

Loseblatt # 42

# VERFAHREN FÜR DIE VERLUSTARME LAGERUNG VON HOLZ AUS AGRO- FORSTSYSTEMEN

Ralf Pecenka, Hannes Lenz, Susann Skalda, Thomas Domin



# Verfahren für die verlustarme Lagerung von Holz aus Agroforstsystemen

## Autoren

Ralf Pecenka, Hannes Lenz, Susann Skalda, Katharina Würdig, Thomas Domin

Anschriften und Kontaktdaten

Dr.-Ing. Ralf Pecenka, Leibniz-Institut für Agrartechnik und Bioökonomie e.V. (ATB),  
Max-Eyth-Allee 100, 14469 Potsdam,  
e-mail: rpecenka@atb-potsdam.de

Dr. Hannes Lenz, Leibniz-Institut für Agrartechnik und Bioökonomie e.V. (ATB),  
Max-Eyth-Allee 100, 14469 Potsdam,  
e-mail: hlenz@atb-potsdam.de

Susann Skalda, Biomasse Schraden e.V., Hauptstraße 2, 04932 Großthiemig  
e-mail: biomasse-schraden@t-online.de

Thomas Domin, Landwirtschaftsbetrieb Domin, Feldstraße 20, 01945 Senftenberg (Peickwitz)  
e-mail: info@landwirt-domin.de

## Forschungsprojekt

"Innovationsgruppe AUFWERTEN – Agroforstliche Umweltleistungen für Wertschöpfung und Energie"

Projektlaufzeit: 01.11.2014 bis 31.07.2019

URL: <http://agroforst-info.de/>

## Förderung und Förderkennzeichen:

Die Förderung des Projektes erfolgte durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) innerhalb des Rahmenprogramms Forschung für Nachhaltige Entwicklung (FONA)

Förderkennzeichen: 033L129

Die Verantwortung für den Inhalt dieses Loseblattes liegt bei den Autoren.

Potsdam, den 22.05.2020

## INHALTSVERZEICHNIS

Abbildungsverzeichnis .....	2
Tabellenverzeichnis .....	2
Zusammenfassung .....	3
1 Einleitung .....	4
2 Verluste bei der Lagerung von Agrarholz .....	5
3 Verfahren zur Lagerung von Agrarholz .....	7
3.1 Lagern und natürliches Trocknen im Freihaufen .....	7
3.1.1 Lagern von Hackschnitzeln im Freihaufen .....	7
3.1.2 Ganzbaumlagerung.....	9
3.2 Lagern im Freien mit zusätzlichen Einbauten im Haufwerk für die Belüftung .....	10
3.2.1 Dombelüftung.....	10
3.2.2 Kaltbelüftung .....	12
3.3 Lagern und natürliches Trocknen unter Dach .....	14
3.4 Lagern und technisches Trocknen mit Einsatz von Fremdenergie .....	15
4 Schlussfolgerungen .....	15
Literatur .....	16

## ABBILDUNGSVERZEICHNIS

<b>Abbildung 1:</b> Prozessschritte der Holzproduktion in Agroforstsystemen und Einflussfaktoren auf die Qualität der Endprodukte .....	4
<b>Abbildung 2:</b> Typischer Trocknungsverlauf von Pappelhackgut am Beispiel einer unbelüfteten, mit einem Vlies abgedeckten Miete für Fein- und Mittelhackschnitzel (P31 bzw. P45) .....	6
<b>Abbildung 3:</b> Günstige Gestaltung von Freihaufen für die Lagerung von Hackschnitzeln .....	8
<b>Abbildung 4:</b> Günstige Gestaltung einer Praxismiete mit Vliesabdeckung als Freihaufen.....	8
<b>Abbildung 5:</b> Praxismiete in einem Fahrtilo (Feuchtigkeitszonen an den Silowänden) .....	9
<b>Abbildung 6:</b> Ganzbaumlager für die Trocknung von Pappelstämmen (ATB 2014).....	9
<b>Abbildung 7:</b> Trocknungsverlauf bei der Ganzbaumlagerung von Pappelstämmen (ATB 2014)	10
<b>Abbildung 8:</b> Wirkprinzip des Dombelüftungsverfahrens (Bemmann und Knust 2010) .....	11
<b>Abbildung 9:</b> Trocknungsverlauf und Masseverluste bei der Dombelüftung .....	11
<b>Abbildung 10:</b> Schematischer Aufbau einer Anlage für die effiziente Belüftungstrocknung von Hackschnitzeln mit sensorgesteuertem Ventilatorbetrieb.....	12
<b>Abbildung 11:</b> Praxisversuch zur Kaltbelüftung von Pappel-Hackschnitzeln (oben: Aufbau des Gesamtsystems, unten: Darstellung des teleskopierbaren Belüftungskanals vor der Befüllung).	13
<b>Abbildung 12:</b> Verteilung des Wassergehalts im Hackschnitzelhaufwerk nach 8-wöchiger Belüftung mit Außenluft .....	13
<b>Abbildung 13:</b> Lagerung von Hackschnitzeln in gut belüfteter/einseitig offener Halle .....	14
<b>Abbildung 14:</b> Prinzipskizze einer Lagerhalle mit seitlichen Öffnungen für eine ausreichende Belüftung .....	15

## TABELLENVERZEICHNIS

<b>Tabelle 1:</b> Ergebnisse verschiedener Ganzbaumlagerversuche .....	10
<b>Tabelle 2:</b> Daten zur Kaltbelüftung .....	14
<b>Tabelle 3:</b> Gegenüberstellung von Aufwand und Nutzen verschiedener Lagerverfahren für Agrarholz .....	16

## ZUSAMMENFASSUNG

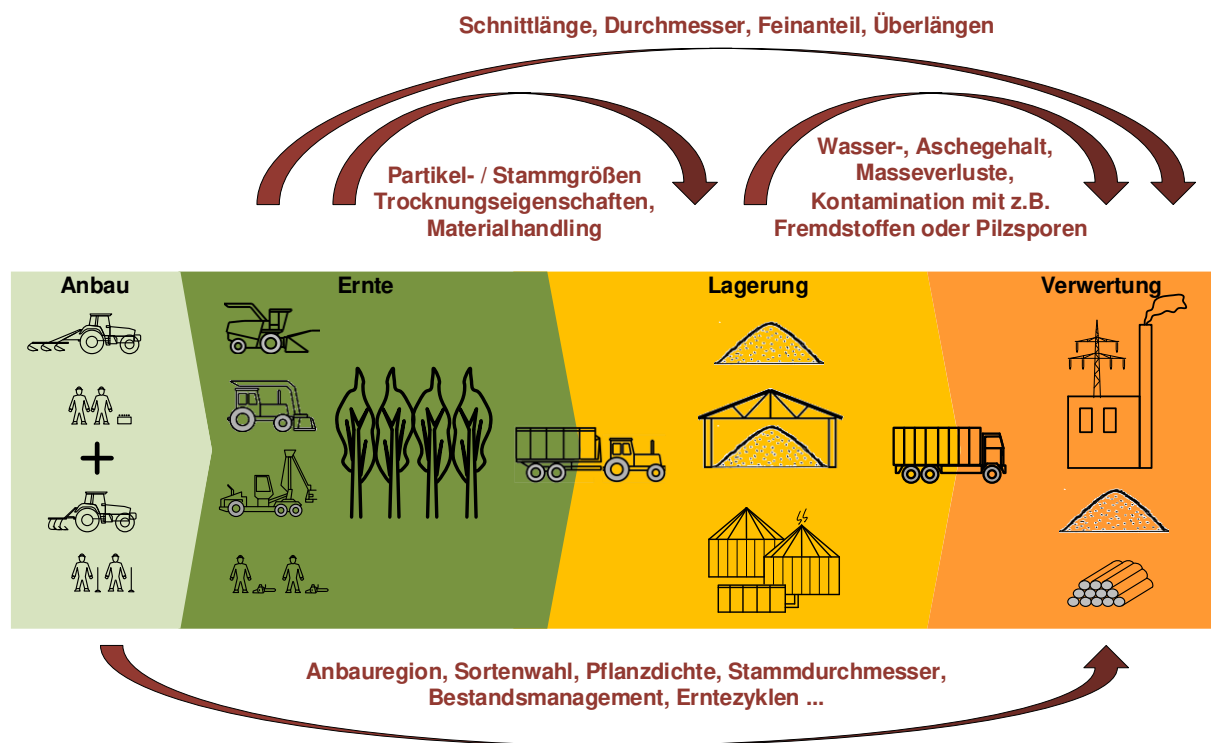
Holz aus Agroforstsystemen wird in der Wintersaison überwiegend als Hackschnitzel aber auch als Stammholz geerntet. Zum Erntezeitpunkt weist das Holz auch in dieser Jahreszeit – je nach Holzart – einen Wassergehalt von üblicherweise 40 bis 60 % auf. Damit ist eine längere Lagerung und die gleichzeitige Trocknung des Ernteguts meist unvermeidbar. Die hierfür erforderliche Logistik muss mit den Ernteprozessen optimal verknüpft und auf die spätere Verwendung des Produkts abgestimmt werden. Die Lagerung und Trocknung als Hackschnitzel in natürlich belüfteten Freihaufen ist eine häufig praktizierte und sehr kostengünstige Lösung, die jedoch mit Trockenmassenverlusten von mehr als 20 Masse-% verbunden sein kann. Nach wenigen Monaten Lagerung erreichen die Hackschnitzel Wassergehalte von 30 bis 35 %. Diese Verluste können durch eine zusätzliche Belüftung des Haufwerks mit Kaltluft oder technisch vorgewärmter Luft deutlich reduziert werden, bei gleichzeitig beschleunigter Trocknung. Hiermit sind allerdings höhere Verfahrenskosten und der Einsatz von Fremdenergie verbunden, so dass der mit diesen Verfahren verbundene Mehraufwand nur dann gerechtfertigt ist, wenn pro Tonne Endprodukt auch ein höherer Marktpreis erzielt werden kann. Alternativ kann das Holz auch im Polter als Ganzbaum getrocknet werden. Hierdurch können die Verluste ebenfalls reduziert werden, allerdings trocknet z.B. Pappelholz im Polter deutlich langsamer als Hackschnitzel. Darüber hinaus ist die Ganzbaumlagerung mit höheren Erntekosten verbunden, so dass sich diese Verfahrenslinie vorzugsweise für längere Umtriebszeiten und Bäume mit Stammdurchmessern von mehr als 15 cm eignet.

# 1 EINLEITUNG

Unter Lagern versteht man jedes geplante Liegen von Materialien, das den Materialfluss gewollt unterbricht. Lagern dient der Überbrückung und dem Ausgleich zeitlicher Differenzen zwischen ankommenden und abgehenden Gütern (VDI-Richtlinie 2411). Darüber hinaus kann durch das Lagern eine Qualitätsänderung, z.B. durch Alterung, Gärung, Reifung, Abkühlung oder Trocknung (Veredelungsfunktion), herbeigeführt werden. Im diesem Fall ist die Lagerung integraler Bestandteil des Produktionsprozesses und das Ausmaß der Qualitätsänderung ist stark von den Rohstoffeigenschaften und den Lagerbedingungen abhängig. Bei der Lagerung von Agrarholz werden in der Regel beide Ziele angestrebt, der Ausgleich zeitlicher Differenzen im Materialbedarf aber auch gleichzeitig die Verbesserung der Qualität des Holzes durch die Trocknung.

Um die Vitalität der Agrarholzbestände zu erhalten und insbesondere den Wiederaustrieb nach der Ernte sicherzustellen, muss die Ernte der gesamten Agrarholzbestände während der Winterruhe im Zeitraum von ca. Anfang November bis Ende März erfolgen. Damit fällt in einem relativ kurzen Zeitraum die gesamte jährliche Erntemenge an. Darüber hinaus weist auch in dieser Jahreszeit das Erntegut – je nach Holzart – einen Wassergehalt von üblicherweise 40 bis 60 % auf. Damit ist eine längere Lagerung des geernteten Holzes aus Agroforstsystemen und die gleichzeitige Trocknung meist unvermeidbar. Die hierfür erforderliche Logistik muss mit den Ernteprozessen optimal verknüpft werden. Darüber hinaus sollte aber auch mit dem potenziellen Abnehmer des Erntegutes bereits vor der Ernte abgestimmt werden, zu welchem Zeitpunkt das Holz benötigt wird und welche Qualitätsanforderungen an das Endprodukt gestellt werden.

In Abhängigkeit von den räumlichen, zeitlichen und den qualitativen Anforderungen an das Endprodukt muss die gesamte Prozesskette der Ernte, Lagerung und Aufbereitung gestaltet werden. Die Lagerung stellt hierbei einen zentralen Baustein dar, mit zahlreichen qualitätsbestimmenden Verknüpfungen zu den anderen Prozessschritten (siehe Abb. 1).



**Abbildung 1:** Prozessschritte der Holzproduktion in Agroforstsystemen und Einflussfaktoren auf die Qualität der Endprodukte

Auf Grundlage der geltenden Regelungen zu den Umtriebszeiten von Holz von landwirtschaftlichen Flächen, ist die maximale Umtriebszeit auf 20 Jahre beschränkt. Damit unterscheidet sich Holz aus Agroforstsystemen nicht nur hinsichtlich der gewählten Baumarten, sondern auch hinsichtlich der erzielbaren Stammdurchmesser von den Holzsortimenten der Forstwirtschaft. Die Produktion von Wertholz in der Landwirtschaft – d.h. von Stammholz mit Durchmessern von mehr als 20 cm – stellt in diesem Bereich bisher noch eine Nische dar. Für die Wertholzproduktion können die bekannten Verfahren aus der Forstwirtschaft genutzt werden, basierend auf der Ganzbaumernte und der Lagerung der Stammabschnitte.

In der landwirtschaftlichen Holzproduktion sind überwiegend Umtriebszeiten von 3 bis 5 Jahren üblich (kurzer Umtrieb). Seltener wird mit größeren Umtriebszeiten von z.B. 6 bis 10 Jahren (mittlerer Umtrieb) oder bis 20 Jahren (langer Umtrieb) gewirtschaftet. Verfahren zur Lagerung und Trocknung von Holz aus Agroforstsystemen müssen dementsprechend angepasst werden. Daher liegt der Focus der folgenden Verfahrensdarstellung auf den üblichen Prozessketten zur Lagerung von Hackschnitzeln oder von Ganzbäumen mit Stammdurchmessern von max. 20 cm.

Lagerprozesse in der Agroforstwirtschaft dienen nicht nur dem „Zwischenspeichern“ des Erntematerials, sondern in der Regel auch der gleichzeitigen Trocknung. Eine Reduzierung des Wassergehalts durch Trocknen ist häufig nicht nur erforderlich, um das Holz anschließend einer hochwertigen Verwertung wie z.B. der Verbrennung zur Bereitstellung von Heiz- oder Prozesswärme zuzuführen, sondern auch, um es über einen längeren Zeitraum möglichst verlustarm lagern zu können.

## 2 VERLUSTE BEI DER LAGERUNG VON AGRARHOLZ

Mikrobiologisch-chemische Prozesse können in Abhängigkeit von Holzart und Lagerbedingungen zu hohen Masseverlusten während der Lagerung führen. Die detaillierten Mechanismen konnten bisher noch nicht ausreichend geklärt werden. Versuche zur Hackschnitzellagerung der letzten 20 Jahre haben je nach Witterungsbedingung, Lagerzeitraum und Hackschnitzleigenschaften sehr unterschiedliche Ergebnisse zu monatlichen Trockenmasseverlusten aber auch zu den langfristigen Verlusten (Lagerdauer 6 bis 9 Monate) gezeigt. Abbildung 2 zeigt qualitativ einen typischen Verlauf der Temperaturentwicklung, Trocknung und Trockenmasseverluste bei der Lagerung von Feinhackschnitzeln (Größenklasse P16 - P31, EN ISO 17225-4 (E ISO 2014)). In unbelüfteten Hackschnitzelhaufen kommt es gewöhnlich innerhalb von wenigen Tagen nach der Haufwerkserrichtung aufgrund der Restatmung der Pflanzenzellen und mikrobiologisch-chemischer Prozesse zu einer Temperaturerhöhung auf 55 bis 65 °C. Frostgrade bei Ernte und Einlagerung können den Beginn der Temperaturerhöhung verzögern. Mit zunehmender Lagerdauer entwickeln sich vermehrt Schimmelpilze, die einen sachgerechten Umgang mit den Hackschnitzeln erfordern (Idler et. al 2019). Mit dem Beginn der Temperaturerhöhung im Lagerhaufen steigen die Trockenmasseverluste. Diese folgen in Abhängigkeit von der Lagerdauer jedoch keinem linearen Verlauf. Die höchsten Verluste pro Zeiteinheit treten innerhalb der ersten 6 bis 12 Lagerwochen auf und können z.B. bei der Lagerung von Feinhackschnitzeln im unbelüfteten Freihaufen nach 3 Monaten bereits ca. 20 % betragen (siehe Abb. 2; Barontini 2014; Pecenka et al. 2014; Lenz et al. 2017; Pecenka et al. 2018). Nach ca. 6 Monaten betragen die Gesamtverluste bei der Lagerung von Hackschnitzeln im Freihaufen unter den für Deutschland typischen Witterungsbedingungen üblicherweise 15 bis 27 Masse-%. Praxisversuche zum Einfluss der Hackschnitzelgröße auf das Lagerungs- und Trocknungsverhalten haben nur leichte Unterschiede zwischen Fein- und Mittelhackschnitzeln gezeigt (siehe Abb. 2). Mittelhackschnitzeln trocknen etwas schneller und können nach 6 Monaten Lagerung geringere Wassergehalte erreichen, jedoch liegen auch hier die Trockenmasseverluste nur geringfügig unter denen der Feinhackschnitzeln.

Auch die Lagerung von ganzen Stämmen/Bäumen ist mit Lagerverlusten verbunden. Untersuchungen von Bärwolff et al. (2012) und Lenz (2016) haben gezeigt, dass die Lagerverluste hier zwar deutlich niedriger sein können (5 bis 9 Masse-% bei ca. 6-monatiger Lagerung), allerdings trockneten die Ganzbäume in Abhängigkeit von der Gestaltung der Holzpolter und der Witterung in der überwiegenden Anzahl der vorliegenden Praxisversuche deutlich langsamer als Hackschnitzelhaufwerke (Wassergehalt am Ende der Lagerung: bestes Ergebnis 34 %<sup>1</sup>, typische Ergebnisse 37 bis 44 %).

Zusammenfassend können als fördernde Faktoren für Trockenmasseverluste folgende Parameter genannt werden:

- ein hoher Wassergehalt des Holzes von 50 bis 60 % zum Zeitpunkt der Ernte,
- andauernd hohe Wassergehalte während der Lagerung von mehr als 30 %,
- eine gute Versorgung der Lagerhaufen mit Sauerstoff,
- Lagertemperaturen von 25 bis 40 °C, da Schimmelpilze hier optimale Wachstumsbedingungen vorfinden.

Ziel einer jeden Lagerung sollte daher die schnelle Trocknung des Haufwerks und die Vermeidung der Wiederbefeuchtung durch Regenwassereintrag sein.

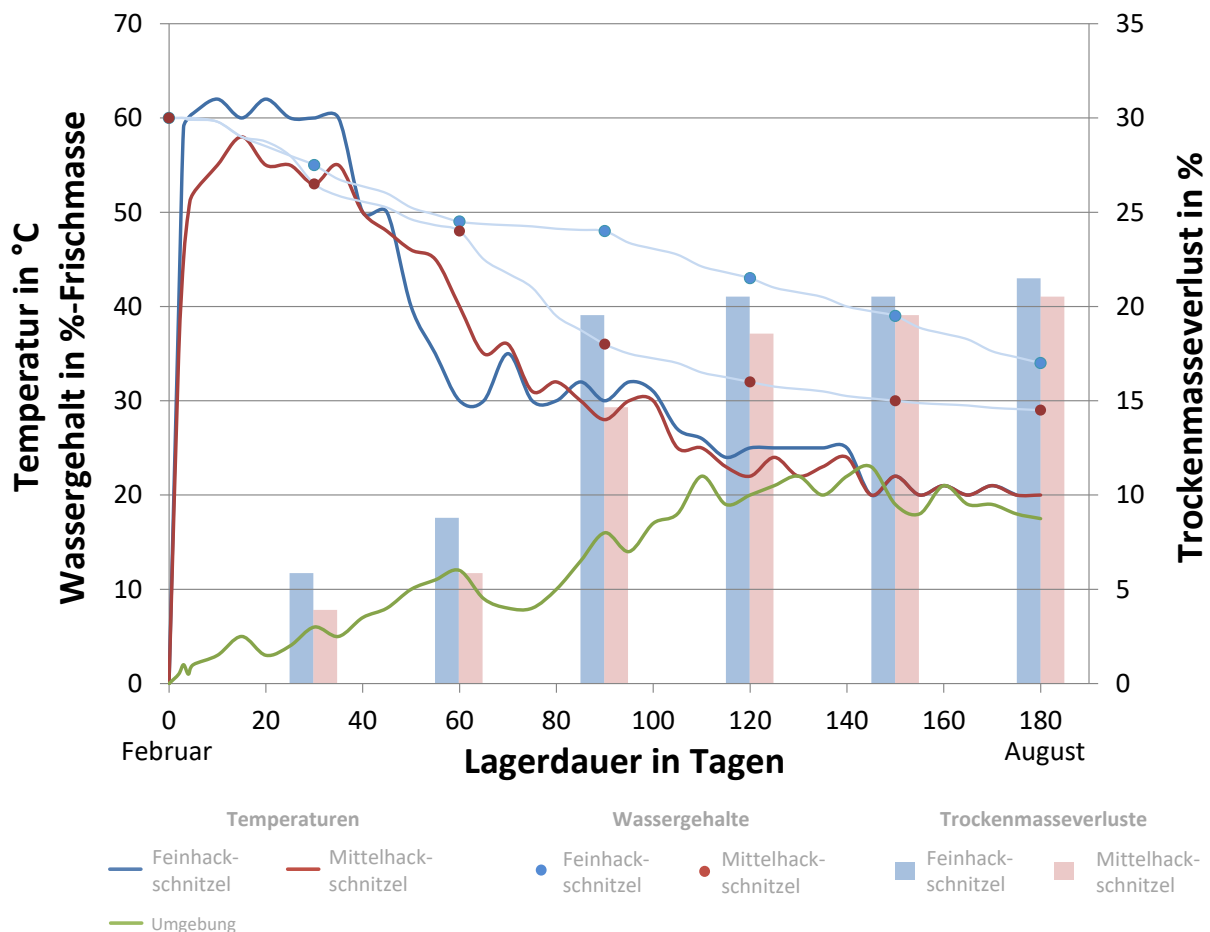


Abbildung 2: Typischer Trocknungsverlauf von Pappelhackgut am Beispiel einer unbelüfteten, mit einem Vlies abgedeckten Miete für Fein- und Mittelhackschnitzel (P31 bzw. P45)

<sup>1</sup> Alle Angaben zum Wassergehalt beziehen sich immer auf %-Gesamtmasse



## 3 VERFAHREN ZUR LAGERUNG VON AGRARHOLZ

Je gewählten Ernteverfahren (siehe **Loseblatt # 39** „Effiziente Verfahrenslinien für Ernte, Transport und Lagerung von Holz aus Agroforstsystemen“), müssen im Anschluss an die Ernte Ganzbäume oder Hackschnitzel über einen Zeitraum vom üblicherweise 3 bis 9 Monaten (z.B. bis zur nächsten Heizsaison) gelagert und getrocknet werden. Bevorzugt wird aufgrund der niedrigen Kosten eine natürliche (fremdenergiefreie) Trocknung. Je nach Technisierungsgrad, Energieeinsatz, Verfügbarkeit von kostengünstiger Wärme/Abwärme und Lagerort lassen sich die gegenwärtig in der Praxis üblichen Verfahren wie folgt einteilen:

- A) Lagern und natürliches Trocknen im Freien (Freihaufen)
  - zerkleinert als Hackschnitzel oder Stückholz im Haufen
  - zerkleinert als Hackschnitzel oder Stückholz im Fahrsilo
  - unzerkleinert als Ganzbaum im Haufen
  - mit oder ohne zusätzliche Abdeckung
  
- B) Lagern im Freien mit zusätzlichen Einbauten im Haufwerk für die Belüftung
  - zerkleinert als Hackschnitzel im Haufen mit Belüftungsdomen
  - zerkleinert als Hackschnitzel im Haufen mit Belüftungsreitern und Zwangsbelüftung mittels Ventilator
  
- C) Lagern und natürliches Trocknen unter Dach
  - zerkleinert als Hackschnitzel oder Stückholz im Haufen
  - zerkleinert als Hackschnitzel oder Stückholz als hohe Schüttung zwischen Wänden oder in Boxen
  
- D) Lagern und technisches Trocknen unter Dach (siehe **Loseblatt # 43**)
  - zerkleinert als Hackschnitzel in Trocknungscontainern
  - zerkleinert als Hackschnitzel in der Halle in Trocknungsboxen oder auf Systemen zur Flächentrocknung
  - unter Zweitnutzung landwirtschaftlicher Trocknungstechnik (z.B. zur Getreide-, Heu- oder Gärresttrocknung)

Alle diese Lagerprozesse dienen nicht nur dem „Zwischenspeichern“ des Erntematerials, sondern in der Regel auch der gleichzeitigen Trocknung. Eine Reduzierung des Wassergehalts durch Trocknen ist häufig nicht nur erforderlich, um das Holz anschließend einer hochwertigen Verwertung wie z.B. der Verbrennung zur Bereitstellung von Heiz- oder Prozesswärme zuzuführen, sondern auch eine wesentliche Voraussetzung um Holz oder Holzhackschnitzel über einen längeren Zeitraum möglichst verlustarm und ohne größere qualitative Einbußen lagern zu können.

### 3.1 Lagern und natürliches Trocknen im Freihaufen

#### 3.1.1 Lagern von Hackschnitzeln im Freihaufen

Die Lagerung und natürliche Trocknung von Hackschnitzeln im Freihaufen ist eine der kostengünstigsten Varianten. Während in den niederschlagsärmeren Gegenden Nordostdeutschlands keine Abdeckung mit einem atmungsaktiven Kompostvlies erforderlich ist, kann eine solche je nach Jahreszeit, den zu erwartenden Niederschlägen bzw. einer möglichen Bedeckung mit Schnee insbesondere für die südlichen Regionen Deutschlands vorteilhaft sein (Abb. 3 und 4). Grobe Hackschnitzel (P45, P63 etc.) zeigen bei der Lagerung im Freihaufen aufgrund der besseren Haufwerksdurchlüftung ein etwas besseres Trocknungsverhalten als Feinhackschnitzel (P16, P31), die Trockenmasseverluste sind jedoch ähnlich hoch (Pecenka et al. 2018). Bei der Gestaltung der Mieten ist unbedingt darauf zu achten, dass die Mieten möglichst steil und mit ebenen Oberflächen

aufgeschüttet werden, um den unerwünschten natürlichen Eintrag von Regenwasser zu minimieren.



**Abbildung 3:** Günstige Gestaltung von Freihäufen für die Lagerung von Hackschnitzeln



**Abbildung 4:** Günstige Gestaltung einer Praxismitte mit Vliesabdeckung als Freihaufen

Sollten landwirtschaftliche Fahrsilos zur Lagerung von Hackschnitzeln zur Verfügung stehen, stellen auch diese eine empfehlenswerte Lageroption dar. Der Einbau eines Folienstreifens zum Ableiten von Regenwasser im Bereich der Silowände ist hier jedoch empfehlenswert, um ein starkes Durchnässen dieser Bereiche zu vermeiden (Abb. 5). Zu dieser Lagervariante liegen bisher noch nicht viele Erfahrungen aus der Praxis vor. In einem eigenen Lagerversuch hat dieses System jedoch trotz der Feuchtigkeitszonen an den Silowänden sehr positive Ergebnisse gezeigt (sehr gute Trocknung bei Verlusten von nur ca. 15 Masse-% nach 6-monatiger Lagerung) (Pecenka et al. 2014).



Abbildung 5: Praxismiete in einem Fahrsilo (Feuchtigkeitszonen an den Silowänden)

### 3.1.2 Ganzbaumlagerung

Das Lagern und Trocknen von Ganzbäumen ist insbesondere für Bäume mit größeren Stammdurchmessern geeignet. Aber auch bei der Ernte mit Systemen zur Rutenernte stellt die Ganzbaumlagerung eine mögliche Alternative zur Zwischenlagerung von Agrarholz dar (Abb. 6).



Abbildung 6: Ganzbaumlager für die Trocknung von Pappelstämmen (ATB 2014)

Trocknungsfortschritt und Kosten des Gesamtverfahrens hängen jedoch stark von der Holzart sowie von den Witterungs- und Standortbedingungen ab. Verschiedene Praxisversuche haben gezeigt, dass für eine ausreichende Trocknung eine gute Durchlüftung des Lagerhaufens und ebenso die Ableitung von Regenwasser bzw. das Vermeiden des Feuchteintrags aus dem Lageruntergrund wesentliche Voraussetzungen sind. Vorteilhaft bei der Ganzbaumlagerung sind die relativ geringen Trockenmasseverluste (bis ca. 10 Masse-% innerhalb von 6 Monaten, Abb. 7). Nachteilig

ist jedoch, dass z.B. Pappelholz (Stammdurchmesser ca. 10 bis 15 cm) nur relativ langsam im Polter trocknet und daher evtl. eine anschließende Nachtrocknung erforderlich sein kann (siehe Tab. 1). Darüber hinaus müssen auch die höheren Gesamtkosten des Verfahrens aufgrund zusätzlich erforderlicher Arbeitsschritte (z.B. Nachhacken des Polters mit Mobilhacker) berücksichtigt werden. Das Verfahren eignet sich somit vorwiegend für Bäume aus dem mittleren bis längeren Umtrieb, vorzugsweise für Bäume mit Stammdurchmessern von mehr als 15 cm.

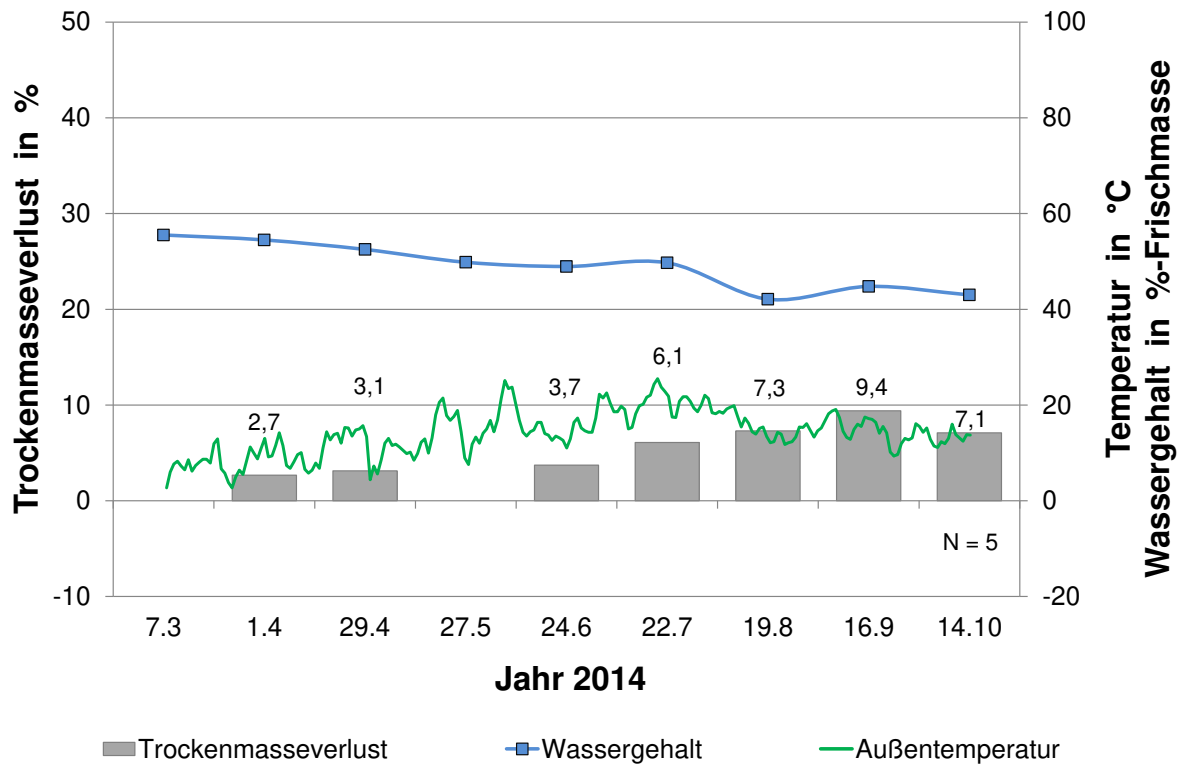


Abbildung 7: Trocknungsverlauf bei der Ganzbaumlagerung von Pappelstämmen (ATB 2014)

Tabelle 1: Ergebnisse verschiedener Ganzbaumlagerversuche

	TLL (Bärwolff und Hering 2012)	Versuch ATB (Lenz et al. 2015)	ATB+TLL (Lenz et al. 2018)
Jahr	22.02.-23.08.2011	07.03.-14.10.2014	25.01.-08.08.2017
Anfangswassergehalt [%]	56	56	56
Endwassergehalt [%]	34	43	44 (08.08.2017) 37 (24.10.2017)
Trockenmasseverlust [Masse-%]	6	9	5
Untergrund	Betonfläche	Feldboden (Vorgewende)*	Kompostvlies (Vorgewende)*

\* auf Querhölzern aufgepoltert zur besseren Durchlüftung

## 3.2 Lagern im Freien mit zusätzlichen Einbauten im Haufwerk für die Belüftung

### 3.2.1 Dombelüftung

Das von der TU Dresden entwickelte DOM-Belüftungsverfahren (Brummack 2008) ist eine fremdenergiefreie Trocknungstechnologie, bei der Zu- und Abluftdome gezielt feuchte Luft aus der Miete herauszuführen sollen (Abb. 8).

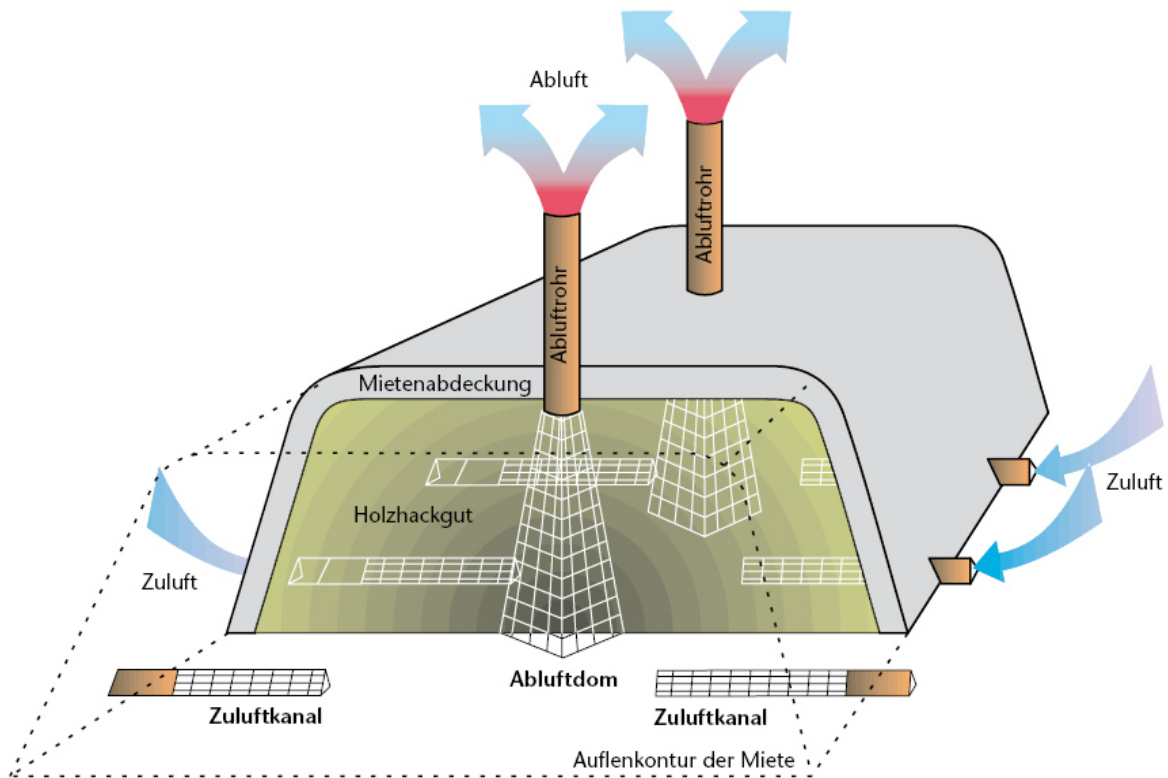


Abbildung 8: Wirkprinzip des Dombelüftungsverfahrens (Bemmann und Knust 2010)

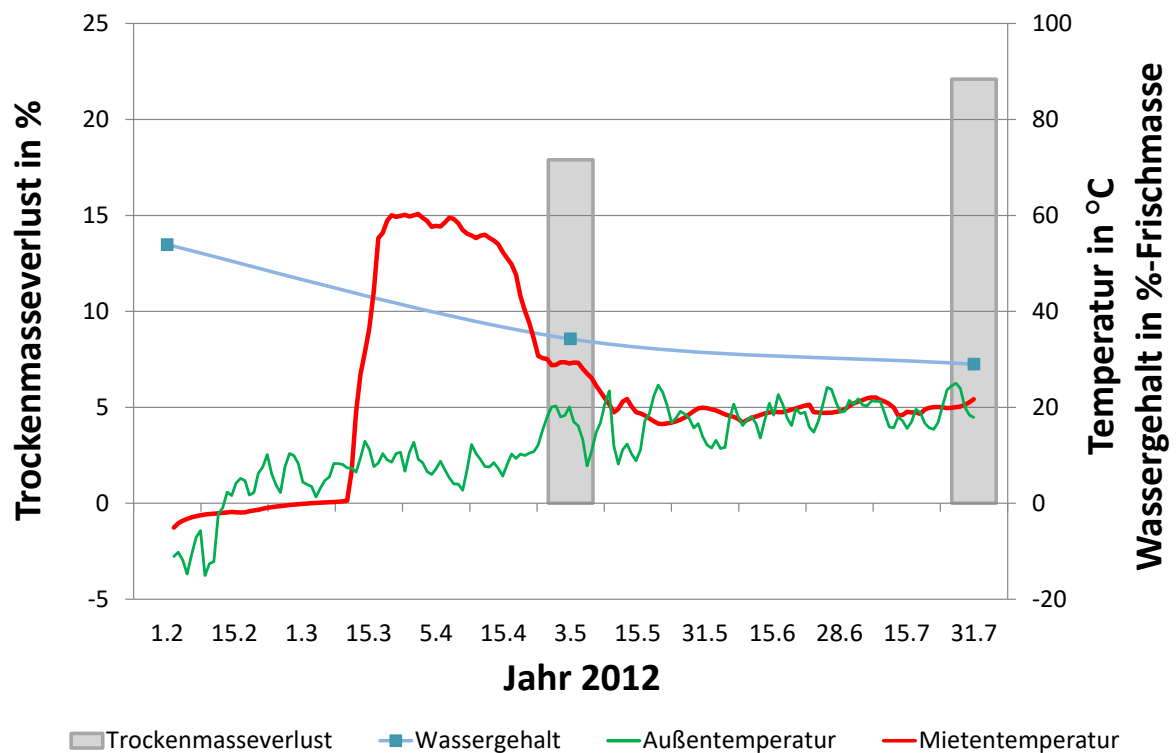
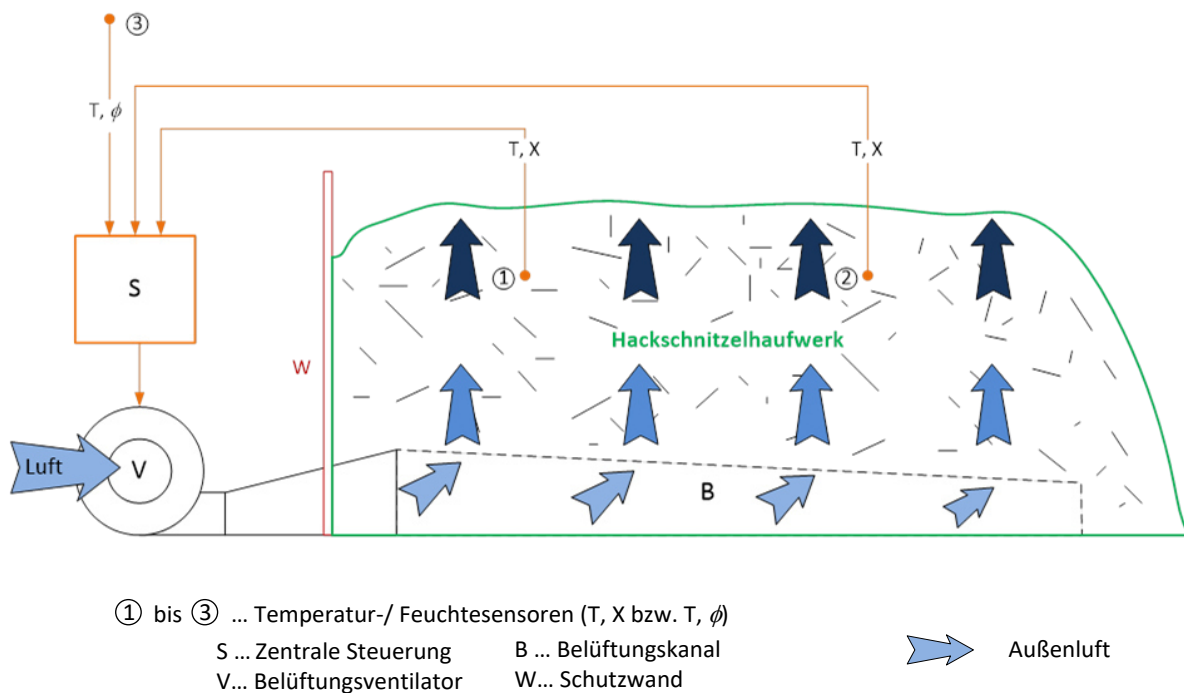


Abbildung 9: Trocknungsverlauf und Masseverluste bei der Dombelüftung

Die fachgerechte Umsetzung des Verfahrens in der Praxis ist mit einem erheblichen Aufwand an Arbeitskräften und technischer Ausstattung verbunden. Vorteil des Verfahrens kann eine im Vergleich zum unbelüfteten Freihaufen beschleunigte Trocknung des Hackgutes sein. Ein Verfahrensvergleich mit der Trocknung von Hackschnitzeln in einem Fahrsilo im Jahr 2012 am Lehr- und Versuchsgut Köllitsch (Sachsen) hat jedoch gezeigt, dass auch mit dem Dombelüftungsverfahren die Trockenmasseverluste im Vergleich zur Lagerung in unbelüfteten Haufwerken nicht gesenkt werden konnten. Darüber hinaus waren erhebliche zusätzliche Verluste durch den Verderb der direkt unter der Abdeckung (Silofolie) liegenden stark durchnässten Schichten entstanden. Abhilfe könnte hier durch den Austausch der Silofolien gegen ein Kompostvlies geschaffen werden. Inwieweit dies aber die Funktionsweise des Gesamtsystems beeinträchtigt, wurde bisher nicht untersucht. Die Ergebnisse dieses Lagerversuchs aus dem Jahr 2012 sind exemplarisch in Abbildung 9 dargestellt (Pecenka et al. 2013).

### 3.2.2 Kaltbelüftung

Für die Zwischenlagerung landwirtschaftlicher Güter sind insbesondere aus der Kartoffellagerung aber auch aus der Getreidebelüftung Systeme zur Kaltbelüftung bekannt. Diese dienen allerdings nicht primär zur Trocknung, sondern sollen vorrangig gewährleisten, dass kritische Lagertemperaturen nicht überschritten werden. Hierfür wird auf der Grundlage von Handmessungen das System manuell geschaltet, oder ein Temperatursensor (Einstechfühler) wird mit einer einfachen Steuerung für das automatisierte Einschalten verbunden.



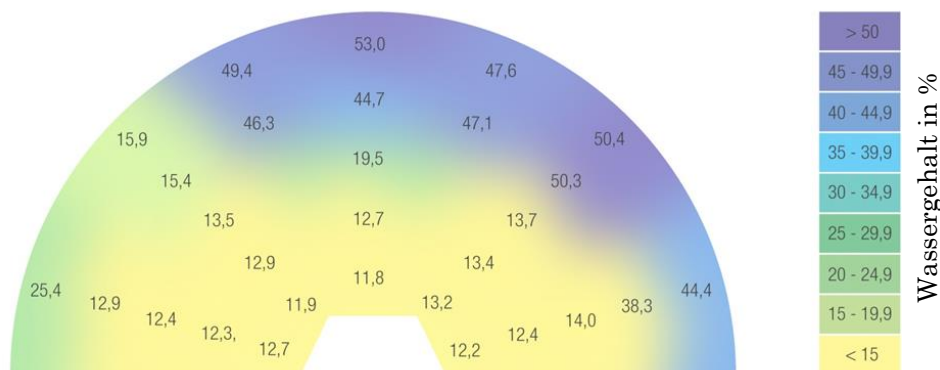
**Abbildung 10:** Schematischer Aufbau einer Anlage für die effiziente Belüftungstrocknung von Hackschnitzeln mit sensorgesteuertem Ventilatorbetrieb

Ausgehend von diesen Systemen befindet sich in Kooperation von ATB Potsdam, TU Dresden und zwei Industriepartnern ein neuartiges System zur energieeffizienten Kaltbelüftung und gleichzeitigen Trocknung von Holzhackschnitzeln in Entwicklung (Gottschalk und Pecenka 2017; Pecenka et al. 2017). Mittels Online-Erfassung von Außenluftbedingungen sowie von Temperatur und Wassergehalt der Hackschnitzel werden die Betriebsparameter des Kaltbelüftungssystems gesteuert (Abb. 10 und 11). Hiermit kann das Trocknungspotential der Außenluft auch unter winterlichen Bedingungen optimal für die Hackschnitzeltrocknung ausgenutzt werden und die stromkostenintensiven Laufzeiten für die Belüftungsanlage minimiert werden. Durch einen beschleunigten Wasserentzug bei gleichzeitiger Kühlung des Ernteguts können die Lagerverluste erheblich reduziert

und qualitativ hochwertige getrocknete Holzhackschnitzel erzeugt werden. Erste Versuche unter Praxisbedingungen haben gezeigt, dass in Abhängigkeit von den Witterungsbedingungen mit dem System Hackschnitzel in den Monaten März bis Mai innerhalb von ca. 8 Wochen von einem Anfangswassergehalt von ca. 55 % auf ca. 20 % getrocknet werden können (Abb. 12 und Tab. 2).



**Abbildung 11:** Praxisversuch zur Kaltbelüftung von Pappel-Hackschnitzeln (oben: Aufbau des Gesamtsystems, unten: Darstellung des teleskopierbaren Belüftungskanals vor der Befüllung)



**Abbildung 12:** Verteilung des Wassergehalts im Hackschnitzelhaufwerk nach 8-wöchiger Belüftung mit Außenluft

**Tabelle 2:** Daten zur Kaltbelüftung

Parameter	
Versuchszeitraum	18.02. bis 13.04.2015
Anfangswassergehalt	54 %
Endwassergehalt	18 %
Trockenmasseverlust	< 2 Masse-%
Elektroenergiebedarf für den Ventilatorbetrieb	4,4 MWh
Heizwertsteigerung	27,1 MWh

### 3.3 Lagern und natürliches Trocknen unter Dach

Die Lagerung von Hackschnitzeln unter Dach ist mit deutlich höheren Kosten verbunden (geeignete Halle erforderlich; Abb. 13 und 14), führt aber aufgrund des in Abhängigkeit von der baulichen Gestaltung des Gebäudes weitgehend unterbundenen Eintrags von Regenwasser zu einer deutlich besseren Trocknung bei reduzierten Verlusten. Je nach Ausgangswassergehalt, Witterung und Standortbedingungen können Trocknungsfortschritte von bis zu 10 %-Punkten pro Monat (in den ersten 3 Monaten) im Lagerhaufwerk erreicht werden. D.h., dass pro m<sup>3</sup> Hackschnitzel 50 bis 70 Liter Wasser innerhalb eines Monats frei werden und aus der Hallenluft abgeführt werden müssen. Deshalb ist die Lagerung unter einem Schleppehdach aufgrund der besseren Belüftung empfehlenswert, andernfalls muss für eine ausreichende Hallenbelüftung gesorgt werden. Eine ungenügende Belüftung kann zu starker Kondensation am Hallendach, einer starken Befeuchtung der Baustruktur und einem Wiedereintrag des Wassers in das Haufwerk führen.



**Abbildung 13:** Lagerung von Hackschnitzeln in gut belüfteter/einseitig offener Halle



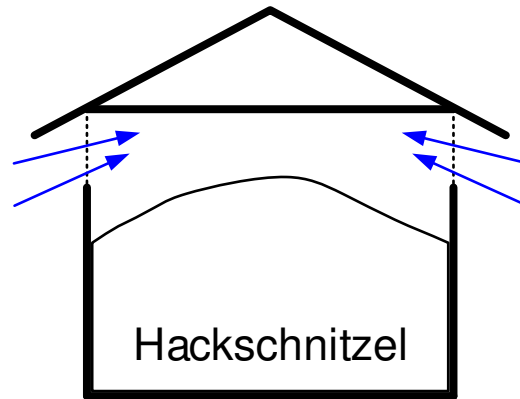


Abbildung 14: Prinzipskizze einer Lagerhalle mit seitlichen Öffnungen für eine ausreichende Belüftung







### 3.4 Lagern und technisches Trocknen mit Einsatz von Fremdenergie

Das technische Trocknen unter Nutzung von Fremdenergie für die Luftvorwärmung und den Betrieb von Ventilatoren für die aktive Durchströmung der Holzlager mit Trocknungsluft ist zwar sehr kostenintensiv, führt aber innerhalb von kurzer Zeit zu sehr guten Trocknungsergebnissen. Eine genauere Darstellung der in diesem Bereich üblichen Verfahren findet sich in **Loseblatt # 43** „Trocknung und Aufbereitung von Holz aus Agroforstsystemen“.

## 4 SCHLUSSFOLGERUNGEN

Welches Verfahren am jeweiligen Standort die beste Lösung darstellt, hängt stark von den individuellen Bedingungen am Standort und von den Anforderungen an das Endprodukt ab. Tabelle 3 gibt einen grundlegenden Überblick über die jeweiligen Vorzüge, technischen Aufwendungen und Kosten der Verfahren. Für die derzeit überwiegende energetische Verwendung der Hackschnitzel stellt die Lagerung und natürliche Trocknung im Freihaufen die häufig effizienteste Lösung dar. Wichtig ist hierbei, dass die Haufen möglichst steil und gleichmäßig (frei von Senken) aufgeschüttet werden, um den Eintrag von Niederschlägen in die Hackschnitzel zu minimieren. Bei einer längeren Lagerung im Freien bis in den nächsten Herbst/Winter ist eine Abdeckung der Hackschnitzel z.B. mit einem Kompostvlies erforderlich. Eine Lagerung bzw. Trocknung der Hackschnitzel unter Dach ist in jedem Fall vorteilhaft, jedoch mit erhöhten Kosten für das Gebäude verbunden. Hier ist abzuwägen, ob der spätere Einsatz der Hackschnitzel ein derartiges Verfahren erfordert und die damit verbundenen Kosten rechtfertigt.

**Tabelle 3:** Gegenüberstellung von Aufwand und Nutzen verschiedener Lagerverfahren für Agrarholz

Verfahren	Bewertung				
	Vorteile	Nachteile	Aufwand	Produktqualität	Kosten
Feinhackschnitzel (P16 – P31) im Freihaufen	Erntetechnik weitgehend verfügbar	Höhere Lagerverluste		+	€
Mittelhackschnitzel (P31 – P45) im Freihaufen	Verbesserte Trocknung bei leicht reduzierten Verlusten	Modifizierte Erntetechnik erforderlich		+	€
Hackschnitzel im Haufwerk mit Abdeckung durch Kompostvlies	Deutlich reduzierter Niederschlagseintrag	Zusatzkosten und Aufwand für Abdeckung des Haufwerks		++	€€
Dombelüftung	Beschleunigte Trocknung	Keine Reduzierung der Lagerverluste		+	€€€
Kaltbelüftung	Deutlich beschleunigte Trocknung und reduzierte Lagerverluste	Erhöhter technischer Aufwand und Energiebedarf für Lüfterbetrieb		+++	€€€€
Ganzbaumlagerung	Deutlich reduzierte Trockenmasseverluste, höhere Qualität des Ernteguts	Langsame Trocknung und höhere Erntekosten		+++	€€€

## LITERATUR

- Barontini M., Scarfone A., Spinelli R., Gallucci F., Santangelo E., Acampora A., Jirjis R., Civitarese V., Pari L. (2014): Storage dynamics and fuel quality of poplar chips. *Biomass and Bioenergy* 62, 17-25
- Bärwolff M., Hering T. (2012): Fremdenergiefreie Trocknungsvarianten für Holz aus Kurzumtriebsplantagen. In: TLL (Hrsg.) TLL, Dornburg, 11
- Bemmann A., Knust C. (2010): AGROWOOD: Kurzumtriebsplantagen in Deutschland und europäische Perspektiven. [SRC in Germany and European prospects], Berlin: Weißensee-Verlag
- Brummack J. (2008): Fremdenergiefreie Trocknung von Holzhackgut. *Bornimer Agrartechnische Berichte* 63, 5-20
- E ISO, EN ISO 17225–4 (2014): Solid Biofuels – Fuel Specifications and Classes – Part 4: Graded wood Chips
- Gottschalk K., Pecenka R. (2017): A thermodynamic model for open-air drying of wood chips. 23rd Workshop on energy and environment, SZENT ISTVÁN UNIVERSITY GÖDÖLLŐ, Gödöllő, Hungary
- Idler C., Pecenka R., Lenz H. (2019): Influence of the particle size of poplar wood chips on the development of mesophilic and thermotolerant mould during storage and their potential impact on dry matter losses in piles in practice. *Biomass and Bioenergy* 127, 105273
- Lenz H. (2016): Optimale Technologien zur verlustarmen Lagerung von Holzhackschnitzeln aus KUP in der Praxis, Nutzung nachwachsender Rohstoffe - Bioökonomie 3.0. TU Dresden, Dresden
- Lenz H., Pecenka R., Idler C. (2015): Optimum storage techniques for poplar wood from short rotation - a comparison of whole tree and fine chips storage. 23rd European Biomass Conference and Exhibition, Etaflorence, Vienna

- Lenz H., Pecenka R., Idler C., Dumfort S., Whittaker C., Ammon C., Hartung E. (2017): Continuous weighing of a pile of poplar wood chips – A comparison of methods to determine the dry matter losses during storage. *Biomass and Bioenergy* 96, 119-129
- Lenz H., Pecenka R., Idler C. (2018): Bestimmung von Wassergehalten und Trockenmasseverlusten während der Ganzbaumlagerung von Pappeln aus einer Kurzumtriebsplantage in Schwarzbach (Thüringen) im Jahr 2017. *ATB, Potsdam-Bornim*, 8
- Pecenka R., Lenz H., Daries W., Hoffmann T., Idler C. (2013): Kontinuierliche Analyse der Lagerbedingungen und Verluste in Hackschnitzellagern unterschiedlicher Bauart in der Praxis. In: TU Dresden (Hrsg.) 19. Fachtagung Energetische Nutzung nachwachsender Rohstoffe, TU Dresden, Dresden, 85-94
- Pecenka R., Lenz H., Idler C., Daries W., Ehlert D. (2014): Development of bio-physical properties during storage of poplar chips from 15 ha test fields. *Biomass and Bioenergy* 65, 13-19
- Pecenka R., Lenz H., Idler C. (2017): Energy-efficient cold-air ventilation of coarse wood chips from short rotation coppice. In: Etaflorence (Hrsg.) 25th European Biomass Conference & Exhibition Etaflorence, Stockholm
- Pecenka R., Lenz H., Idler C. (2018): Influence of the chip format on the development of mass loss, moisture content and chemical composition of poplar chips during storage and drying in open-air piles. *Biomass and Bioenergy* 116, 140-150