

Richtlinien für Heubelüftungsanlagen

Eine fachgerechte Planung sichert den Erfolg und spart Kosten

November 2014

Autoren

Christian Aschauer, Universität für Bodenkultur Wien (A)
Susanne Jakschitz-Wild, Bayrische Landesanstalt für Landwirtschaft, Freising (D)
Matthias Kittl, Landwirtschaftskammer Salzburg (A)
Karl Neuhofer, ARGE Heumilch, Strasswalchen (A)
Franz Nydegger, Agroscope, Ettenhausen (CH)
Johannes Ostertag, Bayrische Landesanstalt für Landwirtschaft, Freising (D)
Alfred Pöllinger, Lehr- und Forschungszentrum Raumberg-Gumpenstein, Irdning (A)
Reinhard Resch, Lehr- und Forschungszentrum Raumberg-Gumpenstein, Irdning (A)
Stefan Thurner, Bayrische Landesanstalt für Landwirtschaft, Freising (D)
Gotthard Wirleitner, Seekirchen (A)



Foto: Franz Nydegger, Agroscope

Heubelüftungsanlage mit Photovoltaikpaneele: Die elektrische und thermische Nutzung der Sonnenenergie erlaubt eine klimaschonende Heutrocknung.

Heubelüftungsanlagen verringern Bröckel- und Atmungsverluste, schränken die Tätigkeit von Pilzen und Bakterien erheblich ein und reduzieren das Wetterrisiko gegenüber der Bodentrocknung wesentlich. Einfache Kaltbelüftungsanlagen können aber bei ungünstigem Wetter den für eine sichere Lagerung erforderlichen Trockenmassegehalt von 87–88 % nicht innerhalb nützlicher Frist erreichen. Für eine effizientere Trocknung wird daher vermehrt erwärmte und/oder entfeuchtete Luft eingesetzt. Je nach Zusammensetzung des Pflanzenbestandes und bei einem Erntezzeitpunkt im Stadium des Ähren-/Rispenschiebens der Leitgräser (z.B. Knaulgras) können damit Energiekonzentrationen im Bereich von 6 MJ Nettoenergie Laktation (NEL) pro Kilogramm Trockensubstanz

erreicht werden. Heu behält daher als hochwertiges Grundfutter seine Bedeutung, auch weil es nahezu keine sporenbildenden Bakterien enthält. Dies ist besonders für die Hartkäseerzeugung entscheidend.

Der Energieaufwand zur Heutrocknung kann mithilfe der Solarenergie und der 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. Interessant ist die Kombination von Photovoltaik mit thermischen Luftkollektoren. Eine gute Planung und Bedienung der Trocknungsanlage ist entscheidend für den Erfolg.



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Wirtschaft, Bildung und Forschung WBF
Agroscope

Bau

Dimensionierung von Boxenanlagen

Heubelüftungsanlagen bestehen aus mindestens einer rechteckigen Heubox mit dichtem Boden und Seitenwänden (Abb. 1). In dieser Box befindet sich ein flächig aufgebauter Rost, der das Heu trägt. Die entsprechenden Masse finden sich in Abbildung 3. Ein Ventilator bläst die Trocknungsluft unter den Rost, die Luft strömt durch das Heu, nimmt dabei Wasser auf und entweicht durch die Abluftöffnungen nach draussen.

Die Boxenfläche ist mit dem Futterbedarf und der Erntefläche abzustimmen. Nach einer groben Faustregel sollten je Grossvieheinheit $6\text{--}10\text{ m}^2$ oder je ha pro Trocknungscharge rund $14\text{--}24\text{ m}^2$ belüftete Fläche zur Verfügung stehen. Boxenböden und Wände aus Beton sollten isoliert werden (z.B. mit Spanplatten). Um eine erste Mindestbeschickungshöhe von $1\text{--}1,5\text{ m}$ zu erreichen, sollten Belüftungsboxen auch nicht zu gross dimensioniert werden. Boxenflächen von über $250\text{--}300\text{ m}^2$ Grösse sollten unterteilt werden, eine Ausnahme sind Grossanlagen mit mehreren grossen Stöcken. Optimal sind rechteckige Formen mit einem Verhältnis von Breite zu Länge von max. 1 zu 1,5. Verschiedene Einblasarten an den Seiten oder in den Ecken sind möglich (Abb. 2).

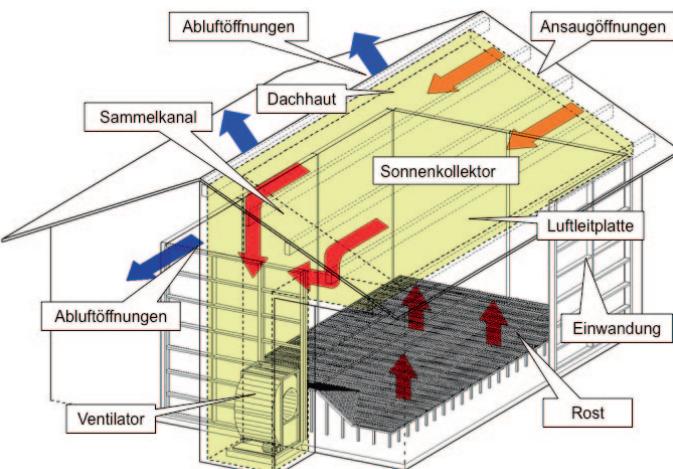


Abb. 1: Luftführung (Pfeile) in einer Heubelüftungsanlage mit im Dach integriertem Sonnenkollektor.

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 Druck mit der Luftgeschwindigkeit überproportional an, und es bilden sich leicht «Kamine», durch welche die Trocknungsluft ungenutzt abströmt. Ein Luftvolumenstrom von rund $0,11\text{ m}^3$ je Quadratmeter Fläche und Sekunde bei einem Spielraum von $0,07\text{--}0,14\text{ m}^3/\text{m}^2$ und Sekunde (ca. $240\text{--}500\text{ m}^3/\text{m}^2$ und Stunde) gilt als Stand der Technik (Baumgartner 1991). Der Richtwert des Volumenstromes soll zumindest bei halber Heustockhöhe erreicht werden. Bei voller Stockhöhe nimmt man eine Verringerung des Luftdurchsatzes auf $0,07\text{ m}^3/\text{s}$ und m^2 in Kauf. Auch im Entfeuchter-Umluftbetrieb ist ein Luftdurchsatz unterhalb von $0,11\text{ m}^3/\text{s}$ und m^2 sinnvoll. Durchgehende

Höhenmarken an der Boxenwand zeigen das Ernevolumen an, und es lassen sich auch ungleiche Beschickungshöhen besser von der Kranbühne aus erkennen.

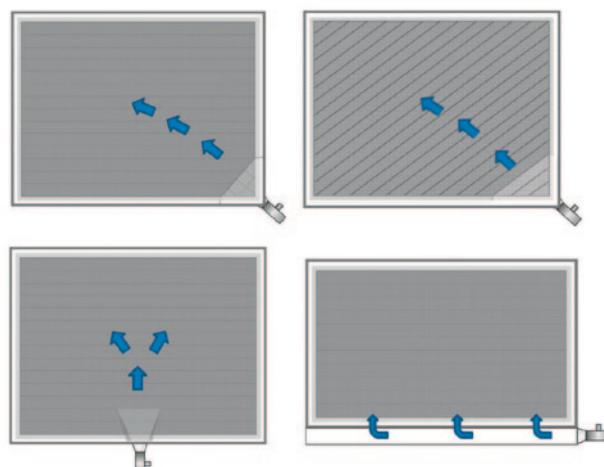


Abb. 2: Anordnung des Einblaskanals, oben eckseitig, jedoch mit unterschiedlicher Rostträgeranordnung, unten mittig bzw. mit seitlichem Einblaskanal.

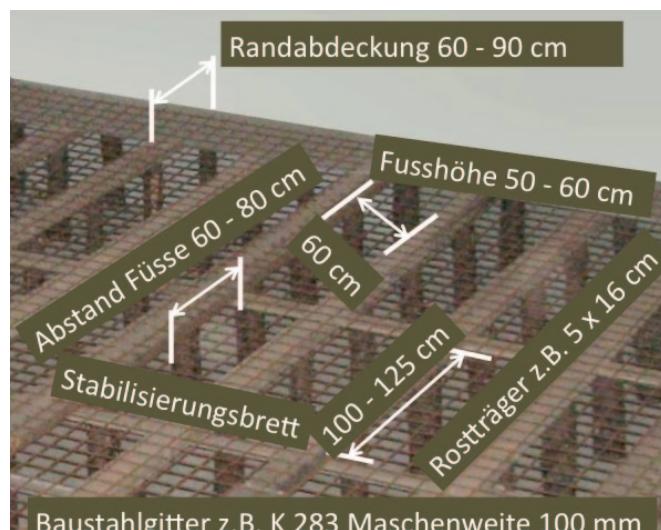
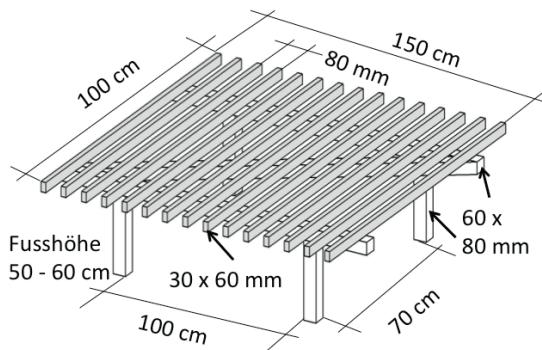


Abb. 3: Daten zum Boxen- und Rostbau.

Je stärker die Boxenfläche von einem quadratischen Querschnitt abweicht, desto wichtiger ist eine ausreichende Rosthöhe. Empfehlenswert ist eine lichte Rosthöhe ab 50cm. Durch eine gezielte Anordnung der Rostträger lassen sich tote Ecken ausgleichen. Zum Druckausgleich sollen die Rostträger grundsätzlich eher quer zur Einströmrichtung stehen (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 von etwa 18mm Stärke verkleidet. Zur Verstrebung eignen sich Kanthölzer, typisch mit einem Querschnitt von 16 cm x 14cm. Die Verstrebung kann vertikal oder horizontal erfolgen. Empfehlenswert ist eine vertikale Verstrebung in Verbindung mit einem Breitflansch-Stahlträger an der Oberseite (Abb. 4).

Dabei können die oberen Enden der vertikalen Kanthölzer zwischen die Flanschflächen eingeschoben werden. Im First und/oder im Giebel sind Abluftöffnungen notwendig (Abb. 5).



Abb. 4: Ausführung einer Boxenwand.

Die Auswahl des Ventilators

Der Ventilator soll den notwendigen Luftdurchsatz beim Gegendruck des Trockengutes und eventueller weiterer Strömungswiderstände sicherstellen. Bei fixer Antriebs-

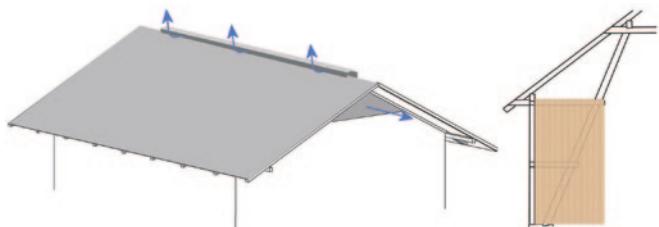


Abb. 5: Gebäudeentlüftung (links), Verkleidung mit nach unten fliehenden Bauelementen (rechts).

drehzahl stellt sich je nach Widerstand automatisch ein bestimmter Druck und ein entsprechender Luftvolumenstrom ein. Sinkt der Strömungswiderstand, so steigt der Luftdurchsatz und umgekehrt. Jeder Ventilator weist einen spezifischen optimalen Betriebspunkt mit bestem Wirkungsgrad auf. Die Antriebsleistung kann bei einem hohen Druck wider Erwarten geringer sein als frei ausblasend ohne Gegendruck.

Im Mittel ist je m Stockhöhe bei einem spezifischen Volumenstrom von $0,11 \text{ m}^3/\text{s}$ und m^2 mit einem statischen Druck von 100–240Pa zu rechnen. Dazu kommt eventuell der Druckverlust durch einen Sonnenkollektor (ca. 75–120Pa), einen Entfeuchter (ca. 70–100Pa) oder Wärmetauscher (ca. 50–80Pa). Einen hohen Gegendruck erzeugt Kleeheu vom ersten Schnitt, besonders bei kurzer Schnittlänge und hoher Feuchtigkeit. Grobstängeliges Belüftungsheu wie etwa Luzerne baut dagegen wenig Gegendruck auf. Einen

wesentlichen Einfluss auf den Druck hat der auf die Fläche bezogene Luftdurchsatz (Abb. 6).

Der maximale Druck des Ventilators sollte eine Reserve von mindestens 200Pa bieten. Insgesamt ergibt das typischerweise bei der Boxentrocknung einen maximalen Druck von 800–1200Pa. Der Volumenstrom verändert sich

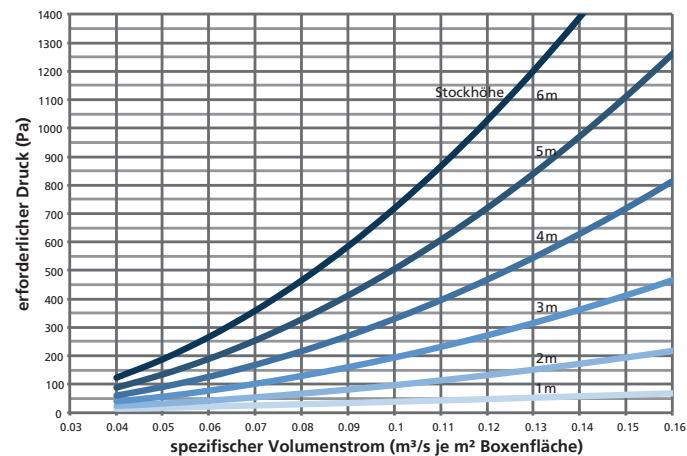


Abb. 6: Statischer Druck bei Wiesenheu in Boxen.

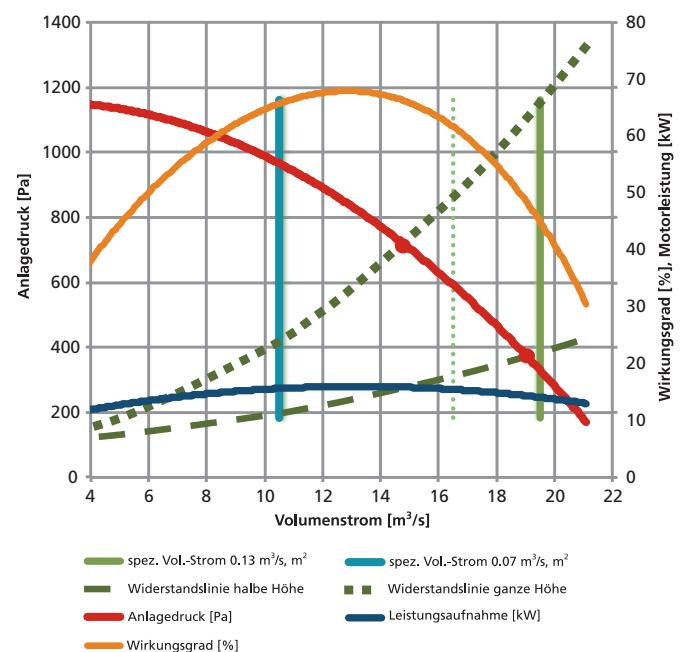


Abb. 7: Druck-Volumen-Diagramm mit den Kennlinien für Anlagedruck, Leistungsaufnahme und Wirkungsgrad.

dabei proportional zur Drehzahl, der Druck hingegen mit dem Quadrat und die Antriebsleistung mit der dritten Potenz der Drehzahländerung. Die Ventilatoreigenschaften werden am besten durch das Druck-Volumen-Diagramm dargestellt (Abb. 7).

Tab. 1: Motordrehzahlen bei unterschiedlicher Frequenz.

Motor-Ausführung	typische Drehzahl in U/min bei Direktantrieb		
	40 Hertz	50 Hertz	60 Hertz
4-polig	1180	1480	1770
6-polig	780	970	1160
8-polig	580	720	865

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 $\cos \varphi = 0,83$	

Dieses enthält die Kurven für den Anlagedruck, die Leistungsaufnahme und den Wirkungsgrad des Ventilators (inkl. Motor). Mit zunehmender Heustockhöhe und je nach Bedingungen verschiebt sich der Betriebspunkt auf der Druck-Kennlinie von rechts nach links.

Der Betriebspunkt liegt dort, wo sich ein dem Ventilatordruck entsprechender Gegendruck einstellt. Im Diagramm ist das der Schnittpunkt der Anlagedrucklinie mit der Widerstandslinie (Abb. 7). Bei Verwendung von Frequenzwandlern werden Druck-Kennlinien für verschiedene Drehzahlen eingetragen, in Abhängigkeit von Polzahl und Drehzahl (Tab. 1). In der Praxis wird daher die Netzfrequenz von 50 Hertz eher nur im Bereich von 40–60 Hertz verändert.

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

Als Richtwert kann bei Boxentrocknung mit einer Motorleistung von 0,11 kW je m² Boxenfläche gerechnet werden. Oft wird die Leistung von Ventilatoren und anderen Elektrogeräten durch die Hausanschluss-Sicherung begrenzt (Tab. 2).

Erhöhung der Trocknungsleistung

Sonnenkollektoren (Dachabsaugung)

Die Nutzung der Sonnenwärme sollte bei keiner Planung übersehen werden (Nydegger 1991). Meist bietet sich bei Gebäuden eine Dachabsaugung unterhalb der vorhandenen Dacheindeckung sowohl im Sparrendach (Abb. 8 und 9) als auch im Pfettendach (Abb. 10) an.

Mit dunklen Dächern (Faserzement, Profilblech und Photovoltaik-Panels) lassen sich Wirkungsgrade bis zu rund 50 % erreichen, bei Ziegeldächern bis zu 37 %. Je m² Dachfläche kann man ungefähr mit 250–300W nutzbarer Wärmeleistung rechnen.

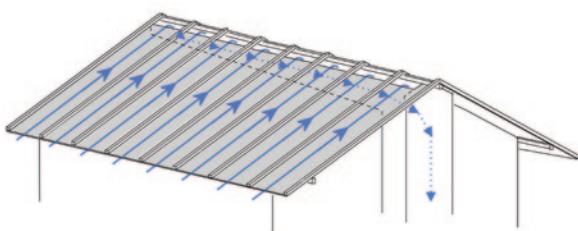


Abb. 8: Sonnenkollektor (Dachabsaugung) bei Sparrendach mit oben liegendem Sammelkanal.

Voraussetzung für eine Dachabsaugung ist ein dichtes Unterdruck (Luftleitplatte). Die Luftgeschwindigkeit soll im Bereich von 3–6,5 m/s liegen.

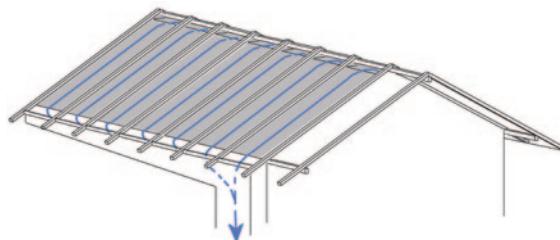


Abb. 9: Sonnenkollektor (Dachabsaugung) bei Sparrendach mit traufenseitigem Sammelkanal.

Empfehlenswert ist eine Dachkollektorfläche ab einer Grösse der doppelten bis dreifachen belüfteten Fläche. Ein Luftvolumenstrom von 100–200 m³/h je m² Dachfläche hat

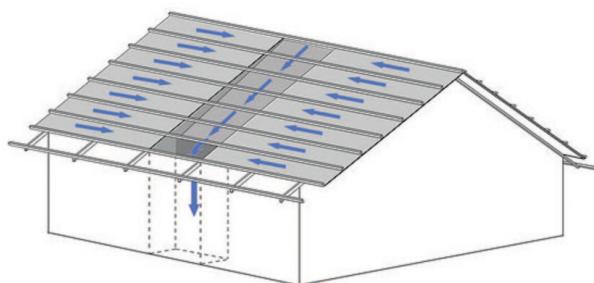


Abb. 10: Dachabsaugung für Pfettendach mit mittigem Sammelkanal in der Breite eines Binderfeldes.

sich bewährt. Sehr lange Kollektorflächen (im Verhältnis zur Saugbreite) sind zu vermeiden. Auch bei vorhandenem Unterzug (Blinddach) ist eine Dachabsaugung möglich. Dazu muss bei innen liegendem Sammelkanal ein Streifen des Unterdraches über dem Sammelkanal entfernt werden, eventuell ist eine grössere Höhe der Lattung oder Konterlattung (je nach Art der Luftführung) über dem Unterdrach erforderlich. Bei unterschiedlich langen Kollektorkanälen können unterschiedliche Kollektorkanalhöhen sinnvoll sein (Abb. 11). Für die optimale Berechnung der Kanalhöhe ist die Software ART-Soko (Nydegger 2010) geeignet. Eine Dachneigung von 20 Grad ist wegen des hohen Sonnenstandes während der Sommermonate ideal. Abweichungen von der idealen Südausrichtung verringern die Wärmeleistung im Sommer bei flacher Dachneigung nur wenig. Damit sind sogar flache nordseitige Dachhälften sinnvoll nutzbar (Abb. 12).

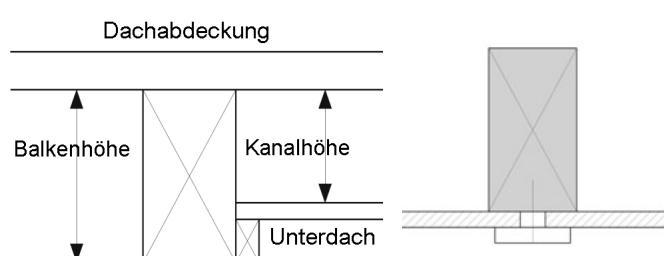


Abb. 11: Einbau des Unterdraches, optimale Kanalhöhe kleiner als Balkenhöhe (links), Kanalhöhe = Balkenhöhe (rechts).

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 Photovoltaik mit einer Dachwärmernutzung (Abb. 13–15).

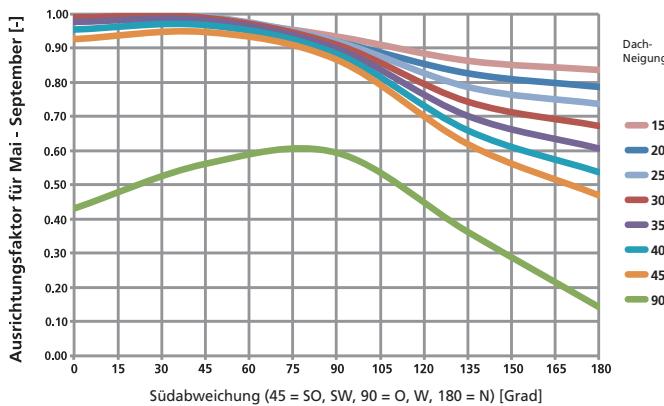


Abb. 12: Ausrichtungsfaktoren gegenüber Südrichtung für die Sommermonate.

Dabei bewirkt eine Kühlung der Solarmodule um je 1°C einen nahezu 0,5 % besseren elektrischen Wirkungsgrad. Die Wärmeleistung unterhalb der Module ist mit jener



Abb. 13: Dachabsaugung kombiniert mit Photovoltaik.

herkömmlicher Abdeckungen vergleichbar. Während der Stillstandszeit der Trocknung sollte entweder für eine natürliche oder mechanische Luftströmung unterhalb der Module gesorgt werden. Zudem ist in Stallgebäuden auf die Funktion der Stalllüftung zu achten (Van Caenegem 2009).

Trocknung mit Warmluftöfen oder Wärmetauscher

Mit angewärmter Luft in Verbindung mit Warmluftöfen (Abb. 16) oder Abwärmenutzung lässt sich die Trocknungs-

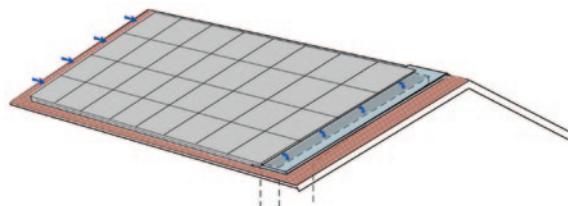


Abb. 14: Photovoltaik auf bestehendem Dach mit horizontaler Luftführung und seitlichem Sammelkanal.

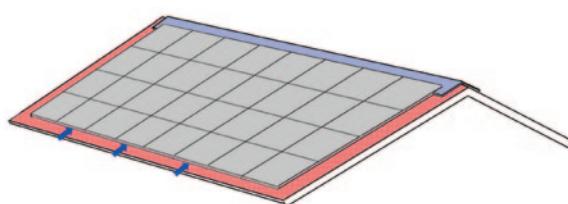


Abb. 15: Photovoltaik auf bestehendem Dach mit Luftführung giebelwärts und Giebelabdeckung.

dauer wesentlich verkürzen. Gelegentlich kann auch eine im Sommer stillgelegte Gebäudeheizung über einen Wärmetauscher genutzt werden. Die erforderliche Heizleistung wird aber oft unterschätzt.

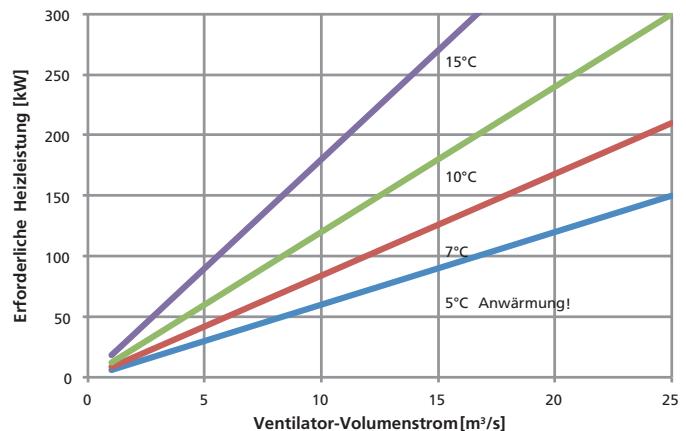


Abb. 16: Erforderliche Heizleistung bei Schlechtwettereinsatz.

Je 10000 m^3 Luft pro Stunde benötigt man für 10°C Anwärmung rund 33 kW Heizleistung. Eine starke Anwärmung um mehr als $15\text{--}20^{\circ}\text{C}$ erscheint aus Gründen der Energieeffizienz oder auch aus Rücksicht auf die Eiweisskomponenten des Trockengutes nicht sinnvoll. Problematisch in letzterer Hinsicht können bereits Lufttemperaturen oberhalb von 50°C über mehrere Tage sein. Der spezifische Energieaufwand zum Abtrocknen von 1 kg Wasser liegt meist im Bereich von $0,9\text{--}1,6\text{ kWh}$ und ist damit relativ hoch. Brennholz oder Abwärme aus einer Kraft-Wärmekopplung (z.B. von Biogasanlagen) steht aber oft kostengünstig zur Verfügung, während bei Entfeuchtern mit einem vergleichsweise höheren Preis pro kWh Energie zu rechnen ist. Oft ist auch der dazu nötige elektrische Anschlusswert nicht vorhanden.

Warmluftöfen weisen auch einen nicht unwesentlichen elektrischen Leistungsbedarf auf. Bei der Aufstellung sind örtliche Brandschutzzvorschriften zu beachten. Die Warmluft wird meist durch flexible Polyamidschläuche geführt. Bei Schlechtwetter können sich bei Warmbelüftung und mangelhafter Gebäudeentlüftung oberflächliche Kondensationsschichten bilden.

Trocknung mit Luftentfeuchter

Mit Luftentfeuchter-Wärmepumpen (Abb. 17) 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 $35\text{--}40\%$ 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 Kondensationswärme und Aggregatsabwärme zu einer Erwärmung von $2\text{--}8^{\circ}\text{C}$. Bei einer Aussentemperatur von weniger als $8\text{--}10^{\circ}\text{C}$ kann es sogar zu einer Verdampfervereisung kom-

men. Dies lässt sich aber durch eine Heissgasrückführung vermeiden. Wichtig ist auch die Abstimmung des Luftdurchsatzes 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 und zu hohem Kältemitteldruck, der wiederum mit hoher Leistungsaufnahme verbunden ist. Typische Werte für die Luftgeschwindigkeit am Verdampfer liegen bei 3–4 m/s. Luftentfeuchter können grundsätzlich im Hauptstrom («Vollentfeuchtung», Abb. 19) oder im Nebenstrom («Teilentfeuchtung») betrieben werden. Bei Teilentfeuchtung wird der Entfeuchter mit Abluft vom Trockengut gespeist, ein Hilfslüfter sorgt für einen optimalen Luftdurchsatz. Die entfeuchte Luft wird danach

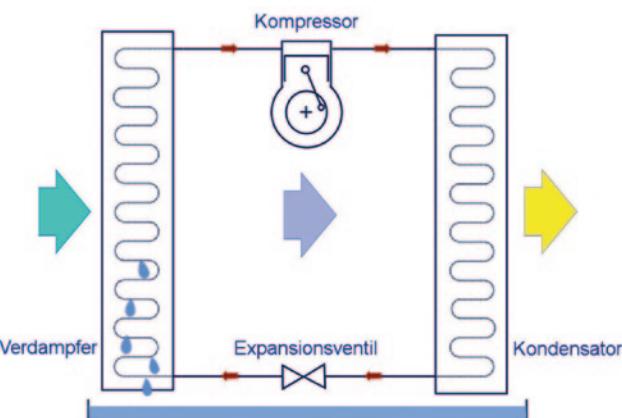


Abb. 17: Schema eines Luftentfeuchters (Luftfluss s. Pfeile).

mit zusätzlicher Außenluft vom Ventilator in den Heustock gedrückt. Bei Vollentfeuchtung kann entweder mit Frischluft oder mit Umluft getrocknet werden. Im Umluftbetrieb kann die Lufttemperatur erheblich ansteigen.

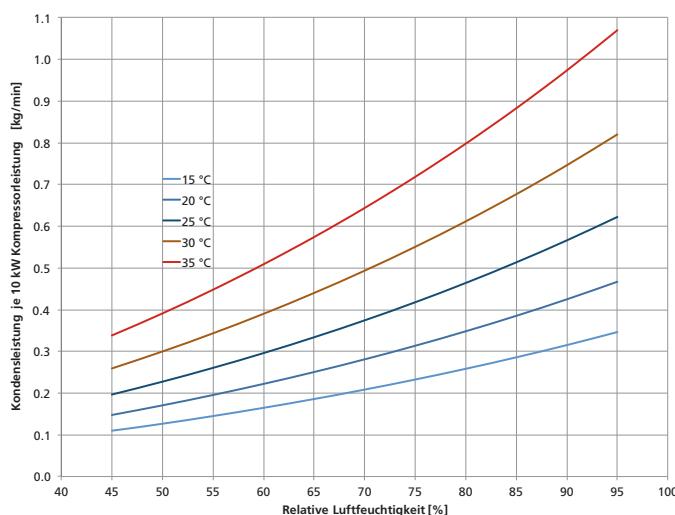


Abb. 18: Kondensleistung von Entfeuchtern in Abhängigkeit von Temperatur und Luftfeuchtigkeit.

Damit verbessert sich auch die Kondensleistung (Abb. 18), ausserdem kann eine Verdampfervereisung vermieden werden. Allerdings ist bei völlig dichtem Gebäude die Trocknung durch die Kondensleistung des Entfeuchters beschränkt.

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 Holzbau teile nicht über einen längeren Zeitraum erhöhte Luftfeuchtigkeit ausgesetzt werden.

Erfahrungsgemäss ist ein Frischluftbetrieb ab etwa 25 °C Aussentemperatur zweckmässig, unterhalb davon ein

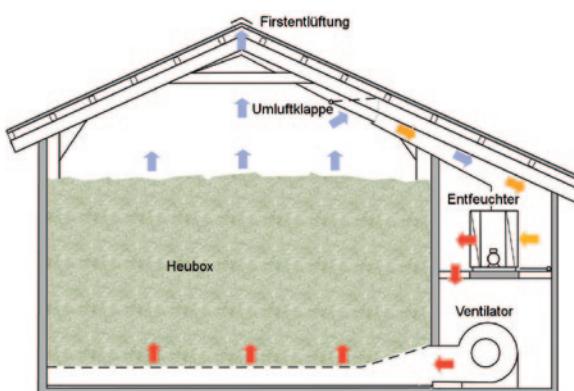


Abb. 19: Schema einer Luftentfeuchtung im Hauptstrom mit Umschaltklappe (Luftfluss s. Pfeile).

Umluftbetrieb. Daher ist insbesondere in Verbindung mit einer Dachwärmennutzung eine Umschaltklappe zur Luftführung vorteilhaft. 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 Gebäudeentlüftung. 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.

Steuergeräte

Anlagensteuerungen erleichtern die Bedienung, können aber die Überwachung durch eine Bedienungsperson nicht voll ersetzen. Einfache Steuerungen für die Kaltbelüftung erfassen die Luftfeuchtigkeit, teilweise auch die Heutemperatur, und können bei Schlechtwetter einen Intervallbetrieb mit Unterbrechungen von typischerweise 2–3 Stunden durchführen.

Speicherprogrammierbare Steuerungen können bei der Luftentfeuchtung automatisch zwischen Frischluft- und Umluftbetrieb umschalten oder in Verbindung mit Frequenzwandlern die Lüfterdrehzahl anpassen sowie einen begrenzten elektrischen Anschlusswert einhalten. Zudem kann der Luftdurchsatz bei Umlufttrocknung verringert oder bei Schönwetter erhöht werden. Durch Messung von Temperatur und Luftfeuchtigkeit der Trocknungsluft vor und über dem Heu oder durch Berechnung des adiabatischen Sättigungsdefizits der Luft sowie Einstufung der Feuchtigkeit des Trockengutes ist eine Vorausschätzung der Trocknungszeit möglich, ebenso ein gesteuerter Intervallbetrieb.

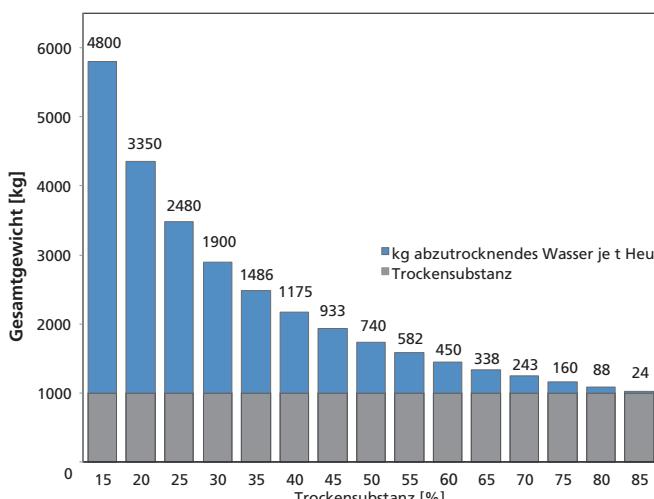


Abb. 20: Abzutrocknende Wassermenge.

Betrieb

Anwelken ist entscheidend

Frisches Grünfutter enthält rund 80 % Wasser, also nur 20 % Trockensubstanz. Bei der Trocknung müssen 4kg Wasser pro kg Trockenmasse oder umgerechnet 3,35kg Wasser je kg Heu abgeführt werden (Abb. 20). Belüftungsheu, das auf 60 % Trockenmasse am Boden vorge trocknet wurde, enthält nur mehr rund 0,67kg Wasser je kg Trockenmasse. Der wesentliche Teil der Trocknung pas siert damit auf dem Feld. Die Vortrocknung bestimmt ganz entscheidend die Kosten für die folgende Unter dach trocknung. Eine um rund 10 % höhere Feuchtigkeit des Belüftungsheus führt zur Verdoppelung der abzutrocknenden Wassermenge. Zum Trocknen von erntefri



Abb. 21: Schätzung des Trockenmassegehaltes.

schem Gras, z.B. in einer Heisslufttrocknung, muss im Vergleich zu typischem Belüftungsheu von 65 % Trockenmasse etwa die zehnfache Wassermenge abgeführt werden. Meist wird das Belüftungsheu am Folgetag nach dem Mähen eingefahren. Durch den Einsatz eines Mähaufbereiters sowie eine gezielte zwei- bis maximal dreimalige Bearbeitung mit dem Kreiselheuer kann der Trockenmasse gehalt bei gutem Wetter auf 60–70 % erhöht werden. Zweckmäßig ist dabei die Verwendung von Geräten mit kleinem Kreiseldurchmesser bei flacher Kreiselstellung. Dabei kann zuerst mit nahezu voller Zapfwellendrehzahl (z.B. 500 min⁻¹) bei etwa 6–8 km/h gefahren werden, beim zweiten Durchgang sollte die Zapfwellendrehzahl auf 380–420 min⁻¹ und bei einem notwendigen dritten Durchgang auf 340–400 min⁻¹ reduziert werden. Nacheinander folgende Bearbeitungen sollten nicht in gleicher Fahrrichtung, sondern eher über Kreuz oder gegenläufig erfolgen. Bei grobstängeligem Futter bringen Mähaufbereiter eine erhebliche Verkürzung der Trocknungszeit um 1–6 Stunden bei gleichzeitiger Einsparung eines Zettvorganges. Eintagesheu kommt aus Kostengründen eher nur bei ungünstigem Wetter für die Heubelüftung infrage. Zur

groben Beurteilung der Vortrocknung streicht man in die Handfläche gelegte Stängel mit dem Daumennagel in Längsrichtung aus. Bei mehr als 65 % Trockenmasse (<35 % Feuchtigkeit) tritt am Stängelende kein Wasser mehr aus (Abb. 21).

Einlagern

Eine möglichst lockere und gleichmäßige Beschickung ist entscheidend für den Trocknungs erfolg. Je nach Feuchtigkeit und Zusammensetzung des Trockengutes und der Anlagenleistung sollte die Schichthöhe einer Charge 1–2 m nicht überschreiten. Mehrere kleinere Chargen verbessern die Trocknungsleistung. Unterschiedlich dichte oder feuchte Stellen des Belüftungsheus führen zu unglei-

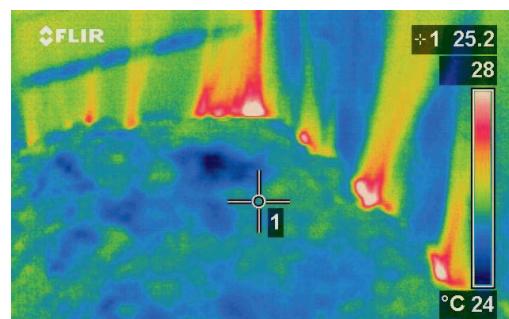


Abb. 22: Das Thermografie-Bild zeigt, dass warme Luft entlang den Wänden der Box entweicht (rote und gelbe Partien).

cher Trocknungs dauer oder sogar zu Schimmelbildung. Unterschiedlich feuchte Futterpartien sollten stets auf der ganzen Boxenfläche verteilt werden. Erfahrene Heutrockner erkennen beim Barfuß gehen auf dem Heustock bei laufendem Ventilator den Trocknungszustand und eventuelle Kamin bildungen.

Grundsätzlich soll beim Beschricken von Boxen der Ventilator bereits laufen, um das Absetzen des Heus einzuschränken. Entfeuchter anlagen sollten während der Beschickung im Frischluftbetrieb gefahren werden, um eine übermäßige Verschmutzung des Verdampfers zu verhindern. Trotzdem ist eine gelegentliche Reinigung der Wärmetauscherflächen notwendig.

Entscheidend für den Trocknungs erfolg ist eine gute Durchlüftung. Verdichtete Stellen werden umströmt und verderben leicht, dagegen führen Lockerbereiche durch Kaminbildung zu starken Luftverlusten. Solche können,

besonders bei geringer Füllhöhe, auch entlang von Boxenwänden auftreten (Abb. 22). Das Schneiden des Belüftungsheus durch drei bis acht Messer im Ladewagen verbessert die gleichmäßige Beschickung, ist aber bei sehr



Abb. 23: Messen des statischen Druckes. Ein Schlauchende wird unterhalb des Boxenrostes verlegt; 1 mm Wassersäule entspricht ca. 10 Pa.

jungem Futter entbehrlich. Bei der Kranbeschickung sollte die Greiferzange rüttelnd bei gleichzeitiger Seitwärtsbewegung geöffnet werden.

Die Überwachung des statischen Druckes gibt Aufschluss über die Durchlüftung und ein eventuelles starkes «Setzen» eines Heustockes (Abb. 23). 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 (Tab. 3).

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

Betriebsarten

Mit Kaltbelüftungs- und Sonnenkollektoranlagen kann der Ventilator bei Regenwetter 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 dem 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 weiter durch neuerliches Einschalten des Lüfters die Abluftfeuchte geprüft werden. Da verschiedene Kostenberechnungen (Nydegger und Wirleitner 2014) gezeigt haben, dass die Trocknung mit Sonnenkollektoren am kostengünstigsten ist, sollten Anlagen so ausgelegt sein, dass diese vor allem beim ersten Schnitt auf die ganze Stockfläche einsetzbar sind. Bei Kaltbelüftung und mit Sonnenkollektoranlagen ist es deshalb von Vorteil, wenn die ganze Stockfläche gleichzeitig beschickt und betrieben werden kann. Bei der Kombination von Sonnenkollektoren mit Luftentfeuchtern, Warmluftöfen etc. können Stöcke auch wechselweise belüftet werden. Mithilfe von Klappen wird einerseits zwischen Sonnenkollektor und Luftentfeuchter etc. und andererseits zwischen den Stöcken umgeschaltet.

Faustzahlen zur Boxentrocknung:

- erforderliche belüftete Fläche, je Grossvieheinheit 6–10 m² oder je ha pro Trocknungscharge rund 14–24 m²
- Strömungswiderstand bei Wiesengras: 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: typisch 11 m³/s (= 39 600 m³/h) pro 100 m² belüftete Fläche (bei halber Heustockhöhe), Mindestwert bei voller Stockhöhe: 0,07 m³/s pro m²
- Ventilator-Antriebsleistung: 11 kW je 100 m² belüftete Fläche oder 0,75 kW pro ha Schnittfläche

- Heizleistung bei Warmbelüftung: 12,5 kW je m³/s Ventilator-Volumenstrom und 10 °C Anwärmung

Faustzahlen für Dachwärmenuutzung:

- 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 möglichst unter 100 Pa liegen.

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 dauern dem Umluftbetrieb ist ein Verhältnis von 2:1 empfehlenswert.

Literatur

- Baumgartner J., 1991. Die Heubelüftung von A–Z. FAT-Berichte 406. Agroscope, Ettenhausen.
- Nydegger F., 1991. Sonnenkollektoren für die Heubelüftung, FAT-Berichte 407. Agroscope, Ettenhausen.
- Nydegger F., 2010. ART-Soko. Dimensionierung von Sonnenkollektoren für die Heubelüftung, Programm-Version 2010 (2.0.1). Agroscope, Ettenhausen.
- Nydegger F. & Wirleitner G., 2014. Vergleich von Kapazität und Kosten verschiedener Unterdachtrocknungsverfahren. 19. Alpenländisches Expertenforum 2014, S. 1–6.
- Van Caenegem L., 2009. Thermische Nutzung von In-Dach-Photovoltaikanlagen. ART-Bericht 709. Agroscope, Ettenhausen
- Wirleitner G., 2010. Qualitätsheu durch energieeffiziente Technik. 37. Viehwirtschaftliche Fachtagung 2010, Lehr- und Forschungszentrum für Landwirtschaft, Raumberg-Gumpenstein, S. 71–80.

Impressum

Herausgeber	Agroscope, Tänikon 1, 8356 Ettenhausen, www.agroscope.ch
Abbildungen	Franz Nydegger (Abb. 1, 3, 11), Josef Braun (Abb. 13) Gotthard Wirleitner (restl. Abb.)
Redaktion	Erika Meili
Gestaltung und Druck	Sonderegger Druck AG, Weinfelden
Adressänderungen	Thomas Zaugg, thomas.zaugg@bbl.admin.ch
Download	www.agroscope.ch/transfer
Copyright	© Agroscope 2014
ISSN	2296-7206 (print), 2296-7214 (online)