperatur, zu einer erheblichen Temperaturdifferenz zwischen Verdampfer und Kondensator. Weiters kann ein zu hoher Kältemitteldruck entstehen, der wiederum mit hoher Leistungsaufnahme verbunden ist. Die Werte für die Luftgeschwindigkeit am Verdampfer liegen typischerweise bei 3–4 m/s.

Kondensleistung, außerdem kann eine Verdampfervereisung vermieden werden. Allerdings ist bei völlig dichtem Gebäude die Trocknung durch die Kondensleistung des Entfeuchters beschränkt (siehe Abb. 20). In der Praxis wird jedoch trotzdem ein geschätzter Anteil von rund 30–40 % des abgetrockneten Wassers am Gebäude kondensiert oder nach außen abgegeben. Dabei muss beachtet werden, dass konstruktive Holzbauteile nicht über einen längeren Zeitraum erhöhter Luftfeuchtigkeit ausgesetzt werden.

sollte die Schichthöhe einer Charge von 1,4–3,5 m nicht überschritten werden. Mehrere kleinere Chargen verbessern die Trocknungsleistung. Unterschiedlich dicke oder feuchte Stellen des Belüftungsheus führen zu ungleicher Trocknungsdauer oder sogar zu Schimmelbildung. Unterschiedlich feuchte Futterpartien sollten stets auf der ganzen Boxenfläche verteilt werden.

Grundsätzlich soll beim Beschicken von Boxen der Ventilator bereits laufen, um das Absetzen des Heus einzuk-

Abb. 21: Schema eines Luftentfeuchters



Luftentfeuchter können grundsätzlich im Hauptstrom („Vollentfeuchtung“) oder im Nebenstrom („Teilentfeuchtung“) betrieben werden. Bei Teilentfeuchtung wird der Entfeuchter mit Abluft vom Trockengut gespeist, ein Hilfslüfter sorgt für einen optimalen Luftdurchsatz. Die entfeuchtete Luft wird danach mit zusätzlicher Außenluft vom Ventilator in den Heustock gedrückt. Bei Vollentfeuchtung kann entweder mit Frisch- oder mit Umluft getrocknet werden. Im Umluftbetrieb kann die Lufttemperatur erheblich ansteigen. Damit verbessert sich auch die

Erfahrungsgemäß ist ein Frischluftbetrieb ab etwa 25 °C Außentemperatur zweckmäßig, darunter ein Umluftbetrieb. Daher ist insbesondere in Verbindung mit einer Dachwärmenutzung eine Umschaltklappe zur Luftführung vorteilhaft (siehe Abb. 22 und 23).

Bei dauerndem Umluftbetrieb hat sich ein Leistungsverhältnis von Entfeuchter zu Ventilator (bezogen auf die Anschlussleistung) ab 2:1 bewährt. Bei Frischluftbetrieb oder Bypassluftzufuhr zwischen Verdampfer und Kondensator kann auch eine Entfeuchterleistung ab 50–75 % der Lüfterleistung ausreichen. Bei kleiner Nennleistung des Entfeuchters und niedrigen Außentemperaturen kann eine kurzzeitige Luftanwärmung über eine Heizung die Kondensleistung im Umluftbetrieb steigern.

Anlagenbedienung

Bei Boxentrocknung ist eine möglichst lockere und gleichmäßige Beschickung entscheidend für den Trocknungserfolg, bei Rundballen sind es analog die Pressdichte und der Dichteverlauf im Ballen. Je nach Feuchtigkeit des Trockengutes und Anlagenleistung

Abb. 22: Schema einer Luftentfeuchtung im Hauptstrom mit Umschaltklappe

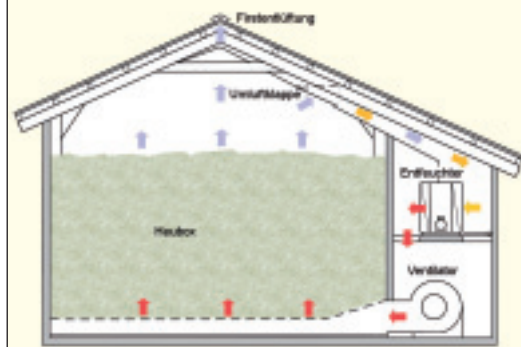


Abb. 23: Schema einer Luftentfeuchtung im Nebenstrom



Faustzahlen für Trocknungsanlagen mit Luftentfeuchter

■ Verhältnis Wärmepumpen-Nennleistung/Ventilatorleistung bei Hauptstrombetrieb ab 1:1, sonst bei Nebenstrombetrieb oder mit Bypassluft ab 0,5:1. Bei dauerndem Umluftbetrieb ist ein Verhältnis von 2:1 empfehlenswert.

Tab. 3: Schätzung des Trocknungsfortschritts

Abluftfeuchte	90	80	70	60	50
Trockenmasse (%)	68	74	78	82,5	85
Feuchtigkeit (%)	32	26	22	17,5	15

schränken. Entfeuchteranlagen sollten während der Beschickung im Frischluftbetrieb gefahren werden, um eine übermäßige Verschmutzung des Verdampfers zu verhindern. Trotzdem ist eine gelegentliche Reinigung der Wärmetauscherflächen notwendig.

Die Überwachung des statischen Gegendruckes gibt Aufschluss über die Durchlüftung und ein eventuelles starkes „Setzen“ eines Heustockes. Eine nach außen zu öffnende Türe der Lüfterkammer zeigt durch die zum Öffnen benötigte Kraft den Saugdruck an.



Um den statischen Druck zu messen wird ein Schlauchende unterhalb des Boxenrostes oder in den Speisekanal einer Ballentrocknung verlegt. 1 mm Wassersäule entspricht dabei ca. 10 Pa.

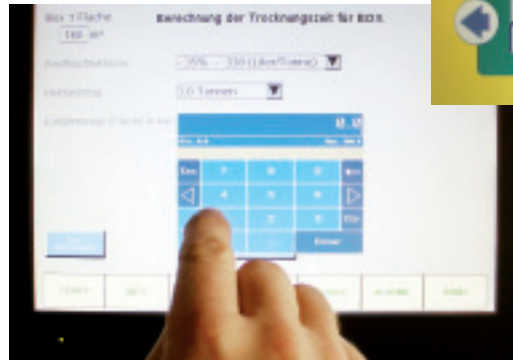
Anhand der relativen Feuchtigkeit der Abluft kann man grob auf den Trockenmassegehalt schließen. Starke lokale Verdichtungen im Heu und eine schlechte Ausnutzung des Sättigungsdefizits der Luft können allerdings Trocknungswerte vortäuschen (siehe Tab. 3).

Mit Kaltbelüftung kann bei Regenwetter der Ventilator im Intervallbetrieb laufen. Dabei ist besonders auf erhöhte Stocktemperaturen über 35 °C zu achten. Eine deutliche Abkühlung der Trocknungsluft ist stets ein Anzeichen für eine noch nicht abgeschlossene Trocknung. Beträgt die relative Luftfeuchtigkeit über Heu nur mehr 50 %, besonders nach einem Wiedereinschalten nach einer Trocknungspause von 2–3 Stunden, so kann man vom Erreichen der Lagerfähigkeit ausgehen. Nach einer Woche sollte aber durch neuerliches Einschalten des

temperatur und können bei Schlechtwetter einen Intervallbetrieb mit Unterbrechungen von typischerweise 2–3 Stunden durchführen. Speicherprogrammierbare Steuerungen können automatisch zwischen Frisch- und Umluftbetrieb bei Luftentfeuchtung umschalten oder in Verbindung mit Frequenzwandlern die Lüfterdrehzahl anpassen sowie einen begrenzten elektrischen Anschlusswert einhalten. Bei Umlufttrocknung wird dabei oft der Luftdurchsatz vermindert, bei Schönwetter dagegen bei geringerer Entfeuchterleistung erhöht.



Anlagensteuerungen erleichtern die Bedienung, können aber die Überwachung durch eine Bedienungsperson nicht ersetzen.



Lüfters die Abluftfeuchte geprüft werden. Bei trockenen Rundballen muss sich ein Rundstahldorn oder der Schaft eines Feuchtemessgerätes an allen Stellen per Hand leicht in den Ballen einstoßen lassen.

Durch Messung von Temperatur und Luftfeuchtigkeit der Trocknungsluft vor und über Heu oder Berechnung des adiabatischen Sättigungsdefizits der Luft sowie Einstufung der Feuchtigkeit des Trockengutes ist eine Vorausschätzung der Trocknungszeit möglich. Der Intervallbetrieb lässt sich damit auch steuern.

Anlagensteuerungen erleichtern die Bedienung, können aber die Überwachung durch eine Bedienungsperson nicht voll ersetzen. Einfache Steuerungen für Kaltbelüftung erfassen die Luftfeuchtigkeit, teilweise auch die Heu-

Wirtschaftlich trocknen

Trocknungskosten hängen in erster Linie von der Feuchtigkeit des Trockengutes ab. Eine Trocknung erntefrischen

Abb. 24: Energiekostenvergleich verschiedener Belüftungsverfahren

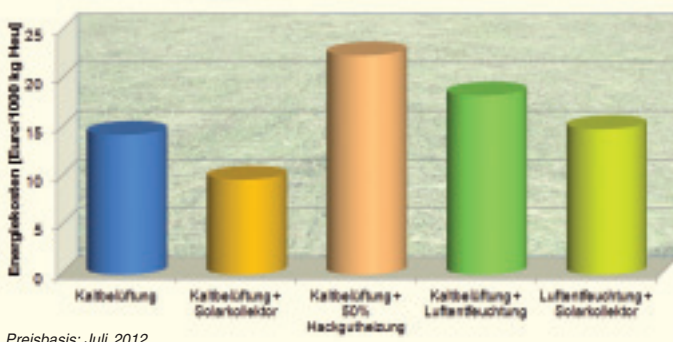
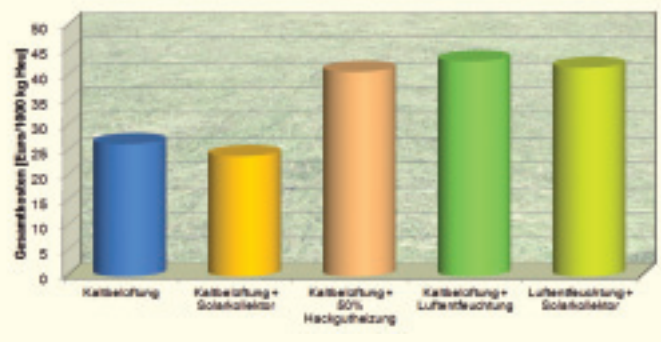


Abb. 25: Gesamtkostenvergleich verschiedener Belüftungsverfahren



Grünfutters erscheint im Blickwinkel steigender Energiepreise daher nur in Ausnahmefällen sinnvoll. Auch bei üblicher Vortrocknung am Boden können durch 10–15 % verringerte Heufeuchtigkeit die Trocknungskosten ungefähr halbiert werden. Dabei ist aber mit erhöhten Bröckelverlusten zu rechnen. Meist wird deshalb bei Boxentrocknung nach Möglichkeit auf 60–70 % Trockenmasse vorgetrocknet, bei Pressballen bis maximal 65 %.

Unabhängig von Energiepreisen, Fixkosten und Gutsfeuchte gibt der spezifische Energieverbrauch einen Anhaltswert für die variablen Trocknungskosten. Bei Kaltbelüftung streuen die Werte in weiten Grenzen um 0,25 kWh/kg abgetrocknetes Wasser. Bei Schlechtwetter können diese aber auf 0,7 kWh/kg ansteigen (siehe Abb. 24). Bei Nutzung der Dachwärme kann der Mittelwert dagegen erheblich unter 0,2 kWh/kg reduziert werden. Bei Entfeuchtertrocknung liegen typische Werte um 0,25–0,4 kWh/kg Wasser. Selbst bei Rundballentrocknung mit reinem Entfeuchterbetrieb wurde ein Verbrauch unter 0,3 kWh/kg Wasser erreicht.

Ein dauernder Trocknungsbetrieb mit Warmluft erfordert 0,9–1,6 kWh/kg Wasser. Allerdings ist der Energiepreis für Hackgut, Stückholz oder auch Abwärme selbst bei aktuellen Marktpreisen erheblich geringer als jener für elektrische Energie. Diese Lösung kommt deshalb vor allem zur Rundballentrocknung oft in Frage.

Die Gesamtkosten variieren je nach Bauaufwand und Eigenleistung stark. Geringe Gesamtkosten ergeben sich bei reiner Kaltbelüftung und Belüftung mit Dachwärmenutzung. Dann folgen Warmbelüftung mit Heizofen bei 50 % Einschaltzeit und schließlich die Entfeuchtertrocknung (siehe Abb. 25). Eine Kombination mit Solarwärmenutzung verringert aber auch deren Werte deutlich. Grob kann man die Gesamtkosten mit dem doppelten bis dreifachen Wert der variablen Kosten abschätzen.

Entgegen mancher Meinungen zeigen Berechnungen der LK Salzburg, dass für einen typischen Grünlandbetrieb die Heutrocknungskosten jene für Gärfuttergewinnung im Flachsilo oder in Siloballen sogar unterschreiten. Bei erforderlicher Neuerrichtung von Gebäuden ist die Kostendifferenz gering. Das

beste Unterdachtrocknungsverfahren lohnt sich nicht, wenn nur minderwertiges Futter zur Verfügung steht. ■

Tab. 4: Spezifischer Energiebedarf der Trocknungsverfahren

Verfahren	spezifischer Energiebedarf	
	[kWh/kg Wasser]	[kWh/t Heu]
Kaltbelüftung	0,25	90 (65–115)
Kaltbelüftung + Sonnenkollektor	0,18	65 (40–90)
Kaltbelüftung + Entfeuchter	0,32	110 (70–130)
Solar Kollektoren + Entfeuchter	0,24	85 (60–120)
Kaltbelüftung + Heizofen (50 %)	0,92	255 (200–310)


Die Werte sind auf 1.000 kg Heu bei Trocknung von 63 % auf 87 % TM bezogen

Tab. 5: Richtwerte zur Boxentrocknung

Mähfläche je Schnitt [ha]	empfohlene Boxenfläche [m²]	Ventilator-Volumenstrom		Querschnitt Saugkanal [m²]	Boxenraum für 1. Schnitt [m³]	typische Ventilatorleistung [kW]	lichte Rosthöhe [cm]	Abdeckbreite [cm]
		bei halber Stockhöhe [m³]	bei voller Stockhöhe [m³]					
5	40	15.840	10.080	1,1	150	4	41	49
6	50	19.800	12.600	1,38	188	5	43	51
8	60	23.760	15.120	1,65	225	6	44	53
9	70	27.720	17.640	1,93	263	7	46	54
10	80	31.680	20.160	2,2	300	8	47	56
11	90	35.640	22.680	2,48	338	10	49	58
13	100	39.600	25.200	2,75	375	11	50	59
14	110	43.560	27.720	3,03	413	12	52	61
15	120	47.520	30.240	3,3	450	13	53	63
16	130	51.480	32.760	3,58	488	14	55	64
18	140	55.440	35.280	3,85	525	15	56	66
19	150	59.400	37.800	4,13	563	16	58	67
20	160	63.360	40.320	4,4	600	17	59	69
21	170	67.320	42.840	4,68	638	18	61	71
23	180	71.280	45.360	4,95	675	19	63	72
24	190	75.240	47.880	5,23	713	20	64	74
25	200	79.200	50.400	5,5	750	21	66	76
26	210	83.160	52.920	5,78	788	22	67	77
28	220	87.120	55.440	6,05	825	23	69	79
29	230	91.080	57.960	6,33	863	24	70	80
30	240	95.040	60.480	6,6	900	25	72	82
31	250	99.000	63.000	6,88	938	27	73	84
33	260	102.960	65.520	7,15	975	28	75	85
34	270	106.920	68.040	7,43	1.013	29	76	87
35	280	110.880	70.560	7,7	1.050	30	78	89
36	290	114.840	73.080	7,98	1.088	31	79	90
38	300	118.800	75.600	8,25	1.125	32	81	92

Es ist empfehlenswert, einen Schnitt auf mindestens 2 bis 3 Trocknungschargen aufzuteilen. Die in der Tabelle angegebene Mähfläche je Schnitt ist auf drei Chargen je Schnitt bezogen. Boxenflächen über 200–250 m² sollten besser unterteilt werden. Die Breite der Randabdeckung sollte bei grobstängeligem Futter (z.B. Luzerne) um 10–15 % vergrößert, bei reinem Weidelgrasbestand (Raygras) aber leicht verringert werden. Bei ausgewogenem Futter, gutem Anwelken auf 60 % TS (40 % Wassergehalt) und einer gesamten Stockhöhe von 5 m ist mit einem statischen Druck von 400 Pascal bei halber Stockhöhe zu rechnen. Dachabsaugungen, Wärmetauscher von Wärmepumpen oder Heizanlagen erfordern einen um rund 100 Pascal höheren statischen Druck beim notwendigen Volumenstrom.

Alle Bilder, Abbildungen und Tabellen: Gotthard Wirleitner, außer Bild S. 20 (Rundballentrocknung): Fa. Lasco, Bild S. 24 (Fotovoltaik): Josef Braun sowie Bilder S. 26 (Anlagensteuerungen): Fa. Lasco und SR Reindl

	<p>Fachgruppe: Futterbau und Futterkonservierung</p> <p>Vorsitzender: Ing. Reinhard Resch, LFZ Raumberg-Gumpenstein</p> <p>Geschäftsführer: Univ. Doz. Dr. Karl Buchgraber, LFZ Raumberg-Gumpenstein, 8952 Irnding, Tel.: 03682/22451-310, www.oead-gruenland.at E-Mail: karl.buchgraber@raumberg-gumpenstein.at</p>	<div style="border: 1px solid black; border-radius: 15px; padding: 10px; background-color: #e0f0e0;"> <p>INFO 4/2014</p> </div>
-------------------------------------------------------------------------------------	-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------