

Loseblatt # 39

# EFFIZIENTE VERFAHRENSLINIEN FÜR ERNTE, TRANSPORT UND LAGERUNG VON HOLZ AUS AGROFORSTSYS- TEMEN (ÜBERBLICK)

Ralf Pecenka, Hannes Lenz, Susann Skalda, Thomas Domin

# **Effiziente Verfahrenslinien für Ernte, Transport und Lagerung von Holz aus Agroforstsystemen (Überblick)**

## **Autoren**

Ralf Pecenka, Hannes Lenz, Susann Skalda, 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 14.07.2020

## INHALTSVERZEICHNIS

Abbildungsverzeichnis .....	1
Tabellenverzeichnis .....	1
Zusammenfassung .....	2
1 Einleitung .....	2
1.1 Produktion von Holzbiomasse in AFS .....	3
2 Ernteverfahren .....	3
2.1 Einstufige Ernteverfahren .....	4
2.1.1 Gutstrom bei der einstufigen Ernte .....	6
2.2 Zweistufige Ernteverfahren .....	7
2.3 Flächenleistungen und Erntekosten .....	9
3 Transport und Lagerung .....	10
3.1 Transport .....	10
3.2 Lagerung .....	11
4 Schlussfolgerungen .....	12
Literatur .....	12

## ABBILDUNGSVERZEICHNIS

<b>Abbildung 1:</b> Zusammenhang von Maschinenbreiten und Reihenabstand einer Agrarholzfläche	4
<b>Abbildung 2:</b> Einstufige Ernte von Hackschnitzeln .....	5
<b>Abbildung 3:</b> Feldhäcksler bei der Hackschnitzelernte .....	5
<b>Abbildung 4:</b> Mäh Hacker bei der Hackschnitzelernte .....	6
<b>Abbildung 5:</b> Trennen der Bäume vom Stock und Gutzufuhr bei der einstufigen Ernte; a) und b) Vorbiegen der Bäume und Umwerfen für horizontalen Einzug, c) Vertikaler Einzug der Bäume ..	7
<b>Abbildung 6:</b> Zweistufige Ernte von Hackschnitzeln .....	7
<b>Abbildung 7:</b> Technischeinsatz in der zweistufigen Agrarholzernte .....	9
<b>Abbildung 8:</b> Transporttechnik für Agrarholz .....	11

## TABELLENVERZEICHNIS

<b>Tabelle 1:</b> Typische Ernteleistungen und Verluste in der Agrarholzernte (ermittelt bei der Ernte von Pappeln in Kurzumtriebsplantagen) .....	10
<b>Tabelle 2:</b> Mögliche Kostenaufteilung in der Agrarholzernte (ermittelt bei der Ernte von Pappeln in Kurzumtriebsplantagen) .....	10

## ZUSAMMENFASSUNG

Holz aus Agroforstsystemen wird in der Wintersaison überwiegend als Hackschnitzel aber auch als Stammholz geerntet. Hierfür wurden in den letzten Jahrzehnten verschiedene auf land- und forstwirtschaftlicher Technik basierende Erntemaschinen und Verfahrensketten entwickelt. 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. In verschiedenen Studien zum Stand der Technik in der Agrarholzproduktion und zu den entsprechenden Verfahrenskosten wurde ermittelt, dass in Abhängigkeit von den Biomasseerträgen, der Bewirtschaftung und der Wahl der Erntetechnik 35 bis 60 % der Gesamtkosten der Biomasseproduktion allein auf die Ernte und den Transport zum Lagerplatz entfallen. Die optimale Gestaltung der Erntekampagne ist daher für die Wirtschaftlichkeit der Agrarholzproduktion besonders wichtig und fängt bereits bei der auf das Zielsortiment und die Erntetechnik abgestimmten Anlage eines Agroforstsystems an. Für die Produktion von Hackschnitzeln zur energetischen Verwertung werden häufig modifizierte Feldhäcksler aber auch Mäh Hacker für den Anbau an Standardtraktoren eingesetzt. Übliche Umtriebszeiten von Beständen für die Hackschnitzelproduktion liegen je nach Standort bei 3 bis 5 Jahren. Für die stoffliche Verwertung von Agrarholz (als Stammholz) dagegen sind längere Umtriebszeiten von maximal 20 Jahren erforderlich, so dass für die Ernte dieser Bäume aufgrund der größeren Stammdurchmesser ( $> 15$  cm) der Einsatz von Forsttechnik erforderlich ist.

## 1 EINLEITUNG

Auf landwirtschaftlichen Nutzflächen angelegte Gehölze bieten die Möglichkeit, Biomasse nachhaltig zu produzieren und gleichzeitig die Einkommenssituation in der Landwirtschaft zu verbessern. Unter europäischen Bedingungen besitzen schnell wachsende Baumarten wie Pappeln, Weiden und Robinien in Form von Kurzumtriebsplantagen (KUP) oder Agroforstsystem (AFS) ein erhebliches Potential für die Produktion von Holzbiomasse. Das auf diesen Flächen produzierte Agrarholz wird vorzugsweise für die Erzeugung von Wärme in hofeigenen Anlagen eingesetzt oder als Energieträger an regionale Heiz(-kraft)werke vermarktet. Auch eine stoffliche Verwertung der erntefrischen Hackschnitzel z.B. in der Holzwerkstoffindustrie ist möglich oder je nach Standort, Sorte und Anbausystem kann alternativ auch Stammholz innerhalb der bisher zulässigen maximalen Umtriebszeit von 20 Jahren produziert werden. In Europa wird gegenwärtig auf mehr als 40.000 ha Agrarholz produziert, davon ca. 6.500 ha in Deutschland (FNR 2020). Bei diesen Flächen handelt es sich jedoch überwiegend um KUP. Der Fokus des im Folgenden dargestellten Verfahrensüberblicks liegt auf der landwirtschaftlichen Produktion von Biomasse aus schnellwachsenden Gehölzen. Die für AFS erforderlichen Verfahren sind im Wesentlichen mit denen zur Bewirtschaftung und Ernte von KUP eingesetzten Verfahren identisch. Somit profitieren Agroforstsysteme in diesem Bereich von den Technikentwicklungen und Erfahrungen der zurückliegenden Jahrzehnte im KUP-Anbau. Wird dagegen die Produktion von Wertholz oder der Aufbau eines AFS zur Obstproduktion angestrebt, findet man die hierfür erforderlichen Informationen in den Bereichen der Forstwirtschaft bzw. des Obstanbaus.

## 1.1 Produktion von Holzbiomasse in AFS

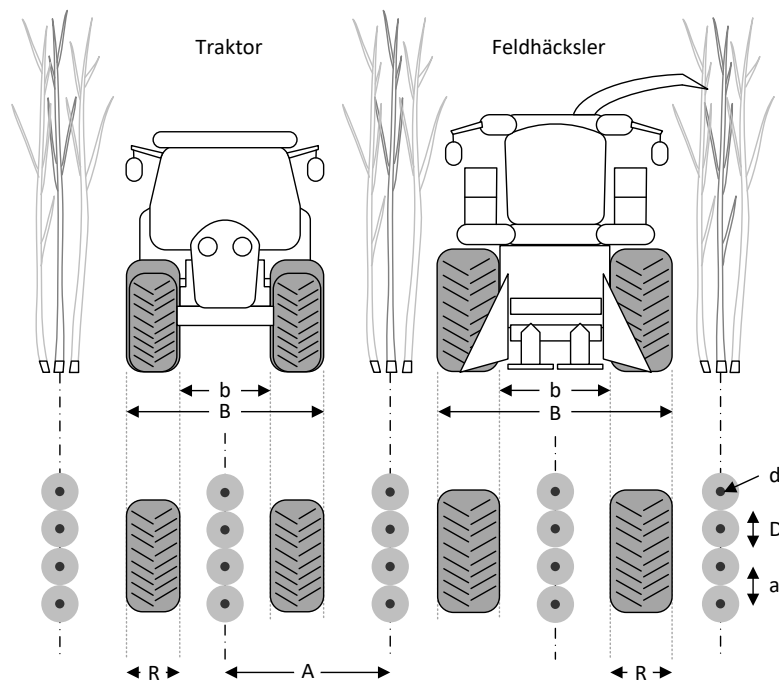
In verschiedenen Studien zum Stand der Technik in der Agrarholzproduktion und zu den entsprechenden Verfahrenskosten wurde ermittelt, dass in Abhängigkeit von den Biomasseerträgen, der Bewirtschaftung und der Wahl der Erntetechnik 35 bis 60 % der Gesamtkosten der Biomasseproduktion allein auf die Ernte entfallen (Scholz et al. 2008; Schweier 2013; Pecenka et al. 2014a; Pecenka und Hoffmann 2015). Um die maschinelle Ernte von Agrarholz (mit Fokus auf KUP) effizienter zu gestalten, gab es in den vergangenen 30 Jahren zahlreiche Lösungsansätze, von denen nur wenige Praxisreife erlangt haben.

Je nach Zielsortiment und den entsprechend ausgewähltem Anbausystem mit vielfältigen Baumarten, Pflanzabständen, etc., stehen dem Bewirtschafter heute schon eine Vielzahl von Erntemaschinen und die hierfür angepassten Verfahrenslinien zum anschließenden Transport, der Lagerung und der Aufbereitung des Ernteguts zur Verfügung. Grundsätzlich findet die Ernte schnellwachsender Baumarten außerhalb der Vegetationsperiode statt. Somit steht für die Ernte prinzipiell ein Zeitfenster von November bis März zur Verfügung. Es sollte möglichst darauf geachtet werden, dass die Flächen bodenschonend befahrbar sind. Lange Frostperioden bieten sich idealerweise für die Ernte an, können aber insbesondere bei länger anhaltenden Temperaturen von unter -5 °C aufgrund des dann durchgefrorenen Holzes nicht nur zu erheblich gesteigerten mechanischen Belastungen der eingesetzten Maschinen bei der Hackschnitzelernte führen, sondern auch zu einer Minderung der Hackschnitzelqualität durch eine intensivere Zerkleinerung der Bäume beim Hacken (Pecenka et al. 2020a). Hohe Schneelagen können eine zügige Ernte ebenso behindern. Auch sollte die verwendete Transporttechnik hinsichtlich ihrer störungsfreien Funktion unter winterlichen Einsatzbedingungen vorab geprüft werden.

## 2 ERNTEVERFAHREN

Wesentlich für den Einsatz ausgewählter Erntetechnik und die erzielbare Ernteleistung ist die richtige Flächenanlage. Bereits bei der Flächenbegründung müssen die angestrebten Umtriebszeiten und die verfügbare Erntetechnik berücksichtigt werden. Entsprechend sind ausreichend große Vorgewende, Reihenabstände und Pflanzabstände zu wählen (siehe [Loseblätter # 36](#) und [# 38](#)).

Abbildung 1 zeigt die grundlegenden Zusammenhänge zwischen Maschinenbreite und Reihenabstand. Für die störungsfreie Flächenbewirtschaftung müssen insbesondere die Spurbreiten der Ernte- und Transportsysteme berücksichtigt werden.



	<b>Merkmal</b>	<b>Typische Maße</b>	
a	Pflanzabstand	0,4 ... 0,7 m	
A	Reihenabstand	2,0 ... 2,5 m	
b	Spurweite innen	Traktor: 1,1 ... 1,4 m	Häcksler: 1,1 ... 1,7 m
B	Spurweite außen	Traktor: 2,5 ... 2,8 m	Häcksler: 2,9 ... 3,3 m
d	Pflanzplatzdurchmesser zur ersten Ernte	Entsprechend Schnittdurchmesser	
D	Pflanzplatzdurchmesser nach mehrmaliger Ernte	0,3 ... 0,5 m	
R	Reifenbreite (Standardbereifung)	Traktor: 62 ... 71 cm	Häcksler: 71 ... 90 cm

**Abbildung 1:** Zusammenhang von Maschinenbreiten und Reihenabstand einer Agrarholzfläche

Ernteverfahren werden üblicherweise nach ihrem Mechanisierungsgrad, der Kopplung der Teilarbeitsschritte, den vorgegebenen Sortimenten oder nach der Rotationslänge systematisiert (Landgraf et al. 2018). Im Folgenden werden die gegenwärtig üblichen Ernteverfahren in Abhängigkeit der Kopplung der Teilarbeitsschritte in ein- und zweistufige Verfahren unterschieden und im Detail beschrieben.

## 2.1 Einstufige Ernteverfahren

Die Ernte im einstufigen Verfahren ist national wie auch international eine praxisgängige Lösung, die sich hinsichtlich Ablauf und eingesetzter Technik stark an die in der Landwirtschaft üblichen Silomaisernte anlehnt. Das Material wird in einem Arbeitsgang gefällt und durch Hacken zerkleinert, d.h. die Hackschnitzel sind erntefrisch und haben je nach Baumart einen hohen Wassergehalt von 40 bis 60 % (Pappel ca. 55 %) (Idler et al. 2019). Je nachdem, für welche Verwendung die Hackschnitzel vorgesehen sind, kann deshalb eine anschließende Trocknung der Hackschnitzel nötig werden (Garstang et al. 2002).

Innerhalb der einstufigen Verfahren gibt es zwei verschiedene Systeme, die sich auf dem Markt etabliert haben (Abb. 2):

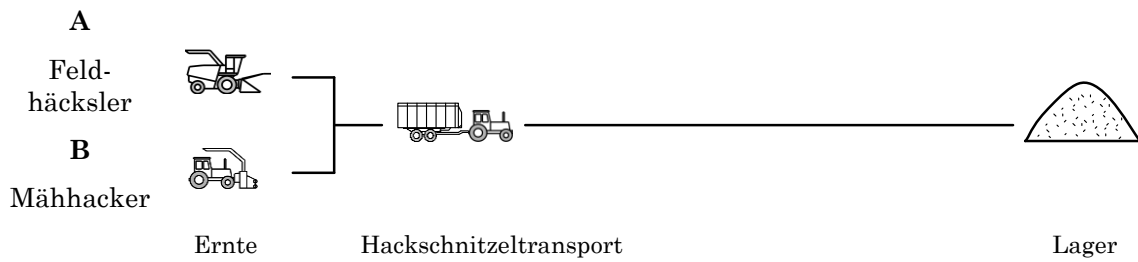


Abbildung 2: Einstufige Ernte von Hackschnitzeln

#### A) Selbstfahrende Feldhäcksler

Für die Ernte werden häufig modifizierte selbstfahrende landwirtschaftliche Feldhäcksler eingesetzt, bei denen die Biomasse mit Hilfe eines speziellen Gehölzschneidevorsatzes vom Stock getrennt und anschließend im Häckselaggregat des Feldhäckslers zerkleinert wird (Abb. 3). Die Bäume werden dabei unter Vorspannung einer horizontalen Einzugswalze zugeführt. Durch das Vorbiegen können die Bäume jedoch am Stamm brechen, was zu Störfällen führt (Wirkner 2010). Bei sehr dichten Beständen (Doppelreihe), mittleren bis längeren Umtriebszeiten (> 4 Jahre) oder älteren Beständen mit sehr breiten Stöcken funktioniert das Prinzip des Vorspannens nicht immer zuverlässig, so dass es hier zusätzlich zu Störungen bei der Materialzufuhr zum Häckselaggregat kommen kann. Ältere Systeme sind auf Schnitthalsdurchmessern von 7 bis 8 cm begrenzt. Neuere Maschinen bzw. Erntevorsätze können theoretisch Bäume bis zu einem Schnitthalsdurchmesser von ca. 15 cm in Einzel- oder in Doppelreihen ernten. Praxiserfahrungen haben gezeigt, dass bei Schnitthalsdurchmessern von mehr als 10 cm bei allen gängigen Systemen zunehmend mit Störungen des Materialstroms in das Häckselaggregat zu rechnen ist. Dies ist insbesondere für die wuchsstärkeren Randreihen zu beachten, die in AFS den Bestand dominieren. Für den störungsfreien Einsatz von Feldhäckslern in AFS sind daher in Abhängigkeit von der standortspezifischen Bestandsentwicklung die Umtriebszeiten ggf. kürzer zu wählen. Für die jährlich wiederkehrende Ernte größerer Flächen ist ferner die Verstärkung des Häckselaggregates für die Zerkleinerung der holzartigen Biomasse empfehlenswert. Eine bisher wenig eingesetzte aber interessante Alternative zu Feldhäckslern bieten für die Holzernte modifizierte Zuckerrohrerntemaschinen (z.B. HSAB Billet Harvester, Fa. Henriksson Salix AB, Schweden).

Die Gehölzschneidwerke sind für den Anbau an konventionelle leistungsstarke Feldhäcksler konzipiert, wie sie etwa in der Maisernte eingesetzt werden. Das Erntegut weist Partikelgrößen zwischen 16 und 45 mm auf (P16 bis P31, Fein- bis Mittelhackschnitzel, (ISO 2014)) und wird über den Auswurf auf einen Anhänger geblasen. Der Anhänger wird nur bei eingeschränkten Platzbedingungen von Erntemaschine selbst gezogen, sondern üblicherweise von einem parallel fahrenden Traktor gezogen (Scholz et al 2009). Anschließend wird das Erntegut direkt zu einem Zwischenlager im Nahbereich oder an den Ort der Verwertung transportiert.



New Holland FR 9060  
mit Vorsatz FB130



Claas Jaguar 900  
mit Vorsatz HV 1400  
(Fa. Wimatec)



Claas Jaguar 870  
mit Vorsatz MK IV  
(Fa. HSAB)

Abbildung 3: Feldhäcksler bei der Hackschnitzelernte

## B) Mäh Hacker

Neben den Gehölzschneidervorsätzen für selbstfahrende Feldhäcksler gibt es Mäh Hacker die an Standardtraktoren angebaut oder von diesen gezogen werden. Praxisreife für die Ernte von Pappeln haben bisher Maschinen für den Front- bzw. Heckanbau, so genannte Anbau-Mäh Hacker, erreicht (Ehlert und Pecenka 2013). Diese sind zwar etwas weniger leistungsstark als Feldhäcksler, aber in der Anschaffung deutlich günstiger. Aufgrund ihres geringen Gewichts und des flexiblen Anbaus an unterschiedliche Schlepper lassen sich Anbauhacker auch unabhängig von Trägerfahrzeug leicht zu den Einsatzorten mittels Anhänger transportieren. Bei den Anbauhackern gibt es verschiedene Bauarten. Der Erntevorgang kann analog zu dem im Abschnitt Feldhäcksler beschriebenen Verfahren (mit gleichen Vor- und Nachteilen) erfolgen (z.B. GMHT 140, Fa. JENZ, Abb. 4a). Alternativ gibt es Systeme, bei denen das Hackorgan direkt auf das Sägeblatt montiert ist (z.B. MH 130, Fa. Kluge, Abb. 4b). Diese Systeme haben den Vorteil, dass die Bäume ohne Vorspannung vertikal eingezogen und gehackt werden können und so Schädigungen der Wurzelstöcke vermieden und auch dichtere bzw. ältere Bestände geerntet werden können. Systeme mit vertikalem Einzug sind zwar aufgrund ihrer etwas geringeren Arbeitsbreite auf die Ernte von in Einzelreihe angebauten Beständen beschränkt, können dafür aber auch Bestände mit Schnitthalsdurchmessern von bis zu 15 cm sicher ernten. Für die störungsfreie Ernte ist jedoch auf Grundlage von Praxiserfahrungen der vergangenen Jahre für alle Erntemaschinen und Baumarten der Anbau in Einzelreihe zu empfehlen. Mit einigen Anbau-Mäh Hackern lassen sich auch Hack schnitzel mit größeren Partikellängen produzieren (Hacklänge bis 120 mm, P63), die in Abhängigkeit von der Lagergestaltung ein günstigeres Lager- und Trocknungsverhalten aufweisen können (Pecenka et al. 2018). So lässt sich die Hacklänge beim MH130 stufenweise für Hack schnitzelgrößen von P16 bis P63 verstellen (Hacklänge 40 bis 120 mm).



a) Mäh Hacker GMHT 140 (Fa. JENZ)



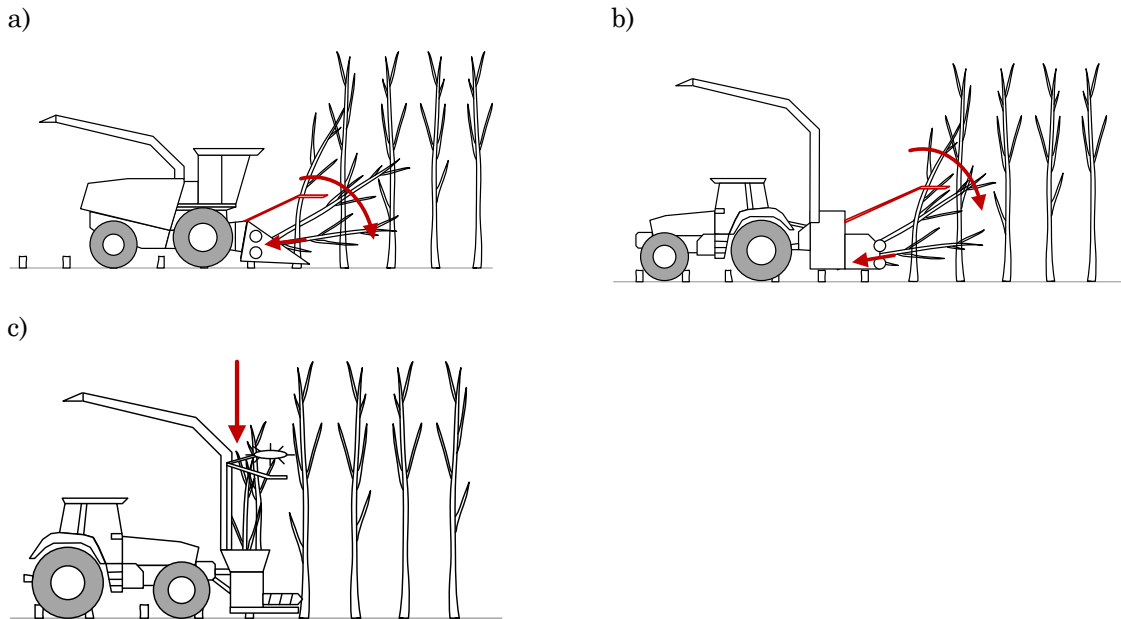
b) Mäh Hacker MH 130 (Fa. Kluge)

Abbildung 4: Mäh Hacker bei der Hack schnitzelernte

### 2.1.1 Gutstrom bei der einstufigen Ernte

Während bei der Ernte mit Gehölzmäh Häckslern und einigen Anbau-Mäh Hackern die Bäume zunächst vorgebogen, vom Stock getrennt und dann horizontal der Hack trommel zugeführt werden (Abb. 5a und b), gibt es auch Anbau-Mäh Hacker, bei denen die Bäume direkt aus dem Bestand heraus in der vertikalen Position gehackt werden (Abb. 5c). Hierdurch werden insbesondere bei älteren dichten Beständen Störungen in der Gutzufuhr bzw. bei höheren Fahrgeschwindigkeiten Beschädigungen an den Wurzelstöcken vermieden.



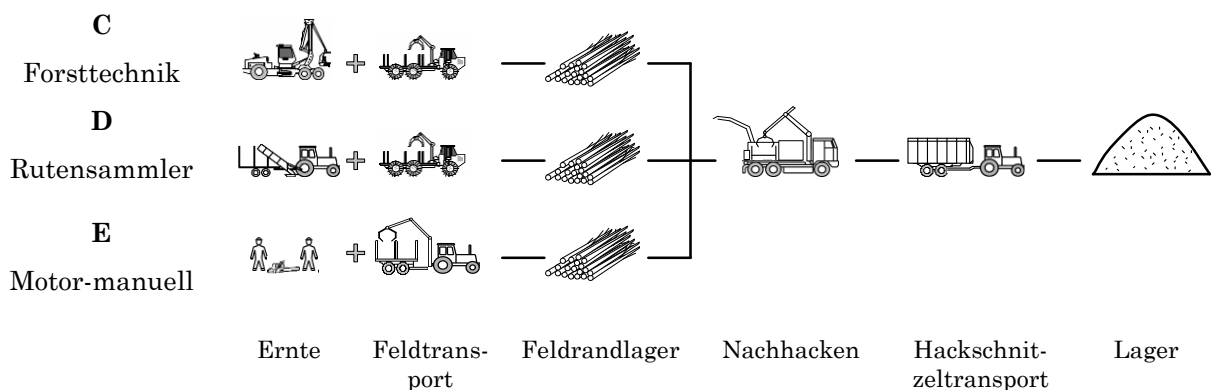


**Abbildung 5:** Trennen der Bäume vom Stock und Gutfuhr bei der einstufigen Ernte; a) und b) Vorbiegen der Bäume und Umwerfen für horizontalen Einzug, c) Vertikaler Einzug der Bäume

Gut geeignet für die Logistikerfordernisse der KUP-Ernte im einstufigen Ernteverfahren ist die Silomais-Erntekette, die in vielen Agrarbetrieben vorhanden ist. Hierbei kommt ein Traktor mit bis zu zwei Hängern zum Einsatz. Für längere Transportwege eignen sich ggf. auch Containerfahrzeuge. Mehr Informationen zu geeigneter Transporttechnik und Logistik sind in Abschnitt 3.1 zusammengestellt.

## 2.2 Zweistufige Ernteverfahren

Die Ernte im zweistufigen Verfahren bietet sich vor allem bei längeren Umtriebszeiten an, wenn die Stammdurchmesser, die von auf landwirtschaftlicher Technik basierenden Maschinen bewältigt werden können, überschritten werden oder eine Lagerung von Ganzbäumen als vorteilhaft erachtet wird. Innerhalb der zweistufigen Verfahren gibt es drei verschiedene Systeme, die sich auf dem Markt etabliert haben: die Ernte unter Nutzung von Forsttechnik, der Einsatz von Spezialmaschinen für die Ganzbaumernte in der Landwirtschaft (z.B. Stemster, Fa. Nordic Biomass a/s, Dänemark) oder die motormanuelle Ernte (Abb. 6). Für die Bereitstellung von Hackschnitzeln müssen nach einer Lagerphase am Feldrand die Bäume später mit einem Mobilhacker zerkleinert werden.



**Abbildung 6:** Zweistufige Ernte von Hackschnitzeln

### C) Forstliche Holzerntetechnik

Während einstufige Ernteverfahren kontinuierlich Mähen und Hacken können, werden die Bäume bei der konventionellen forstlichen Holzerntetechnik entweder als ganze, einzelne Bäume oder durch Mehrfach-Fällung gefällt. Dadurch ist dieses Verfahren prinzipiell hinsichtlich der Flächenleistung weniger leistungsfähig. Eine Steigerung der Flächenleistung ist durch den Einsatz eines Harvesters mit einem Fäller-Bündler-Kopf möglich (Abb. 7a), der mit Hilfe von Greifklauen mehrere Bäume nacheinander greifen, abschneiden und dann als Bündel zwischen den Reihen oder am Feldrand ablegt (z.B. Timberjack TJ 720). Die Hauptprodukte sind Stammabschnitte, die zur stofflichen, aber auch zur energetischen Nutzung verwendet werden können. Es ist auch möglich, ein so genanntes Energieholzfallaggregat (z.B. C 16 a, Bracke) an einen Harvester, Forwarder oder an ein anderes Kranfahrzeug zu montieren. Für den Transport zum Feldrandlager kann anschließend einen Rückezug (Abb. 7e) eingesetzt werden. Das Feldrandlager dient üblicherweise als Zwischenlager und erfüllt gleichzeitig den Zweck der natürlichen Trocknung während der Lagerung (Abb. 7f).

### D) Mähssammler

In Reihe gepflanzte Agrarholzbestände können ebenso mit Mähssammlern (z.B. Stemster MKIII, Abb. 7b) geerntet werden. Die Bäume werden in einem Arbeitsgang gefällt und gesammelt, indem sie - während die Maschine über die Reihen fährt - kontinuierlich vom Stock getrennt und mit Hilfe einer Laufschiene direkt auf die Ladefläche der Erntemaschine befördert werden. Von dort werden die Bäume lose oder bündelweise am Feldrand abgelegt. Für die bessere Auslastung der Erntemaschine auf Flächen mit langen Reihen ist es ggf. empfehlenswert, für den Transport zum Feldrandlager einen zusätzlichen Rückezug einzusetzen. Diese Erntemethode eignet sich für Stämme mit max. 15 cm Schnitthalsdurchmesser.

### E) Motor-manuell (Motorsäge)

Ist eine Fläche sehr klein oder zersplittert gelegen, so dass ein Großmaschineneinsatz nicht wirtschaftlich ist oder die Fläche aus anderen Gründen, z.B. wegen permanenter Nässe für o.g. Techniken nicht geeignet ist, so bietet sich die motor-manuelle Ernte an (Abb. 7c). Bei ihr wird in einem ersten Teilarbeitsschritt das Fällen durch einen Motorsägenschnitt oder, je nach Schnitthalsdurchmesser, auch mit einem Freischneider oder Spacer (Abb. 7d) durchgeführt. Üblicherweise wird die Biomasse durch eine zweite Arbeitskraft händisch auf Poltern vorkonzentriert. Das Rücken der Biomasse zum Ort der Zwischenlagerung bzw. des später folgenden Hackens erfolgt durch einen Schlepper mit Rungenwagen oder einen Rückezug.

Da die Zielsortimente bei der Ernte von Agrarholz auch in den Verfahrenslinien C) bis E) in der Regel Hackschnitzel sind, müssen die Rundhölzer, Ruten oder Bündel anschließend mit einem mobilen Hacker zerkleinert werden (Abb. 7g).



a) Nordic Biomass Stemster MKIII



b) EcoLog Harvester 560 C mit Energieholzaggregat Lignis (Foto: Schweier)



c) Motor-manuelle Ernte mit Kettensäge



d) Motor-manuelle Ernte mit Spacer



e) Rückezug zum Transport zum Zwischenlager am Feldrand



f) Rückezug beim Aufbau der Lagermiete am Feldrand



g) Nachhacken der gelagerten/ getrockneten Bäume

**Abbildung 7:** Technikeinsatz in der zweistufigen Agrarholzernte

## 2.3 Flächenleistungen und Erntekosten

Die Bereitstellungskosten des Endprodukts Hackschnitzel und damit die Konkurrenzfähigkeit des Produktionssystems im Vergleich zu anderen möglichen Optionen in der Landwirtschaft hängen von einer Vielzahl von Faktoren wie insbesondere der Gestaltung der Ernte-, Transport- und Lagerlogistik, der Wahl des richtigen Erntezeitpunkts aber auch der regionalen Verfügbarkeit von für den jeweiligen Bestand geeigneten Erntemaschinen ab. Einen grundlegenden Überblick über die Flächenleistungen typischer Erntelinien und eine Kostenorientierung geben die Tabellen 1 und 2 (Schweier 2013; Landgraf et al. 2018; Pecenka et al. 2014b).

**Tabelle 1:** Typische Ernteleistungen und Verluste in der Agrarholzernte (ermittelt bei der Ernte von Pappeln in Kurzumtriebsplantagen)

Ernteverfahren	Geeignet für Umtriebszeit	Flächenleistung	Ernteleistung	Erntegutspezifischer Lager- und Hackverlust
	Jahre			ha/h*
A) Feldhäcksler	2 - 4	0,6 – 0,8	15 – 21	15 – 25
B) Mähhackler	2 - 6	0,4 – 0,6	10 – 15	15 – 25
C) Forsttechnik	6 - 20	0,12	8 – 9	10 – 20
D) Mähsammler	2 - 4	0,6 – 0,8	15 – 21	10 – 20
E) Motor-manuell	6 - 20	0,05	3 – 4	10 – 20

\* bezogen auf die Gesamtarbeitszeit/Maschinenarbeitsstunden

\*\* atro = absolut trockene Biomasse

**Tabelle 2:** Mögliche Kostenaufteilung in der Agrarholzernte (ermittelt bei der Ernte von Pappeln in Kurzumtriebsplantagen)

Ernteverfahren	Ernte	Transport	Lagerung	Verluste	Hacken <sup>3)</sup>	Gesamtkostenvergleich
	%	%	%	%	%	
A) Feldhäcksler	50	20 <sup>1)</sup>	10	20	0	<b>100<sup>4)</sup></b>
B) Mähhackler	50	20 <sup>1)</sup>	10	20	0	95
C) Forsttechnik	25	15 <sup>2)</sup>	0	10	50	115
D) Mähsammler	30	15 <sup>2)</sup>	0	5	50	120
E) Motor-manuell	20	15 <sup>2)</sup>	0	10	55	110

<sup>1)</sup> 5 km Transport zu einem Zwischenlager

<sup>2)</sup> Transport enthält nur Rücken zum Feldrand

<sup>3)</sup> Hacken der getrockneten Bäume mit Mobilhackler

<sup>4)</sup> Bezugsbasis 100 % für den Vergleich mit den Verfahren B) bis E)

## 3 TRANSPORT UND LAGERUNG

### 3.1 Transport

Gut geeignet für die Erfordernisse der Hackschnitzelernte im einstufigen Ernteverfahren ist die Transporttechnik der Silomais-Erntekette, die in vielen Agrarbetrieben sowohl vorhanden als auch zum Zeitpunkt der Gehölzernte verfügbar ist (Abb. 8). Hierbei kommt ein Traktor mit bis zu zwei Anhängern zum Einsatz. Für längere Transportwege eignen sich ggf. auch Containerfahrzeuge oder das Umladen auf Schüttgut-LKW (Abb. 8d und 8e). Praxiserfahrungen der letzten Jahre haben gezeigt, dass eine gut organisierte und auf die Leistung der Erntemaschine abgestimmte Transportkette ein für die Wirtschaftlichkeit der Agrarholzernte wesentlicher Faktor ist. Da die Kosten für den Einsatz einer spezialisierten Erntemaschine einen großen Anteil an den Gesamtkosten der Ernte haben, sollten durch fehlende Transportfahrzeuge verursachte Wartezeiten minimiert werden. Ebenso sollten Zwischenlagerschritte in der Transportkette und insbesondere das Ablegen der Hackschnitzel auf unbefestigten Flächen vermieden werden, da dies zu starken Verunreinigungen der Hackschnitzel führen kann.

Die Transportmasse wird wesentlich bestimmt durch die Holzart, den Wassergehalt zur Ernte, die Hackgutgröße und die verwendete Erntetechnik. Diese Größen beeinflussen wiederum die Schüttdichte. Für Fein- und Mittelhackschnitzel (P16 bis P45) mit Wassergehalten von 55 bis 60 % (auf Frischmassebasis) wurden durchschnittliche Schüttdichten von 300 bis 350 kg/m<sup>3</sup> (P45) ermittelt.

Nach Trocknung des Materials auf ca. 30 % Wassergehalt sinkt die Schüttdichte auf durchschnittlich 170 kg/m<sup>3</sup> (P45). Der Transport und die ggf. erforderliche Zwischenlagerung und Trocknung sollte gemeinsam mit dem Endverbraucher des Erntegutes abgesprochen und optimiert werden, da jeder weitere Logistikschrift zusätzliche Kosten für die Ein- und Auslagerung verursacht.



a) Hackschnitzeltransport mit Silomaisanhänger



b) Hackschnitzeltransport mit Abschiebewagen



c) Feldtransport mittels auf der Erntemaschine montiertem Überladebunker



d) Containerwechsel zwischen Feld- und Straßentransport



e) Mobiles LKW-Förderband zum Überladen vom Abschiebewagen (Feldtransport) auf Schüttgut-LKW für den Straßentransport

**Abbildung 8:** Transporttechnik für Agrarholz

### 3.2 Lagerung

In Abhängigkeit vom gewählten Ernteverfahren und der regional verfügbaren Infrastruktur für das Lagern und Trocknen von Agrarholz kann grundlegend zwischen folgenden Lagerverfahren gewählt werden (Landgraf et al. 2018):

- A) Lagern und natürliches Trocknen im Freien (Freihaufen) als Hackschnitzelmiere oder Ganzbaumpolter,
- B) Lagern im Freien in der Hackschnitzelmiere mit zusätzlichen Einbauten im Haufwerk für die Belüftung,
- C) Lagern und natürliches Trocknen unter Dach,
- D) Lagern und technisches Trocknen unter Dach unter Nutzung von Fremdenergie wie z.B. Abwärme aus Biogasanlagen.

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 zuführen zu können. Das Trocknen der Holzhackschnitzel ist ebenso eine Voraussetzung, um diese über einen längeren Zeitraum möglichst verlustarm und ohne größere qualitative Einbußen lagern zu können. Alle diese Verfahren sind aufgrund mikrobiologisch-chemischer Abbauprozesse immer mit Trockenmasseverlusten verbunden (Ehlert und Pecenka 2013; Idler et al. 2019). Als Folge erwärmt sich das Hackgut in Abhängigkeit von Holzart, Lagerform, Wassergehalt und Witterung auf Temperaturen von bis zu 70 °C. Eine Schütthöhe von 5 m sollte nicht überschritten werden und auch sollten

die Lagerhaufen nicht durch z.B. Befahren verdichtet werden, um Selbstentzündungen sicher zu vermeiden. Nach ca. drei bis vier Monaten ist bei der kostengünstigsten Variante, der Hackschnitzzellagerung und natürliche Trocknung im Freihaufen, ein Wassergehalt von etwa 35 % unter den in Deutschland im Frühjahr bis Sommer üblichen Witterungsbedingungen erreicht. Als ganze Bäume gelagertes Agrarholz trocknet in Abhängigkeit vom Stammdurchmesser und Holzart deutlich langsamer (Pecenka et al. 2020b).

Details zu den verschiedenen Lagerverfahren, der technischen Umsetzung, ihren Vor- und Nachteilen sowie ihrer Eignung in Abhängigkeit vom gewählten Ernteverfahren sind in **Loseblatt # 42** beschrieben.

## 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. Die größte Herausforderung liegt an vielen Standorten von Agroforstsystemen (AFS) darin, für den jeweiligen Bestand geeignete Erntetechnik in der Region zu finden. Die Anschaffung eigener spezialisierter Erntetechnik rechnet sich nur, wenn jedes Jahr größere Flächen beerntet werden können. So geht man beispielsweise davon aus, dass für den wirtschaftlichen Einsatz eines Feldhäckslers jedes Jahr mindestens 300 ha Agrarholz geerntet werden müssen (Scholz et al. 2009). Eine kostengünstigere Alternative stellt hier der Einsatz von Mähhackern oder auch von Forsttechnik dar. Mähhacker erbringen derzeit zwar noch nicht immer die Flächenleistung von Feldhäckslern, sind aber auch für die Ernte von Baumbeständen mit größeren Stammdurchmessern (bis 18 cm) geeignet. Agroforstbestände sind durch einen deutlich höheren Flächenanteil von Randreihen geprägt. Aufgrund des stärkeren Wachstums der Bäume in den Randreihen sind solche größeren Stammdurchmesser bereits im 4-jährigen Umtrieb je nach Standort für AFS durchaus typisch. Für Bäume im langen Umtrieb muss in der Regel Forsttechnik eingesetzt werden. Trotz der höheren Kosten für die Ernte mit Forsttechnik stellt diese aufgrund der guten regionalen Verfügbarkeit und der damit geringen Anfahrtskosten beim Einsatz von Lohnunternehmen eine wichtige Alternative dar.

## LITERATUR

- Ehlert D., Pecenka R. (2013): Harvesters for short rotation coppice: current status and new solutions. *International Journal of Forest Engineering* 24(3), 170-182
- FNR (2020): Mediathek – Anbaufläche für nachwachsende Rohstoffe. <https://mediathek.fnr.de/anbaufläche-für-nachwachsende-rohstoffe.html>, (Zugriff am 06.03.2020)
- Garstang J., Weekes A., Poulter R., Bartlett D. (2002): Identification and characterisation of factors affecting losses in the large-scale, non-ventilated bulk storage of wood chips and development of best storage practices, First Renewables Ltd
- 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
- ISO (2014): EN ISO 17225–4. Solid Biofuels – Fuel Specifications and Classes – Part 4: Graded wood Chips
- Landgraf D., Bärwolff M., Burger F., Pecenka R., Hering T., Schweier J. (2018): Produktivität, Management und Nutzung von Agrarholz. In: Veste M., Böhm C. (Hrsg.), *Agrarholz – Schnellwachsende Bäume in der Landwirtschaft: Biologie - Ökologie – Management*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 447-510
- Pecenka R., Hoffmann T. (2015): Harvest technology for short rotation coppices and costs of harvest, transport and storage. *Agronomy Research* 13(2), 361-371

- Pecenka R., Ehlert D., Lenz H. (2014a): Efficient harvest lines for Short Rotation Coppices (SRC) in agriculture and agroforestry. *Agronomy Research* 12(1), 151-160
- Pecenka R., Schweier J., Lenz H. (2014b): Was kostet die Ernte von KUP? Praxiserprobte Ernte-technologien im Vergleich. 20. Fachtagung Energetische Nutzung nachwachsender Rohstoffe, TU Dresden, Dresden
- 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
- Pecenka R., Lenz H., Jekayinfa S.O., Hoffmann T. (2020a): Influence of Tree Species, Harvesting Method and Storage on Energy Demand and Wood Chip Quality When Chipping Poplar, Willow and Black Locust. *Agriculture* 10(4), 116
- Pecenka R., Lenz H., Hering T. (2020b): Options for Optimizing the Drying Process and Reducing Dry Matter Losses in Whole-Tree Storage of Poplar from Short-Rotation Coppices in Germany. *Forests* 11, 374/1-18
- Scholz V., Boelke B., Burger F., Hofmann M., Hohm C., Lorbacher F.R. (2008): Produktion von Pappeln und Weiden auf landwirtschaftlichen Flächen. KTBL - Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft, Darmstadt
- Scholz V., Eckel H., Hartmann S. (2009): Verfahren und Kosten der Energieholzproduktion auf landwirtschaftlichen Flächen. KTBL-Schrift: Die Landwirtschaft als Energieerzeuger 476 (2009) 67-80
- Schweier J. (2013): Erzeugung von Energieholz aus Kurzumtriebsplantagen auf landwirtschaftlichen Marginalstandorten in Südwestdeutschland. Dissertation, Fakultät für Umwelt und Natürliche Ressourcen, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, Freiburg, 291 S.
- Wirkner R. (2010): Energieholzproduktion im Kurzumtrieb – Chancen und Probleme bei ihrer Umsetzung: eine Analyse unter Einbeziehung von Experteninterviews