

Qualitätsheu durch effektive und kostengünstige Belüftung

Franz Nydegger und Gotthard Wirleitner unter Mitarbeit von
Josef Galler, Alfred Pöllinger, Ludo Van Caenegem,
Herbert Weingartmann, Heinz Wittmann

Im Blickwinkel steigender Futtermittelpreise, aber auch aus Gründen der Produktqualität erhält gutes Heu als Grundfutter eine neue Aktualität. Ohne Gärfutter gewonnene „Heumilch“ wird nicht ohne Grund vom Verbraucher geschätzt und von einigen Molkeereien oder Käseereien besser bezahlt. Wenn Heu als alleiniges Grundfutter dienen soll, dann ist ein hoher Energiegehalt entscheidend. Mit einem guten Grünlandbestand, einer schonenden Vortrocknung am Boden und einer nachfolgenden wirksamen Unterdach Trocknung ist in günstigen Lagen eine Energiekonzentration in der Größenordnung von 6 MJ NEL/kg Heu-Trockenmasse erreichbar.

Voraussetzung für eine entsprechende Heuqualität ist einerseits das Einbringen des Feuchtheus vor dem Einsetzen umfangreicher Bröckelverluste. Wichtig ist aber auch ein wirksames Trocknen auf einen Trockensubstanzgehalt von mindestens 87% innerhalb von 40 bis 70 Stunden. Erst ab diesem Trockensubstanzgehalt ist Vermehrungsgefahr von Bakterien und Schimmelpilzen gebannt. Restfeuchte kann die Ursache einer Erwärmung bis hin zur Selbstentzündung des Heus werden (Vorschriften zur Brandverhütung beachten!). Gutes Belüftungsheu zeigt noch eine Grünfärbung, riecht aromatisch und ist schmackhaft. Die Trockenmasseaufnahme je Tier liegt über derjenigen von Silagefutter, denn Gärsäuren begrenzen die Fresslust.

Nicht richtig getrocknetes Heu riecht muffig und sieht grau oder braun aus. Beim Menschen kann schlechtes Heu zu Bronchialasthma oder zur "Farmerlunge" führen. Für die Farmerlunge ist ein um 3 bis 12 Stunden verzögertes Auftreten von Husten, Atemproblemen, Fieber bis zum Schüttelfrost typisch. Wegen des zeitlichen Verzuges zwischen einem Heu-Kontakt und den Komplikationen wird die Farmerlunge leider oft erst erkannt, wenn starke gesundheitliche Einschränkungen dauerhaft geworden sind. Durch Heufütterung gewonnene Milch zeigt im Gegensatz zu Silagemilch einen deutlich geringeren Gehalt an Clostridiensporen – Dauerformen von Buttersäurebildnern. Einige Molkeereien bezahlen die Milch je nach dem Gehalt an diesen für die Milchverarbeitung und Käseerei schädlichen Clostridien.

Diese Broschüre soll dazu beitragen, hohe Futterqualitäten bei möglichst geringen Kosten zu erreichen.

Die Vortrocknung am Boden spart Geld, darf aber nicht zu weit gehen

Heute ist es technisch möglich, frisch gemähtes Wiesen gras ohne Vorwelkung unter Dach zu trocknen. Allerdings ist der Energieaufwand dafür sehr hoch. Mobile oder stationäre Heißluft-Grünfütterungstrocknungsanlagen konnten sich deshalb wegen des hohen

Heizölpreises nur wenig durchsetzen. Zum Trocknen von Feuchtheu mit 60% Trockenmasse muss im Vergleich zu 70% Trockenmasse die doppelte Menge an Wasser abgeführt werden. Man braucht deshalb auch ungefähr die doppelte Menge an Energie. Bei höheren Feuchtigkeitsgehalten wird die Situation noch wesentlich drastischer. Zur Trocknung von frisch gemähtem Gras mit knapp 20% Trockenmasse müssen beispielsweise je t Trockenheu von 87% Trockenmasse 3,35 t Wasser abgeführt werden, also 335% des Trockenguts. Von der Kostenseite kommt daher der Vortrocknung am Boden eine große Bedeutung zu.



Bild 1: Grobprüfung 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

Am ersten Tag nach dem Mähen können Kreiselzettwender mehrmals eingesetzt werden. Am zweiten Tag ist wegen zunehmender Bröckelverluste bereits Vorsicht am Platz. Besonders bei grobstängeligem Futter bringen Mähauflbereiter eine erhebliche Verkürzung der Trocknungszeit. Sie besitzen als Arbeitswerkzeuge entweder Schlägel oder Walzen. Intensivauflbereiter verwenden meist eine Bürstenwalze und eine Breitstreuvorrichtung.

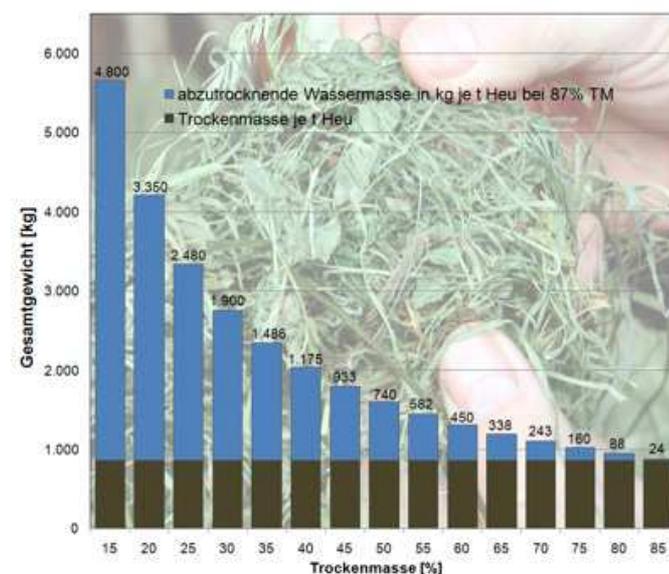


Bild 2: Die Menge des abzutrocknenden Wassers hängt stark vom Anfangs-Trockenmassegehalt ab

Das Wetterrisiko und die ab 70% Trockenmassegehalt stark steigenden Bröckelverluste begrenzen die Vortrocknung am Boden. Im Blickwinkel der Schlag-

kraft und Witterungsunabhängigkeit kann es manchmal sinnvoll sein „Eintagesheu“ einzubringen.

Belüften führt nicht immer zu einer Trocknung!

Bei Regenwetter ist trotz Belüftung mit Außenluft keine Trocknung von Heu bis zur Lagerfähigkeit möglich. Es gibt nämlich einen Gleichgewichtszustand zwischen der Feuchtigkeit eines Trockengutes und der relativen Luftfeuchtigkeit. Zum Trocknen von Heu auf Lagerfähigkeit von rund 87% Trockenmasse ist bei 20 °C beispielsweise eine maximale Luftfeuchtigkeit von höchstens 50% Voraussetzung. Bei 80% relativer Luftfeuchtigkeit ist nur eine Trocknung bis etwa 76% Trockenmasse möglich. Ist die Luft feuchter, so wird trotz Belüftung nicht mehr getrocknet. Es wird dann das Heu sogar in geringerem 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.

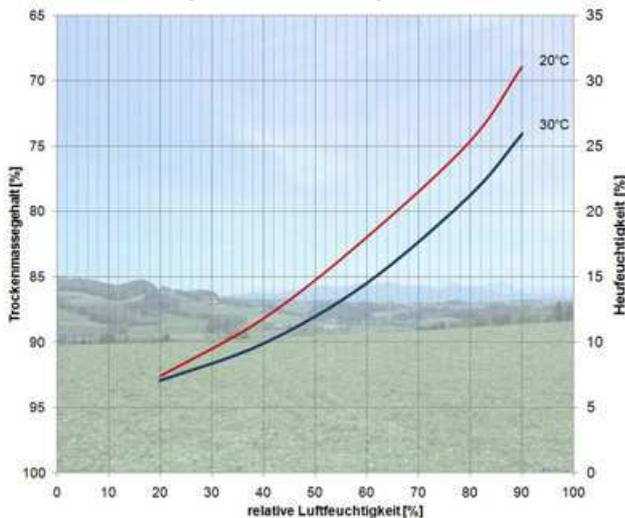


Bild 3: Feuchtigkeitsgleichgewicht von Wiesenheu (nach Segler, 1968)

Wegen des Feuchtigkeitsgleichgewichts trocknet das Heu nicht gleichmäßig, sondern schichtweise. Die bis zum Feuchtigkeitsgleichgewicht getrocknete Schicht wandert im Lauf 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 Wasseraufnahmefähigkeit der Luft

Die tatsächliche Wasseraufnahme der Luft ist von der relativen Luftfeuchte, der Temperatur, aber auch von der Feuchtigkeit des Trocknungsgutes abhängig. Theoretisch könnte z.B. ein Kubikmeter Luft bei 20°C und 70% relativer Feuchtigkeit 5,2 g Wasser bis zur Sättigung aufnehmen. In Wirklichkeit ist aber die Wasseraufnahme viel geringer:



Bild4: Trocknungszonen

Die Erklärung dafür ist, dass sich die Luft während eines Trocknungsvorgangs abkühlt, weil die zur Verdunstung (Verdampfung) des Wassers nötige Energie von 0,68 kWh je kg Wasser entzogen wird. Aus der, mit einer Trocknung einhergehenden Abkühlung der Luft lässt sich damit die Wasseraufnahme der Luft bestimmen: 1°C Abkühlung entspricht rund 0,47 g/m³. Wegen des Wärmeentzugs der Luft ist der spezifische Energieaufwand für die Heubelüftung meist erheblich kleiner als die Verdampfungswärme. Bei Kaltbelüftung streut der Energieaufwand um 0,25 kWh/kg Wasser.

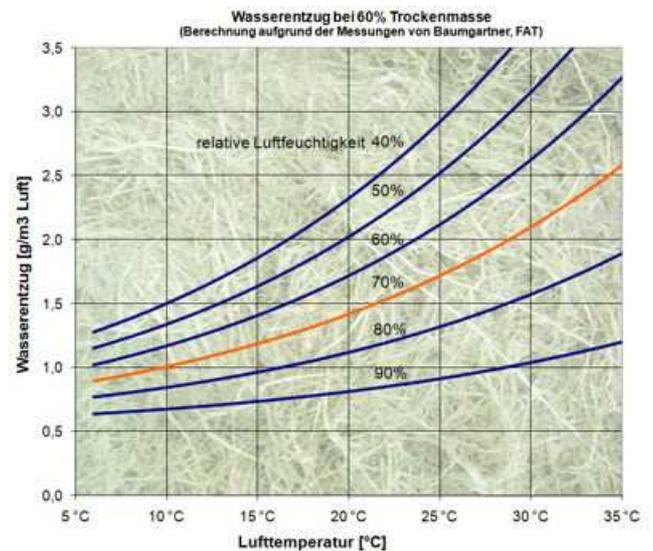


Bild 5: Maximaler Wassereutzug in g/m³ Luft bei 60% TM

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 65% 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.

higkeit der Trocknungsluft beträchtlich. Während bei Kaltbelüftung bei üblichen Luftfeuchtwerten ungefähr 0,8 bis 1,1 g Wasser/m³ Luft aufgenommen werden, steigt z.B. bei 5 °C Anwärmung die Wasseraufnahme auf fast das Doppelte. Der spezifische Energieaufwand liegt bei ständiger Warmbelüftung um 1 bis 1,4 kWh je kg abzutrocknendes Wasser.

Die Planung der Trocknungsboxen

Für die Planung einer Heubelüftung 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 in Quaderballen gepresst werden. Damit sind die Belüftungsboxen zum Beginn des nächsten Schnittes wieder verfügbar. Nach einer groben Faustregel sollten je ha Chargen-Mähfläche rund 25 bis 30 m² belüftete Fläche zur Verfügung stehen.

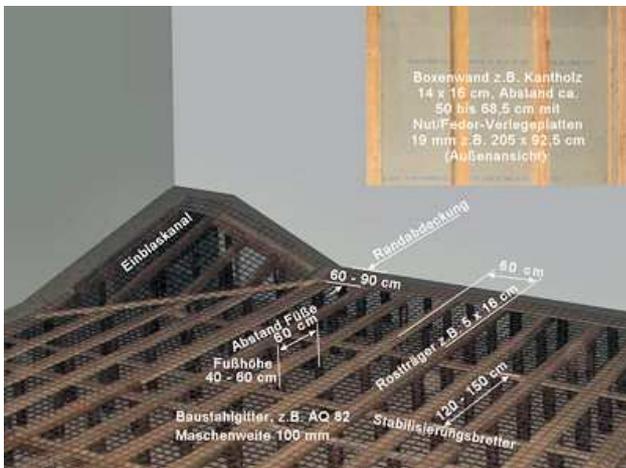


Bild 6: Beispiel für die Gestaltung des Bodenrostes. Als Rostträger werden allerdings meist Kanthölzer mit 10 x 10 cm Querschnitt verwendet

Heute geht der Trend bei Heubelüftungsanlagen zur Verringerung des Strömungsverlustes. Während früher oft strömungungünstige 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 – Seitenwand 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 Platten abgedeckt. Es ist zu bedenken, dass für eine einigermaßen gleichmäßige Durchlüftung die Höhe der ersten Heuschicht zumindest einen halben Meter betragen soll. Sehr große Trocknungsboxen (z.B. über 150 bis 200 m²) sollten daher unterteilt werden.

Anstelle eines Holz-Lattenrostes werden neuerdings gerne Baustahlmatten mit 100 x 100 mm Maschenweite und etwa 8 mm Drahtstärke (z.B. ÖNORM AQ 82) verwendet. Damit wird der Bodenrost weniger leicht durch Greiferzinken beschädigt. Eine ausrei-

chende 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.

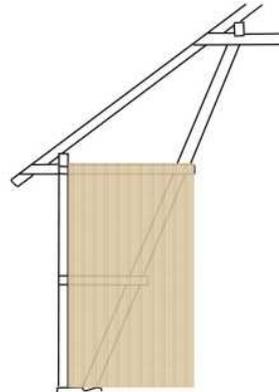


Bild 8: Nach unten fliehende Gebäudeteile verkleiden!

Wichtig ist die Auswahl des Ventilators

Entscheidend für die Höhe des erforderlichen Ventilatordruckes ist der Druckverlust im Heu und in den Luftführungen oder Wärmetauschern. Grob kann man von 100 bis 240 Pa Druckverlust je m Heu-Durchströmweg ausgehen. Genauer hängt der Druckverlust von der Luftgeschwindigkeit, von der Art und Dichte des Heus und daher auch von der gesamten Heustockhöhe ab. Darüber lagerndes Heu verdichtet nämlich untere Schichten. Ein fertig getrockneter Heustock hat typischerweise oben eine Dichte von 60 bis 80 kg/m³, unten jedoch von 100 bis 130 kg/m³, im Durchschnitt also etwa 90 kg/m³.

Zur Begrenzung des Strömungswiderstandes, aber auch der Gewährleistung einer ausreichenden Durchlüftung des Heus muss die Förderleistung („Volumenstrom“) auf die belüftete Fläche abgestimmt werden. Bewährt sind Werte von 0,11 m³ Luft/m² belüfteter Fläche und Sekunde (Bereich 0,07 bis 0,13 m³/m²*s). 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 m³ Luft/m² erhöht beispielsweise den Gegendruck auf das Dreifache!

Mit Rücksicht auf saugseitige Druckverluste in Wärmetauschern oder Solarkollektoren kann für Heustockhöhen bis 6 m ein maximaler Gesamtdruck in der Größenordnung von 1.000 bis 1.600 Pa empfohlen werden, bei Pressballenbelüftung liegt der Wert bei rund 1.300 bis 1.500 Pa. Gräser- und kräuterreiches oder grobstängeliges Heu (z.B. Luzerne) erfordert einen geringen, ein kleereicher Bestand oder eine kurze Schnittlänge dagegen einen hohen Druck. Axialventilatoren können den Anforderungen effektiver Heubelüftungsanlagen nicht mehr gerecht werden. Aber selbst bei Radialventilatoren gibt es erhebliche Unterschiede in der Druckstabilität.

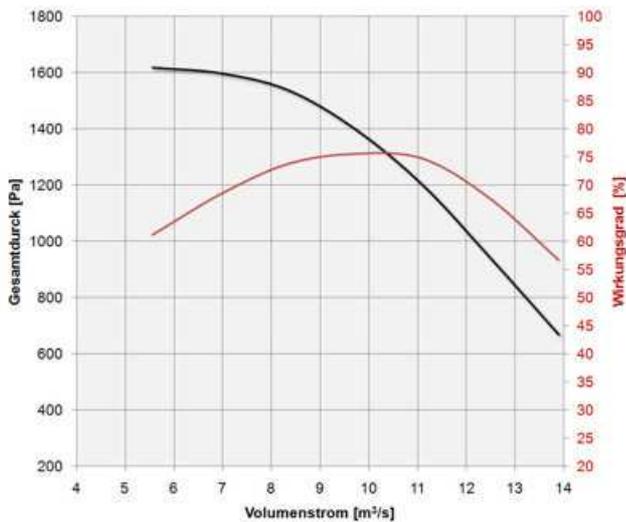


Bild 9: Kennlinien eines Ventilators für 18 kW Motornennleistung

Die Kennlinie des Ventilators sollte über einen breiten Druckbereich einen nur langsam abfallenden Volumenstrom zeigen. Oft wird die Nennförderleistung auf einen, für den Trocknungsbetrieb zu niedrigen Druck angegeben. Der beste Wirkungsgrad wird meist nicht zugleich mit dem größten Druck erreicht, sondern bei erheblich geringerem Volumenstrom. Ventilatoren mit einseitigem Lufteintritt sind eher druckstabiler als solche mit zweiseitiger Ansaugung „Doppelflüter“.

Zunehmend werden Belüftungsanlagen mit einem Frequenzumformer ausgerüstet. Damit ist es möglich, die Drehzahl des Ventilators und damit Förderleistung und Druck stufenlos zu verändern und den 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.



Bild 10: links Frequenzumformer

Der in einer Anlage herrschende statische Druck lässt sich übrigens leicht mit Hilfe eines teilweise mit Wasser gefüllten U-Rohres messen. Das Rohr wird mit einem Plastikschlauch verbunden, dessen Ende unterhalb des Boxenrostes 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. Aus dem dynamischen

Druck (p_{dyn}) lässt sich die Luftgeschwindigkeit und damit die Luftförderleistung errechnen.

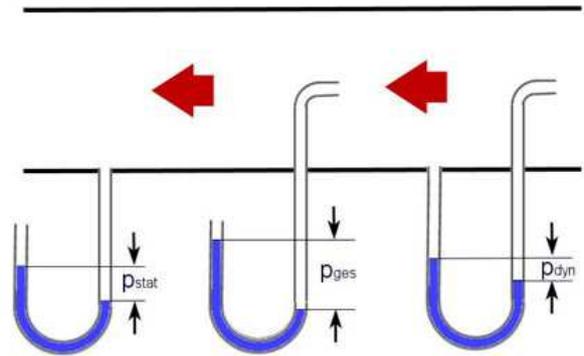


Bild 11: Druckmessung, links statischer Druck, Mitte Gesamtdruck, rechts dynamischer Druck

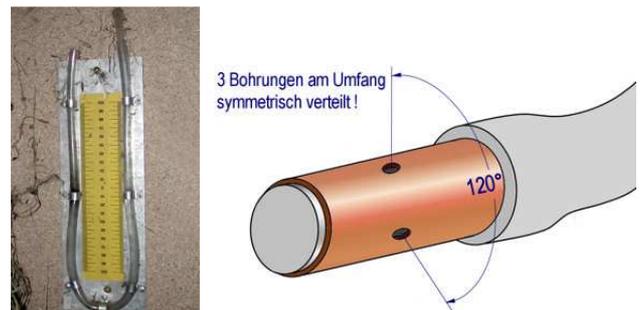


Bild 11a: links U-förmiger Schlauch, rechts Schlauchende zur Messung des statischen Druckes unterhalb des Bodenrostes

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. Teleskopverteiler und Greiferanlagen führen zu vergleichbar hohen Heustockdichten.



Bild 12: Abladen und Lockern mit dem Dosierladewagen

Einer der schlimmsten Fehler bei der Heubelüftung ist das Aufbringen einer zu hohen Welkheuschicht. Zu große Schichthöhen bewirken ein rasches Zusammensinken des Heustockes und entsprechende Verdichtungen, die eine gleichmäßige Durchlüftung ver-

hindern. Entscheidend für die mögliche Schichthöhe ist vor allem der Trockenmassegehalt des Feuchtheus. Nach Schweizer Empfehlungen sollte ein Wert („Wasserdeckel“) von 50 kg Wasser je m² 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 eventuell bis zu 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 mit Stechthermometer und Hygrometer erleichtern die Bedienung.

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. Bei richtiger Anlagendimensionierung sollte die Trocknungszeit im Bereich unterhalb von 60 bis 75 Stunden liegen. Entscheidend für die Futterqualität ist das Herabtrocknen auf mindestens 87% Trockenmasse. Leider ist dies (wie die Gleichgewichtskurve zeigt) in manchen Gebieten mit Kaltbelüftung allein schwer erreichbar.

Rundballenbelüftung – Details entscheiden

Die Belüftung von Rundballen ist grundsätzlich schwieriger als jene von Loseheu in Boxen. Die Probleme bei der Trocknung von Rundballen sind vielfach auf eine ungleichmäßige Durchlüftung infolge von Dichteunterschieden innerhalb der Ballen, aber auch zwischen den Ballen einer Trocknungscharge zurückzuführen.

Belüftbare Ballen sollen mit niedrigem Druck gepresst werden, der Ballendurchmesser sollte weder zu klein, noch zu groß sein. Bewährt sind Ballendurchmesser im Bereich von 1,2 bis 1,5 m. Die Ballendichten sollten im Bereich von 110 bis 120 (maximal 140) kg Heu-TM/m³ bleiben, dabei sind die oberen Werte nur bei grobstängeligem Futter vertretbar. Je nach Presstyp und –Hersteller liegt der zulässige Druck am

Manometer der Presse bei 60 bis 80 bar. Pressen mit variabler Kammergröße liefern Ballen mit gleichmäßiger Dichte als solche mit Konstantkammer. Bei den Konstantkammer-Pressballen strömt die Trocknungsluft wegen des lockeren Ballenkerns wie durch einen Schlot ab. Es ist daher sinnvoll, die obere Ballenstirnseite mit einem massiven Deckel abzudichten. Allerdings sind neue Pressen mit variabler Presskammer mit einer „Weichkernauführung“ ausgerüstet. Damit lässt sich der Ballenkern ebenso weich pressen wie bei Konstantkammerpressen.

Die Pressdichte ist dann passend, wenn man mit der flachen Hand noch 15 bis 20 cm in den Ballenkern hineinstoßen kann. Ideal sind Rundballen mit einem weichen Kern und einer dichter gepressten, stabilen Außenschicht.

Selbstgebaute Rundballen-Belüftungen werden meist mit Untenbelüftung ausgeführt. Hinsichtlich des Trocknungsverlaufes haben sie sich nicht weniger bewährt, als Anlagen mit einer Luftzufuhr von oben und unten. Von oben kann nämlich ohne hydraulische Andrückvorrichtung kaum jene Abdichtung erreicht werden, wie sie an der Ballenunterseite durch das Eigengewicht auftritt. Bei alleiniger Untenbelüftung müssen allerdings sehr feuchte Ballen gewendet werden.



Bild 13: Untenbelüftung von Rundballen

Eine Ballenbelüftung ist allgemein nur bei einem Trockenmassegehalt über 70% (zumindest 65%) empfehlenswert. Speziell druckstabil ausgelegte Ventilatoren mit einem maximalen Druck von 1.500 Pa sind erforderlich. Ein neues Rundballen-Trocknungssystem, bei dem die Ballen aus der Mitte belüftet werden steht noch in Erprobung.

Warmbelüftung mit Heizanlagen

Die Luftanwärmung durch einen ölbefeuerten Warmluftofen oder eine Biomasseheizung ermöglicht die Trocknung während der Nacht (wichtig gleich nach dem Einfahren von Feuchtheu!) und bei folgendem Schlechtwetter. So mindert sich der beschriebene "Wasserdeckel" schnell. Es können nach der ersten Nacht wieder größere Heu-Chargen aufgebracht werden. Dabei sind allerdings beträchtliche Heizleistungen notwendig: Zur Erwärmung von 1 Kubikmeter

Luft um 1 Grad ist eine Energie von rund 1,2 kJ = 0,33 Wh (Wattstunden) notwendig. Je 1 m³/s Luftförderleistung und 10 Grad Anwärmung beträgt die notwendige Heizleistung rund 12 kW. Bei 20 m³/s und einer üblichen Anwärmung um 7 Grad ergeben sich z.B. etwa 170 kW Heizleistung!

Die Nutzung einer Biomasseheizung ist grundsätzlich interessant. Dabei wird die Wärme über handelsübliche Wärmetauscher an die Trocknungsluft übergeben. Die Heizleistung für zwei 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 Stromagregate ideal zur Luftanwärmung genutzt werden, wenn die Distanz von Anlage und Heustock überbrückbar ist.

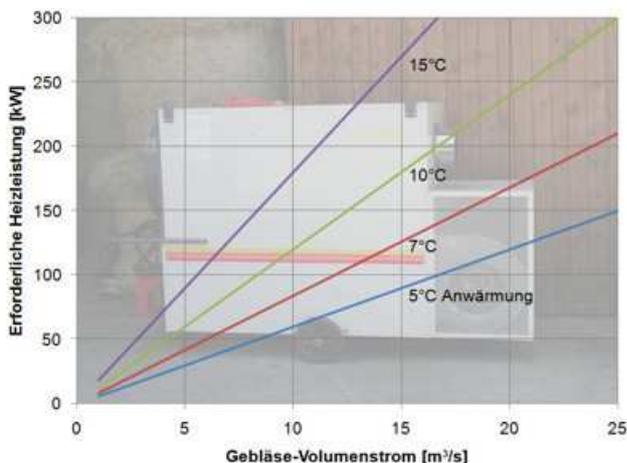


Bild 14: Erforderliche Heizleistung

In der Praxis wird zur Begrenzung der Heizölkosten ein Öl-Warmluftofen nur zugeschaltet, wenn die Trocknungsfähigkeit der Außenluft nicht ausreicht. Auch werden teilweise Zweistufenbrenner verwendet, um die volle Heizleistung nur abzurufen, wenn man eine hohe Trocknungsleistung braucht. Somit kann man - wie bei der später beschriebenen Entfeuchter-Wärmepumpe - von einer reduzierten Zuschaltung des Öl-Warmluftofens ausgehen. Praxisnah 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 wärmedämmend werden, um die warme Trocknungsluft nicht gleich wieder zu kühlen. Öl-Warmluftöfen werden außerhalb der Landwirtschaft zur Hallenheizung verwendet, daher stehen im Bedarfsfall oft Mietgeräte zur Verfügung. Das teuerste Heu ist verdorbenes Heu!

Wegen der veränderten Energiepreisrelationen und der Fortschritte in der Handhabung ist die Wärmepumpe zur Alternative des Öl-Warmluftofen geworden. Entsprechend dimensionierte Luftentfeuchter-Wärmepumpen sichern die notwendige Schlagkraft der Heubelüftung auch in größeren Betrieben. Kombinationen mit der nachfolgend beschriebenen Nutzung der Solarenergie sind machbar.

Während bei der Kaltbelüftung in der Nacht - trotz des unverzichtbaren Belüftens - meist nichts trocknet, hat

man mit einem optimal dimensionierten Entfeuchter oder Warmluftofen einen erheblichen Trocknungserfolg. Wird das Feuchtheu mit 60% TM eingebracht, so kann bis zum nächsten Tag bereits ein Viertel des herauszutrocknenden Wasser entfernt sein, bei Feuchtheu mit 65% TM sogar bis zu ein Drittel davon. Auch wenn dem Einfuhrtag eine Regenzeit folgt, werden Heizofen- und Entfeuchterbetriebe mit der Trocknung fertig, bevor es zu Schimmelbildung und Verderb kommt. Viele Heumilchbetriebe können auf eine derartige Sicherung des Trocknungserfolgs und die damit einhergehende erhöhte Schlagkraft nicht verzichten.

Warmbelüftung mit Sonnenkollektoren

Zur Steigerung der Trocknungsleistung von Heubelüftungsanlagen eignen sich einfache, ins Dach integrierte Sonnenkollektoren. Sie nutzen das während den Sommermonaten reichlich vorhandene Energieangebot der Sonne und kommen ohne wesentliche zusätzliche Fremdenergie aus. Da für die Trocknung von Heu nur Temperaturdifferenzen zur Außenluft bis 10 °C notwendig sind, ist eine einfache, kostengünstige Bauweise der Luftkollektoren möglich und die Kollektoren erreichen trotzdem Wirkungsgrade zwischen 30 bis 50% für dunkle und bis über 60% für transparente Abdeckungen. Bei Blechdächern liegt der typische Wirkungsgrad um 50%, bei Faserzement-Wellplatten um gut 40% und bei Ziegel-Eindeckung bei rund 35%.

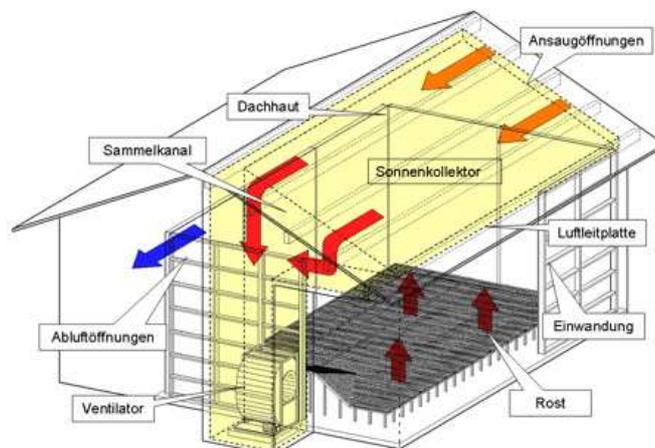


Bild 15: Heubelüftungsanlage mit ins Dach integriertem Sonnenkollektor.

Sonnenkollektoren für die Heubelüftung sind meist ein Bestandteil des Scheunendaches. Es ist somit von Vorteil, wenn bereits bei der Planung des Gebäudes die notwendigen Überlegungen zur Luftführung und zur Dimensionierung des Sonnenkollektors angestellt werden.

Bei der Planung sind vorerst die Rahmenbedingungen zu klären. Die für den Sonnenkollektor nutzbare Fläche sollte erfahrungsgemäß rund der doppelten Heustockfläche entsprechen. Einerseits ist dies Bedingung, um eine ausreichende Temperaturerhöhung der Trocknungsluft zu erreichen, andererseits benötigen die Kollektorkanäle genügend Querschnitt, was bei knappen Flächen kritisch wird. Die Leistung eines Sonnenkollektors hängt stark vom Dachmaterial und

von der Luftströmung im Kollektor ab, sowie von der Neigung der Dachflächen und ihrer Ausrichtung zur Sonne.

Exposition (Abweichung von Süden) 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

Ausnutzungsgrad der Sonneneinstrahlung in Abhängigkeit von Dachneigung und Südabweichung

Die beste Wirkung während der Dürrfütterernteperiode erreicht ein nach Süden ausgerichtetes Dach mit einer Neigung von 20 Grad. Auch Ost- oder Westflanken können jedoch bei derselben Neigung rund 90% und Nordflanken rund 75% der Leistung einer Südausrichtung ergeben. Steilere Dächer sind bei großer Abweichung von Süd wesentlich schlechter. Dies zeigt aber, dass für Sonnenkollektoren durchaus auch nicht ganz optimal ausgerichtete Flächen in Betracht gezogen werden können.

Bei der Dachkonstruktion lassen sich grob zwei Bauweisen unterscheiden: Das Pfettendach mit horizontal verlaufenden Balken, auf die direkt das Abdeckmaterial verlegt und das Sparrendach mit vom First zur Traufe verlaufenden Sparren, auf die eine horizontale Lattung zur Aufnahme des Abdeckmaterials montiert wird. Diese Bauweisen haben einen großen Einfluss auf die Luftströmung im Kollektor und auf die Länge der Kollektorkanäle. In aller Regel erfolgt die Montage der Luftleitplatte unter, oder in optimalem Abstand zur Abdeckung, zwischen die Balken (Sparren oder Pfetten). Abdeckung, Balken und Luftleitplatte bilden so die Kollektorkanäle.

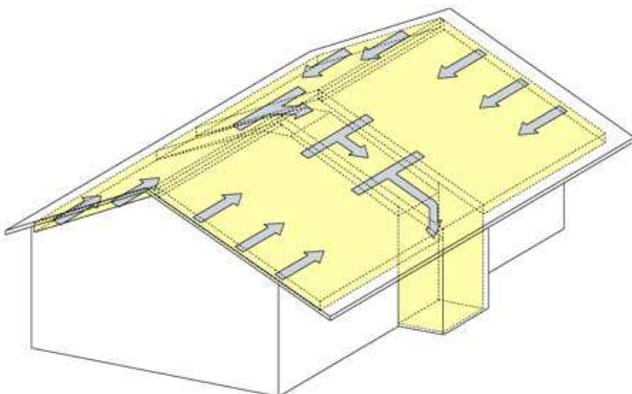


Bild. 16: Sonnenkollektor im Pfettendach mit vier Kollektorfeldern auf zwei Dachflanken und einem mittigen Sammelkanal

Beim Sparrendach wird der Luftstrom durch die Lattung etwas gebremst, dafür sind die Kollektorkanäle in der Regel weniger lang. Als Abdeckungsmaterial

stehen Wellfaserplatten sowie Well- und Profilleche im Vordergrund. Mit durchsichtigen Materialien lassen sich zwar höhere Wirkungsgrade erreichen, sie sind aber aus Gründen des Brandschutzes und des Erscheinungsbildes selten einsetzbar.

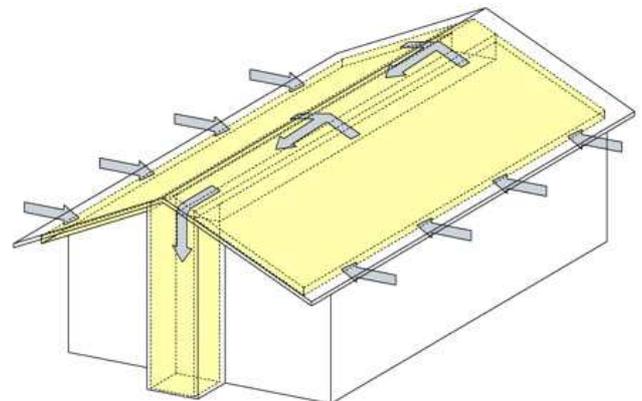


Abb. 17: Skizze einer Sonnekollektoranlage im Sparrendach mit zwei Kollektorfeldern

Für ein optimales Funktionieren des Sonnenkollektors ist es wichtig, eine genügend hohe Geschwindigkeit (4 bis 6 m/s) in den Kollektorkanälen zu erreichen, damit die Luft verwirbelt und die Energie an der Unterseite der Dacheindeckung abgeholt wird. Gleichzeitig sollte der Druckverlust nicht zu hoch ausfallen. In langjähriger Praxis hat sich ein Drucklimit von rund 100 Pa (= 1 mbar oder 10 mm Wassersäule) etabliert.

Der Sammelkanal übernimmt die Luft aus den Kollektorkanälen und leitet sie zum Ventilator weiter. Im Sammelkanal ist der Querschnitt so zu wählen, dass die Luftgeschwindigkeit in der Regel 4 m/s nicht überschreitet (Vermeidung von unnötigem Druckverlust). Die Latten welche die Spanplatten des Sammelkanals tragen sind in der Richtung der Luftströmung zu montieren.

Wenn möglich ist bei der Einteilung der Kollektorfelder auf gleiche Längen zu achten. Entscheidend ist beispielsweise bei Pfettendächern mit Leimbändern, welches Binderfeld als Sammelkanal dienen soll. Daraus ist ersichtlich, dass auch die Planung der Belüftungsanlage und die Anordnung des Ventilatorstandorts eine große Rolle spielt. Im Gegenzug ist es Dank dem Einbau eines Sonnenkollektors auch möglich, den Ventilator in einem Bereich der Scheune zu platzieren, der für eine direkte Ansaugung der Luft von außen nicht geeignet ist.

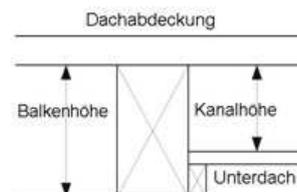


Bild 18: Die Kollektorkanäle bestehen in der Regel aus den Balken (Pfetten oder Sparren), der Dachabdeckung und der Luftleitplatte (Unterdach). Die optimale Kanalhöhe wird ausgehend von der maximalen Balkenhöhe berechnet.

Weisen Sonnenkollektoren unterschiedlich lange oder breite Felder auf, kann eine ungleichmäßige Durch-

strömung und somit auch unterschiedliche Temperaturerhöhungen durch unterschiedliche Abstände zwischen der Luftleitplatte und der Abdeckung verhindert werden. Jedes Feld erhält somit einen individuellen Abstand (Kanalhöhe). Diese Maßnahme lässt sich allerdings in der Praxis nur mit guter Information (zum Beispiel der beteiligten Handwerker) und entsprechendem Nachdruck durchsetzen.

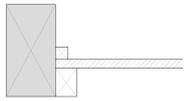
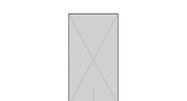
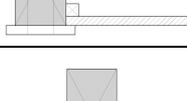
	Starke Balken, kleine notwendige Kanalhöhe. Spanplatte auf seitlich angeschlagener Latte. Einlegen von oben.
	Kanalhöhe entspricht der notwendigen Balkenhöhe. Spanplatte von unten bündig mit Brett befestigt
	Kanalhöhe nur wenig kleiner als Balkenhöhe. Vormontiertes Brett, einlegen von oben.
	Kanalhöhe entspricht der notwendigen Balkenhöhe. Luftleitplane gespannt von unten befestigt, vor allem in Altbauten mit Sparrendächern.

Bild 19: Montagearten für die Luftleitplatte. Für das Einlegen von oben sind die oberen zwei Varianten geeignet.

Für die Montage der Luftleitplatte haben sich die in Bild 19 aufgeführten Möglichkeiten bewährt. Besonders bei Neuanlagen ist eine Montage von oben vor dem Eindecken von Vorteil. Durchlaufend angeordnete Pfetten (Gerberpfetten) behindern dabei die Montage von oben und den Luftfluss weniger als versetzt angeordnete Koppelpfetten. Ein engmaschiges Netz beim Lufteinlass am Ortgang verhindert das Eindringen von Vögeln.

Damit bei einer solaren Heubelüftungsanlage alle Elemente gut zusammenspielen, ist das Berechnen verschiedener Varianten von Bedeutung. Dazu bietet die Forschungsanstalt Agroscope Reckenholz-Tänikon ART (Schweiz) die Software „ART-SOKO Dimensionierung von Sonnenkollektoren für die Heubelüftung“ an. Diese unterstützt die Planung von Sonnenkollektoren für die Heubelüftung. Für die Berechnung sind Angaben zum Kollektortyp (Abdeckmaterial und Strömungsrichtung) notwendig.

Kombination Solar-Luftkollektor mit Fotovoltaikpaneelen (Hybridkollektoren)

Solarzellen zur Stromerzeugung bilden mit Luftkollektoren eine ideale Kombination. Das ist einerseits der Fall, weil Solarzellen bei niedrigen Temperaturen bessere Wirkungsgrade haben. Ebenso kann auch gegenüber einem herkömmlichen Luftkollektor ohne transparente Abdeckung dessen Wirkungsgrad erhöht werden.

Fotovoltaikanlagen setzen lediglich 10 bis 15% der Sonnenstrahlung in Elektrizität um. Der Rest der Sonnenenergie wird als Wärme an die Umgebung abgegeben. Indem die Paneele im Dach integriert

werden, können sie ähnlich wie konventionelle Dachabdeckungen als thermische Sonnenkollektoren für die Heubelüftung genutzt werden. Während der Heubelüftungszeit werden außerdem die Paneele gekühlt, wodurch ihr elektrischer Wirkungsgrad zunimmt.

Messungen an der Forschungsanstalt ART in Tänikon zeigen, dass bei auf dem Dach montierten Paneelen die Temperatur der Solarzellen um bis zu 30 °C über der Umgebungstemperatur ansteigt, obwohl sie vom Wind unten und oben frei angeströmt werden. Dies ist vor allem bei niedriger Windgeschwindigkeit (unter 2 m/s) der Fall. Bei Paneelen die im Dach integriert sind, kann die Temperatur der Solarzellen um bis zu 10 °C gesenkt werden, wenn zwischen Paneelen und Unterdach ein Luftstrom erzeugt wird. Pro Grad Temperatursenkung steigt die Stromproduktion um 0,3 bis 0,5%.

Mit zunehmender Luftgeschwindigkeit im Kanal nimmt der Wärmeübergangskoeffizient zwischen der Unterseite der Paneele und der vorbeiströmenden Luft zu. Hierdurch wird mehr Wärme von der Luft aufgenommen. Das gleiche gilt jedoch auch für die obere Seite der Paneele. Je höher die Windgeschwindigkeit, desto höher ist die Wärmeabgabe an die Außenluft und desto weniger Wärme steht für die Nutzung zur Verfügung. Folglich sollte man eine möglichst große Differenz zwischen Luftgeschwindigkeit im Kanal und Windgeschwindigkeit draußen anstreben. Bei nahezu gleicher Luft- (2,7 m/s) und Windgeschwindigkeit (2,79 m/s) betrug der thermische Wirkungsgrad der ART-Versuchsanlage am 10.07.08 etwa 44% (Bild 20).

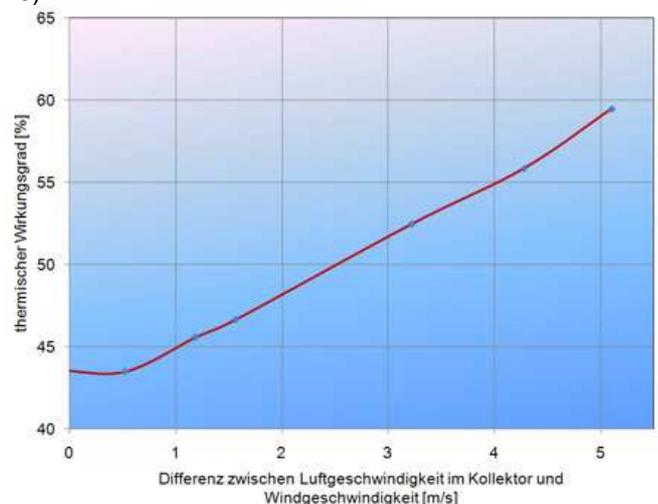


Bild 20: Die Differenz zwischen der Luftgeschwindigkeit im Kollektorkanal und der Windgeschwindigkeit sollte im Hinblick auf einen hohen thermischen Wirkungsgrad möglichst groß sein (Versuchsergebnisse der ART)

Für eine Luftgeschwindigkeit im Kanal von 6,88 m/s bei gleichzeitiger Windgeschwindigkeit von 1,78 m/s (Differenz 5,1 m/s) stieg der thermische Wirkungsgrad auf nahezu 60%. Das heißt, dass während der Heubelüftung bis zu sechs mal mehr Wärme als Elektrizität produziert werden kann. An sonnigen Tagen kann den Solarzellen bis zu 4 kWh Wärme pro m² entzogen werden.

Es stellt sich die Frage, ob es sich lohnt, zur Kühlung der Solarzellen den Heuventilator auch außerhalb der

Heutrocknungszeit laufen zu lassen. Wirtschaftlich kann dies nur sein, wenn die Mehrproduktion an Strom durch die Solarzellen größer als die Energieaufnahme durch den Ventilator ist. Theoretische Berechnungen zeigen, dass eine mechanische Lüftung nur dann sinnvoll ist, wenn es nicht gelingt, durch Schwerkraftlüftung (Sparrendach), oder Windeinwirkung (Pfettendach) eine ausreichende Kühlung der Paneele zu bewerkstelligen. Da außerhalb der Heutrocknungszeit die Luft aus dem Hybridkollektor nicht durch das Heu gedrückt werden muss, beschränkt sich die notwendige Druckerhöhung für den Ventilator auf weniger als 100 Pa. Bei diesem relativ geringen Gegendruck ist es wirtschaftlicher, Axialventilatoren (Stalllüfter) einzusetzen, die energieeffizienter große Luftmengen bei geringem Druck fördern können. Die wirtschaftlichste Lüfrate für die Kühlung der Solarzellen muss für jede Solaranlage gesondert berechnet werden. Als Richtwerte für die Kollektorkühlung kann man annehmen: Lüfrate pro m² Fotovoltaikpaneele 50 bis 100 m³/h, Luftgeschwindigkeit im Kollektorkanal 1,0 bis 2 m/s.

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 damit etwas wärmer, als die dem Verdampfer zugeführte Luft. Entscheidend ist die Verringerung der relativen und auch der absoluten Luftfeuchtigkeit. Damit ist wie durch Luftanwärmung eine wirkungsvolle Trocknung möglich. Durch den Einbau eines Zwischenkühlers nach dem Verdampfer wird bei einigen Entfeuchtern deren Kondensationsleistung verbessert.

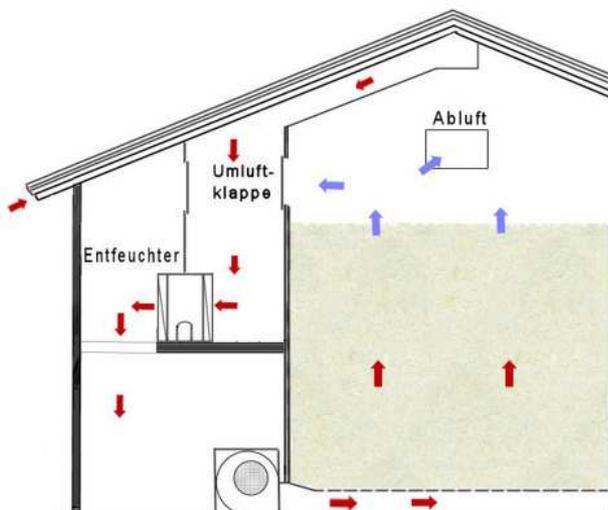


Bild 21: Anlagenschema mit Luftentfeuchter und Dachabsaugung (Variante Entfeuchtung im Hauptstrom)

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, wie vielmal 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 5.

Für den Einsatz zur Heutrocknung sind allerdings unterschiedliche Betriebsarten möglich:

Wenn die ganze Trocknungsluft den Entfeuchter durchströmt (**Entfeuchter im Hauptstrom**), dann ist eine Abstimmung auf den Luftdurchsatz entscheidend für die Funktion. Bei zu großem Luftdurchsatz reicht unter Umständen die Kälteleistung des Aggregats nicht aus, um den Taupunkt zu unterschreiten. In diesem Fall wird nicht mehr entfeuchtet, sondern lediglich Wärme erzeugt. Bei einer Luftgeschwindigkeit erheblich über 3 m/s in den Wärmetauschern besteht auch die Gefahr, dass am Verdampfer abgeschiedenes Wasser vom Luftstrom mitgerissen wird. Bei geringer Nennleistung des Entfeuchters im Verhältnis zur Ventilator-Förderleistung kann man die Funktion durch eine Luftzufuhr zwischen Verdampfer und Kondensator (Bypassluft) sicherstellen. Damit kann sogar Energie eingespart werden, weil die „Temperaturspreizung“ zwischen Verdampfer und Kondensator abnimmt. Diese bestimmt nämlich die Leistungszahl. Bei Bypassluftführung ist ein Verhältnis der Nennleistung von Entfeuchter zu Ventilator ab etwa 0,5 : 1 möglich, sonst liegt dieses Verhältnis bei etwa 1 : 1 bis 2 : 1.

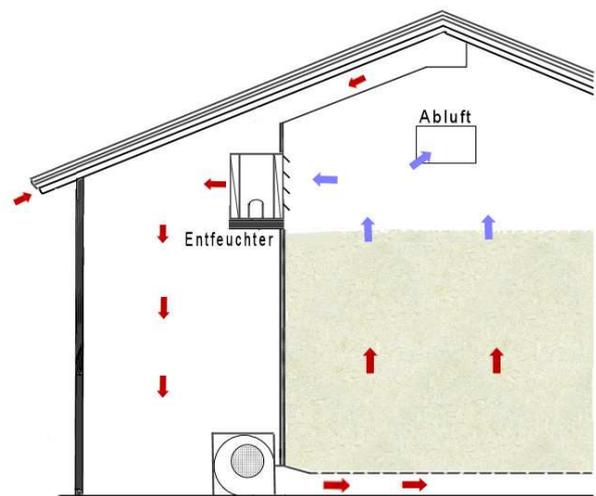


Bild 21a: Anlagenschema mit Luftentfeuchter im Nebenstrom und Dachabsaugung

Wird dagegen der **Entfeuchter im Nebenstrom** betrieben, dann strömt nur ein Teil der Trocknungsluft durch dessen Wärmetauscher. Ein Hilfslüfter bestimmt den Durchsatz des Entfeuchters. In diesem Fall arbeitet der Entfeuchter unabhängig, für seine Funktion ist also eine Leistungsabstimmung nicht entscheidend. Mit einer Regelung der Hilfslüfterdrehzahl kann der Entfeuchter im optimalen Bereich arbeiten.



Bild 22: Umluftklappe

Im **Frischlufbetrieb** kann bei Außentemperaturen unter 8 bis 10 °C eine Vereisung des Verdampfers erfolgen. Das führt meist automatisch zum kurzfristigen Abschalten oder Abtauen des Aggregats. Der Vorteil dieser Betriebsart ist, dass für die Trocknung nicht allein die Kondensationsleistung des Entfeuchters maßgeblich ist, weil mit der Abluft ebenfalls Feuchtigkeit abgeführt wird.

Führt man die Trocknungsluft im geschlossenen Kreislauf (**Umluftbetrieb**), so steigt deren Temperatur durch die Heizwirkung des Entfeuchters bis zu einem Gleichgewichtszustand (z.B. auch über 40 °C) an. Auf diese Weise wird eine Verdampfervereisung vermieden. Der Entfeuchter arbeitet unter günstigen Bedingungen bei hoher relativer Luftfeuchte, ebenso wirkt sich die eintretende Temperaturerhöhung vorteilhaft auf den Trocknungseffekt aus. Die Trocknungsleistung wird allerdings alleine von der Kondensationsleistung des Entfeuchters bestimmt, die erforderliche Entfeuchterleistung wird daher meist höher angesetzt, als beim Frischluftbetrieb.

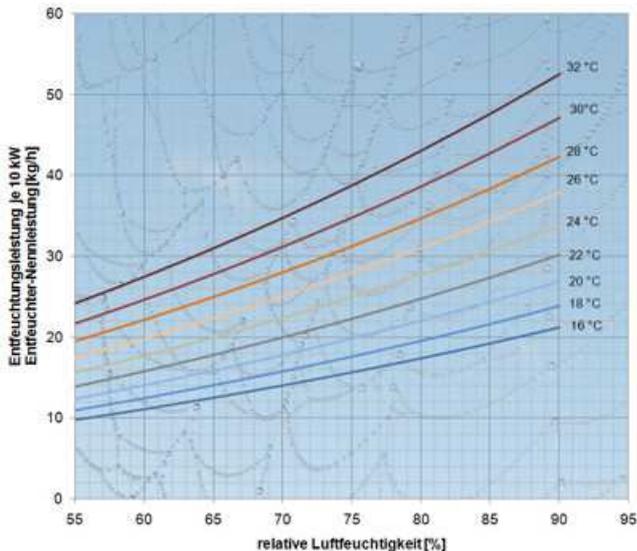


Bild 23: Die Entfeuchterleistung ist stark von der Luftfeuchtigkeit und der Temperatur abhängig! Unterhalb von 50 % rel. Luftfeuchtigkeit ist die Wirkung gering.

Ein Kompromiss zwischen den beiden Systemen, also ein **Mischluftbetrieb**, lässt sich durch eine Umschaltklappe zwischen Heubergerraum und Lüftersaugseite erreichen. Das ermöglicht bei Schlechtwetter einen teilweise geschlossenen Betrieb. Damit lassen sich Vorteile beider Systeme kombinieren und vor allem eine Verdampfervereisung vermeiden. Ein

reiner Frischluftbetrieb ist teilweise erst ab 20 bis 25°C Außentemperatur zweckmäßig.

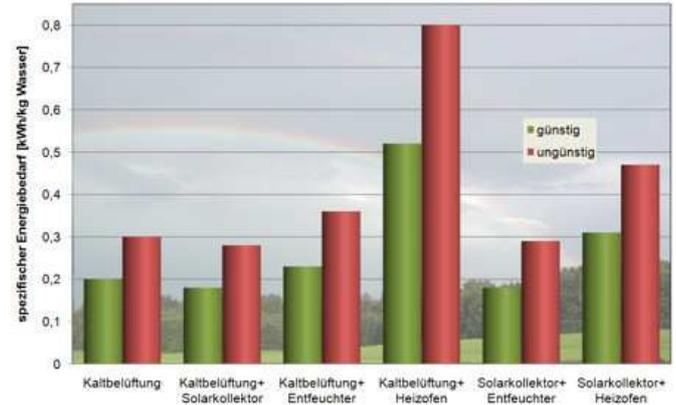


Bild 24: Spezifischer Energiebedarf verschiedener Verfahren

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 50 bis 55% relativer Luftfeuchtigkeit schaltet man den Entfeuchter aus Kostengründen besser ab. Dies wird teilweise automatisch durch einen Hygrostaten erreicht. Bei niedriger relativer Luftfeuchte sinkt naturgemäß die Wirksamkeit eines Luftentfeuchters. Die Entfeuchungsleistung ist in erster Linie von der absoluten Luftfeuchtigkeit abhängig, daneben auch von der Temperatur.

Verfahren	Energiebedarf [kWh/kg Wasser]	Energiebedarf [kWh/t Heu]
Kaltbelüftung	0,25	110 (90 bis 130)
Kaltbel.+ Solarkollektor	0,21	90 (75 bis 120)
Kaltbel.+Entfeuchter	0,29	125 (100 bis 155)
Solarkoll.+ Entfeuchter	0,24	105 (80 bis 125)
Kaltbel.+ Heizofen	0,67	290 (225 bis 340)
Solarkoll.+ Heizofen	0,40	175 (135 bis 205)

Bei der obenstehenden Tabelle ist der Energiebedarf je t Heu auf eine Trocknung von 60% auf 87% TM bezogen! Bei Mischverfahren mit Entfeuchter oder Heizofen wurde ein mittlerer Anteil von etwa 40% Zuschaltung berechnet. Bei diesem geringen Anteil beträgt im Mischbetrieb von Kaltbelüftung mit Öfen der Heizölverbrauch etwa 23 l/t Heu, der Energiebedarf des Ventilators verringert sich um etwa 17% gegenüber einer Kaltbelüftung. Ein höherer Laufzeitanteil, aber auch ungünstige Bedingungen können zu einer Verdoppelung der Richtwerte führen!

Kosten und Nutzen vergleichen

Das beste Konservierungsverfahren lohnt sich nicht, wenn es bei schlechtem Futter eingesetzt wird. Umgekehrt lassen sich durch eine Futterernte vor dem Einsetzen der massiven Bröckelverluste über 70% Trockenmassegehalt erstklassige Heuqualitäten erzielen und vor allem das Wetterrisiko weit herabsetzen. „Einsonniges“ Heu, also Heu mit nur einem Tag Vortrocknungszeit am Boden wird möglich.

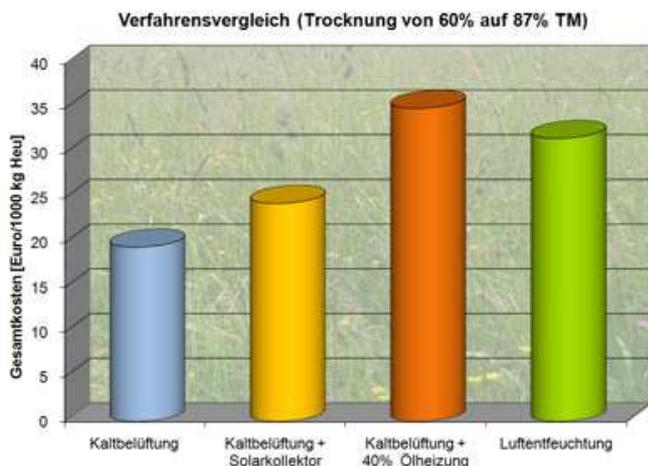


Bild 25: Gesamtkosten je 1000 kg Heu bei Trocknung von 60% auf 87% TM (Preisbasis Jänner 2009, Stromtarif 13 Cent/kWh, Ölpreis 0,6 €/l, ohne Kosten der Heuwerbung und ohne Gebäudekosten)

Durch die Vortrocknung am Boden kann allerdings ganz wesentlich Trocknungsenergie gespart werden. Luftanwärmung und Luftentfeuchtung sind dann am Platz, wenn die Feuchtigkeit der Außenluft keine Trocknung ermöglicht. Vor allem beim Einsatz eines Luftentfeuchters ist aber der hohe Fixkostenanteil aufgrund des Anschaffungspreises zu beachten, auch wenn die Energiekosten geringer sind, als bei herkömmlicher Warmbelüftung. Zu bedenken ist auch, dass der Energiepreis je kWh elektrischer Energie im Vergleich zu Heizöl oder Hackgut meist wesentlich höher ist. In Österreich bieten regionale Elektrizitätsversorger während der Sommermonate jedoch spezielle niedrige Stromtarife für die Heutrocknung an.

Planungsdaten zur Heubelüftung

Allgemeine Planungsdaten:

- erforderliche belüftete Fläche grob abschätzen mit 25 bis 30 m² je ha Chargen-Erntefläche
- Ventilator-Gesamtdruck, abhängig vom spezifischen Volumenstrom und von der Heustockhöhe, Beschickungsart, Erntegut (grobe Faustzahl 100 bis 240 Pa/m Heustockhöhe)
- spezifischer Volumenstrom (z.B. 0,11 m³/s*m² belüftete Fläche, gerechnet beim Ventilator-Gesamtdruck); 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.
- aus den obigen Werten ergibt sich der gesamte Ventilator-Volumenstrom (typisch 11 m³/s pro 100 m² belüftete Fläche)
- Ventilator-Antriebsleistung errechnet sich aus Druck und Volumenstrom (Faustzahl 11 kW je 100 m² belüftete Fläche)
- Heizleistung bei Warmbelüftung 12,3 kW je m³/s Ventilator-Volumenstrom und 10°C Anwärmung

Faustzahlen für Trocknungsanlagen mit Luftentfeuchter:

- 25 bis 30 m² belüftete Fläche je ha Chargen-Erntefläche
- ab 2,4 kW Wärmepumpen-Nennleistung je ha Chargen-Erntefläche, Verhältnis Wärmepumpen-Nennleistung/Ventilatorleistung bei Hauptstrombetrieb ab 1 :1, sonst bei Nebenstrombetrieb oder mit Bypassluft ab 0,5:1.
- Ventilator-Volumenstrom 10.000 m³/h (= 2,77 m³/s) je ha Chargen-Erntefläche oder Lüfter-Nennleistung ca. 3 kW je ha Chargen-Ernteflächemaximale Entfeuchtungsleistung/Stunde etwa 3-fache und Heizleistung 4 bis 5-fache Kompressorleistung

Faustzahlen für Solartrocknung:

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

Planungsdaten für Ballentrocknung:

- spezifischer Volumenstrom im Ballen 0,25 bis 0,3 m³/s*m² Ballen-Stirnfläche
- je nach Ballendurchmesser 0,4 bis 0,6 m³/h Luft je Ballen
- maximaler Ventilatorruck mindestens 1.300 bis 1500 Pa
- Ventilator-Nennleistung ca. 0,4 bis 0,7 kW/Ballen
- Heizleistung ca. 3,3 bis 6,3 kW/Ballen je 10°C Anwärmung
- Durchmesser der Einströmöffnung 0,8-facher Ballendurchmesser (= 90 bis 120 cm), Dichtring am Boden (oder auch am Deckel) etwa 10 bis 15 cm hoch.

Wichtige Berechnungsformeln:

Gutsfeuchtigkeit in % Nassbasis (f): $f = 100 \cdot W/F$ W... Wassermasse [kg], F ... Feuchtgutmasse [kg]

Gutsfeuchtigkeit in % Trockenbasis (x): $x = 100 \cdot W/TS$ TS... Trockensubstanz [kg]

Umrechnung in Feuchtigkeit (Trockenbasis): $x = 100 \cdot f / (100 - f)$

Umrechnung in Feuchtigkeit (Nassbasis): $f = 100 \cdot x / (100 + x)$

Abzutrocknende Wassermasse in kg (W): $W = G_a \cdot (a - e) / (100 - e)$ oder $W = G_e \cdot (a - e) / (100 - a)$

dabei ist: G_a ...Anfangsgewicht [kg], G_e ...Endgewicht [kg]; a ...Anfangsfeuchtigkeit [%]; e ...Endfeuchtigkeit [%]

Trockensubstanzgehalt (ts) in %: $ts = 100 - f$

Druckumrechnung: 1 mm Wassersäule (WS) = 9,81 Pa (rund 10 Pa)

1 mbar = 100 Pa (= 1 hPa) 1 bar = 100.000 Pa

Luftgeschwindigkeit v in m/s aus dem dynamischen Druck p_{dyn} in mm WS: $v = 4 \cdot \sqrt{p_{dyn}}$

Volumenstrom Q in m^3/s : $Q = A \cdot v$ oder $v = Q/A$ A... Querschnittsfläche des Luftkanals [m^2]

Ventilatorleistung P in kW: $P = p \cdot Q / \eta$ p... Gesamtdruck [Pa] η ... Wirkungsgrad (ca. 0,55 bis 0,75)

Spezifische Wärmekapazität (c): für Luft bei 20 °C und mittl. Höhenlage: $1,18 \text{ kJ}/m^3 \cdot K$ (= $0,33 \text{ Wh}/m^3 \cdot K$)

für Wasser: $1,18 \text{ kJ}/kg \cdot K$ (= $1,16 \text{ Wh}/kg \cdot K$)

Heizleistung Ph in kW:

$Ph = Q \cdot c \cdot t / \eta_h$ c... spezifische Wärmekapazität [$\text{kJ}/kg \cdot K$]

t...Anwärmung [$^{\circ}C$]

η_h ...Heizungswirkungsgrad (0,75 bis 0,9)

10 Regeln für die Heubelüftung:

- Belüftete Fläche auf Erntefläche/Charge abstimmen (z.B. 25 bis 30 m² je ha). Je Charge soll die Schichthöhe bei Kaltbelüftung 1,5 m nicht übersteigen, ansonsten 2,5 m.
- Anlage gleichmäßig und locker mit (möglichst vorgeschrittenem) Halbheu befüllen. Sofort bereits beim Beschicken der Anlage Lüfter einschalten, um ein Zusammensacken des Heus zu vermeiden! Die ersten 24 Stunden durchgehend belüften.
- Bei Kaltbelüftung nach den ersten 24 Stunden den Ventilator bei sehr hoher Luftfeuchte zwischendurch abschalten, jedoch bei Heuerwärmung über 35°C aus Sicherheitsgründen laufen lassen. Luftentfeuchter je nach Trocknungszustand unterhalb 50% relativer Luftfeuchte eventuell abschalten.
- Anlage für Trocknungszeit von höchstens 4 Tagen oder 60 bis 75 Stunden auslegen.
- Volumenstrom des Ventilators auf die belüftete Fläche abstimmen (z.B. 0,11 m³/s*m²)
- Druck des Ventilators je nach Anfangsfeuchte des Heus, Heustockhöhe und spezifischen Volumenstrom wählen. Faustregel: 100 bis 240 Pa je m Heustockhöhe.
- Sehr hohe Heustöcke vermeiden. Sie bringen überproportional große Strömungsverluste, ebenso Abwinkelungen in der Luftführung. Heustöcke dicht umwandern. Eventuell die Trocknungsanlage nach Fertig Trocknung entleeren und neu beschicken, um die Kosten für den Ventilatorantrieb zu verringern.
- Für ausreichend große Abluftöffnungen sorgen, um einen Feuchtigkeitskreislauf zu vermeiden (Ausnahme: Umluft-Entfeuchterbetrieb)
- Zur Vermeidung von Schimmelbildung (Heu staubt beim Entnehmen!) unbedingt bis 87% Trockenmasse trocknen.
- Lange Vortrocknungszeit am Boden verringert die Trocknungskosten beträchtlich, erhöht aber das Wetterrisiko. Wegen Bröckelverluste nicht über 70% Trockenmassegehalt vortrocknen!

Die Mitarbeiter:

Dipl. HLFL-Ing. Josef Galler, Landwirtschaftskammer Salzburg
Schwarzstraße 19, A- 5024 Salzburg,
Mail: josef.galler@lk-salzburg.at, Tel. +43 (0)662 870571 242

Dipl. Agro Ing. Franz Nydegger, Eidgenössisches Volkswirtschaftsdepartement EVD,
Forschungsanstalt Agroscope Reckenholz-Tänikon ART
Tänikon, CH-8356 Ettenhausen
Mail <mailto:franz.nydegger@art.admin.ch>, Tel. +41 (0)52 368 33 16

Dipl. Ing. Alfred Pöllinger, Höhere Bundeslehr- und Forschungsanstalt für Landwirtschaft
Raumberg-Gumpenstein, Raumberg 38, A-8952 Irdning
Mail: alfred.poellinger@raumberg-gumpenstein.at, Tel. +43 (0)3682 22451 375

Dipl. Ing. Ludo Van Caenegem, Eidgenössisches Volkswirtschaftsdepartement EVD,
Forschungsanstalt Agroscope Reckenholz-Tänikon ART
Tänikon, CH-8356 Ettenhausen
Mail: <mailto:ludo.vancaenegem@art.admin.ch>, Tel. +41 (0)52 368 32 82

Univ.-Prof. Dipl. Ing. Dr. Herbert Weingartmann, Universität für Bodenkultur,
Department für Nachhaltige Agrarsysteme, Institut für Landtechnik,
Peter Jordan-Straße 82, A-1190 Wien
Mail herbert.weingartmann@boku.ac.at, Tel.+43 (0)1 47654 3540

Prof. i.R. Dipl. Ing. Gotthard Wirleitner
Am Pfaffenbühel 8, A-5201 Seekirchen (Salzburg)
Mail: g.wirleitner@aon.at, Tel. +43 (0)6212 5702

Dr. Heinz Wittmann, für Bildungs- und Wissenszentrum für Viehhaltung und Grünlandwirtschaft,
Atzenberger Weg 99, D-88326 Aulendorf
Mail: poststelle@LVVG.bwl.de, Tel: +49 (0)7525 942 300

Bildquellenverzeichnis:

Bild 1 bis 11: Gotthard Wirleitner

Bild 12: Otfried Lengwenat

Bild 13,14: Gotthard Wirleitner

Bild 15 bis 19: Franz Nydegger (ART)

Bild 20: Ludo Van Caenegem (ART)

Bild 21 bis 25: Gotthard Wirleitner