

## Verbesserung der Heubergetechnik

**Improvement of hay production**

**FKZ: 12NA117**

**Projektnehmer:**

Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. (KTBL)

Bartningstraße 49, 64289 Darmstadt

Tel.: +49 6151 7001-0

Fax: +49 6151 7001-123

E-Mail: [ktbl@ktbl.de](mailto:ktbl@ktbl.de)

Internet: [www.ktbl.de](http://www.ktbl.de)

**Autoren:**

Nilles, Lisa; Klöble, Ulrike

Gefördert durch das Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages im Rahmen des Bundesprogramms Ökologischer Landbau und andere Formen nachhaltiger Landwirtschaft.

Die inhaltliche Verantwortung für den vorliegenden Abschlussbericht inkl. aller erarbeiteten Ergebnisse und der daraus abgeleiteten Schlussfolgerungen liegt beim Autor / der Autorin / dem Autorenteam. Bis zum formellen Abschluss des Projektes in der Geschäftsstelle Bundesprogramm Ökologischer Landbau und andere Formen nachhaltiger Landwirtschaft können sich noch Änderungen ergeben.

Schlussbericht zum Projekt des  
Kuratoriums für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e. V. (KTBL)

im Rahmen des Bundesprogramms Ökologischer Landbau und anderer Formen nachhaltiger  
Landwirtschaft

## **Verbesserung der Heubergetechnik**

Projektnummer 2812NA117

Laufzeit 05.2013 bis 31.08.2016

Darmstadt. 4. Oktober 2016

## Kurzfassung

Mit hochwertigem Belüftungsheu kann Futter erzeugt werden, das auch den Anforderungen von Milchkühe mit hoher Milchleistung gerecht wird und das mit dem Futterwert der Grassilage gleichgesetzt werden kann. Voraussetzungen sind eine optimierte Bergungstechnik und moderne Heubelüftungsanlagen.

Ziel dieses Verbundprojektes war es daher die Heubereitung beispielhaft an verschiedenen Verfahrensschritten zu untersuchen und so zu einer „Verbesserung der Heubergetechnik“ beizutragen und einen aktuellen Stand des Wissens zu vermitteln. Die Projektstruktur war so angelegt, dass möglichst alle Teilarbeitsschritte der Verfahrenskette betrachtet wurden.

Schwerpunkt des Teilprojekts des KTBL war es eine betriebswirtschaftliche Verfahrensbewertung zu erarbeiten, welche insbesondere bei der Heutrocknung die Vielzahl unterschiedlicher Techniken zur Luftanwärmung einbezieht, wie Unterdachabsaugung, Luftanwärmung über Biogasabwärme, Hackschnitzelofen und die Entfeuchtertechnik. Als Informations- und Entscheidungshilfe für interessierte Betriebsleiter und Berater wurde das KTBL-Heft „Belüftungsheu: Qualität – Verfahren – Kosten“ erstellt, in dem das Thema Belüftungsheu in fundierter Form zusammengefasst wurde und so eine Grundlage für den interessierten Personenkreis darstellt.

Dieses Heft gibt zunächst einen Überblick über die Einsatzmöglichkeiten des Belüftungsheus in der Wiederkäuerernährung im Vergleich zu Bodenheu und Grassilage. Ebenso wird auf die Besonderheiten bei der Heuwerbung und -bergung eingegangen. Der Schwerpunkt liegt auf den verschiedenen Trocknungsverfahren; es werden die Boxen- oder Ballentrocknung und unterschiedliche Luftanwärmungsverfahren beschrieben. Die Wirtschaftlichkeit der Belüftungsheuerzeugung wird beispielhaft für einige definierte Anlagen dargestellt. Abschließend wird an Beispielen aus Praxisbetrieben die Vielfalt möglicher Lösungen in der Belüftungsheuerzeugung aufgezeigt.

Die Boxentrocknung eignet sich vor allem für Betriebe mit ausschließlicher Heufütterung. Der Vorteil der Boxentrocknung liegt in der höheren Schlagkraft. Die maximale Einfuhrfeuchte von etwa 40 % reduziert die Bröckelverluste am Feld und ermöglicht eine schnelle Ernte. Auch die Nachbelüftung ist einfacher als bei der Ballentrocknung, da der Lagerraum gleichzeitig Trocknungsraum sein kann, wo das Heu auf dem Belüftungsrost liegen bleibt.

Die Ballentrocknung wird eher auf Betrieben eingesetzt, die ihr Futter teilweise als Grassilage und teilweise als Belüftungsheu einbringen wollen. Die Ballentrocknung ist schwieriger als die Boxentrocknung, da durch die Zahl der Trocknungsplätze eine beschränkte Schlagkraft vorgegeben ist und ein verdichtetes Gut getrocknet wird.

## Abstract

With high quality barn-dried hay, forage can be produced that meets the requirements of even high yielding dairy cows and equals the feed value of grass silage. Prerequisites are an optimised harvesting technique and a modern hay drying plant.

The aim of this joint project was therefore to investigate the procedural steps in making good barn-dried hay and so contribute towards an “improvement of hay harvesting technique” whilst reporting all the available current knowledge on the subject. The project was designed so that all separate operations in the process could be examined.

The KTBL subproject role focused on developing a method for evaluating farm management procedures for hay drying considering, in particular, the many different techniques for heating the required air such as under-roof extraction, warming with residual heat from the biogas

production process or use of wood chip furnaces, as well as air moisture extraction systems. As information source and decision aid for interested farm managers and agricultural advisors the KTBL has produced the booklet: “Barn-dried hay: quality – technique – costs“ in which the theme barn-dried hay is comprehensively explained, offering a fundamental source of knowledge for everyone interested in the procedure.

First of all, this booklet gives an overview of the feeding possibilities with barn-dried hay in ruminant nutrition compared with those of field-dried hay and grass silage. Also dealt with are special techniques in mowing and harvesting the grass. Focused on are the different drying methods including bulk drying and bale drying, as well as different air heating techniques. The economics of producing barn-dried hay is demonstrated on the basis of several defined systems. In conclusion, the numerous possible solutions for producing barn-dried hay are demonstrated through examples from working farms.

Barn-drying of loose hay, or box drying, is above all practical on farms where hay is the only forage on offer. Its particular advantage is the large amounts of crop that can be dried at the same time. The maximum moisture content of the brought-in grass in this case is around 40 % and this reduces head and stem losses in the field and enables a fast harvest. In such systems, the storage area can also be the drying location and this means re-ventilation during storage is easier than with bale drying systems because the hay remains on the aeration floor slats right through the feeding season.

Bale drying tends to be applied more on farms that want their forage partly as grass silage and partly as barn-dried hay. Bale drying is more complicated than loose hay or box drying in that the number of bale drying locations in a barn is a limiting factor to throughput, as is also the drying of densely packed bales.

## Inhaltsverzeichnis

1	Einführung.....	5
1.1	Gegenstand des Vorhabens .....	5
1.2	Ziele und Aufgabenstellung des Projekts, Bezug des Vorhabens zu den einschlägigen Zielen des BÖLN .....	5
1.3	Planung und Ablauf des Projekts .....	5
1.3.1	Abstimmung im Verbundprojekt.....	5
1.3.2	Abstimmung mit Experten .....	6
<b>2</b>	<b>Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde .....</b>	<b>6</b>
2.1	Verfahren der Belüftungstrocknung .....	6
2.1.1	Grundlagen der Belüftungstrocknung .....	6
2.1.2	Luftanwärmungs- und Luftentfeuchtungsverfahren .....	8
2.2	Boxentrocknung .....	11
2.3	Ballentrocknung .....	14
<b>3</b>	<b>Material und Methoden .....</b>	<b>18</b>
3.1	Kosten der Belüftungsheuwerbung .....	18
3.2	Investitions- und Energiebedarf der Heutrocknung .....	18
4	Darstellung der Ergebnisse.....	21
5	Diskussion der Ergebnisse.....	27
<b>6</b>	<b>Angaben zum voraussichtlichen Nutzen und zur Verwertbarkeit der Ergebnisse .....</b>	<b>28</b>
<b>7</b>	<b>Gegenüberstellung der ursprünglich geplanten zu den tatsächlich erreichten Ziele; Hinweise auf weiterführende Fragestellungen .....</b>	<b>28</b>
<b>8</b>	<b>Zusammenfassung .....</b>	<b>28</b>
<b>9</b>	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>29</b>
10	Übersicht über alle im Berichtszeitraum vom Projektnehmer realisierten Veröffentlichungen .....	30

## 1 Einführung

### 1.1 Gegenstand des Vorhabens

Mit hochwertigem Belüftungsheu kann Futter erzeugt werden, das auch den Anforderungen von Milchkühe mit hoher Milchleistung gerecht wird und das mit dem Futterwert der Grassilage gleichgesetzt werden kann. Voraussetzung sind eine optimierte Bergungstechnik und moderne Heubelüftungsanlagen.

### 1.2 Ziele und Aufgabenstellung des Projekts, Bezug des Vorhabens zu den einschlägigen Zielen des BÖLN

Um die Wirtschaftlichkeit der optimierten Heutechnik zu bewerten und ökonomische Argumente für die Heuproduktion für den Wissenstransfer zu erhalten, wird an die Arbeiten zur KTBL-Datensammlung „Futterbau“ (KTBL 2014) angeknüpft. Die gewonnenen Daten werden in die KTBL-Datenbanken eingepflegt sowie für Berechnungen und für Veröffentlichungen in der Online-Anwendung der KTBL-Datensammlung „Futterbau“ und im KTBL-Heft „Belüftungsheu: Qualität – Verfahren – Kosten“ aufbereitet. Somit ist auch eine ökonomische Bewertung der Optimierungsmaßnahmen möglich. Zielgruppen sind Praktiker, Berater, Auszubildende und Studierende. Aber auch Lehrkräfte und Sachverständige sollen angesprochen werden. Das Ziel dieses Heftes ist es, die empfehlenswerten Verfahren moderner Heutechnik anwendungsorientiert darzustellen. Die Inhalte beziehen sich sowohl auf Technik und Verfahren als auch auf Managementaspekte. Sie sollen komprimiert und leicht verständlich mit erklärenden Bildern und Grafiken dargestellt werden. Praxisbeispiele sollen erläutern, wie die gesamte Prozesskette Heu optimiert werden kann.

Das Vorhaben knüpft an das Ziel des BMELV an, Wissens- und Erfahrungslücken für nachhaltige Wirtschaftsformen zu schließen und damit die Wettbewerbsfähigkeit von der Erzeugung über die Verarbeitung bis zur Vermarktung landwirtschaftlicher Produkte nachhaltig zu stärken.

Die Ergebnisse werden unter [www.oekolandbau.de](http://www.oekolandbau.de), [www.orgprints.org](http://www.orgprints.org) und in den KTBL-Online-Anwendungen veröffentlicht. In diesen Anwendungen können sie online von Interessierten für eigene Berechnungen genutzt werden. Darüber hinaus werden sie in zukünftigen KTBL-Veröffentlichungen verbreitet werden.

### 1.3 Planung und Ablauf des Projekts

#### 1.3.1 Abstimmung im Verbundprojekt

Im Teilprojekt der Universität Kassel wurde zunächst die Heuwerbetechnik untersucht, dabei standen insbesondere die Prozessgrößen Gutablage, Trockensubstanzgehalt und Bröckelverluste im Vordergrund. Ebenfalls untersucht wurde die Durchströmung von Heurundballen.

Im Teilprojekt des KTBL wurden im letzten Drittel des Projektes zusätzlich zu den Feldversuchen der Universität Kassel Berechnungen zur Bewertung der Wirtschaftlichkeit durchgeführt und der Wissenstransfer in die Praxis intensiviert. Die durchgeführten Berechnungen zur Wirtschaftlichkeit wurden eng mit der projektbegleitenden KTBL-Arbeitsgruppe „Heubergetechnik“ abgestimmt. In der Arbeitsgruppe wurde festgelegt, welche Heubelüftungstechniken für einen modernen Heubetrieb in Frage kommen. Anhand dieser Zusammenstellung wurden für gegebene Parameter verschiedene Planbetriebe entworfen. Die Auswertung erfolgt anhand der Investitions- und Energiekosten. Dazu wurden Preise verschiedener Heutrocknungsanlagen bei den entsprechenden Herstellern abgefragt. Ebenso wurden Landwirte, welche eine Heutrocknungsanlage einsetzen, zu ihren Erfahrungen mit der Anlage und den Investitionskosten befragt.

Zwischen beiden Teilprojekten fand ein regelmäßiger Informationsaustausch statt.

### 1.3.2 Abstimmung mit Experten

Am 29.08.2015 gründete sich die KTBL-Arbeitsgruppe „Heubergetechnik“. Mit ihr wurde die Gliederung des KTBL-Hefts „Belüftungsheu: Qualität – Verfahren – Kosten“ vereinbart. Während der Bearbeitungszeit des Hefts haben sich die Arbeitsgruppenmitglieder intensiv in die Manuskripterstellung eingebracht.

In der projektbegleitenden Arbeitsgruppe arbeiteten diese Personen: Björn Bohne, Universität Kassel FB 11 Agrartechnik, Witzenhausen; Josef Braun, Freising; Alfons Fübbeker, Landwirtschaftskammer Niedersachsen, Oldenburg; Matthias Funk, Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. (KTBL), Darmstadt; Prof. Dr. Martina Hofmann, Hochschule Weihenstephan-Triesdorf, Fakultät Land- und Ernährungswirtschaft, Freising; Susanne Jak-schitz-Wild, LfL Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft, Institut für Landtechnik und Tierhaltung, Freising; Matthias Kittl, Landwirtschaftskammer Salzburg, Heumilch und Heuwirtschaft, Salzburg (Österreich); Lisa Nilles, Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. (KTBL), Darmstadt; Alfred Pöllinger, Höhere Bundeslehr- und Forschungsanstalt (HBLFA) Raumberg-Gumpenstein, Irdning (Österreich); Stefan Thurner, LfL Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft, Institut für Landtechnik und Tierhaltung, Freising.

## **2 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde**

### 2.1 Verfahren der Belüftungsheutrocknung

#### 2.1.1 Grundlagen der Belüftungstrocknung

##### 2.1.1.1 Einfluss der Trocknungsluft

Um einen frisch gemähten Futterbestand, der meist eine Restfeuchte von 80 % aufweist, auf eine Lagerfeuchte von 13 % Restfeuchte zu trocknen, müssen große Mengen an Wasser abgeführt werden. Abbildung 1 zeigt das zu entziehende Wasser je Kilogramm (kg) lagerfähiges Heu. Um eine Tonne Heu mit einem Restrockensubstanzgehalt von 87 % zu erhalten, müssen aus einem frisch gemähten Bestand 3,35 t Wasser abgeführt werden (Abb. 1). Daher ist die Trocknung von Belüftungsheu immer ein Kompromiss zwischen den Bröckelverlusten am Feld und den Trocknungskosten unter Dach.

Jede künstliche Trocknung führt zu zusätzlichen Kosten, weswegen eine Vortrocknung auf dem Feld die kostengünstigste Trocknungsmethode ist, jedoch müssen dabei die Bröckelverluste eingeschränkt werden. Anzustreben ist für die Boxenbelüftung ein Erntegut mit 60 % Trockenmasse (TM), aus dem nur noch 450 kg Wasser pro Tonne Belüftungsheu bis zur Lagerstabilität abgeführt werden müssen. Ein um 10 % höherer Feuchtigkeitsgehalt im Erntegut würde die Trocknungszeit unter Dach und damit auch die Trocknungskosten verdoppeln (Wirlleitner et al. 2014). Jedoch können die tatsächlich erreichten Werte teilweise zwischen 50–70 % TM schwanken.

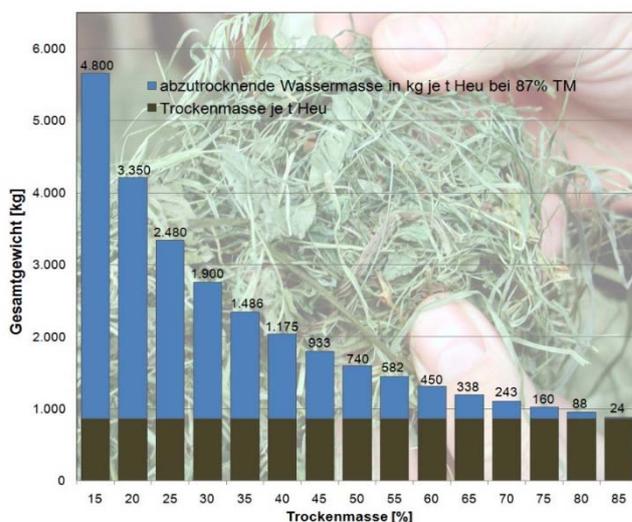


Abb. 1: Abzutrocknende Wassermenge je kg lagerfähiges Belüftungsheu mit 87 % TM (Wirleitner, 2016)

Bei der Belüftungstrocknung im Lager sind folgende Faktoren zu berücksichtigen: Das Gut kann nur getrocknet werden, wenn die Umgebungsluft ein Sättigungsdefizit aufweist, weil dann der Wasserdampfdruck der Umgebungsluft niedriger ist als der im Trocknungsgut und so überhaupt erst Wasser aufgenommen werden kann. Um Heu auf einen Endtrockenmassegehalt von 87 % zu trocknen, muss die Umgebungsluft eine relative Luftfeuchtigkeit von 45–50 % unterschreiten (Aschauer et al. 2014).

Das Sättigungsdefizit der Trocknungsluft kann durch Erwärmen oder Entfeuchten erhöht werden. Dabei sollte beachtet werden, dass bei einer Erwärmung des Belüftungsheus über 45 °C, vor allem gegen Ende des Trocknungsprozesses, das Eiweiß denaturiert wird und dadurch schlechter für das Tier verfügbar ist. Beispielsweise entweichen bei einer Erwärmung des Belüftungsheus über 40 °C die ätherischen Öle (Agru Heubergetechnik 2016). Ab rund 50 °C wird das im Futter vorhandene Rohprotein denaturiert. Bei feuchtem Futter geschieht dies erst bei höheren Temperaturen.

#### 2.1.1.2 Rekondensation

Das Belüftungsheu trocknet in Schichten. Die warme, trockene Luft steigt in der Box von unten nach oben – bei der Ballentrocknung auch von innen nach außen – durch das Trocknungsgut und reichert sich mit Feuchtigkeit an. Durchströmt die Trocknungsluft auch die oberen bzw. äußeren Zonen, kann sie keine weitere Feuchtigkeit aus dem Gut aufnehmen, da sie bereits gesättigt ist. Wenn die Trocknungsluft angewärmt wird, kann sie mehr Wasser aufnehmen, kühlt sich aber gleichzeitig auch rasch ab. Dabei wird der Taupunkt unterschritten und es kommt zur Rekondensation, d. h. das Wasser lagert sich an das Heu an. Die Rekondensation findet innerhalb des Heustocks oder an der Grenzschicht zur Umgebungsluft statt. Damit kann es trotz aktiver Heutrocknung zur Schimmelbildung im Belüftungsstock oder Rundballen kommen (Wirleitner et al. 2014). Mit einer Luftentfeuchtung der Trocknungsluft kann dieses Problem gemindert werden. Auf jeden Fall muss die Trocknungsanlage solange laufen, bis auch die oberste Schicht ausreichend getrocknet ist. Um Schimmelbildung und bakteriellen Abbau zu verhindern bzw. Atmungsprozesse zu beenden, darf die Trocknung aber auch nicht zu lange dauern: Boxenheu sollte in maximal 60 Stunden und Ballenheu in 24–30 Stunden so trocken sein, dass es dauerhaft lagerfähig ist (Agru Heubergetechnik 2015).

Wenn das überschüssige Wasser im Trockengut nicht schnell genug abgeführt werden kann, ist die Trocknungsanlage überlastet. Aus diesem Grund gibt es eine Grenze für die eingebrachte Wasserlast je Quadratmeter Boxgrundfläche bzw. je Kubikmeter Rundballen. Diese

Grenze wird als Wasserdeckel bezeichnet und mit 50 kg Wasser/m<sup>2</sup> Boxenfläche angegeben. (Nydegger und Wirleitner 2014). Er bestimmt die maximale Einfuhrmenge und Einlagerungshöhe. Bei den Rundballen entspricht dies einer maximalen Dichte von 100–130 kg TM/m<sup>3</sup>.

Ein wesentliches Element bei der Belüftungstrocknung ist die gleichmäßige Durchströmung des gesamten Heustocks bzw. Rundballens durch die Trocknungsluft. Ausschlaggebend hierfür ist ein möglichst gleichmäßiges Material, das ohne Verdichtung geerntet wurde und möglichst gleichmäßig in die Box eingelagert wurde. In der Regel wird während der Trocknung der Stock in einzelnen Bereichen mit dem Heukran umgeschichtet, um Zonen, die zu dicht lagern und nicht von der Trocknungsluft durchströmt werden, aufzulockern. Haben sich Kamine gebildet, werden diese beim Umschichten mit feuchterem Material bedeckt, sodass dort die Luft nicht mehr austritt. Beim Rundballen hingegen kann im Nachhinein kaum noch reagiert werden, da kommt es auf die gleichmäßige Pressung an. Nur durch Ändern der Position auf dem Belüftungsstrang kann ggf. noch Einfluss auf die Trocknung eines z. B. zu fest gepressten Ballens genommen werden (Thurner 2016).

### 2.1.2 Luftanwärmungs- und Luftentfeuchtungsverfahren

Bei der Heutrocknung kommt es darauf an, unabhängig von der Witterung arbeiten zu können, um auch unter ungünstigen Bedingungen und vor allem während der Nachtstunden eine gute Trocknung zu gewährleisten. Die im Folgenden dargestellten Luftanwärmungs- und Luftentfeuchtungsverfahren gelten sowohl für Boxen- oder Rundballentrocknungsanlagen.

In älteren Anlagen wird noch vielfach mit Kaltbelüftung gearbeitet, d. h. die Trocknungsluft wird nicht angewärmt. Diese Anlagen sind jedoch stark witterungsabhängig und für Belüftungsheu erzeugende Betriebe nicht mehr zu empfehlen. In der professionellen Heutrocknung ist eine höhere Wasseraufnahme je Kubikmeter Trocknungsluft und damit ein schnelleres Trocknungsergebnis notwendig. Dies ist entweder durch Erwärmung oder Entfeuchtung der Luft oder einer Kombination aus beidem möglich (Tab. 1). Mit diesen Anlagen wird der Trocknungsbetrieb witterungsunabhängiger und die Konservierung erfolgt schneller, wodurch weniger Verluste auftreten und das Futter insgesamt hochwertiger ist.

Tab. 1: Vergleich der Verfahren zur Luftanwärmung oder -entfeuchtung (Agru Heubergetechnik 2015)

Verfahren zur Luftanwärmung oder -entfeuchtung	Vorteil	Nachteil
Unterdachabsaugung	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Sehr kostengünstige Wärmebereitstellung</li> <li>- Erhöhung der Stromausbeute bei PV-Anlagen durch Kühleffekt</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Von der Sonne und Tageszeit abhängig</li> <li>- Große Dachfläche notwendig</li> <li>- Druckverlust auf der Ansaugseite des Radialventilators → mehr Leistung erforderlich</li> </ul>
Wärmerückgewinnung	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Anwärmung der Außenluft bzw. Zuluft und damit Steigerung der Effizienz von Wärmetauschern und Luftentfeuchern</li> <li>- Verringerung des Leistungsbedarfs und somit der Investitionskosten bei KWK-Anlagen, Hackschnitzelheizungen oder Wärmetauschern</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Zusätzlicher baulicher und technischer Aufwand für Abluftführung</li> </ul>
Wärmetauscher (Wärmequelle: Biogasanlage oder Holzheizung)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Nutzung der BHKW-Abwärme im Sommer</li> <li>- Holz möglicherweise selbst vorhanden</li> <li>- Nutzung regenerativer Wärme (z. B. Hackschnitzelheizung)</li> <li>- Witterungsunabhängig</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Für große Heutrocknungsanlagen → Biogasanlage oder Hausheizung meist nicht ausreichend</li> </ul>
Luftentfeuchter	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Gefahr der Rekondensation wird reduziert</li> <li>- Witterungsunabhängig</li> <li>- Hohe Trocknungsleistung</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Sehr hoher Investitionsbedarf</li> <li>- Hoher elektrischer Anschlusswert erforderlich</li> <li>- Zusätzlicher baulicher und technischer Aufwand für den Umluftbetrieb</li> </ul>

Solarmodule	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Geringere Dachfläche erforderlich durch hohen Wirkungsgrad</li> <li>- Aufbau auf vorhandenes Dach leichter möglich</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Von Sonne abhängig</li> <li>- Höhere Investitionskosten</li> <li>- Druckverlust auf der Ansaugseite des Radialventilators → mehr Leistung erforderlich</li> </ul>
-------------	------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

### 2.1.2.1 Unterdachabsaugung

Bei der Unterdachabsaugung (Abb. 2) wird die warme Luft genutzt, die sich unter der Dachfläche ansammelt (Aschauer et al. 2014). Auf landwirtschaftlichen Betrieben gibt es häufig große Dachflächen, die sich für die Gewinnung von Solarwärme eignen. Wird die Wärme unterhalb von Photovoltaikanlagen abgesaugt, werden zudem die Photovoltaikmodule gekühlt, was zu einer Steigerung des Stromertrages führen kann (Van Caenegem und Pasca 2006). Die Absaugfläche sollte mindestens das Drei bis Fünffache der Heustockfläche bei der Boxentrocknung betragen bzw. 3–8 m<sup>2</sup> je 100 kg Frischmasse bei der Ballentrocknung (Pöllinger et al. 2014, Kittl 2016). Beim Bau gilt es den richtigen Abstand passend zur Dachlänge zu wählen. Hier bietet die Software ARTSOKO (2010) eine entsprechende Hilfestellung für die Planung. Obwohl dieses Verfahren im Betrieb sehr kostengünstig ist, bleibt es dennoch witterungs- und tageszeitabhängig und unterliegt so gewissen Kapazitätsgrenzen (Weingartmann 2002). Je Quadratmeter Dachfläche kann mit 0,3 kW nutzbarer Wärmeleistung gerechnet werden (Kittl 2016). Der Einsatz der Unterdachabsaugung wird bei allen Heutrocknungsanlagen klar empfohlen. Zu beachten ist, dass sich der Anlagendruck auf der Ansaugseite um 75–120 Pa erhöht.

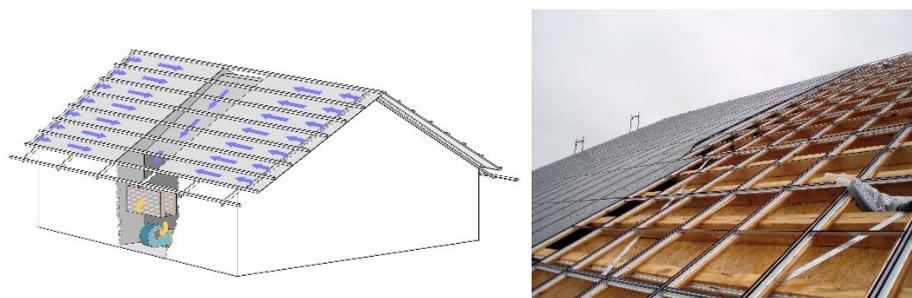


Abb. 2: Unterdachabsaugung – Schema und Ausführung (Wirleitner 2016, Braun 2016)

### 2.1.2.2 Wärmetauscher

Bei der Biogas- oder Holzgaserzeugung und Verwertung im Blockheizkraftwerk wird Wärme erzeugt, die vor allem im Sommer häufig nicht genutzt werden kann. Biogaswärme kann meist sehr günstig bezogen werden (0,02 €/kWh) und ist witterungsunabhängig; sie ist somit eine empfehlenswerte Wärmequelle.

Auch ein Scheitholz- oder Hackschnitzelofen kann zur Wärmebereitstellung genutzt werden. Die Kosten für Hackschnitzel belaufen sich auf 0,03 €/kWh. Ölöfen oder Gasbrenner sind aufgrund der geringen Nachhaltigkeit weniger empfehlenswert. Zudem können die Abgase bei einer Direktbefeuerung zu Dioxineintrag führen (Thurner 2016).

### 2.1.2.3 Dieselaggregat

Je nach verwendeter Technik müssen für die Heutrocknung hohe Anschlusswerte zur Verfügung gestellt werden, wenn gleichzeitig Lüfter und Entfeuchter betrieben werden. Häufig ist die Hausanschlussleistung begrenzt und oftmals nicht für die Anschlusswerte einer Heutrocknung ausreichend ausgelegt (Wirleitner et al. 2014). Deshalb kann es sinnvoll sein, ein zusätzliches Dieselaggregat zur Stromerzeugung in Spitzenzeiten bereitzustellen. Ein weiterer Vorteil ergibt sich aus der anfallenden Wärme des Aggregats, die auch zur Trocknung genutzt werden kann. Der Faktor von elektrischer Leistung des Aggregats zur Wärmeerzeugung beträgt etwa 1:1,8–2, d. h. je kWel entstehen 1,8–2 kWth.

#### 2.1.2.4 Luftentfeuchter

Bei der Entfeuchter-Trocknung wird die feuchte Luft über den Verdampfer geleitet, wobei Wärme entzogen wird (Abb. 3). Kühlt die Luft unter den Taupunkt ab, wird Wasser am Register abgeschieden. Die nun trockene und kühle Luft wird weiter zur Kondensatorseite geleitet und erwärmt sich dort aufgrund der Abwärme des Kühlaggregats. Die nun entfeuchtete und angewärmte Luft hat ein wesentlich höheres Sättigungsdefizit als die ursprüngliche Luft und kann so dem Belüftungsheu mehr Wasser entziehen als angewärmte aber nicht entfeuchtete Luft (Wirleitner et al 2014).

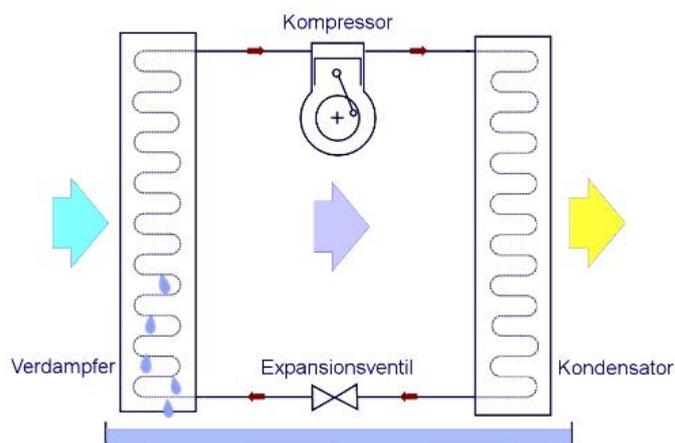


Abb. 3: Schema einer Luftentfeuchter-Wärmepumpe (Entfeuchter) (Wirleitner 2016)

Beim Betrieb von Entfeuchteranlagen wird zwischen Haupt- und Nebenstrom unterschieden: Bei Hauptstrom wird die gesamte Trocknungsluft entfeuchtet, im Nebenstrom wird nur ein Teil der Trocknungsluft entfeuchtet (Aschauer et al 2014).

Die Vollentfeuchtung kann entweder im Frisch- oder im Umluftverfahren durchgeführt werden. Im Frischluftverfahren wird Außenluft angesaugt, entfeuchtet, durch den Heustock geschickt und anschließend nach außen entlassen. Beim Umluftverfahren wird die durch den Heustock geleitete, feuchte Luft nochmals durch den Entfeuchter und anschließend wieder durch den Heustock geleitet. Durch das Umluftverfahren kann sich die Lufttemperatur deutlich erhöhen und die Kondensationswärme des abgeschiedenen Wassers voll ausgenutzt werden. Dabei sollte jedoch der Raum, in dem die Trocknungsluft umgewälzt wird, geschlossen bleiben (Wirleitner et al. 2014). Auch kann eine zusätzliche Heizung hinter dem Entfeuchter im Umluftbetrieb die Kondensleistung deutlich steigern (Wirleitner et al. 2014).

Außerdem gibt es Entfeuchter mit einem Kreuzstrom-Plattenwärmetauscher zur Steigerung der Energieeffizienz. Dabei ist dem Verdampfer und Kondensator jeweils ein Kreuzstrom-Plattenwärmetauscher vorgeschaltet, der über Kreuz zunächst die warme, feuchte Luft aus dem Heustock abkühlt, bevor sie in den Verdampfer geht und bis unter den Taupunkt weiter abgekühlt wird. Anschließend wird die entfeuchtete, kalte Luft aus dem Verdampfer wieder über den Kreuzstrom-Plattenwärmetauscher geführt, wobei sie erwärmt wird, bevor sie im Kondensator auf die endgültige Zieltemperatur gebracht wird. Auf Zieltemperatur gebracht wird sie wieder in den Heustock gedrückt. Durch den Einsatz des Kreuzstrom-Plattenwärmetauschers ergibt sich im Vergleich zur konventionellen Kondensationstrocknung ein Energieeinsparpotenzial von über 40 %, und zwar durch die Übertragung der thermischen Energie aus den beiden Luftströmen im Kreuzstrom-Plattenwärmetauscher (Schneider 2015, Waltner 2015).

Die Entfeuchtertechnik ist zwar weitgehend witterungsunabhängig, jedoch sind auch bei diesem Verfahren Einsatzgrenzen zu beachten: So sollte bei Außentemperaturen von unter 20 (bis 25) °C eher im Umluftverfahren als im Frischluftverfahren gearbeitet werden. Unter 10 °C oder bei einer Luftfeuchtigkeit unter 35–40 % ist der Einsatz des Entfeuchters wenig wirksam (Wirleitner et al. 2014).

Um eine hohe Trocknungsleistung zu erreichen und damit hohe Futterqualitäten zu gewährleisten, wird eine Kombination aus Unterdachabsaugung und Luftentfeuchtung mit einer anderen Luftanwärmung z. B. mit Biogasabwärme oder aus Hackschnitzelöfen empfohlen, zumal die Energie aus dem Dachraum kostenlos ist. Generell ist für das Umluftverfahren darauf zu achten, dass die Lufträume im Gebäude nicht zu groß sind, sodass möglichst wenig Luft zirkuliert und somit die Wärme erhalten bleibt.

#### 2.1.2.5 Wärmerückgewinnung

Ähnlich wie in der Haustechnik bei Raumbelüftungsanlagen kann die Wärme der Abluft aus dem Heustock ebenfalls für die Anwärmung der Zuluft von draußen verwendet werden. Im Prinzip funktioniert der Kreuzstrom-Plattenwärmetauscher für die Wärmerückgewinnung wie bereits beim Entfeuchter beschrieben, nur dass er hier ohne Entfeuchter zum Einsatz kommt. Der zusätzliche Aufwand besteht darin, dass die Führung der Abluft gezielt erfolgen muss. So muss diese wie beim Umluftverfahren mit dem Entfeuchter gebündelt und mittels Ventilator durch den Wärmetauscher nach außen gebracht werden. Die Zuluft für die Trocknung wird dadurch vorgewärmt, bevor sie in einem weiteren Wärmetauscher auf die Zieltemperatur gebracht wird. Mit dieser Anordnung können bis zu 50 % des Wärmebedarfs eingespart werden.

#### 2.1.2.6 Solarmodule

Aufgrund ihres Aufbaus nutzen neuartige Solarmodule die Sonnenenergie effizienter als die Unterdachabsaugung. So können je nach Hersteller mit mehr als  $700 \text{ W/m}^2$  gerechnet werden, was mehr als der doppelten Wärmemenge einer Unterdachabsaugung entspricht (Thurner und Jakschitz-Wild 2015). Die speziellen Hochleistungssolarmodule sind daher speziell für Betriebe mit kleiner Dachfläche oder bei Betrieben, bei denen keine Unterdachabsaugung realisiert werden kann, geeignet.

## 2.2 Boxentrocknung

In der Boxentrocknung wird das Belüftungsheu mithilfe eines Krans in eine Trocknungsbox eingebracht, die in einer Halle vor Witterungseinflüssen geschützt wird. Eine Boxentrocknung besteht aus einer an vier Seiten umwandeten Trocknungsbox, durch die von unten mithilfe eines Radiallüfters die trockene Luft durch einen Rost geblasen wird, die anschließend das Trocknungsgut durchströmt und trocknet.

Weitere Komponenten dienen der Luftanwärmung oder -entfeuchtung und können aus einer Unterdachabsaugung, einem Entfeuchter, einem Wärmetauscher oder einer Heizung bestehen. Eine Steuerung regelt das Zusammenwirken der Komponenten.

### 2.2.1 Musteranlage

In der Abbildung 4 ist die Funktionsweise einer Boxentrocknung mit Unterdachabsaugung und Luftentfeuchter als Musteranlage dargestellt. Die Trocknungsluft wird mithilfe des Lüfters in die Box geblasen, wo sie das Trocknungsgut durchströmt. Die feuchte Luft kann nun entweder über die Firstentlüftung entweichen oder wird im Umluftverfahren zum Entfeuchter zurückgeführt, wo sie entfeuchtet und erwärmt wird. Des Weiteren ist eine Unterdachabsaugung zugeschaltet, die mit einer Umluftklappe gesteuert wird.

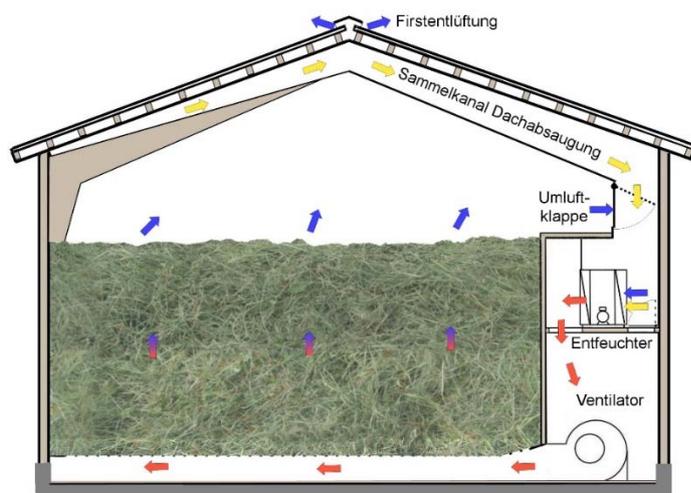


Abb. 4: Schema der Voll- und Teilentfeuchtung in der Boxentrocknung bei Entfeuchterbetrieb mit Unterdachabsaugung (Wirleitner, 2016)

Beim Betrieb einer Boxentrocknung sind verschiedene Parameter wichtig: So muss die belüftete Fläche und damit zusammenhängend der Lüfter mit Entfeuchter, Heizung und Unterdachabsaugung auf die Erntefläche abgestimmt sein. In Tabelle 2 sind die jeweiligen Kennzahlen zusammengestellt.

Tab. 2: Kennzahlen für Boxentrocknungsanlagen (Kittl 2015, Wirleitner 2015)

Merkmal	Parameter
Einfuhrfeuchte	30–45 % Restfeuchte
Dichte des Belüftungsheus	Durchschnitt 100 kg TM/m <sup>3</sup> (60–130 kg/m <sup>3</sup> )
<b>Maximale Boxengröße</b>	250 m <sup>2</sup> (teilweise bis 400 m <sup>2</sup> )
Boxenvolumen je Hektar Trocknungscharge	24–38 m <sup>3</sup>
Erstbeschickungshöhe	1,5–2,5 m (je nach Eingangsfeuchte)
Maximale Schichthöhe für Trocknung	6 m
Maximale Schütthöhe für neues feuchtes Belüftungsheu	3m
<b>Lüfterleistung</b>	1 kW je 10 m <sup>2</sup> Boxenfläche
Luftmenge	250 – 400 m <sup>3</sup> je m <sup>2</sup> Boxenfläche
Druck	150 Pa je m Schichthöhe + Zuschläge Bei gräser-/kräuterreichem Trockengut 125 Pa/m, bei ausgewogenem Trockengut 135 Pa/m, bei kleereichem Trockengut 160 Pa/m  + 75–120 Pa bei Dachabsaugung + 50–110 Pa bei Wärmetauscher/Entfeuchter
<b>Heizleistung</b>	1–2 kW netto je 1 m <sup>2</sup> Boxenfläche
<b>Entfeuchterleistung</b>	1–2 kW je 10 m <sup>2</sup> Boxenfläche 1–2 kW je kW Lüfterleistung
<b>Dachabsaugungsfläche</b>	3- bis 5-Fache der Boxenfläche
Leistung je m <sup>2</sup> Dachfläche	~ 0,3 kW

### 2.2.2 Konstruktion der Trocknungsbox

Die Trocknungsbox ist meist eine rechteckige Holzbox mit einem Rost am Boden. Die Form der Trocknungsbox sollte eher quadratisch als rechteckig sein mit einem Seitenverhältnis von maximal 1 zu 1,5 (Aschauer et al. 2014). Die Außenwände sollen luftdicht geschlossen sein, um die Luft durch das Trocknungsgut zu zwingen und ein Entweichen der Luft entlang der Außenwände zu vermeiden. Zusätzlich werden die Ränder des Rostes der Box mit Spannplatten abgedeckt (Abb. 5). Die Breite der Abdeckung richtet sich dabei nach der Boxengröße.



Abb. 5: Beispiele für den Aufbau einer Boxentrocknung: Unterbau, Rost, Seitenabdeckung und Höhenmarkierung (links, Wirleitner, 2016) und Höhenmarkierung an den Seitenwänden (rechts, KTBL)

Die Boxen bestehen meist aus einer Kantholzverstrebung, abgedeckt mit feuchtebeständigen OSB(oriented strand board)-Platten. Wichtig ist es hierbei, die statischen Anforderungen einzuhalten, damit beim Befüllen mit relativ feuchtem Belüftungsheu die Wände nicht auseinandergedrückt werden oder gar kollabieren (Thurner 2016). Für den Bodenrost können einfache Baustahlmatten verwendet werden. Wichtig sind die Markierungen an den Innenwänden, um beim Beschicken mit dem Kran die Füllhöhe abzuschätzen und eine gleichmäßige Befüllung zu gewährleisten. Dies verhindert die ungleichmäßige Abtrocknung des Belüftungsheus. Die Rosthöhe sollte mindestens 50 cm vom Boden betragen. Wände und Böden aus Beton sollten isoliert sein, um die Trocknungsluft nicht vorzeitig abzukühlen (Aschauer et al 2014). Jede Box soll mit einem Notausstieg versehen werden, um aus der Box herausklettern zu können. Dazu schraubt man am besten schräg geschnittene Leisten waagrecht im Abstand von 50 cm an die Innenseite der Boxenwand (Kittl 2016).

### 2.2.3 Befüllung der Box

Die gleichmäßige Befüllung der Trocknungsbox ist für den Trocknungserfolg entscheidend, sodass keine feuchten Nester oder Kamine entstehen können und die Trocknungsluft gleichmäßig durch den gesamten Heustock strömt. Eine Empfehlung ist, die Greiferzange abzusenken und mit rüttelnden Bewegungen zu öffnen. Ebenso soll der Lüfter während des Befüllens ab einem Meter Füllhöhe bereits laufen, um ein Setzen des Stockes zu vermeiden (Aschauer et al. 2014). Bei Entfeuchteranlagen sollte während des Befüllens im Frischluftbetrieb gearbeitet werden, um eine übermäßige Verschmutzung des Verdampfers zu vermeiden. Während des Trocknungsvorgangs sollte der Heustock möglichst nicht betreten werden, um Verdichtungen zu vermeiden. Werden wiederholt kleinere Frischgutmengen eingebracht, können bessere Trocknungsleistung erzielt werden als mit einer Einmalfüllung mit einer großen Menge (Wirleitner 2015).

### 2.2.4 Lüfter

Ein Lüfter wird benötigt, um die Trocknungsluft gegen den Druck des Trockengutes und weiterer Strömungswiderstände durch den Heustock hindurchzudrücken (Aschauer et al 2014). Heutzutage werden nur noch Radiallüfter in der Heutrocknung eingesetzt, weil sie eine höhere Druckstabilität aufbringen. Der Luftzufuhrkanal sollte möglichst geringe Druckverluste verursachen.

Zu beachten ist, dass bei zu großen Luftmengen und Drücken die Kaminbildung schneller einsetzt, weil sich die Luft den Weg des geringsten Widerstandes sucht. Dies führt zu ungleichmäßiger Durchtrocknung, sodass einzelne Stellen in der Trocknungsbox nicht oder nur sehr langsam getrocknet werden. Der Lüfter muss eine Steuerung haben, damit seine Leistung an den Trocknungsverlauf und die Außenluftverhältnisse angepasst werden kann (Aschauer et al. 2014).

### 2.2.5 Steuerung und Kontrolle der Trocknung

Um den Trocknungsvorgang zu überwachen, werden neben den programmierbaren Steuerungen die manuelle Kontrolle und weitere einfache Hilfsmittel empfohlen (Kittl 2015). Dazu gehören Temperatursonden und ein U-förmiger Schlauch als Rohrmanometer (Abb. 6). Ein U-Rohr-Manometer misst den statischen Druck und ist eine einfache Hilfe zur Überprüfung des Anlagendrucks. Ein Schlauchende wird unterhalb des Rostes verlegt. Ein übermäßig hoher Druck kann auf eine überlastete Anlage hinweisen (Aschauer et al. 2014). Ebenso sind Wetterstationen hilfreich, die die Feuchtigkeit der Trocknungsluft vor und nach der Trocknungsbox messen und so ein einfaches Messinstrument zur Überprüfung des Trocknungsfortschritts darstellen (Kittl 2015).



Abb. 6: Ein U-Rohr-Manometer hilft bei der Überwachung der Anlage (Wirleitner 2016)

### 2.2.6 Einlagerung und Futtervorlage



Zur Einlagerung und teilweise auch zur direkten Futtervorlage kommen Hängedrehkräne zum Einsatz. Um große Reichweiten zu erzielen, werden Teleskoparme eingesetzt. Auch ein Querfahrwerk erhöht den Aktionsradius (Abb. 7). Kurvenfahrten sind ebenso möglich. Wichtig ist die Hubleistung des Krans, die in Metern (mt) gemessen wird. Üblich sind 5–6 mt, was bedeutet, dass der Kran bei ausgefahrenem Teleskoparm auf 6 m noch 1 Tonne heben kann.

Abb. 7: Hängedrehkran mit Querfahrwerk (Foto: Firma Auer)

## 2.3 Ballentrocknung

Für die Ballentrocknung wird das Erntegut auf dem Feld in lockere Ballen gepresst und in einer überdachten, befahrbaren Trocknungsanlage bis zur Lagerfähigkeit getrocknet. Die Ballen befinden sich nur während der Trocknung auf der Trocknungsanlage und werden dort, nicht wie bei der Boxentrocknung üblich, bis zum Verfüttern gelagert. Die Luftführung ist in den Ballen deutlich schwieriger als in der Boxentrocknung, weshalb dieses Verfahren auch weniger verbreitet ist.

Es können sowohl Rund- wie auch Quaderballen getrocknet werden, wobei Quaderballen meist eine höhere Dichte aufweisen und deshalb schwieriger zu trocknen sind als Rundballen.

Die Zahl der Trocknungsplätze begrenzt im Wesentlichen die Kapazität der Ballentrocknungsanlage. Der Ballendurchmesser entscheidet ebenfalls über die Durchsatzleistung einer Rundballentrocknungsanlage (Tab. 3). Unter Umständen begrenzen die Ballen aus der folgenden

Charge die für die Trocknung und Nachbelüftung erforderliche Zeitspanne. Während bei einer Boxentrocknung das Belüftungsheu meist in der Box verbleibt und die nächste Charge auf die noch unvollständig getrocknete Charge aufgeschichtet werden kann, müssen bei der Ballentrocknung die Ballen für die nächste Charge abgeräumt werden. Empfehlenswert ist eine Über-trocknung der Ballen auf 90–92 % TM, damit die Heuballen durch mögliches Nachschwitzen nicht zu schimmeln beginnen. Tabelle 3 gibt einen Überblick, wie viele Ballen bei welchem Durchmesser pro Hektar anfallen können, ausgehend von einem mittleren Heuertrag von 2,5 t/ha und Schnitt.

Tab. 3: Ballenzahl und Ballengewichte bei einer Ballendichte von 130 kg/m<sup>3</sup> und einem Heuertrag von 2500 kg/ha bzw. bei 87 % TS von 2175 kg TS/ha (Wirleitner und Wyss 2015)

Durchmesser m	TM kg	Ballengewicht [kg] bei Trockensubstanzgehalt von					Ballen je ha
		87 %	80 %	75 %	70 %	65 %	
1,2	176	203	221	235	252	271	12
1,3	207	238	259	276	296	319	11
1,4	240	276	300	320	343	369	9
1,5	276	317	345	368	394	424	8
1,6	314	361	392	418	448	483	7
1,7	354	407	443	472	506	545	6
1,8	397	456	496	529	567	611	5

### 2.3.1 Untenbelüftung

Die häufigste Anlagenform ist die Untenbelüftung oder einseitige Belüftung (Abb. 8, Tab. 4). Die Ballen werden auf ein Ballenloch mit einem Blechkranz gesetzt, der etwa 14 cm in den Ballen hineinragen soll. Der Blechkranz dient dazu, einen Luftabschluss zu erreichen. Bei einem Ballendurchmesser über 1,5 m wird eine Kreuzverstrebung im Blechkranz empfohlen, um den Ballen zu stabilisieren (Wirleitner und Wyss 2015). Dabei sollte der Blechkranz nur etwa maximal 45 cm kleiner sein als der Ballendurchmesser, damit das Verhältnis Ballendurchmesser zu Lüftungsloch rund 1:0,76 beträgt (Wirleitner und Wyss 2015). Insgesamt wird empfohlen maximal 20 Ballen pro Belüftungsstrang hintereinander anzuordnen.

Der Ballen wird durch das Ballenloch von unten mit der Belüftungsluft durchströmt. Da es aber zu einem Kamineffekt kommen kann, indem die Luft ungehindert durch die Ballenmitte entweicht, wird der Ballen oben abgedeckt. Dies kann mit einem schweren Deckel erfolgen. Dadurch entweicht die Luft über die Seitenflanken und der Ballen wird gleichmäßig durchströmt und getrocknet (Pöllinger 2003).



Abb. 8: Untenbelüftung: Luftstrom im Ballen und Beispiele für Anlagen (Holpp 2004, Firmenbild [www.lasco.at/rundballentrocknung](http://www.lasco.at/rundballentrocknung) 2015, Wirleitner 2016)

Die Ballen sollten mindestens einmal während des Trocknungsvorgangs gewendet werden, um ein optimales Trocknungsergebnis zu erzielen. Daher empfiehlt sich die Anschaffung einer Ballenwendezange.



Abb. 9: Rundballentrocknung mit flexiblen Zwischenringen (einzeln) (links) und als Kompaktanlage (rechts) (Firmenbilder [www.lasco.at/rundballentrocknung](http://www.lasco.at/rundballentrocknung) 2016, [www.2015.rmh.at/rmh-rundballenbelueftung](http://www.2015.rmh.at/rmh-rundballenbelueftung) 2016)

Eine Sonderform ist die einseitige Belüftung mit flexiblen Zwischenringen (Abb. 9). Hierbei wird jeweils ein Ring mit Belüftungsschlauch zwischen zwei Ballen gelegt, der dabei den jeweiligen Ballen von oben oder unten belüftet. Die angewärmte und ggf. auch entfeuchtete Luft kann über einen Schlauch dem Luftkanal zugeführt werden. Diese Anlagen werden entweder mit vielen einzelnen flexiblen Zwischenringen oder als Kompaktanlage mit jeweils vier Ballenringen gebaut. Bei der Kompaktanlage wird so der Aufwand für das Ringauflegen reduziert. Diese Anlagen können somit auch überbetrieblich genutzt werden und können am Betrieb einfach nachgerüstet werden (Wirleitner und Wyss 2015). Die Kapazität ist jedoch gering. Durch die Ringnutzung ist der Bau von kleinen Anlagen möglich. Auch eine mehrfache Gebäudenutzung wird durch das flexible System möglich, da keine festen Luftkanäle verbaut werden (Wirleitner und Wyss 2015).

Tab. 4: Kennzahlen für die Ballentrocknung mit Untenbelüftung (Kittl 2015)

Merkmal	Parameter
Einfuhrfeuchte	25–30 % Restfeuchte
Dichte der Ballen	110–130 kg TM /m <sup>3</sup>
Lüfter Nennleistung	0,5 kW je Ballen (0,3–0,7 kW)
Anlagen-/ Lüfterdruck	800–1500 Pa
Entfeuchterleistung	1- bis 2-fache Lüfterleistung
Unterdachabsaugung	3–8 m <sup>2</sup> je 100 kg Frischmasse
Heizleistung	ab 1 kW je 100 kg Frischmasse
Lochdurchmesser	75 % vom Ballendurchmesser

### 2.3.2 Oben- und Untenbelüftung

Eine Oben- und Untenbelüftung (zweiseitige Belüftung) leitet die Luft durch die beiden Stirnseiten in den Ballen, sodass von beiden Seiten belüftet wird und die Luft an der Bauchseite austritt. Quaderballen können nur mit diesem System effizient belüftet werden (Abb. 10).



Abb. 10: Oben- und Untenbelüftung: Luftstrom im Ballen (links), Beispielanlage für Rundballentrocknung (mitte) und Quaderballentrocknung (rechts) (Holpp 2004, Firmenbilder www.climair50.com 2016)

### 2.3.1 Zuluftkanal

Der Kanal vom Lüfter zu den einzelnen Ballen kann ein Blech-, Holz- oder auch Betonkanal sein (Wirleitner und Wyss 2015). Um zwischen den Rundballen einen Druckausgleich herzustellen, empfiehlt sich, den Zuluftkanal zu den Ballen konisch zu verjüngen. Die meisten Anbieter verwenden anstelle eines verjüngenden Kanals Luftbremsen. Auch sollte der Kanal wärmeisoliert sein, um Abkühlung der Trocknungsluft vor den Ballen zu reduzieren.

### 2.3.2 Aufreihung der Ballen

Die Anordnung der Ballen kann je nach gewähltem Belüftungssystem in einreihiger oder mehrreihiger Anordnung oder übereinander erfolgen (Abb. 11). Dabei sollte der Abstand zwischen den Ballen auf der Trocknung mindestens 30 cm betragen. Auch sollten nicht mehr als 20 Ballen in einer Reihe liegen. Zwei nebeneinanderliegende oder zwei übereinanderliegende Ballenreihen sind möglich (Wirleitner und Wyss 2015).

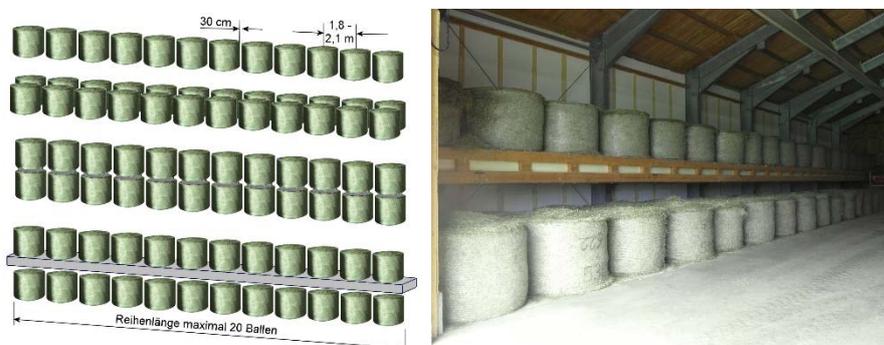


Abb. 11: Aufreihungsmöglichkeiten der Ballen auf einer Trocknungsanlage (links) und Praxisbeispiel (rechts) (Wirleitner 2016)

### 2.3.3 Musteranlage

In Abbildung 12 wird eine Musteranlage für eine Untenbelüftung mit Entfeuchtertechnik dargestellt. Die Ballen stehen auf ihren jeweiligen Belüftungslöchern. Die entfeuchtete, angewärmte Luft durchströmt die Ballen. Dabei sind die Ballen abgedeckt, damit die durchströmende Luft auch die Randbereiche mitrocknet. Die abgekühlte, mit Feuchtigkeit angereicherte Trocknungsluft wird im geschlossenen System zurück zum Entfeuchter geleitet. Dazu muss der Raum geschlossen bleiben. Die Trocknungsanlage (Abb. 12) kann dazu mit einem Rollvorhang ganz oder nur teilweise verschlossen werden. Für einen besseren Luftkreislauf wird in diesem Fall die feuchte Luft mit einem zusätzlichen Axialventilator zum Entfeuchter transportiert. Dieser entzieht der feuchten Luft Wasser und wärmt sie an. Um eine höhere Effizienz zu erlangen, kann noch zusätzlich eine Unterdachabsaugung oder externe Wärmequelle zum

Einsatz kommen, die die Luft zusätzlich erwärmt. Die warme, trockene Luft wird dann erneut zu den Ballen geleitet.

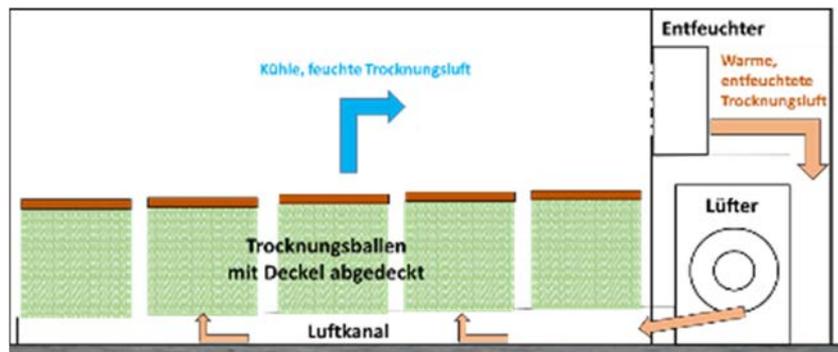


Abb. 12: Musteranlage, Ballentrocknung mit Entfeuchter (bl-heutrocknung.eu, verändert)

Die Technik der Luftanwärmung und -entfeuchtung entspricht der Technik der Boxentrocknung. So können auch hier Unterdachabsaugung, Entfeuchter und Wärmetauscher genutzt werden. Jedoch werden Ballen meist mit einem niedrigeren Feuchtegehalt (mindestens 70 % TM) im Vergleich zur Boxentrocknung eingefahren, da die Luft durch ein verdichtetes Gut geführt werden muss. Deshalb sind die Anforderungen an die Druckstabilität des Lüfters auch größer im Vergleich zur Boxentrocknung.

Für den Entfeuchterbetrieb im Umluftverfahren wird bei der Ballentrocknung ebenso wie bei der Boxentrocknung eine Wärmeisolierung der Luftkanäle empfohlen. Des Weiteren sollte der Bereich der zu trocknenden Ballen über eine Rollplane o. Ä. von anderen Gebäudeteilen abgetrennt werden können (Wirleitner und Wyss 2015). Bei der Luftanwärmung für Ballen wird eine Heizleistung von 3 kW pro Ballen empfohlen.

#### 2.3.4 Futtevorlage

Der Vorteil der Ballentrocknung liegt im einfachen Transport der Ballen, in der einfachen Manipulierbarkeit (Rundballenkette) der Ballen. Zur Futtevorlage können technische Hilfsmittel zur Vereinfachung der Arbeit eingesetzt werden, z. B. ein Ballenauflösegerät oder im einfachsten Fall eine Rundballenraufe (Selbstauflösung durch die Tiere).

### 3 Material und Methoden

#### 3.1 Kosten der Belüftungsheuwerbung

Zur Berechnung der Kosten der Belüftungsheuwerbung wurden die Arbeitserledigungskosten dargestellt, die sich aus den Direktkosten (z. B. Saatgut) und den Lohnkosten zusammensetzen. Für die Lohnkosten ist ein Lohnsatz für den Betriebsleiter oder die Betriebsleiterin in Höhe von 17,50 €/AKh unterstellt.

#### 3.2 Investitions- und Energiebedarf der Heutrocknung

In der Literatur gibt es mehrere Ansätze, den Investitions- und Energiebedarf für Heutrocknungsanlagen zu ermitteln. Laville-Studer (1990) ermittelte betriebswirtschaftliche Daten für künstliche Heutrocknungsverfahren mit Sonnenkollektor und Luftentfeuchter, aber nur für Betriebsgrößen mit 10 ha und 20 ha Heufläche. Nydegger und Wirleitner (2014) ermittelten für einen Betrieb mit 19 ha Wiesenland und einem Ertrag von 9 t TM/ha den Investitionsbedarf und die Trocknungskosten. Verglichen wurde die Kaltbelüftung mit einer Sonnenkollektoranlage und einer Anlage mit Luftentfeuchter und Sonnenkollektor. Es werden aber keine Daten für den Hallenbau angegeben.

Amman und Wyss (2007) erstellten einen betriebswirtschaftlichen Vergleich von Feuchtheu mit weiteren Konservierungsarten für Raufutter. Sie geben auch die Kosten für loses Belüftungsheu und Rundballenbelüftungsheu an, jedoch blieb unklar, mit welchem Trocknungsverfahren das Belüftungsheu erzeugt wurde.

Im Bereich der Ballentrocknung erstellte Holpp (2004) einen betriebswirtschaftlichen Vergleich für drei unterschiedliche Arten von Ballentrocknungsanlagen. Insgesamt wurden auf diesen drei Anlagen 56 Ballen getrocknet.

In der Literatur wird oft nur der Investitionsbedarf für eine Betriebsgröße ermittelt oder Betriebsgrößen bis max. 20 ha verglichen. Daher wurde vom KTBL in Zusammenarbeit mit der Arbeitsgruppe Heubergetechnik der Investitionsbedarf ausgewählter Trocknungstechniken für unterschiedliche Betriebsgrößen ermittelt, um eine Vergleichbarkeit innerhalb der Betriebsgrößen zu erreichen. Neu ist ebenso der Vergleich von Boxentrocknung und Ballentrocknung mit ähnlichen Parametern.

So werden neben einer Boxentrocknung und Ballentrocknung für Erntemengen von 20 ha auch eine Boxentrocknungsanlage für jeweils einen Betrieb mit 60 und 100 ha Einfuhrleistung auf 2 Chargen dargestellt. Ebenso wurde der Investitionsbedarf für die Gebäudehülle angegeben. Die Darstellung im Heft ermöglicht die Auswahl mit oder ohne Gebäudehülle. Als Trocknungsverfahren wurden moderne Luftanwärmungs- und -entfeuchtungsverfahren gewählt, die eine sichere und zügige Trocknung gewährleisten.

So wurden in Abstimmung mit der Arbeitsgruppe Heubergetechnik (2015) für die Heubelüftung drei Verfahren der Belüftungsluftbehandlung jeweils in Kombination mit einer Unterdachabsaugung verglichen: ein Verfahren mit Luftentfeuchtung, eine Trocknung mit Hackschnitzelofen und ein Verfahren, bei dem die Abwärme einer Biogasanlage mit 300 kW<sub>el</sub> genutzt wird. Der eventuell noch ausstehende Energiebedarf bei der Variante mit der Biogasabwärme wird mit einem Hackschnitzelofen gedeckt.

Die unterschiedlichen Parameter für die Berechnung der Trocknungsanlage wurden zum Teil aus der Literatur entnommen, zum Teil wurden dazu Trocknungsanlagenhersteller befragt. Dazu wurde ein Excel-Tool erstellt, das die flexible Auswahl vieler Parameter und Betriebsgrößen erlaubt. Für das Heft „Belüftungsheu: Qualität – Verfahren – Kosten“ wurde aufgrund der Übersichtlichkeit eine Auswahl von 3 Betriebsgrößen für die Boxentrocknung (20 ha, 60 ha und 100 ha auf 2 Chargen) und eine für die Ballentrocknung (20 ha auf 4 Chargen) getroffen. Die höhere Chargenzahl bei der Ballentrocknung ergibt sich aus dem Umstand, dass die Ballen auf der Trocknung den Flaschenhals in der Trocknung darstellen und daher, um die Kosten niedriger zu halten, mehr Chargen gefahren werden.

Die in den Tabellen 6 bis 8 dargestellten Ergebnisse wurden mithilfe eines Excel-Tools berechnet, in das unterschiedliche Parameter und Werte aus der Literatur, von Experten und aus der KTBL-Datensammlung „Futterbau“ (KTBL 2014) aufgenommen wurden.

Die gewählten Parameter und Werte zur Berechnung der Beispielanlagen im Heft werden im Folgenden erläutert: Es wird bei der Boxen- und der Ballentrocknung von einer Erntemenge von 8 t TM/ha und 4 Schnitten im Jahr ausgegangen. Dabei handelt es sich um einen KTBL-Standardwert für kleereiches Öko-Grünland mit mittlerem Ertrag. Die Erntemenge verteilt sich im Verhältnis 30:25:25:20 auf die vier Schnitte. Aufgrund der teuren Trocknung wird bei der Boxentrocknung auf 2 Chargen und bei der Ballentrocknung auf 4 Chargen geerntet und getrocknet. Das Ballenheu wird bis auf 92 % TM getrocknet und damit übertrocknet, um eventuelles Nachschwitzen abzufangen und eine sichere Lagerung zu gewährleisten. Die Preise und Kosten werden ohne Mehrwertsteuer angegeben.

Bei der Boxentrocknung setzt sich der Investitionsbedarf „Halle“ aus dem Investitionsbedarf der Gebäudehülle, dem Boxenbau und dem Kran zusammen. Für die Gebäudehülle wurde auf

einen KTBL-Standardwert von 250 €/m<sup>2</sup> zurückgegriffen. Laut Kittl (2016) und den Erfahrungen einiger Landwirte beträgt der ungefähre Preis zum Erstellen einer Belüftungsbox 100 €/m<sup>2</sup> belüfteter Fläche. Der Investitionsbedarf für den Heukran schwankt mit der Betriebsgröße und beginnt in dem Excel-Tool mit 35.000 € (Kittl 2016). Alle Preise und Kosten werden ohne Mehrwertsteuer angegeben.

Bei der Ballentrocknung wurde für die Gebäudehülle ebenfalls der Standardwert von 250 €/m<sup>2</sup> wie bei der Boxentrocknung angenommen. Laut Kittl (2016) schwankt der Investitionsbedarf für den Unterbau der Ballentrocknung zwischen 600 und 800 €/Ballen. Für die Berechnungen im Heft wurde ein Wert von 600 €/Ballen angenommen.

Zur Definition von „Belüftungsheu“ wurde sich an die Erfahrungen der Mitglieder der Arbeitsgruppe Heubergetechnik (2015) orientiert: Für das Belüftungsheu der Boxentrocknung wurde ein TM-Gehalt von 60 % angenommen, für die Ballentrocknung ein TM-Gehalt von 70 %, da es sich um ein stärker verdichtetes Gut handelt und somit schwieriger zu trocknen ist.

Für das Boxenheu wurde ein Raumbedarf von 10 m<sup>3</sup>/t angenommen. Die Maße der Rundballen betragen einen Durchmesser von 1,5 m und eine Höhe von 1,2 m. Für die Dichte wurde ein Wert von 130 kg TM/m<sup>3</sup> angenommen (Wirleitner und Wyss 2015)

Die Trocknungsdauer bei der Boxentrocknung betrug insgesamt 60 h, bei der Ballentrocknung 24 h (Arbeitsgruppe Heubergetechnik 2015). Das Verhältnis Lüfter zu Entfeuchter wurde für beide Verfahren auf 1:2 festgelegt (Kittl 2016).

Kittl (2016) macht darauf aufmerksam, dass das frühere Maß der Fläche zur Unterdachabsaugung zur belüfteten Fläche von 2:1 meist schon zu klein ist und Werte von 3 bis 5 gewählt werden sollten. In der Praxis ergibt dies oft Probleme mit den tatsächlich vorhandenen Dachflächen. Die Leistung aus der Unterdachabsaugung wird mit knapp 0,3 kW/m<sup>2</sup> Dachfläche veranschlagt. Jakschitz-Wild (2015) schätzt die Investitionskosten für die Unterdachabsaugung mit 25 €/m<sup>2</sup> ein.

Die Kosten für die Wärmebereitstellung der Biogasanlage wurde entsprechend den KTBL-Faustzahlen „Biogas“ (KTBL 2013) mit 0,02 €/kWh angenommen. Der Investitionsbedarf des Heizregisters wird auf 15 €/kW geschätzt (Bayer 2016). Die Kosten der Hackschnitzel betragen 0,03 €/kWh. Für die Abschreibung wurden Werte zwischen 15 und 30 Jahren, je nach Bauteil, angenommen. Ebenso liegt der Ansatz für die Reparaturkosten 1–2 % je nach Abschreibungszeit der Anlagen- und Gebäudeteile.

In Tabelle 5 sind die wichtigsten gewählten Parameter dargestellt. Aus diesen Parametern errechnen sich die Werte für die Boxentrocknung (Tab. 7–9) und für die Ballentrocknung (Tab. 10).

Tab. 5: Gewählte Parameter zur Berechnung des Investitionsbedarfs, der fixen Kosten und der Energiekosten der Heutrocknung

<b>Merkmal</b>	<b>Einheit</b>	<b>Boxen</b>	<b>Ballen</b>
Ertrag	TM/(ha · a)	8	
Schnitte	Anzahl	4	
Chargen	Anzahl	2	4
Ertragsverteilung Schnitte	%	30/25/25/20	
Einfuhrfeuchte	%	60	70
Endfeuchte des trockenen Belüftungsheus	%	87	92
Einlagerungshöhe Einfuhr	m	2	

Lagerhöhe	m	7	
Boxengröße, maximal	m <sup>2</sup>	250	
Spezifisches Volumen Belüftungsheu Box	m <sup>3</sup> /t	10	
Durchmesser des Ballens	m		1,5
Dichte des Ballens	kg TM/m <sup>3</sup>		130
Verhältnis Lüfter zu Entfeuchter	kW	1:2	
Trocknungszeit 1. Schnitt 1. Charge	h	60	24
Leistung Biogasanlage	kWel	300	
Preis Diesel	€/l	0,7	
Preis Biogawärme	€/kWh	0,02	
Preis Hackschnitzel	€/kWh	0,03	
Preis Strom	€/kWh	0,24	

## 4 Darstellung der Ergebnisse

### 4.1 Kosten der Belüftungsheuwerbung

Tabelle 6 gibt eine Übersicht über die einzelnen Arbeitsgänge der Belüftungsheuerzeugung für das Boxen- und Ballentrocknungsverfahren bis zur Trocknungsanlage. Arbeitsgänge, die bei beiden Verfahren gleich sind, werden zusammen dargestellt. Erst bei der Bergung mit Ladewagen oder Ballenpresse unterscheiden sich die Verfahren. Als Grundlage dient ein ökologisch bewirtschaftetes, kleebetontes Dauergrünland mit mittlerem Ertrag und vier Schnitten. Die Rahmenbedingungen sind: eine Schlaggröße von 2 ha, eine Hof-Feld-Entfernung von 2 km und eine Mechanisierung von 67 kW.

Tab. 6: Arbeitsverfahren der Belüftungsheuernte: Feldarbeiten für Ladewagen und Ballen

Häufigkeit	Zeit-raum	Arbeitsvorgang	Menge je ha	Arbeitszeit Akh/ha	
				Ladewagen	Ballen
0,25	SEP2	Bodenprobe: Entnahme von Hand; Fahrten mit Pick-up		0,05	0,05
1	MRZ1	Gülle ausbringen, ab Hof: Pumptankwagen, 5 m <sup>3</sup> , 3 m; 45 kW	20 m <sup>3</sup>	2,37	2,37
0,25	MRZ2	Striegeln von Grünland: 4,5 m; 45 kW		0,09	0,09
0,75	MRZ2	Übersaat, pneumatisch mit Striegel: 4,5 m; 45 kW	3 kg	0,43	0,43
1	MAI2	Mähen mit Mähauflbereiter: 2,4 m; 45 kW, 18 % TM	15,3 t	0,64	0,64
2	MAI2	Wenden mit Kreiselzettwender: 4,5 m; 45 kW		0,86	0,86
1	MAI2	Schwaden: 3,5 m; 45 kW		0,51	0,51
1	MAI2	Belüftungsheu, Rundballen pressen: Rundballen 1,5 m, 320 kg/Ballen; 67 kW Belüftungsheu, Rundballen, 1. Schnitt, im Rispenschieben, 70 % TM	4 t		0,42

1	MAI2	Belüftungsheu, Ballentransport: Doppelzug je 8 t, Dreiseitenkippanhänger; Frontlader, 2.100 daN; Rundballenzange; 67 kW, 70 % TM	4 t		1,67
1	MAI2	Belüftungsheu bergen mit Ladewagen: 20 m³, 2,25 t; 67 kW, 60 % TM	4,6 t	0,88	
1	MAI2	Heukran, 5 mt, 30 m Schiene, 2 t Belüftungsheu, lose, 1. Schnitt, im Rispenschieben, 60 % TM	4,6 t	0,88	
1	MAI2	Gülle ausbringen, ab Hof: Pumptankwagen, 5 m³, 3 m; 45 kW	15 m³	1,97	1,97
0,25	JUN1	Nachsaat von Gras, Grasnachsämaschine: 2,5 m; 67 kW	15 kg	0,26	0,26
0,25	JUN1	Walzen von Grünland: 3 m; 45 kW		0,20	0,20
3	JUL-SEP	Mähen mit Mähaufbereiter: 2,4 m; 45 kW, 18 % TM	9,9 t	1,91	1,91
6	JUL-SEP	Wenden mit Kreiselzettwender: 4,5 m; 45 kW		2,58	2,58
3	JUL-SEP	Schwaden: 3,5 m; 45 kW		1,53	1,53
3	JUL-SEP	Belüftungsheu, Rundballen pressen: Rundballen 1,5 m, 320 kg/Ballen; 67 kW Belüftungsheu, Rundballen, 2. Schnitt ff., im Rispenschieben, 70 % TM	2,5 t		1,17
3	JUL-SEP	Belüftungsheu, Ballentransport: Doppelzug je 8 t, Dreiseitenkippanhänger; Frontlader, 2.100 daN; Rundballenzange; 67 kW, 70 % TM	2,5 t		3,14
3	JUL-SEP	Belüftungsheu bergen mit Ladewagen: 20 m³, 2,25 t; 67 kW, 60 % TM	3 t	1,73	
3	JUL-SEP	Heukran, 5 mt, 30 m Schiene, 2 t Belüftungsheu, lose, 1. Schnitt, im Rispenschieben, 60 % TM	3 t	1,73	
		<b>Summe</b>		<b>18,62</b>	<b>19,80</b>

Die Direkt- und Arbeitserledigungskosten für die in der Tabelle 5 dargestellten Heuertverfahren betragen für das Verfahren „Ladewagen“ 741 €/ha und für das Verfahren „Ballen“ 881 €/ha.

#### 4.2 Investitionsbedarf, fixe Kosten und Energiekosten der Belüftungsheutrocknung

Der Investitionsbedarf und die Kosten der Boxen- und Ballentrocknung sind für die unterschiedlichen Ernteflächen in den Tabellen 7 bis 10 dargestellt.

Tab. 7: Investitionsbedarf, fixe Kosten und Energiekosten der Boxentrocknung; 20 ha auf 2 Chargen

Investitionsbedarf Boxentrocknung, 20 ha auf 2 Chargen			
20 ha Boxen	Unterdachabsaugung in Kombination mit		
	Entfeuchter und Dieselaggregat	Hackschnitzelofen	Biogas

	Größe	€	Größe	€	Größe	€
<b>Halle</b>						
Gebäudehülle	330 m <sup>2</sup>	82.500	330 m <sup>2</sup>	82.500	330 m <sup>2</sup>	82.500
Boxen	2 x 150 m <sup>2</sup>	30.000	2 x 150 m <sup>2</sup>	30.000	2 x 150 m <sup>2</sup>	30.000
Kran		35.000		35.000		35.000
Summe Halle		147.500		147.500		147.500
<b>Trocknungstechnik</b>						
Lüfter	14 kW	4.755	14 kW	4.755	14 kW	4.755
Entfeuchter	28 kW	32.603	-	0	-	0
Dieselaggregat	42 kWel	11.092	-	0	-	0
Unterdachabsaugung	420 m <sup>2</sup>	10.500	420 m <sup>2</sup>	10.500	420 m <sup>2</sup>	10.500
Heizofen	-	0	140 kWth	31.910	19 kWth 1)	15.368
Wärmetauscher	-	0	-	0	*1	4.275
Steuerung		6.993		6.993		6.993
Summe Trocknungstechnik		65.943		54.159		41.892
<b>Summe Investitionsbedarf</b>		<b>213.443</b>		<b>201.659</b>		<b>189.392</b>
<b>Fixe Kosten Boxentrocknung, 20 ha auf 2 Chargen</b>						
Abschreibung €/a	-	8.963	-	8.177	-	7.359
Reperaturkosten €/a	-	2.689	-	2.453	-	2.208
Zinsen €/a	-	3.202	-	3.025	-	2.841
<b>Fixe Kosten trockenes Heu €/t</b>		<b>71</b>		<b>65</b>		<b>59</b>
<b>Energiekosten Boxentrocknung, 1. Schnitt 1. Charge, 20 ha auf 2 Chargen</b>						
Strom €	-		-	202	-	226
Biogas €	-		-	-	-	137
Hackschnitzel €	-		-	252	-	-
Diesel €	-	369	-	-	-	-
<b>Energiekosten Heu €/t</b>		<b>13</b>		<b>16</b>		<b>13</b>

1) In dieser Konstellation ist es günstiger, die Trocknungszeit um 60 h zu verlängern und nur mit Biogaswärme zu trocknen als einen kleinen Hackschnitzelofen zu kaufen. Dieses Beispiel wird jedoch aus Gründen der Vergleichbarkeit mit den anderen Verfahren dargestellt.

Tab. 8: Investitionsbedarf, fixe Kosten und Energiekosten der Boxentrocknung; 60 ha auf 2 Chargen

60 ha	Unterdachabsaugung in Kombination mit
-------	---------------------------------------

<sup>1</sup> Biogasanlage 300 kWel (ca. 285 kWth)

Boxen	Entfeuchter und Diesellaggregat		Hackschnitzelofen		Biogas	
	Größe	€	Größe	€	Größe	€
<b>Halle</b>						
Gebäudehülle	880 m <sup>2</sup>	220.000	880 m <sup>2</sup>	220.000	880 m <sup>2</sup>	220.000
Boxen	2 x 210 m <sup>2</sup> und 2 x 190 m <sup>2</sup>	80.000	2 x 210 m <sup>2</sup> und 2 x 190 m <sup>2</sup>	80.000	2 x 210m <sup>2</sup> und 2 x 190 m <sup>2</sup>	80.000
Kran		35.000		35.000		35.000
Summe Halle		<b>335.000</b>		<b>335.000</b>		<b>335.000</b>
<b>Investitionsbedarf</b>						
Lüfter	2 x 21 kW	19.085	2 x 21 kW	19.085	2 x 21 kW	19.085
Entfeuchter	2 x 42 kW	77.403	-	0	-	0
Diesellaggregat	126 kWel	21.678	-	0	-	0
Unterdachabsaugung	1260 m <sup>2</sup>	31.500	1260 m <sup>2</sup>	31.500	1260 m <sup>2</sup>	31.500
Heizofen	-	0	420 kWth	70.189	283 kWth	51.460
Wärmetauscher	-	0	-	0	*2	4.275
Steuerung		8.841		8.841		8.841
Summe Trocknungstechnik		158.507		129.616		115.161
<b>Summe Investitionsbedarf</b>		<b>493.507</b>		<b>464.616</b>		<b>450.161</b>
<b>Fixe Kosten Boxentrocknung, 60 ha auf 2 Chargen</b>						
Abschreibung €/a	-	20.684	-	18.758	-	17.794
Reperaturkosten €/a	-	6.205	-	5.627	-	5.338
Zinsen €/a	-	7.403	-	6.969	-	6.752
<b>Fixe Kosten trockenes Heu €/t</b>		<b>61</b>		<b>56</b>		<b>53</b>
<b>Energiekosten Boxentrocknung, 1. Schnitt 1. Charge, 60 ha auf 2 Chargen</b>						
Strom €	-	Die- selag- gregat	-	607	-	631
Biogas €	-	-	-	-	-	137
Hackschnitzel €	-	-	-	756	-	-
Diesel €	-	1.561	-	-	-	-
<b>Energiekosten/t Heu €/t</b>		<b>19</b>		<b>16</b>		<b>9</b>

Tab. 9: Investitionsbedarf, fixe Kosten und Energiekosten der Boxentrocknung; 100 ha auf 2 Chargen

100 ha Boxen	Unterdachabsaugung in Kombination mit					
	Entfeuchter und Diesellaggregat		Hackschnitzelofen		Biogas	
	Größe	€	Größe	€	Größe	€

<sup>2</sup> Biogasanlage 300 kWel (ca. 285 kWth)

<b>Halle</b>							
Gebäudehülle	1452 m <sup>2</sup>	363.000	1452 m <sup>2</sup>	363.000	1452 m <sup>2</sup>	363.000	
Boxen	3 x 230 m <sup>2</sup> und 3 x 210 m <sup>2</sup>	132.000	3 x 230 m <sup>2</sup> und 3 x 210 m <sup>2</sup>	132.000	3 x 230 m <sup>2</sup> und 3 x 210 m <sup>2</sup>	132.000	
Kran		40.000		40.000		40.000	
<b>Summe Halle</b>		<b>535.000</b>		<b>535.000</b>		<b>535.000</b>	
<b>Trocknungs- technik</b>							
Lüfter	3 x 23 kW	29.749	3 x 23 kW	29.749	3x23 kW	29.749	
Entfeuchter	3 x 46 kW	125.646	-	0	-	0	
Dieselaggregat	207 kWel	33.744	-	0	-	0	
Unterdachab- saugung	2070 m <sup>2</sup>	51.750	2070 m <sup>2</sup>	51.750	2070 m <sup>2</sup>	51.750	
Heiz- ofen	-	0	690 kWth	107.101	539 kWth	86.458	
Wärmetau- scher	-	0	-	0	*3	4.275	
Steuerung		9.989		9.989		9.989	
<b>Summe Trock- nungstechnik</b>		<b>250.877</b>		<b>198.589</b>		<b>182.220</b>	
<b>Summe Inves- titionsbedarf</b>		<b>785.877</b>		<b>733.589</b>		<b>717.220</b>	
<b>Fixe Kosten Boxentrocknung, 100 ha auf zwei Chargen</b>							
Ab- schrei- bung €/a	-	32.833	-	29.348	-	28.256	
Repera- turkos- ten €/a	-	9.850	-	8.804	-	8.477	
Zinsen €/a	-	11.788	-	11.004	-	10.758	
<b>Fixe Kosten trocke- nes Heu €/t</b>		<b>59</b>		<b>53</b>		<b>51</b>	
<b>Energiekosten Boxentrocknung, 1. Schnitt 1. Charge, 100 ha auf 2 Chargen</b>							
Strom €	-	Dieselag- gregat	-	998	-	1.022	
Biogas €	-	-	-	-	*	137	
Hack- schnitzel €	-	-	-	1.242	-	-	
Diesel €	-	2.292	-	-	-	-	
<b>Ener- giekos- ten €/t Heu</b>		<b>17</b>		<b>16</b>		<b>8</b>	

<sup>3</sup> Biogasanlage 300 kWel (ca. 285 kWth)

Tab. 10: Investitionsbedarf und fixe Kosten und Energiekosten der Heuballentrocknung; 20 ha auf 4 Chargen

20 ha Ballen	Unterdachabsaugung in Kombination mit						
	Einheit	Entfeuchter und Dieselaggregat		Hackschnitzelofen		Biogas	
		Größe	€	Größe	€	Größe	€
<b>Halle</b>							
Gebäudehülle		453 m <sup>2</sup>	113.288	453 m <sup>2</sup>	113.288	453 m <sup>2</sup>	113.288
Unterbau Ballen Kanäle		44 Ballen/ 1. Charge	22.000	44 Ballen/ 1. Charge	22.000	44 Ballen/ 1. Charge	22.000
<b>Summe Halle</b>			<b>139.688</b>		<b>139.688</b>		<b>139.688</b>
<b>Trocknungstechnik</b>							
Lüfter		22 kW	6.630	22 kW	6.630	22 kW	6.630
Entfeuchter		44 kW	39.032	-	0	-	0
Dieselaggregat		70 kWel	14.177	-	0	-	0
Unterdachabsaugung		528 m <sup>2</sup>	13.200	528 m <sup>2</sup>	13.200	528 m <sup>2</sup>	13.200
Heizofen	-	-	0	109 kW	27.672	-	0
Wärmetauscher	-	0	-	0		*4	4.275
Steuerung			8.815		8.815		8.815
Summe Trocknungstechnik			81.855		56.317		32.920
<b>Summe Investitionsbedarf</b>			<b>221.542</b>		<b>196.005</b>		<b>172.608</b>
<b>Fixe Kosten Ballentrocknung, 20 ha auf 4 Chargen</b>							
Abschreibung	€/Jahr	-	9.673	-	7.971	-	6.411
Reperaturkosten	€/Jahr	-	2.902	-	2.391	-	1.923
Zinsen	€/Jahr	-	5.418	-	5.035	-	4.684
<b>Fixe Kosten trockenes Heu</b>	<b>€/t</b>		<b>103</b>		<b>89</b>		<b>75</b>
<b>Fixe Kosten trockenes Heu</b>	<b>€/Ballen</b>		<b>29</b>		<b>25</b>		<b>21</b>
<b>Energiekosten Ballentrocknung, 1. Schnitt 1. Charge</b>							
<b>Einheit</b>							
Strom	€	-	Dieselaggregat	-	128	-	152
Biogas	€	-	-	-	-	-	52
Hackschnitzel	€/t	-	-	-	78	-	-
Diesel	€	-	330	-	-	-	-
<b>Energiekosten/t Heu</b>	<b>€/t</b>		<b>25</b>		<b>16</b>		<b>16</b>
<b>Energiekosten/t Heu</b>	<b>€/Ballen</b>		<b>7</b>		<b>5</b>		<b>5</b>

((s. Tabelle 1. Charge oder 1 Charge bzw. 4 Chargen oder 4. Charge))

Bei der Heutrocknung ergibt sich ein Größendegressionseffekt, da größere Betriebe geringere fixe Kosten für den 1. Schnitt und die 1. Charge haben als kleinere Betriebe (Abb. 13). Im

<sup>4</sup> Biogasanlage 300 kWel (ca. 285 kWth)

Verfahren „Biogas“ ist die günstigste Trocknung mit der Ballentrocknung verteilt auf 4 Chargen zu erreichen, da bei einer angenommenen Biogasanlage mit 300 kWel keine zusätzliche Wärmequelle nötig ist.

€/t

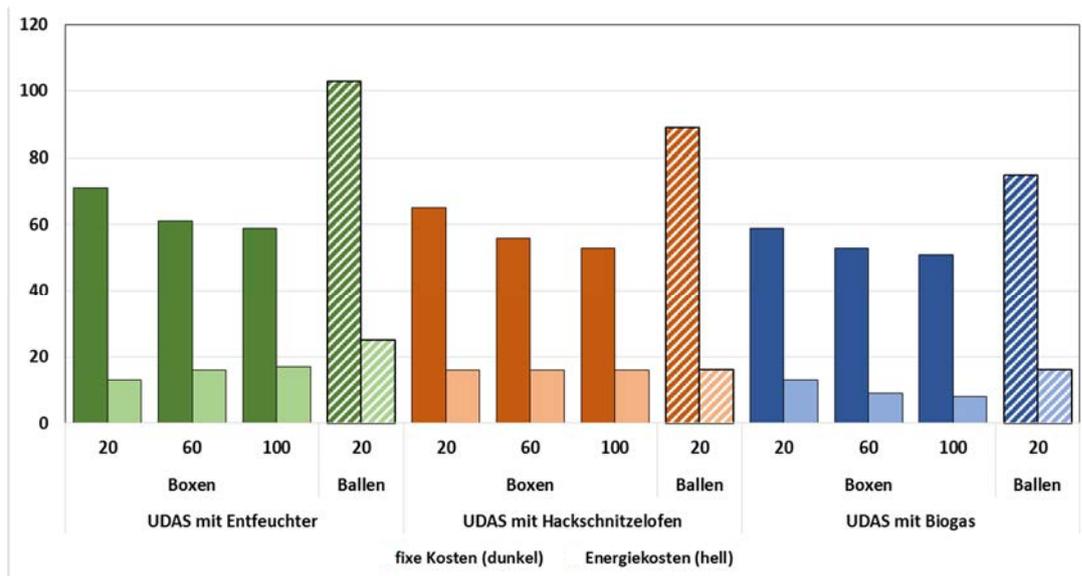


Abb. 13: Fixe Kosten und Energiekosten der verschiedenen Verfahren der Belüftungstrocknung bei unterschiedlichen Ernteflächen

Zusammenfassung fixe Kosten (dunkel) und Energiekosten (hell) der beiden Verfahren (Boxen und Ballen) und Ernteflächen (20 ha; 60 ha; 100 ha Boxen und 20 ha Ballen) für die Verfahren Unterdachabsaugung (UDAS) in Kombination mit Entfeuchter, Hackschnitzelofen und Biogas mit 300 kWel

Eine weitere Möglichkeit, um vor allem die Investitionskosten und die Kosten für die belüftete Fläche als Lagerraum zu senken, besteht darin, das fertig getrocknete Heu aus der Box zu nehmen, in Ballen zu pressen und separat zu lagern. Dies ist vor allem für größere Betriebe interessant. So kann die Boxenzahl reduziert werden, da weniger Boxen als Lagerraum zur Verfügung stehen müssen.

## 5 Diskussion der Ergebnisse

Die Boxentrocknung eignet sich vor allem für Betriebe mit ausschließlicher Heufütterung. Der Vorteil der Boxentrocknung liegt in der höheren Schlagkraft. Die maximale Einfuhrfeuchte von etwa 40 % reduziert die Bröckelverluste am Feld und ermöglicht eine schnelle Ernte. Dadurch dass der Lagerraum dem Trocknungsraum entsprechen kann, gestaltet sich die Nachbelüftung des Belüftungsheus einfacher als bei der Ballentrocknung, da das Belüftungsheu auf dem Belüftungsrost liegen bleibt und so bei Bedarf nachbelüftet werden kann. Die Ballentrocknung wird eher auf Betrieben eingesetzt, die ihr Futter teilweise als Grassilage und teilweise als Belüftungsheu einbringen wollen. Die Ballentrocknung ist schwieriger als die Boxentrocknung, da durch die Zahl der Trocknungsplätze eine beschränkte Schlagkraft vorgegeben ist und ein verdichtetes Gut getrocknet wird. Belüftungsheu stellt eine sehr interessante Alternative zu anderen Grobfuttermitteln dar. Aufgrund moderner leistungsfähiger Technik sind heutzutage Futtermittelqualitäten erreichbar, die der Wiederkäuerernährung gerecht werden. Im Bereich der Futterwerbung und -bergung gibt es viele technische Neuerungen, die die Belüftungsheuernte erleichtern können. Nichtsdestotrotz sind weitere Neuerungen nötig, um die Belüftungsheuernte so schonend wie möglich zu gestalten. Heutzutage stehen den interessierten Betriebsleitern eine Vielzahl an Trocknungsverfahren zur Auswahl. Jedoch sollte aufgrund der Vielzahl eine genaue Prüfung der betrieblichen Voraussetzungen erfolgen, um eine passgenaue Anlage zu erstellen.

## **6 Angaben zum voraussichtlichen Nutzen und zur Verwertbarkeit der Ergebnisse**

Die aktuelle Diskussion am Milchmarkt zeigt, dass einzelne Molkereien nach Markenprodukten suchen, um dem Verbraucher höherwertige Milch zu einem höheren Preis anbieten zu können, z. B. Heumilch. Betriebsleiter, die Heumilch erzeugen wollen, benötigen genaue Informationen darüber, wie dieses Produktionsverfahren zu gestalten ist und mit welchem Investitions- und Energiebedarf zu rechnen ist. Das KTBL-Heft „Belüftungsheu: Qualität – Verfahren – Kosten“ veranschaulicht den Mehraufwand, um qualitativ hochwertiges Belüftungsheu zu erzeugen und begründet damit den höheren Verbraucherpreis. Aber auch Landwirte, die Milch in eigenen Käsereien verarbeiten, erhalten mit diesem Heft Entscheidungshilfen.

## **7 Gegenüberstellung der ursprünglich geplanten zu den tatsächlich erreichten Ziele; Hinweise auf weiterführende Fragestellungen**

Das KTBL hat sein Projektziel, die Wirtschaftlichkeit der optimierten Heutechnik zu bewerten und ökonomische Argumente für die Heuproduktion für den Wissenstransfer zu erhalten, erreicht. Die gewonnenen Daten zur Heubergung und -ernte wurden in die KTBL-Datenbanken eingepflegt und für Veröffentlichung in der Online-Anwendung sowie dem KTBL-Heft 113 „Belüftungsheu: Qualität – Verfahren – Kosten“ aufbereitet.

Für die Bewertung der Wirtschaftlichkeit der Heubelüftung konnten die erhobenen Daten für die Veröffentlichungen im KTBL-Heft 113 „Belüftungsheu – Qualität – Verfahren – Kosten“ aufbereitet werden. Die Wirtschaftlichkeit der Heubelüftung wird beispielhaft für einige definierte Anlagen dargestellt. So wurde der Vergleich von Boxen- und Ballentrocknung möglich.

Um die Nutzer über das Projekt hinaus bei der Bewertung der Wirtschaftlichkeit der Belüftungsheuerzeugung zu unterstützen, wären weitere Arbeiten erforderlich: Eine Online-Anwendung, die dem Nutzer erlaubt, die definierten Anlagen der Heubelüftung zu ändern und so eigene Kalkulationen durchführen. Dies würde bei der Planung konkreter Investitionsvorhaben zur Heubelüftung hilfreich sein. Mit Daten zur detaillierten Beschreibung der Verfahrensabläufe und zum Arbeitszeitbedarf für die Heubelüftung würde ein Vergleich mit anderen Konservierungsarten des Grünlands- und Feldfutteraufwuchs wie z. B. Bodenheu oder Luzernegrassilage möglich werden.

## **8 Zusammenfassung**

Mit hochwertigem Belüftungsheu kann Futter erzeugt werden, das auch den Anforderungen von Milchkühe mit hoher Milchleistung gerecht wird und das mit dem Futterwert der Grassilage gleichgesetzt werden kann. Voraussetzung sind eine optimierte Bergungstechnik und moderne Heubelüftungsanlagen.

Im Teilprojekt wurde auf Basis der vorliegenden Literatur und mithilfe einer KTBL-Arbeitsgruppe ein Überblick über die Einsatzmöglichkeiten des Belüftungsheus in der Wiederkäuerernährung im Vergleich zu Bodenheu und Grassilage erarbeitet. Die Besonderheiten bei der Heuwerbung und -bergung wurden vor allem in Abstimmung mit dem Teilprojekt der Universität Kassel untersucht. Die verschiedenen Trocknungsverfahren wie die Boxen- oder Ballentrocknung und unterschiedliche Luftanwärmungsverfahren wurden beleuchtet. Die Wirtschaftlichkeit der Belüftungsheuerzeugung wurde beispielhaft für einige definierte Anlagen berechnet. Anhand von Beispielen aus Praxisbetrieben wird die Vielfalt der Lösungen in der Belüftungsheuerzeugung aufgezeigt. Diese Ergebnisse wurden in einem übersichtlichen und anschaulichen KTBL-Heft „Belüftungsheu: Qualität – Verfahren - Kosten“ veröffentlicht.

## 9 Literaturverzeichnis

Agro Heubergetechnik (2015/2016): Persönliche Mitteilung der Arbeitsgruppe Heubergetechnik, Treffen am 26.08.2015 in Würzburg und persönliche Mitteilungen 2016

Amman, H.; Wyss, U. (2007): Feuchtheu als mögliche Konservierungsart für Raufutter. ART-Berichte 685

ARTSOKO (2010): Dimensionierung von Sonnenkollektoren für die Heubelüftung. Programm-Version 2010, <http://www.agroscope.admin.ch/shop/00008/00023/index.html?lang=de>  
Zugriff am 31.08.2016

Aschauer, C. et al. (2014): Richtlinien für Heubelüftungsanlagen. Eine fachgerechte Planung sichert den Erfolg und spart Kosten. Agroscope. Tägikon (38). ART-Berichte 38????

Baumgartner, J. (1995): Das Raumgewicht von Heu – Neben der Technik mischt auch der Betriebsleiter mit. FAT-Berichte 471

Bayer, G. (2016): Mitteilung am 14.04.2016

Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (Hg.) (2015): Gruber Tabelle zur Fütterung der Milchkühe, Zuchtrinder, Schafe, Ziegen. 39. Auflage

Bohne, B. (2015): Was ist bei der Gewinnung von hochwertigem Heu zu beachten? Rheinische Bauernzeitung 17, S. 39 - 40.

Buchgraber, K. (2014): Vergleichende Bewertung von Heu- und Grassilage hinsichtlich ausgewählter Inhaltsstoffe. In: 19. Alpenländisches Expertenforum, S. 83 - 86

Buchgraber, K.; Gindl, G. (2009): Zeitgemäße Gründlandbewirtschaftung. Leopold Stocker Verlag

Fachstufe Landwirt (1997): Fachtheorie Agrarwirtschaft für Ackerbau, Grünland, Waldwirtschaft, Tierzucht, Tierhaltung, Landtechnik, Ökologie und Ökonomie. BLV Verlagsgesellschaft mbH, München, 5. überarbeitete Auflage

Fasching C. et al. (2015): Einfluss verschiedener Heutrocknungsverfahren auf Futteraufnahme und Milchproduktion im Vergleich zu Grassilage. In: 42. Viehwirtschaftliche Fachtagung, Raumberg-Gumpenstein, S. 67 - 74

Gindl, G. (2002): Zeitgemäße Heubereitung und Heuqualität in der Praxis. In: 8. Alpenländisches Expertenforum 2002, BAL, 09. - 10. April 2002, S. 67 - 72

Ginzinger, W. (2016): Einfluss der silofreien Fütterung auf die Milchqualität. In: Hofeigene Heubelüftungsanlagen, Grub, S. 65 - 73

Hofmann, M. (2016): Einfluss von getrocknetem Grünfutter in Rationen für Milchkühe auf Futtereffizienz und Tiergesundheit. In: Hofeigene Heubelüftungsanlagen, Grub

Holpp, M. (2004): Trocknung von Rundballen. Machbarkeit und Wirtschaftlichkeit. FAT-Berichte 616

Jakschitz-Wild, S.; Thurner, S. (2015): Bericht aus dem bayernweiten Pilotbetriebsnetzwerk mit hofeigenen Heubelüftungsanlagen. In: Hofeigene Heubelüftungsanlagen, Grub, S. 7 - 24

Jakschitz-Wild, S. (2015): Persönliche Mitteilung am 24.11.2015

KTBL (2014): KTBL-Datensammlung „Futterbau“. KTBL, Darmstadt

KTBL (2016): Leistungs-Kostenrechnung Pflanzenbau. [www.ktbl.de/](http://www.ktbl.de/)

Kittl, M. (2015): Bauliche und Technische Heutrocknungssysteme. ÖKL-Kolloquium 02.12.2015, Landeskammer Salzburg, Hochschule für Agrar- und Umweltpädagogik und Landeskammer Salzburg

Kittl, M. (2016): LFZ Raumberg-Gumpenstein Irdning, Persönliche Mitteilung Am 23.03.2016

Laville-Studer, K. (1990): Wie wirtschaftlich sind künstliche Heutrocknungsverfahren. FAT-Berichte 384

Nydegger, F.; Wirleitner, G. (2014): Vergleich von Kapazität und Kosten verschiedener Unterdachrocknungsverfahren. In: 19. Alpenländisches Expertenforum, S. 71 - 76

Pöllinger, A. et al. (2008): Heuballen richtig pressen. Der fortschrittliche Landwirt 5, S. 49 - 50

Pöllinger, A. (2003): Vergleich unterschiedlicher Heutrocknungsverfahren. In: Gumpensteiner Bautagung, S. 63 – 68

Schneider, A. (2015): Innovative Kondensations-Heutrocknung. <http://www.arwego.de/projekte-referenzen/2013/Innovative-Kondensations-Heutrocknung>. Zugriff am 23.09.2016

Schön, XYZ et al. (1998): Die Landwirtschaft. Band 3, Landtechnik, Bauwesen, BLV Verlagsgesellschaft mbH, München, 9. bearbeitete und erweiterte Auflage

Spiekers, H.; Nussbaum, H.; Potthast, V. (2009): Erfolgreiche Milchviehfütterung. DLG-Verlag

Thaysen, J. et al. (1999): Mäh- und Intensivaufbereiter. DLG Merkblatt 313 Ausschuss für Futterkonservierung

Thurner, S.; Jakschitz-Wild, S. (2015): Heubelüftung: ein altes Verfahren!? - Stand der Technik und neue Entwicklungen. LfL-Schriftenreihe 7/2015, Milchviehhaltung - nachhaltig und zukunftsorientiert, LfL, S. 55 - 72

Van Caenegem, L.; Pasca, A. (2008): Photovoltaikanlagen auch thermisch nutzen, Vortrag 19.11.2008, Agroscope, Grangeneuve

Waltner, C. H. (2015): Entwicklung eines Kondensationsheutrockners mit interner Energierecycling-Untersuchung des Energieeinsparpotenzials durch den Einsatz eines rekuperativen Systems. Bachelorarbeit, Hochschule Konstanz, Fakultät Maschinenbau, Verfahrens- und Umwelttechnik

Weingartmann, H. (2002): Technik und Perspektiven in der Heutrocknungen. In: 8. Alpenländisches Expertenforum, BAL Raumberg-Gumpenstein, S. 63 - 66

Welte, M. (2015): Der Markt für Bio-Heumilch. In: Hofeigene Heubelüftungsanlagen, Grub

Wirleitner, G. et al. (2014): Richtlinien für Belüftungstrocknung von Heu. Der fortschrittliche Landwirt 10

Wirleitner, G. (2015a): 10 Regeln für den Erfolg bei der Trocknung von Loseheu. [www.heutrocknung.org/heu-als-grundfutter/unterlagen](http://www.heutrocknung.org/heu-als-grundfutter/unterlagen). Zugriff am 24.08.2016

Wirleitner, G. (2015b): Überlegungen bei der Planung einer Boxentrocknung. [www.heutrocknung.org/heu-als-grundfutter/unterlagen](http://www.heutrocknung.org/heu-als-grundfutter/unterlagen). Zugriff am 24.08.2016

Wirleitner, G.; Wyss, U. (2015): Richtlinien zur Trocknung von Rundballen. Agroscope INT, Posieux

Wyss, U. (2012): Konservierung durch Trocknung. Les Prairiales – Grange-Verney

## **10 Übersicht über alle im Berichtszeitraum vom Projektnehmer realisierten Veröffentlichungen**

Nilles, L. (2015): Überblick über die Kosten der Heubelüftung. Fachgespräch „Qualitätsheu durch Belüftung“ 11.12.2015, Hessische Staatsdomäne Frankenhausen

Nilles, L.; Klöble, U. (2016): Kosten der Belüftungsheuerzeugung in Boxen oder Ballen. In: 14. Wissenschaftstagung Ökologischer Landbau 2017, Freising, eingereicherter Beitrag