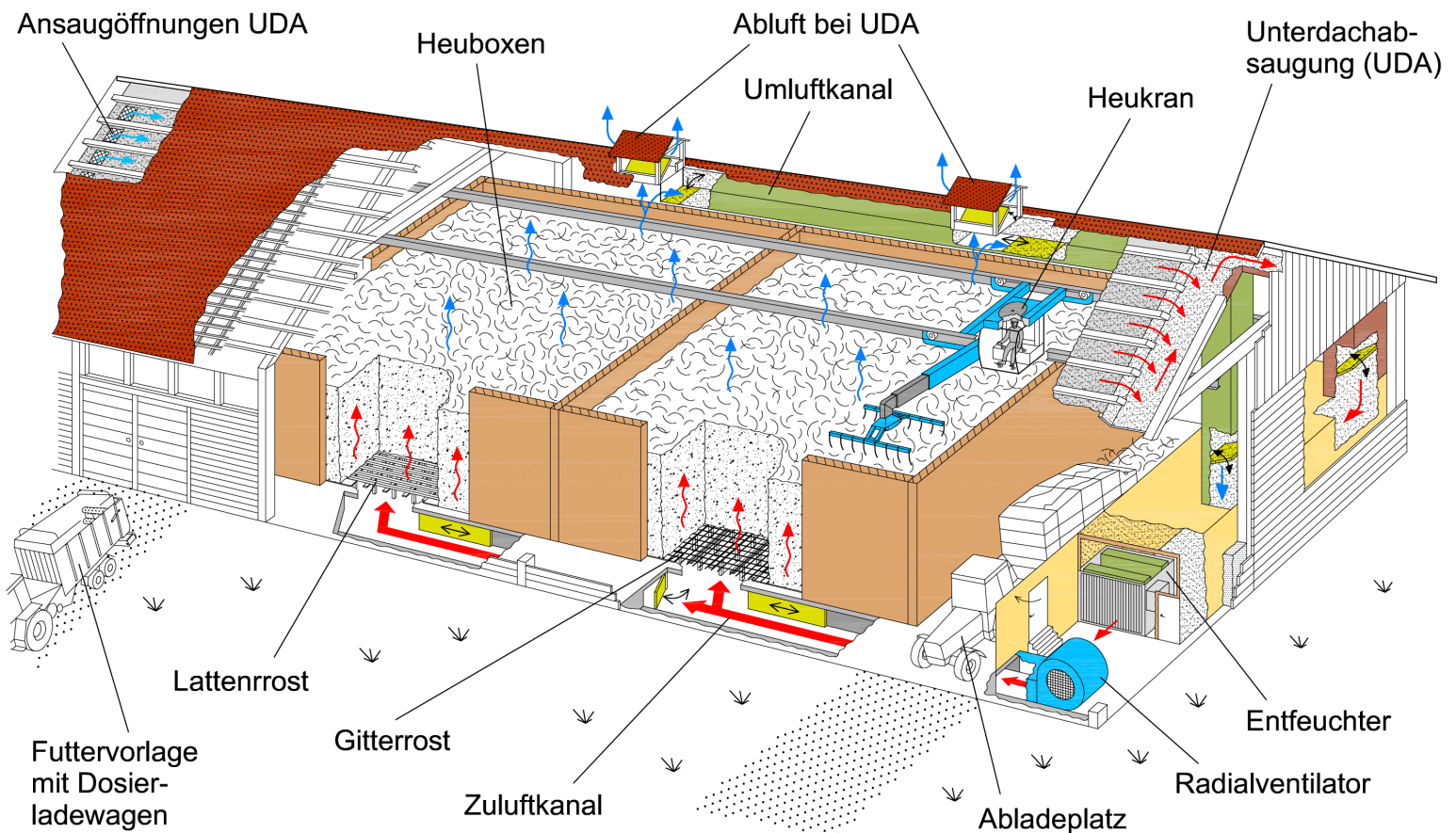


Verfahrensablauf, Technische Anforderungen,
Verfahrenskosten

Heutrocknung mit Luftentfeuchter



www.alb-bayern.de/laf3

Landtechnik Forum Bayern, Verfasser:

Stefan Thurner
Markus Hofmann
Juliana Mačuhová
Peter Stötzel
Rudolf Gasteiger

Georg Ohmayer

Christoph Bodenmüller

Christoph Waltner



AELF Kempten

FrigorTec GmbH



Arwego Armin Schneider e.K.



Foren der ALB Bayern e.V.

ALB-Arbeitsblätter, ALB-Beratungsblätter, ALB-Praxisblätter, ALB-Infobriefe, ALB-Leitfäden und Fachinformationen werden in den Foren der Arbeitsgemeinschaft Landtechnik und Landwirtschaftliches Bauwesen in Bayern e.V. ausgearbeitet.

Die Foren, denen Fachleute der jeweiligen Sachgebiete angehören, sind Expertenausschüsse zum Informationsaustausch und zur Wissensvermittlung in die landwirtschaftliche Praxis.

Foren der ALB Bayern e.V.:

- ▶ BauForum Bayern (BaF),
Leitung: Jochen Simon, LfL
- ▶ Bewässerungsforum Bayern (BeF),
Leitung: Dr. Martin Müller, ALB
- ▶ Biogas Forum Bayern (BiF),
Leitung: Dr. Martin Müller, ALB
- ▶ Landtechnik Forum Bayern (LaF),
Leitung: Dr. Markus Demmel, LfL

Partner



Bayerisches Staatministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten



Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft



Ämter für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten

Impressum

Herausgeber Arbeitsgemeinschaft Landtechnik und Landwirtschaftliches Bauwesen
in Bayern e.V. (ALB),
Vöttinger Straße 36, 85354 Freising
Telefon: 08161 / 887 - 0078
Telefax: 08161 / 887 - 3957
E-Mail: info@alb-bayern.de
Internet: www.alb-bayern.de

1. Auflage 2021
© ALB Alle Rechte vorbehalten
Bildquelle Titelfoto: Martin Berchtold, TUM

Inhalt

Seite

1. Einleitung	7
2. Ziel des Beratungsblattes	8
3. Verfahrensablauf.....	8
4. Technische Anforderungen.....	11
5. Verfahrenskosten.....	20
6. Fazit.....	22
7. Weiterführende Literatur/Links.....	22

Steckbrief Luftentfeuchtertrocknung

Energiebedarf: je nach Witterungsbedingungen, Anwelkgut und Anlagensteuerung im Mittel rund $0,47 \pm 0,28$ kWh/kg Wasserentzug mit einer Spanne von 0,2 bis 0,8 kWh/kg Wasserentzug; pro dt Heu im Mittel rund $12,1 \pm 6,3$ kWh/dt; alle Werte mit Nutzung einer Dachabsaugung und bezogen auf den Stromverbrauch in der Gesamtanlage (Zahlen basieren auf Praxisergebnissen und Ergebnissen der Heubelüftungsversuchsanlage Hübschenried aus dem Jahr 2019)

Fixe Kosten: je nach Situation am Betrieb im Mittel 133 ± 15 €/m³ (brutto) Lagerraum mit einer Spanne von 110 bis 160 €/m³ Lagerraum; Kosten basieren auf neun aktuellen Förderfällen aus den Jahren 2017 bis 2019

Variable Kosten: je nach Witterungsbedingungen und Heumenge von 2,20 – 5,60 € pro dt Trockenmasse Heu (Zahlen basieren auf Praxiswerten aus 2019 und einem Strompreis von 26,39 Cent/kWh); alle Werte mit Nutzung einer Dachabsaugung und automatischer Steuerung der Anlage

Temperatur der zu entfeuchtenden Luft: effiziente Trocknung von 20 – 30 °C (Zuluft am Luftentfeuchter)

Relative Luftfeuchtigkeit: effiziente Trocknung über 50 % relative Luftfeuchtigkeit (Zuluft am Luftentfeuchter)

Leistungsbedarfs eines Luftentfeuchters:
1 – 2 kW/10 m² Boxengrundfläche

Verhältnis Anschlussleistungsbedarf Luftentfeuchter/Radialventilator:

- Umluftbetrieb (nachts) ab 1 : 1
- Bypassbetrieb ab 0,5 : 1
- bei Dauerumluftbetrieb (Tag und Nacht) 2 : 1

Anströmfläche: Anströmfläche am Wärmetauscher des Luftentfeuchters: je 100 m² Fläche der Trocknungsboxen etwa 3 m², oder pro 10 kW Verdichterleistung rund 1,7 m²

Glossar

Absolute Luftfeuchtigkeit: Absolute Masse des Wasserdampfs pro m^3 Luft.

Abluftbetrieb: Beim Abluftbetrieb wird die Heustockabluft zum Verdampfer geführt und dort unter den Taupunkt abgekühlt. Die abgekühlte und entfeuchtete Heustockabluft wird nun mit der verfügbaren Außenluft mit Hilfe der über Sensoren gemessenen Temperatur und relativen Luftfeuchte verglichen. Beim Abluftbetrieb besitzt die Außenluft ein höheres Sättigungsdefizit als die abgekühlte und entfeuchtete Heustockabluft und wird an Stelle dieser zum Kondensator und anschließend in die Heubox geführt. D. h. die abgekühlte und entfeuchtete Heustockabluft wird durch die Außenluft zwischen Verdampfer und Kondensator ersetzt (vergleiche Kapitel 4.4.3).

Außenluftbetrieb: Wird in der Praxis auch als Frischluftbetrieb bezeichnet. Außenluft wird direkt oder über die Dachabsaugung angesaugt und gelangt über einen Bypass (am Luftentfeuchter vorbei) zum Radialventilator, der sie in den Heustock drückt. Wenn es sinnvoll ist (Lufttemperatur und relative Luftfeuchtigkeit sind ausschlaggebend), kann die Außenluft auch durch den Luftentfeuchter geführt werden (vergleiche Kapitel 4.4.2).

Bypassbetrieb: Beim Bypassbetrieb wird nur ein Teil der Abluft über dem Heustock zurück zum Luftentfeuchter geführt und von diesem aufbereitet. Dazu ist in der Regel am Luftentfeuchter ein zusätzlicher Axialventilator angebracht, um die Abluft aktiv durch den Luftentfeuchter zu transportieren. Der Rest der Luft, der dem Radialventilator zugeführt wird, stammt aus der Dachabsaugung oder wird direkt als Außenluft angesaugt. Dieses System ist häufig in Altanlagen realisiert, hat aber heute nur noch wenig Bedeutung. Grund für die Bypasslösung war oft der begrenzte Stromanschluss.

Dachabsaugung: Die Außenluft wird im Zwischenraum zwischen Dachhaut und einer Schalung oder zwischen Dachhaut und einer aufgebauten Photovoltaikanlage durch die Sonneneinstrahlung (solar) erwärmt. Dabei wird empfohlen, den Zwischenraum abhängig vom Radialventilator zu dimensionieren (empfohlen wird die Verwendung des Programmes ART-SOKO oder eine thermische Simulation).

Heißgasrückführung im Luftentfeuchter: Durch eine Bypasslösung wird im Kältekreis des Luftentfeuchters die Eisbildung am Wärmetauscher verhindert. Während der Heißgasrückführung (i. d. R. kurze Zeiträume von 5 – 10 Minuten) wird die Luft nicht entfeuchtet.

Heutrocknung: Der Begriff wird in dieser Veröffentlichung für die technische Unterdachtrocknung von angewelktem Grünzeug verwendet. In der Praxis werden die Begriffe Belüftungstrocknung, Heubelüftung, Warmlufttrocknung, Warmbelüftung u. ä. synonym verwendet.

Intervallbelüftung: Bei der Intervallbelüftung werden zwei Trocknungsboxen gleichzeitig (oder kurz nacheinander) befüllt und abwechselnd getrocknet.

Leistungszahl des Luftentfeuchters: Wird auch als Coefficient of Performance (CoP) bezeichnet. Gibt das Verhältnis von aufgewendeter elektrischer Leistung am Verdichter zur Wärmeleistung am Kondensator im Laborbetrieb an. Anzustreben ist eine hohe Leistungszahl. Die Leistungszahl wird vom Hersteller ermittelt und unterscheidet sich von der Energieeffizienz im realen Betrieb.

Luftentfeuchter: Synonym zum Begriff Luftentfeuchter werden in der Praxis auch die Begriffe Kondensationstrockner, Wärmepumpe oder Entfeuchter verwendet.

Sättigungsdefizit der Luft: Differenz des Dampfdrucks zum Sättigungsdampfdruck. Das Sättigungsdefizit gibt an, wieviel Wasserdampf die Luft bis zur Sättigung theoretisch noch aufnehmen kann. Häufig wird auch der Begriff adiabatisches Sättigungsdefizit der Luft verwendet, der aber theoretisch für ein System ohne Wärmeverluste an die Umgebung gilt. Bei der Trocknung kann nur ein Teil des gesamten Sättigungsdefizits genutzt werden, weil sich die Luft durch den Entzug der Verdampfungswärme des abgetrockneten Wassers abkühlt.

Taupunkt: Entspricht der Taupunkttemperatur; ist diejenige Temperatur, die bei Luft mit einer bestimmten relativen Luftfeuchtigkeit und bei konstantem Druck unterschritten werden muss, damit sich Wasserdampf als Tau oder Nebel abscheidet.

Temperaturspreizung: Differenz zwischen Zu- und Abluft nach dem Luftentfeuchter.

Trocknungsbox: In der Trocknungsbox wird das geerntete Anwelkgut eingelagert und bis zur Lagerfähigkeit fertig getrocknet. Sie dient auch als Lagerraum für das Heu. In der Praxis wird die Trocknungsbox auch als Belüftungsbox oder Heubox bezeichnet.

Umluftbetrieb: Die Abluft über dem Heustock wird gezielt angesaugt und über den Luftentfeuchter geführt, bevor sie vom Radialventilator wieder in den Heustock gedrückt wird. Somit entsteht ein nahezu geschlossener Luftkreislauf, in dem sich die Temperatur aufgrund des stetigen Energieeintrags über den Luftentfeuchter langsam erwärmt (vergleiche Kapitel 4.4.1).

Unterdachtrocknung: Die Trocknung von angewelktem Grünzeug in einem Gebäude bis zur Lagerfähigkeit mit kalter oder warmer Luft.

Verdichter: Der Verdichter, häufig auch als Kompressor bezeichnet, komprimiert das Kälte-

mittel im Luftentfeuchter.

Wärmetauscher: Wird in der Praxis oft als Wärmeregister oder Register bezeichnet. Wärmetauscher dienen zur Energieübertragung zwischen zwei Medien. Die von Kühlmittelrohren durchzogene Rippenstruktur des Verdampfers und Kondensators im Luftentfeuchter werden als Wärmetauscher bezeichnet. Dabei wird vom Medium Kühlmittel die Energie zum Medium Luft übertragen.

Warmluftkollektor: Industriell vorgefertigtes Element zur hoch effizienten, solaren Luftanwärmung auf dem Dach.

1. Einleitung

Die Unterdachtrocknung von Grünlandaufwüchsen und Feldfutter hat regional Bedeutung und nimmt im Zuge der Produktion des Premiumprodukts „garantiert traditionelle Spezialität Heumilch“ aktuell wieder zu (Abbildung 1). War die Heutrocknung mit (kalter) Außenluft früher die Regel, wird heutzutage eher aufbereitete warme Luft (angewärmt, entfeuchtet oder beides) verwendet, um das Heu bis zur Lagerfähigkeit zu trocknen. Der Vorteil der Heutrocknung mit aufbereiteter Luft ist die sichere und witterungsunabhängige Trocknung, die zu einer konstant hohen Heuqualität führt. Neben der Nutzung von z. B. regenerativer Energie (Hackschnitzel, Biogas) zum Anwärmen der Luft, bietet sich auch die Heutrocknung mittels Luftentfeuchtung an (Abbildung 2). In der Praxis



Abb. 1: EU-Gütesiegel „garantiert traditionelle Spezialität“ (g. t. S.)

wird die Heutrocknung in der Regel mit einer Dachabsaugung kombiniert, um die kostengünstige Solarenergie tagsüber effizient zu nutzen.

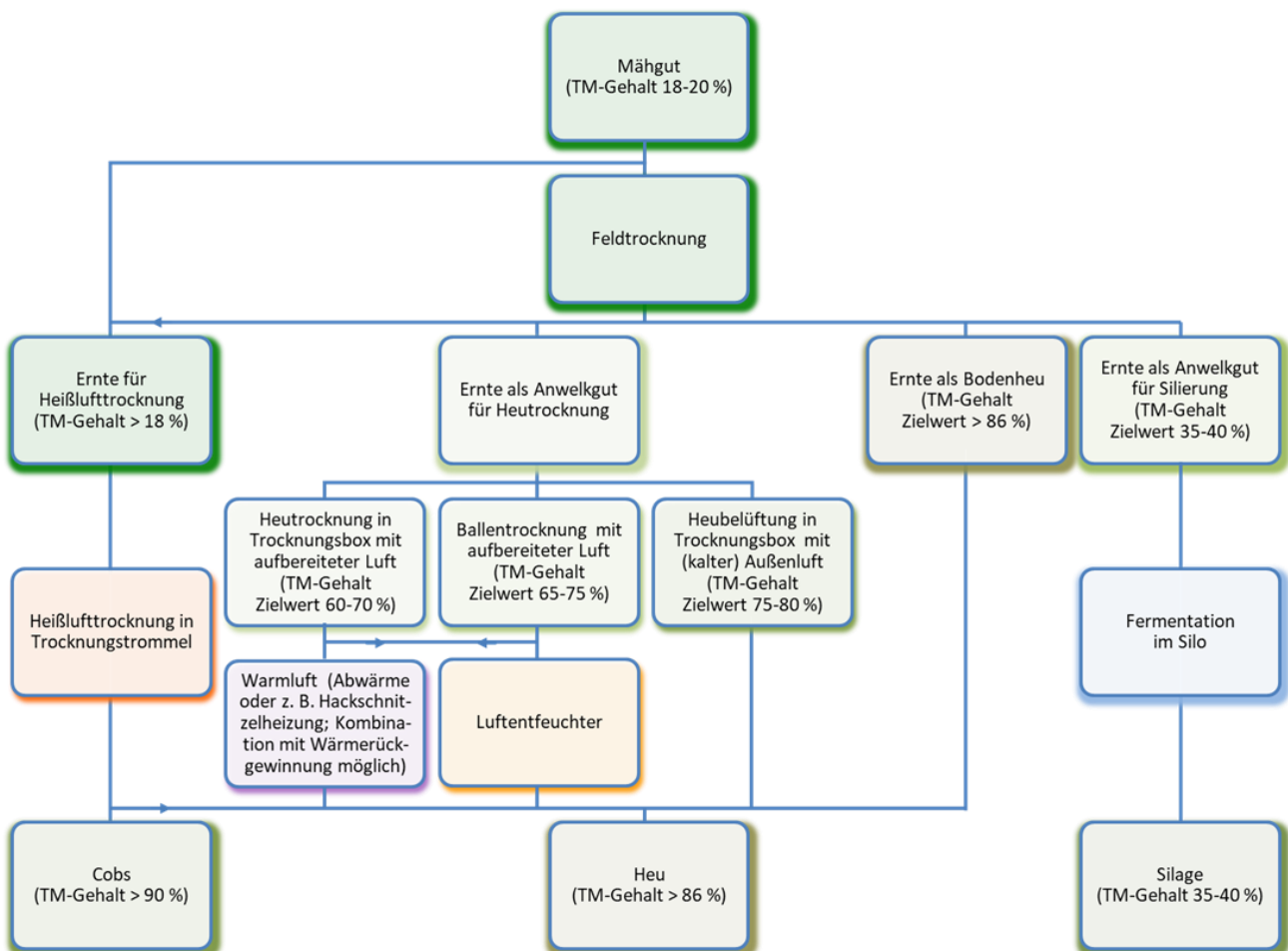


Abb. 2: Systematik der Grünfuttermkonservierung (TM = Trockenmasse)

2. Ziel des Beratungsblattes und Zielgruppe

Ziel des Beratungsblattes ist es, die Verfahrenstechnik von Heutrocknungen mit Luftentfeuchter mit spezifischen technischen Unterschieden verständlich darzustellen. Weiterhin sollen in der Praxis übliche Verfahrensabläufe beim Einsatz eines Luftentfeuchters beschrieben werden.

Zielgruppen des Beratungsblattes sind daher Landwirte, die neu in die Heutrocknung einsteigen und Landwirte, die bereits eine Heutrocknungsanlage betreiben und diese optimieren oder auf den aktuellen Stand der Technik bringen wollen. Weiterhin richtet sich das Papier an Berater der Landwirtschaftsverwaltung und Verbundpartner.

3. Verfahrensablauf

Die Ernte von Belüftungsheu erfolgt in der Regel zum gleichen Schnitttermin wie bei der Ernte von Silage. Ein Schnittzeitpunkt zum Ähren- und Rispschieben der Hauptbestandbildner bildet die Voraussetzung für hohe Energie- und Eiweißgehalte im Futter. Allerdings ist nicht immer das Ziel ein Heu mit hohen Energie- und Eiweißgehalten zu produzieren. Z. B. für das Jungvieh oder die Trockensteher ist ein moderater Energie- und Eiweißgehalt erforderlich. Daher bietet zum einen die Ernte in Chargen die Möglichkeit, Heu mit verschiedenen Energie- und Eiweißgehalten zu erzeugen, es kann aber auch gezielt ein späterer Schnitt auf einzelnen Flächen erfolgen. Damit ist die Heutrocknung als Futterkonservierungsmethode prädestiniert für eine abgestufte Grünlandnutzung, die auch als mosaikartige Grünlandnutzung bezeichnet wird und somit auch für artenreiches Grünland (artenreiches Grünland hat eine höhere Nutzungselastizität, wodurch ein längerer Nutzungszeitraum zur Verfügung steht, der die Ernte in Chargen begünstigt). Ertragsstarke, oft artenärmere Grünlandbestände können jedoch genauso gut in einer Heutrocknung konserviert werden. Hier unterstützt die Nutzung in mehreren Chargen die Realisierung eines optimalen Schnittzeitpunkts bei unterschiedlicher Exposition der Flächen (z. B. Nord- und Südhanglagen sowie Tallagen weisen oft eine unterschiedliche Vegetationsentwicklung auf, so dass der Schnitt



Abb. 3: Kreiselzettwender beim Wenden (Bildquelle: Juliana Mačuhová, LfL 2017)

in den einzelnen Lagen zum optimalen Zeitpunkt erfolgen kann).

Für die Mahd wird in der Regel ein Kreisel- oder Doppelmessermähwerk verwendet. Dabei ist der Mähknigge (www.alb-bayern.de/laf2) zur Schonung von Wildtieren zu berücksichtigen. Ein Anwelken des Grünguts auf der Wiese muss für Heutrocknungsanlagen mit Luftentfeuchter erfolgen. Empfohlen ist ein Trockenmassegehalt zwischen 60 und 70 % beim Einfahren. Ab einem Trockenmassegehalt von rund 70 % steigen die Bröckelverluste stark an. Notwendig hierfür sind in der Regel ein Zettvorgang und schonendes ein- bis mehrmaliges Wenden mit dem Kreiselzettwender, je nach Witterungsverlauf und Aufwuchsmenge (Abbildung 3). Eine Mahd mit Aufbereiter trägt zu einem beschleunigten

nigten Anwelkvorgang bei. Bei einer Mahd mit einem Doppelmessermähwerk entfällt der Zettvorgang, da das Material nach dem Mähen breitflächig abgelegt wird. Das Anwelkgut wird je nach Witterungsbedingungen und Trocknungskapazität ein bis zwei Tage nach dem Mähen eingefahren.

Zur Bergung sollten beim losen Verfahren möglichst Ladewagen mit Förderschwingen oder Kettenförderer eingesetzt werden, da das Erntegut beim Schneiden und Laden möglichst nicht verdichtet werden soll (Abbildung 4). Kurzschnittladewagen mit Rotor, wie sie bei der Silageprozesskette zum Einsatz kommen, sind nur dann geeignet, wenn es zwei Rotoren, einen zum Schneiden und einen zum Laden gibt. Unabhängig vom Ladewagentyp ist darauf zu achten, dass dieser locker beladen wird.

Ein lockeres gleichmäßiges Befüllen der Trocknungsbox mit einem Heukran (eine geschlossene Kabine mit Klimatisierung wird empfohlen) bildet die Voraussetzung für den Trocknungserfolg (Abbildung 5 + 6). Ziel ist dabei über die gesamte Boxenfläche in jeder eingebrachten Schicht für den Trocknungsvorgang einen gleichmäßigen Luftwiderstand zu erreichen. In Abhängigkeit der Feuchtigkeit und der Bestandszusammensetzung des Anwelkguts soll die Schichthöhe einer Charge 2 – 4 m nicht überschreiten. Eine um 10 % höhere Feuchtig-



Abb. 4: Schonendes Laden mit Schwingenladewagen (Bildquelle: Markus Hofmann, LfL 2018)

keit des Anwelkguts führt im Bereich von 50 – 70 % Trockenmassegehalt fast zu einer Verdopplung der abzutrocknenden Wassermenge (1,6 - 1,9-fache Wassermenge). Die Trocknungsdauer soll in allen Fällen 80 h nicht überschreiten, idealerweise ist eine Charge nach 40 – 60 h getrocknet. Während des Befüllens sollte die Heutrocknungsanlage im Außenluftbetrieb laufen (vergleiche Kapitel 4.4.2), um die Verschmutzungsgefahr am Wärmetauscher des Luftentfeuchters gering zu halten. Mit Schnellverschlüssen leicht abnehmbare Schutzgitter am Wärmetauscher an der Zuluftseite des Luftentfeuchters erleichtern den Reinigungs- und Wartungsaufwand (Abbildung 7). Gerade beim 1. Schnitt verschmutzen Löwenzahnblüten



Abb. 5 + 6: Anwelkgut abladen und einlagern mit dem Heukran in die Trocknungsbox (Bildquelle: Juliana Mačuhová, LfL 2019)

leicht den Luftentfeuchter. Im Allgemeinen ist eine Reinigung mit Staubsauger und/oder Kompressor (in einzelnen Fällen auch mit einem Hochdruckreiniger, hierzu vorab die Freigabe des Herstellers einholen) insbesondere der Lamellen von Zeit zu Zeit notwendig, um die Effizienz des Luftentfeuchters zu gewährleisten. Darüber hinaus ist bei Luftentfeuchtern die Führung eines Prüfbuches mit Einträgen von Erst- und Folgeprüfungen der Dichtigkeit des Kältekreislaufes bzw. Reparaturen verpflichtend.

Beim Befüllen der Trocknungsbox sollte bereits warme Luft, entweder die warme Außenluft oder die zusätzlich angewärmte Luft aus der Dachabsaugung genutzt werden, um die gesamte Heutrocknungsanlage und den Heustock aufzuwärmen und zu durchlüften. Die Wärmeenergie, die über die Belüftung während des Befüllens in den Heustock eingebracht werden kann, erleichtert die Trocknung mit Luftentfeuchter im Umluftbetrieb vor allem in der ersten Nacht entscheidend. Da zum einen der Luftentfeuchter im Umluftbetrieb bei einer höheren Ablufttemperatur über dem Heustock effizienter arbeitet und zum anderen während des Befüllens somit bereits einiges an Wasser abgetrocknet werden kann.

Während der Trocknung ist der Luftvolumenstrom in der Trocknungsbox nicht konstant und muss dem aktuellen Trockenmassegehalt des



Abb. 7: Luftentfeuchter mit zuluftseitigem Gitter für den Grobschmutz an der Anströmseite des Wärmetauschers (Bildquelle: Markus Hofmann, LfL 2018)

Heustocks angepasst werden. Zu Beginn der Trocknung ist ein hoher Luftvolumenstrom erforderlich ($\sim 0,13 \text{ m}^3/\text{s}$ pro m^2 Boxenfläche) und gegen Ende der Trocknung ist ein niedrigerer Luftvolumenstrom zweckmäßig ($\sim 0,07 \text{ m}^3/\text{s}$ pro m^2 Boxenfläche). Um gegen Ende der Trocknung das restliche Wasser abzuführen, sind niedrige Luftmengen mit geringer relativer Luftfeuchtigkeit nötig, dafür reicht ein geringerer Luftvolumenstrom. Bei unnötig hohem Luftvolumenstrom gegen Ende der Trocknung steigt der Energiebedarf stark an.

Sobald die relative Luftfeuchtigkeit der Abluft über dem Heustock unter 50 % fällt, beginnt die Phase der Nachbelüftung. Dabei wird über mehrere Tage der Radialventilator für ein bis zwei Stunden in Betrieb genommen. Steigt dabei die relative Luftfeuchtigkeit der Abluft über 50 % an, wird solange belüftet, bis sie wieder unter diesen Wert fällt. Es ist empfehlenswert die Nachbelüftung an Schönwettertagen über angewärmte Luft aus der Dachabsaugung ohne Inbetriebnahme des Luftentfeuchters durchzuführen. Die Phase der Nachbelüftung endet, sobald die relative Luftfeuchtigkeit der Abluft über dem Heustock nach mehreren Tagen dauerhaft unter 50 % bleibt.

Wenn in der Trocknungsbox noch eine bereits fertig getrocknete Charge liegt und die neue Charge zum Trocknen auf diese daraufgelegt wird, so ist darauf zu achten, dass die Zuluft zur Trocknungsbox möglichst unter 50 % relative Luftfeuchtigkeit liegt, um ein Wiederbefeuchten der bereits fertig getrockneten Charge zu vermeiden. Insgesamt steigt durch die zusätzlich zu durchlüftende, bereits fertig getrocknete Charge, der Strombedarf für den Radialventilator leicht an.

Bei der Unterdachtrocknung ist eine Überwachung und Sichtkontrolle des Trocknungsprozesses nötig. Dies kann durch Begehen des Heustocks, durch eine Temperatur- und Feuchtemessung oder die Messung der Wärmestrahlung durch eine Wärmebildkamera, welche die

Temperaturunterschiede der Heustockoberfläche angezeigt, unterstützt werden. Gegen eine eventuelle Selbsterwärmung bei unvollständiger Trocknung muss mit Temperatursonden auch nach der Trocknung noch kontrolliert werden.

4. Technische Anforderungen

4.1 Funktionsprinzip eines Luftentfeuchters

Die Heutrocknung mit Luftentfeuchtern kommt sowohl bei Systemen mit Trocknungsboxen als auch bei Systemen mit Rundballen zum Einsatz (vergleiche Abbildung 2). Die Luftentfeuchtung erfolgt nach dem Prinzip einer Wärmepumpe (Abbildung 8). Bei der Luftentfeuchtung wird durch Kondensation die absolute Feuchtigkeit in der Luft verringert, wodurch sich das Sättigungsdefizit der Luft vergrößert. Der Luftentfeuchter entzieht dabei der anströmenden feuchten Luft durch das Verdampfen eines Kältemittels im Verdampfer Wärme. Durch die Abkühlung der Luft steigt die relative Luftfeuchtigkeit an, bis die Kondensation eintritt. Im Phasenübergang von Wasser aus dem dampfförmigen in den flüssigen Zustand wird Kondensationswärme freigesetzt (ca. 0,68 kWh pro kg Kondensat). Das kühle Kältemittel des Luftentfeuchters nimmt im Verdampfer sowohl die Energie aus der Abkühlung der Luft als auch die Kondensationswärme aus der Wasserabscheidung auf. Nach dem Verdampfer strömt das Kältemittel im Luftentfeuchter in den Verdichter. Im Verdichter wird das Kältemittel komprimiert und in den Kondensator geleitet. Die Kompression führt zu einer Erhitzung des Kältemittels. Damit kann die abgekühlte und entfeuchtete Luft, die nach dem Verdampfer den Kondensator durchströmt, erwärmt werden. Die Luft nimmt dabei die im Verdampfer entzogene Wärme und die freigesetzte Kondensationsenergie auf. Zusätzlich setzt der Verdichter Abwärme frei, die ebenfalls von der getrockneten Luft aufgenommen wird. Der größte Anteil der Wärmeenergie entsteht aus der Kondensation des Wasser-

dampfs. Aus dem Einsatz von 1 kWh elektrischer Energie lassen sich dadurch 5 – 7 kWh Heizenergie zur Luftanwärmung gewinnen. Nach dem Kondensator kommt das Kältemittel an das Expansionsventil. An diesem Ventil wird der Druck stark reduziert, was zu einer Abkühlung des Kältemittels führt, um erneut den Verdampfer zu durchströmen und Energie aufzunehmen. Der Kreislauf beginnt von vorne.

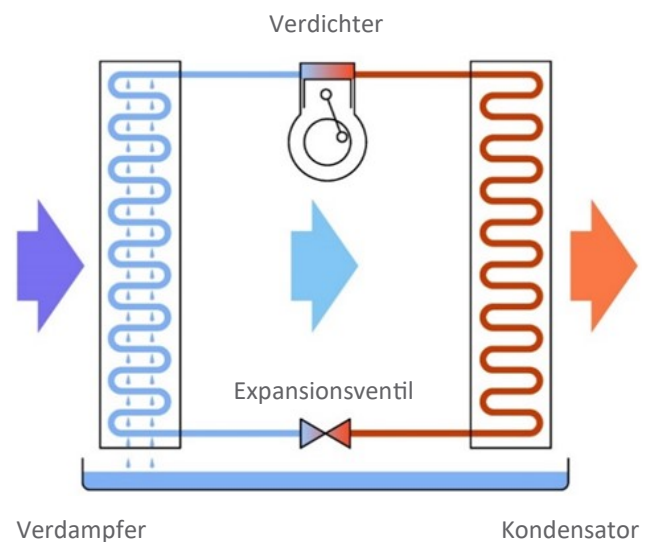


Abb. 8: Prinzip des Luftentfeuchters (Quelle: LfL, ILT 4c)

4.2 Spezielle Bauarten von Luftentfeuchtern

Neben dem in Abbildung 8 dargestellten grundlegenden Aufbau eines Luftentfeuchters gibt es noch spezielle Bauarten von Luftentfeuchtern. So ist ein Luftentfeuchter mit Kreuzstromwärmetauscher am Markt verfügbar. Bei dieser Bauart wird die Abluft vom Heustock zunächst über einen Wärmetauscher geführt, bevor sie in den Verdampfer gelangt und abgekühlt sowie entfeuchtet wird. Der Wärmetauscher kühlt die Luft bereits etwas ab, so dass sie schon „vorgekühlt“ zum Verdampfer gelangt. Auf dem Weg vom Verdampfer zum Kondensator passiert die kalte entfeuchtete Luft den Wärmetauscher in der Gegenrichtung und nimmt dabei die Wärme aus der Abluft über den Heustock auf, bevor sie im Kondensator weiter aufgeheizt wird (vergleiche 4.4.1, Abbildung 10).

Weiterhin unterscheiden sich die Luftentfeuchter der verschiedenen Hersteller bezüglich der Lamellenoberfläche und dem Lamellenabstand der Wärmetauscher sowie in der Anzahl und Anordnung der kältemittelführenden Rohre im Wärmetauscher. Ebenso können Luftentfeuchter (wie im Kapitel 4.4.4 beschrieben) mit einem Frequenzumformer ausgestattet sein, um den Strombedarf anhand der aktuell verfügbaren Strommenge zu regeln. Auch gibt es verschiedene Filtersysteme, die vor dem Verdampfer an-

gebracht werden können, um eine Verschmutzung der Wärmetauscher, die zu einer Reduzierung des Luftdurchsatzes führen kann, zu erschweren bzw. zu verhindern. Gleichzeitig kann dadurch das Reinigungsintervall verlängert werden.

Daneben gibt es auch Kompaktsysteme, bei denen der Luftentfeuchter zusammen mit dem Radialventilator in einem kompakten Bauelement fertig installiert geliefert und eingebaut werden kann. Die genannten speziellen Bauarten können ebenfalls, wie im Kapitel 4.4 beschrieben, eingesetzt werden.

Eine heute nur noch selten verwendete Art von Luftentfeuchtern stellen Luftentfeuchter für den Bypassbetrieb dar. Beim Bypassbetrieb wird nur ein Teil der Abluft über dem Heustock zurück zum Luftentfeuchter geführt und von diesem aufbereitet. Dazu ist in der Regel am Luftentfeuchter ein zusätzlicher Axialventilator angebracht, um die Abluft aktiv durch den Luftentfeuchter zu transportieren. Die Zuluft zum Heustock setzt sich dann aus dem aufbereiteten Teilluftstrom vom Luftentfeuchter und einem weiteren Teilluftstrom meist von der Dachabsaugung zusammen.

4.3 Dimensionierung und Kennzahlen eines Luftentfeuchters für die Heutrocknung

Ausschlaggebend bei der Dimensionierung des Luftentfeuchters ist der Luftvolumenstrom bzw. Luftdurchsatz. Die für die Wärmeenergieerzeugung maßgebende Leistungszahl sinkt unter anderem bei großer Temperaturspreizung des Kondensators und des Verdampfers. Durch diese physikalischen Zusammenhänge wird klar, dass der Betrieb des Luftentfeuchters stark von der Temperatur der zu entfeuchtenden Luft abhängt und

bei zu hohen ($> 40 \text{ }^\circ\text{C}$) oder zu niedrigen ($< 10 \text{ }^\circ\text{C}$) Zulufttemperaturen nicht mehr effizient arbeitet. Bei niedrigen Zulufttemperaturen (unter $8 - 10 \text{ }^\circ\text{C}$) kann es zur Eisbildung am Verdampfer kommen. Dies lässt sich jedoch durch eine automatische Heißgasrückführung (CPC-Regelung) oder einen Heizstab vermeiden bzw. beheben. Der Radialventilator und der Luftentfeuchter müssen aufeinander und auf

die Größe der Trocknungsboxen abgestimmt sein. Der energetisch optimale Betriebsbereich des Radialventilators sollte im Bereich von $0,07 - 0,13 \text{ m}^3/\text{s}$ Luftvolumenstrom pro m^2 Fläche der Trocknungsboxen liegen, da mit dieser Luftmenge eine effiziente Trocknung im Heustock erfolgen kann. Bei geringer relativer Luftfeuchtigkeit der Abluft über dem Heustock (gegen Trocknungsende) sollte der Luftdurchsatz grundsätzlich durch den Luftentfeuchter kleiner (in Richtung $0,07 \text{ m}^3/\text{s}$ Luftvolumenstrom pro m^2 Fläche der Trocknungsbox), bei hoher relativer Luftfeuchtigkeit der Abluft über dem Heustock (bei Trocknungsbeginn) dagegen größer (in Richtung $0,13 \text{ m}^3/\text{s}$ Luftvolumenstrom pro m^2 Fläche der Trocknungsbox) gewählt werden. Dies entspricht den Anforderungen von Seiten der Luftführung im Heustock. Dort sollte zu Trocknungsbeginn der Luftdurchsatz ebenso höher sein als bei Trocknungsende. Ein Grund ist, dass gegen Trocknungsende das Wasser aus den Grashalmen erst nach außen gelangen muss, um abgetrocknet zu werden. Dieser Vorgang dauert bei den Grashalmen länger als bei den Blättern, wodurch auch weniger Luftdurchsatz notwendig ist, um die auf der Oberfläche des Trocknungsprodukts aufnehmbare Feuchtigkeit abzutrocknen.

Luftentfeuchter können auch zur Ballentrocknung eingesetzt werden. Der energetisch optimale Betriebsbereich des Radialventilators sollte bei der Ballentrocknung im Bereich von $0,14 - 0,28 \text{ m}^3/\text{s}$ Luftvolumenstrom pro m^2 Ballenstirnfläche liegen.

Für den Luftentfeuchter sollte die Luftgeschwindigkeit am Wärmetauscher $2,5 - 3,2 \text{ m/s}$ betragen. Somit ist die Anströmfläche des Wärmetauschers auf die Grundfläche der Trocknungsboxen abzustimmen. Je 100 m^2 Trocknungsboxengrundfläche ist eine Anströmfläche von et-

wa 3 m^2 empfehlenswert. Als Faustzahlen für den Leistungsbedarf eines Luftentfeuchters ergeben sich $1 - 2 \text{ kW}$ je 10 m^2 Grundfläche der Trocknungsboxen. Zusätzlich kann von der Verdichterleistung die Anströmfläche berechnet werden: Pro 10 kW Verdichterleistung ist eine Anströmfläche von rund $1,7 \text{ m}^2$ einzuplanen.

Bei einer geringen Luftgeschwindigkeit am Wärmetauscher des Luftentfeuchters (z. B. $1,5 \text{ m/s}$) besteht durch die tiefe Abkühlung das Risiko der Verdampfervereisung. Gleichzeitig wird bis zur Vereisung der Taupunkt sicher unterschritten und die Luft verliert viel absolute Feuchte, aber es wird nur eine geringe Leistungszahl erreicht. Ist dagegen die Luftgeschwindigkeit am Wärmetauscher höher (z. B. 4 m/s), hat die Luft nicht mehr genügend Zeit zur Abkühlung im Wärmetauscher und der Taupunkt wird eventuell nicht mehr erreicht. Somit erfolgt eine mangelhafte Wasserabscheidung und es wäre eine hohe Leistungszahl erforderlich. In den üblichen Betriebspunkten eines Luftentfeuchters zur Heutrocknung liegt die Leistungszahl (CoP) bei $5 - 7$.

Entscheidend für die Trocknungsleistung eines Luftentfeuchters ist die Ausführung des Verdampfers. Für die Kondensleistung und für die Lufterwärmung wirken sich eine große Lamellenoberfläche mit entsprechender Kältemittelführung und somit gleicher Oberflächentemperatur günstig aus. Ebenso trägt eine die Selbstreinigung unterstützende und das Reinigen von Hand erleichternde Konstruktion zu einer hohen Kondensleistung bei. Generell wird empfohlen, technische Datenblätter von den Firmen mit einem Angebot anzufordern, um eine bessere Vergleichbarkeit der Systeme zu haben. Wünschenswert wäre ein neutraler Vergleich der Technik z. B. über die DLG, der jedoch derzeit nicht durchgeführt wird.

4.4 Kombiniertes Betrieb Luftentfeuchter mit solarer Luftanwärmung und weitere Betriebsarten

Die Nutzung von Sonnenenergie über eine Dachabsaugung oder Warmluftkollektoren bietet eine kostengünstige Energiequelle zur solaren Luftanwärmung. Je nach Anlagenkonfiguration wird die derart erwärmte Luft ausschließlich für die Trocknung verwendet und bei ungünstigen Witterungsbedingungen (Luft vom Dach weist ein zu geringes Sättigungsdefizit auf) ausschließlich auf den Luftentfeuchter im Umluftbetrieb umgeschaltet. Andere Anlagen optimieren den Energieeinsatz nicht nur durch einen Wechsel von Dachabsaugung und Luftentfeuchter, sondern es wird die Luft aus der Dachabsaugung anstelle der Abluft aus dem Heustock entfeuchtet. Eine weitere Möglichkeit ist der Abluftbetrieb, bei dem zwar die Luft aus

dem Heustock im Verdampfer abgekühlt und entfeuchtet wird, dann jedoch verworfen, d. h. nach draußen abgegeben wird. Stattdessen wird die meist über die Dachabsaugung kommende Außenluft über den Kondensator erwärmt und schließlich zum Heustock geführt. Der Betrieb eines Luftentfeuchters mit wechselnder Zuluftführung und automatischer Steuerung ermöglicht die höchste Effizienz. Ziel ist dabei immer, möglichst viel Energie im System zu halten. Dabei entscheidet die Steuerung, welche Luft (Luft aus der Dachabsaugung oder Abluft über dem Heustock) mit weniger Energieaufwand entfeuchtet bzw. angewärmt werden kann (vergleiche folgende Kapitel 4.4.1 bis 4.4.4).

4.4.1 Ausschließlicher Umluftbetrieb

Die Trocknungsluft zirkuliert hier dauerhaft im System und wird über den Luftentfeuchter ohne (Abbildung 9) oder mit (Abbildung 10) Kreuz-

stromwärmetauscher geführt, somit ist der Luftentfeuchter dauerhaft im Einsatz.

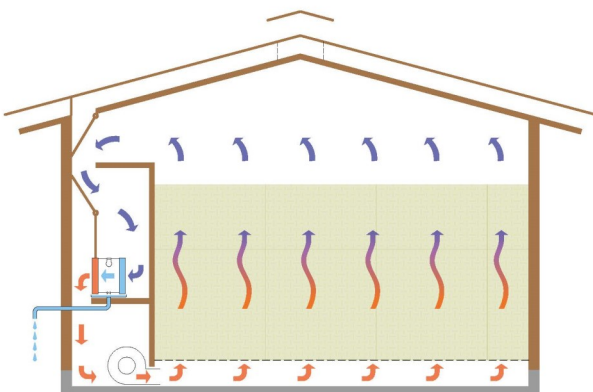


Abb. 9: Umluftbetrieb mit Luftentfeuchter (Quelle: LfL, ILT 4c)

→ Bei dieser Anlagenkonfiguration ist der Energieverbrauch am höchsten. Dieser Einsatz eines Luftentfeuchters ist bei längeren Schlecht-

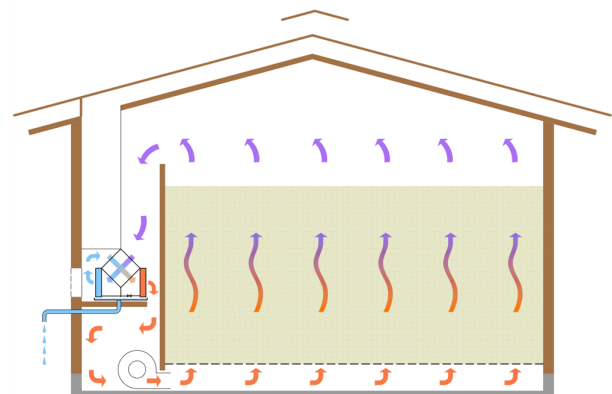


Abb. 10: Umluftbetrieb mit Luftentfeuchter mit Kreuzstromwärmetauscher (Quelle: LfL, ILT 4c)

wetterphasen möglich oder wenn eine Dachabsaugung nicht realisierbar und daher nicht vorhanden ist.

4.4.2 Wechsel zwischen Umluft- und Außenluftbetrieb

4.4.2.1 Außenluftbetrieb über Dachabsaugung ohne Luftentfeuchter

Die Außenluft wird über die Dachabsaugung durch die Sonne angewärmt und tagsüber bei Schönwetterphasen direkt zur Trocknung verwendet (Abbildung 11). Nachts oder bei Schlechtwetter wird im Umluftbetrieb mit Luftentfeuchter (Kapitel 4.4.1) getrocknet.

→ Da bei der Kombination dieser zwei Varianten (Außenluftbetrieb über Dachabsaugung ohne Luftentfeuchter während des Tages und Umluftbetrieb mit Luftentfeuchter nachts) der Energieverbrauch optimiert ist, werden diese generell empfohlen.

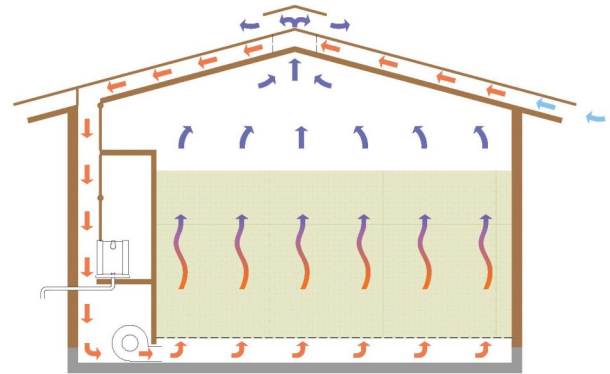


Abb. 11: Außenluftbetrieb ohne Einsatz des Luftentfeuchters (Quelle: LfL, ILT 4c)

4.4.2.2 Außenluftbetrieb über Dachabsaugung und Luftentfeuchter

Die Außenluft wird über die Dachabsaugung angewärmt und über den Luftentfeuchter entfeuchtet und zur Trocknung verwendet (Abbildung 12). Eine Steuerung entscheidet anhand von Messwerten eingebauter Sensoren, wann der Wechsel zwischen Umluftbetrieb (Kapitel 4.4.1) und den zwei Arten des Außenluftbetriebs (Kapitel 4.4.2.1 oder Kapitel 4.4.2.2) jeweils günstig ist, so dass der Energieverbrauch am niedrigsten ist. Diese Betriebsart kann auch mit einem Luftentfeuchter mit Kreuzstromwärmetauscher realisiert werden (ist nicht als Schemazeichnung dargestellt).

→ Der Energieverbrauch ist bei dieser Variante am niedrigsten und es handelt sich um das schnellste Trocknungsverfahren, allerdings ist

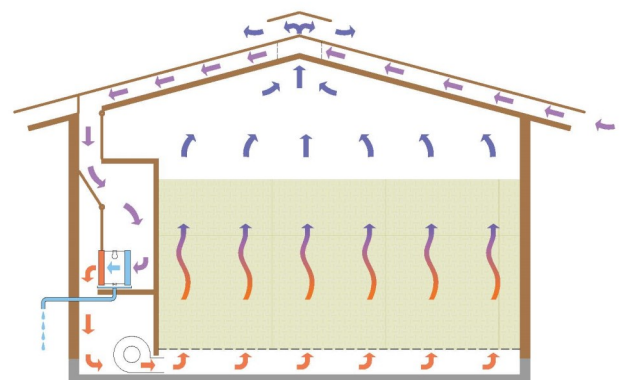


Abb. 12: Außenluftbetrieb mit Einsatz des Luftentfeuchters (Quelle: LfL, ILT 4c)

eine entsprechende Steuerung mit Klappen und Sensoren erforderlich.

4.4.3 Abluftbetrieb

Es kann ein ausschließlicher Abluftbetrieb des Luftentfeuchters in Kombination mit einem Kreuzstromwärmetauscher realisiert werden (Abbildung 14). Dabei wird dauerhaft die Au-

ßenluft über den Kreuzstromwärmetauscher direkt zum Kondensator geführt und an zwei Stellen angewärmt. Die Abluft aus dem Heustock wird ebenfalls über den Kreuzstromwär-

metauscher zum Verdampfer geführt und in zwei Schritten unter den Taupunkt abgekühlt und anschließend in die Umwelt abgegeben (Abbildung 13). Der Abluftbetrieb kann auch mit einem Luftentfeuchter ohne Kreuzstromwärmetauscher realisiert werden, ist derzeit aber nicht auf dem Markt verfügbar.

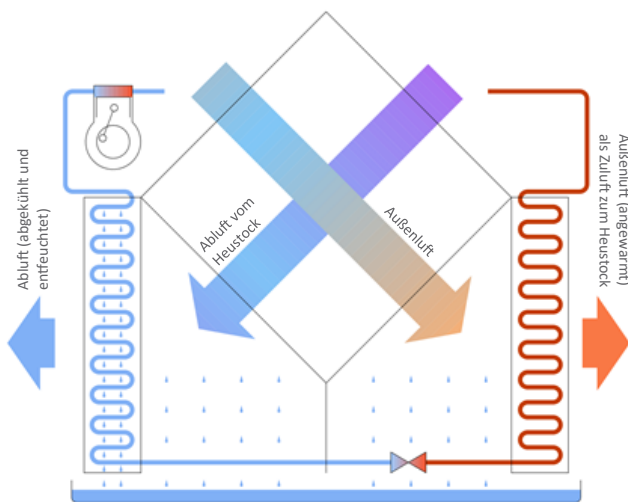


Abb. 13: Luftführung beim Abluftbetrieb durch den Luftentfeuchter mit Kreuzstromwärmetauscher (Quelle: LfL, ILT 4c)

4.4.4 Ergänzungen

Eine zusätzliche Luftanwärmung zwischen Luftentfeuchter und Radialventilator führt zu einer schnelleren Trocknung. Dazu ist es sinnvoll gegebenenfalls am Betrieb verfügbare „kleinere“ Wärmequellen (z. B. Hackschnitzelheizung oder die Abwärme eines Stromaggregats) zu verwerten.

Der Einsatz eines frequenzgesteuerten Verdichters ist bei begrenzter Stromverfügbarkeit am Betrieb und zur gezielten Regelung sinnvoll.

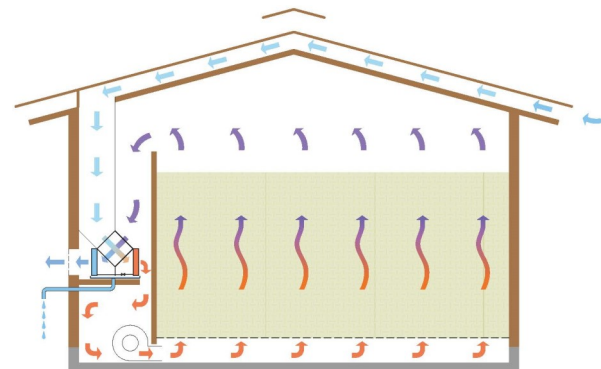


Abb. 14: Abluftbetrieb mit Luftentfeuchter mit Kreuzstromwärmetauscher (Quelle: LfL, ILT 4c)

→ Der Energieverbrauch ist bei dieser Variante durch die zusätzliche Nutzung des Kreuzstromwärmetauschers sehr niedrig. Es handelt sich um das schnellste Trocknungsverfahren, allerdings ist eine entsprechende Steuerung mit Klappen und Sensoren erforderlich. Ideal ist es, den Abluftbetrieb mit einer Dachabsaugung und Steuerung zu kombinieren, so dass wahlweise Abluftbetrieb, Außenluftbetrieb oder Umluftbetrieb möglich ist, je nachdem mit welcher Betriebsart, die wenigste Energie für die Trocknung eingesetzt werden muss.

4.5 Steuerung der Heutrocknungsanlage mit Luftentfeuchter

Die Steuerung der Anlage nimmt beim Wechsel zwischen den verschiedenen Anlagenkonfigurationen eine Schlüsselrolle ein. So regelt sie über Drucksensoren und den Frequenzumformer die Luftmenge, die der Radialventilator durch den Heustock drückt und optimiert gleichzeitig die Zusammensetzung der anströmenden Luft in dem sie je nach Temperatur und Feuchtigkeit der Außenluft bzw. Umluft zwischen den verschiedenen Betriebsarten wechselt. Auch der Luftentfeuchter kann über die Steuerung, sofern er über einen Frequenzumformer verfügt, geregelt werden; in jedem Fall kann die Steuerung den Luftentfeuchter ein- und ausschalten z. B. wenn er in den Bereich der oben genannten kritischen Betriebszustände (Vereisung) kommt. Die Steuerung zeigt dem Bediener die aktuelle Betriebsart samt Stellung der verschiedenen Klappen/Jalousien an. Weiterhin können an der Steuerung die Lufttemperatur, die Luftfeuchtigkeit und der Luftdruck an verschiedenen Stellen im System abgelesen werden. Oft dokumentiert die Steuerung auch den realisierten Anlagenbetrieb, so dass im Nachhinein Ursachen für Probleme bei der Heutrocknung nachgegangen werden kann und z. B. defekte Sensoren ersetzt werden können oder Bedienfehler durch den Anlagenbetreiber erläutert werden können. Weiterhin bieten Anlagen mit modernen Steuerungen einen Online-Support bzw. eine dauerhafte Anlagenüberwachung durch den Hersteller als Option.

Zur Realisierung der verschiedenen Anlagenkonfigurationen werden Klappensteuerungen bzw. Jalousien im Zu- und Abluftsystem benötigt. Weiterhin sind diese im Zuluftsystem zu den Trocknungsboxen zur Belüftung verschiedener Trocknungsboxen erforderlich. Automatisch gesteuerte Umschaltklappen zum Wechsel zwischen den verschiedenen Anlagenkonfigurationen sind daher vorteilhaft, um möglichst viel solare Luftanwärmung zu realisieren aber auch den Energieeinsatz zu optimieren. Die feuchte

Abluft aus dem Heustock wird bei Außenluftbetrieb der Trocknungsanlage über eine Firstentlüftung oder die Öffnung einer Giebelseite abgeführt (Abbildung 15 + 16).

Neben der Steuerung der verschiedenen Anlagenkonfigurationen werden die Umschaltklappen und Jalousien auch für die Realisierung einer möglicherweise angestrebten Intervallbelüftung benötigt. Bei der Intervallbelüftung wird die zu trocknende Heumenge auf zwei Trocknungsboxen aufgeteilt und dann im Wechsel getrocknet. Dabei wird die aufbereitete Zuluft meist eine Stunde in je eine der beiden Trocknungsboxen geleitet. In der Zwischenzeit bleibt der andere Heustock unbelüftet. Laut Praxisausagen verringert sich dadurch die Trocknungszeit im Vergleich zur Trocknung der gesamten Charge in einer Trocknungsbox. Eine Kurzzeit-Intervalltrocknung ist bei geringem Anfangswassergehalt des Trockengutes oder gegen Ende des Trocknungsvorganges sinnvoll.

4.6 Weitere Optimierungsmöglichkeiten für den Luftentfeuchterbetrieb

Während des Umluftbetriebs ist es zweckmäßig die Luft über dem Trocknungsgut z. B. der Trocknungsbox möglichst vollständig abzusaugen und damit die Wärme zu erhalten sowie eine gezielte Luftumwälzung durch den Luftentfeuchter zu gewährleisten (Abbildung 17 + 18). Gerade im Umluftbetrieb kann die Lufttemperatur erheblich ansteigen. Kennzeichnend für eine entsprechend gute Anlagenkonzeption sind hier Erwärmungen in der Größenordnung

von 4 – 8 °C in der ersten Nacht. Generell sind daher Energieverluste zu minimieren. Dabei sollten die luftführenden Anlagenteile möglichst dicht sein und die Transmissionswärmeverluste durch eine Wärmeisolierung minimiert werden (insbesondere im Bereich des Bodens der Trocknungsboxen und der Luftkanäle). Bei der Planung ist auf eine möglichst kompakte Gesamtanlage mit kurzen Luftkanälen zu achten.



Abb. 15 + 16: Verschließbare Abluftöffnung am Giebel – geschlossen bei Umluftbetrieb (links), offen bei Außenluftbetrieb (rechts; Bildquelle: Christoph Waltner, 2019)



Abb. 17 + 18: Abtrennung einer Heubox durch eine Rollplane: die feuchte Luft wird gezielt über den Umluftkanal zum Luftentfeuchter geführt, somit werden die Energieverluste minimiert (Bildquelle: Christoph Bodenmüller, 2019)

Anhand der relativen Abluftfeuchte kann grob auf den erreichten Trockenmassegehalt im Heustock geschlossen werden (Tab. 1). Programmierbare Anlagensteuerungen erlauben ausgehend von Messungen der Temperatur und der

relativen Luftfeuchtigkeit der Trocknungsluft an verschiedenen Stellen im System eine Abschätzung der verbleibenden Trocknungsdauer.

Tab. 1: Schätzen des Trocknungsfortschritts anhand der relativen Luftfeuchtigkeit der Abluft über dem Heustock (Quelle: Aschauer et al., 2014)

Relative Luftfeuchtigkeit der Abluft (%)	90	80	70	60	50
Trockenmassegehalt des Materials im Heustock (%)	68	74	78	82,5	85

Um zu gewährleisten, dass die Tragsicherheit und Dauerhaftigkeit von Holzbauteilen im Gebäude nicht geschädigt wird ist sicherzustellen,

dass relevante Bauteile einer relativen Luftfeuchtigkeit von mehr als 85 % nicht länger als wenige Wochen im Jahr ausgesetzt werden.

4.7 Wartung des Luftentfeuchters

Grundsätzlich ist ein Gerät mit Kältemittel auf Dichtigkeit zu prüfen. Die Dichtigkeitsprüfung darf nur von zertifizierten Betrieben durchgeführt werden. Seit 01.01.2015 erfolgt die Berechnung der Prüfintervalle gemäß EU-VO 517/2014. Dabei werden die Kategorien nach dem CO₂-Äquivalent des Kältemittels in der Anlage eingeteilt:

- ab 5 t CO₂-Äquivalent: jährliche Prüfung
- ab 50 t CO₂-Äquivalent: halbjährliche Prüfung
- ab 500 t CO₂-Äquivalent: 1/4-jährliche Prüfung

Dabei berechnet sich das CO₂-Äquivalent aus dem Produkt des „Global Warming Potential“ (GWP) des Kältemittels und der Füllmenge in kg. Im Regelfall (unter den relevanten Herstellern) wird für den Luftentfeuchter zur Heutrock-

nung das Kältemittel R407C eingesetzt. Das Kältemittel R407C hat ein GWP von 1.774. Das bedeutet, dass pro 1 kg R407C in der Anlage von einem CO₂-Äquivalent in Höhe von 1.774 kg auszugehen ist. Im Regelfall werden je Luftentfeuchter zwischen 10 und 40 kg R407C verwendet. Somit entspricht diese Füllmenge einem CO₂-Äquivalent zwischen 17,7 und 71,0 t. Damit ist bei kleineren Anlagen eine jährliche Prüfung und bei größeren eine halbjährliche Prüfung vorgesehen.

Neben der Prüfung auf Dichtigkeit gibt es keine weiteren gesetzlichen Vorgaben zur Wartung bzw. Prüfung von Luftentfeuchtern. Die Wärmetauscher sollten aber regelmäßig gereinigt werden, damit die Anlage effizient läuft. Der Einsatz von Luftfiltern vor dem Verdichter kann das Reinigungsintervall der Wärmetauscher deutlich reduzieren.

5. Verfahrenskosten mit Luftentfeuchter

Eine Heutrocknungsanlage mit Luftentfeuchter verursacht feste Kosten und variable Kosten. Die festen Kosten entstehen durch die Investition in die benötigten Gebäude, baulichen Anlagen und in die Trocknungstechnik. Diese Kosten fallen immer an, unabhängig ob eine Heutrocknung stattfindet. Demgegenüber werden die variablen Kosten (z. B. Stromverbrauch) direkt durch die Trocknung verursacht.

Bei neun aktuellen Bauten mit Förderung aus dem Allgäu (Realisierung in den Jahren 2017 bis 2019) wurde das Investitionsvolumen (Bau und Technik) erhoben. Die Förderfälle umfassten separate Neubauten (7) und Anbauten (2) an bestehenden Gebäuden. Im Mittel wurden damals 133 €/m³ Lagerraum (Spanne von 110 bis

160 €/m³) benötigt, wobei seitdem diese Ausgaben angestiegen sind. Hiervon entfallen ungefähr zwei Drittel auf die Baumaßnahmen (88 €/m³) und ein Drittel auf den Technikauf (45 €/m³).

Ein landwirtschaftlicher Betrieb mit Heufütterung im Winter (18,0 kg Heufrischmasse je Kuh und Tag) und Weidegang im Sommer mit Heuzufütterung (5,5 kg Heufrischmasse je Kuh und Tag) benötigt für ein Jahr in Abhängigkeit der Anzahl an Winterfüttertagen folgenden Lagerraum bei einer Lagerdichte von ca. 100 kg TM/m³ bzw. ca. 120 kg Heufrischmasse/m³ (alle im Folgenden berechneten Werte basieren auf 120 kg Heufrischmasse/m³).

Tab. 2: Auswahl zum notwendigen Lagerraumbedarf (m³) pro Milchkuh mit und ohne Nachzucht

Lagerraumbedarf (m ³)	Milchkuh mit Nachzucht	Milchkuh ohne Nachzucht
200 Winterfüttertage mit 10 % Lagerraumreserve	57 m ³	41 m ³
200 Winterfüttertage ohne Lagerraumreserve	52 m ³	38 m ³
180 Winterfüttertage mit 10 % Lagerraumreserve	48 m ³	39 m ³
180 Winterfüttertage ohne Lagerraumreserve	43 m ³	35 m ³

Es liegt je nach betrieblicher Gegebenheit eine große Spannweite beim Lagerraumbedarf vor (Tabelle 2). Daraus folgt ein Investitionsbedarf von 5.800 bis 7.600 € je Milchkuh mit Nach-

zucht (bzw. 4.700 bis 5.500 € je Milchkuh ohne Nachzucht). Hieraus resultieren die in der folgenden Tabelle dargestellten festen Kosten.

Tab. 3: Feste Kosten für Heutrocknungsanlagen

Feste Kosten (€)	Milchkuh mit Nachzucht € je Kuh und Jahr	Milchkuh ohne Nachzucht € je Kuh und Jahr
Gebäudekosten		
Abschreibungsdauer 30 Jahre	222 – 294 €	182 – 211 €
Reparatur, Unterhalt 1 %		
Zinskosten 3 %		
Technikkosten		
Abschreibungsdauer 15 Jahre	201 – 265 €	164 – 191 €
Reparatur, Unterhalt 2 %		
Zinskosten 3 %		
Gesamtkosten	423 – 559 €	346 – 402 €

Die variablen Kosten für die Heutrocknung hängen vom Wassergehalt bei der Einlagerung und den Energiekosten ab. Bei einer Luftentfeuchtertrocknung mit Nutzung einer Dachabsaugung streut dieser Wert, je nach Ausgangsfeuchte und Anteil der Dachwärmenutzung sehr stark. Bei einem Strompreis von 26,39 Cent/kWh ergeben sich somit mittlere variable Kosten in Höhe von 3,41 €/dt TM Heu (Spanne von 2,20 € bis 5,60 € pro dt TM Heu).

Bei dem zuvor genannten Lagerraumbedarf von 43 bis 57 m³ je Milchkuh mit Nachzucht (35 bis 41 m³ je Milchkuh ohne Nachzucht) werden 52 bis 69 dt Heu (bzw. 43 bis 50 dt Heu) eingelagert. Für 1 dt Heu wird 0,86 dt TM angesetzt. Damit ergeben sich variable Kosten von 153 bis 202 € pro Jahr bei der Milchkuh mit Nachzucht (bzw. 125 bis 145 € pro Jahr bei der Milchkuh ohne Nachzucht).

Die gesamten Kosten betragen somit 576 bis 761 € pro Jahr bei der Milchkuh mit Nachzucht (bzw. 471 bis 547 € pro Jahr bei der Milchkuh ohne Nachzucht). Diese Zahlen stellen einen groben Orientierungsrahmen dar, da sie nur auf einer vergleichsweise kleinen Datenbasis mit

Investitionskosten aus den letzten Jahren aufbauen.

Diesen Verfahrenskosten sind die Vorteile einer Heutrocknungsanlage mit Luftentfeuchter gegenüberzustellen. Eine exakte wirtschaftliche Bewertung dieser Vorteile ist teilweise klar erfassbar (z. B. Zuschlag für Heumilch, höhere Grundfutterleistung), oftmals aber auch sehr schwierig ermittelbar (z. B. geringere Schlagkraft bei Teilen der Erntetechnik pro Charge erforderlich, wodurch der Einsatz kleinerer Technik möglich ist). Ebenso ist teilweise eine Bemessung in € auch nicht möglich (z. B. verbesserte Arbeitszufriedenheit, Imagesteigerung für Tourismusaktivitäten). Zudem bewirkt die betriebsindividuelle Sachlage eine sehr große Bandbreite bei den festen und variablen Kosten der Heutrocknung (z. B. Nutzung vorhandener Gebäudesubstanz als kostengünstige Einbaulösung oder Nutzung vorhandener Abwärme zusätzlich zum Luftentfeuchter). Demzufolge muss jeder Landwirt eine eigene Kalkulation für seine betriebliche Situation durchführen und hierauf aufbauend auch eine Entscheidung für seinen eigenen Betrieb fällen.

6. Fazit

Vorteile Luftentfeuchter:

- ▶ energieeffizienteste Technik zur Heutrocknung bei Betrachtung auf Basis kWh/kg Wasserentzug
- ▶ Wärmequelle nicht zwingend erforderlich
- ▶ wetterunabhängige, hohe Betriebssicherheit
- ▶ schonenderes Verfahren durch niedrigere Temperatur der entfeuchteten Luft und schnelle Trocknung
- ▶ bessere und sichere Futterqualität
- ▶ erhöhte Grundfutteraufnahme mit Einsparung von Kraftfutter
- ▶ verbesserte Arbeitszufriedenheit durch automatisch gesteuerte Trocknung

Nachteile Luftentfeuchter:

- ▶ hoher Strombedarf im Betrieb
- ▶ hohe Anschlussleistung erforderlich, daher auf vielen Betrieben nur mit zusätzlichem Stromaggregat umsetzbar
- ▶ hohe Investitionskosten
- ▶ höherer baulicher Aufwand für zusätzliche Luftkanäle
- ▶ hohe technische Komplexität der Technik und Steuerung

7. Weiterführende Literatur/Links

- ▶ Mehrere Richtlinien zum Bau von Heutrocknungsanlagen wurden in Kooperation mit bzw. von den österreichischen und schweizer Kollegen erarbeitet und sind auf der Seite <https://www.lfl.bayern.de/ilt/pflanzenbau/gruenland/162738/index.php> (ganz unten) verfügbar bzw. verlinkt.
- ▶ Eine Liste der Technikhersteller und Lieferanten ist auf derselben Internetseite erhältlich.
- ▶ Weiterhin gibt es eine Fachinformation des Biogas Forum Bayern zum Thema „Möglichkeiten der Nutzung von Kraft-Wärme-Kopplung zur Heubelüftung Teil 1: Technische und bauliche Grundlagen, Förderung“
- ▶ Eine Zusammenstellung verschiedener weiterer Informationen hauptsächlich aus Österreich und der Schweiz ist unter <http://www.heutrocknung.org/heu-als-grundfutter/unterlagen/> verfügbar.
- ▶ Zum Thema landwirtschaftliche Nutzgebäude in Holzbauweise ohne vorbeugenden chemischen Holzschutz: Forschungsvorhaben. Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion der Technischen Universität München (TUM) und Institut für Landtechnik und Tierhaltung der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL), https://www.bgu.tum.de/fileadmin/w00blj/hb/04_Forschung/02_Abgeschlossene_Forschungsprojekte/2018/18_SB_Landwirtschaftliche_Nutzgebäude.pdf

Arbeitsgemeinschaft Landtechnik und
Landwirtschaftliches Bauwesen
in Bayern e.V. (ALB)
Vöttinger Straße 36, 85354 Freising
Telefon: 08161 / 887 - 0078
Telefax: 08161 / 887 - 3957
E-Mail: info@alb-bayern.de
Internet: www.alb-bayern.de