

Die vorliegende Studie wurde gemeinschaftlich finanziert durch

die Bayernwerk AG,

**BAYERNWERK**  
Ein Unternehmen der VIAG-Gruppe

das Bayerische Staatsministerium für  
Ernährung, Landwirtschaft und Forsten



und C.A.R.M.E.N. e.V.



**C.A.R.M.E.N.**

## Danksagung

Unser herzlicher Dank gilt folgenden Personen und Institutionen:

- der BAYERNWERK AG und dem Bayerischen Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten (Referat B2) für die Finanzierung der vorliegenden Untersuchung,
- Herrn Peter Kornell, Abteilungsleiter bei C.A.R.M.E.N. e.V., für die unbürokratische Unterstützung bei der Antragstellung,
- den Bayerischen Forstämtern Würzburg und Neustadt an der Saale für die Bereitstellung der Versuchsbestände,
- dem Unternehmer Dietmar Reith (97450 Arnstein - Heugrumbach) sowie der Firma ENVITAL (63768 Hösbach) für die Versuchsdurchführung in Würzburg,
- den Unternehmern Franz Herbert (97656 Sondernau - Oberelsbach) und Eberhard Räder (97654 Bastheim) für die Versuchsdurchführung in Bad Neustadt an der Saale,
- Herrn Michael Gürtner (86558 Hohenwart) für die Bereitstellung seiner

Trocknungsanlage,

- allen Bayerischen Biomasseheiz(kraft)werken, die sich an der Umfrage beteiligten.

**ISSN 0945 - 8131**

**Alle Rechte vorbehalten.**

Nachdruck, auch auszugsweise, sowie fotomechanische und elektronische Wiedergabe nur mit Genehmigung des Herausgebers.

Die Übernahme von WEB-Seiten in andere Internetangebote ist nur mit Zustimmung der LWF erlaubt. Hiervon ausgenommen ist die Zwischenspeicherung in Proxy-Servern oder anderen Servern, die zur besseren Bereitstellung des Angebotes im Internet dienen. Zwischengespeicherte Seiten dürfen nicht verändert werden. Bei Seiten in denen der Ursprung nicht ersichtlich ist, sind diese mit dem Copyright-Vermerk der LWF zu versehen.

Verfasser:

**Teilmechanisierte Waldhackschnitzel-Bereitstellung:**

Stefan Feller, Bernhard v. Webenau, Helmut Weixler,

**Lagerung:**

Bernhard v. Webenau, Bernhard Krausenboeck, Alexandra Göldner

**Logistik:**

Norbert Remler

Herausgeber und Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft (LWF)

Verantwortlich: Der Leiter der Bayerischen Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft

Schriftleitung: Christian Wild

Internetbearbeitung: Gerhard Huber, Marc Kubatta

April 1999

© 1995-2000 - Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft, Dokument:  
LWF-zertifiziert - Informationen aus der Wissenschaft/ Mai 2000

## Vorwort

Nachhaltige und umweltschonende Energienutzungskonzepte existieren sowohl international als auch national erst *in status nascendi*. Nach wie vor basiert die Energieerzeugung in Deutschland fast ausschließlich auf begrenzt verfügbaren, fossilen Energieträgern. Der Primärenergiebedarf wird zu ca. 86 % aus Erdöl, Erdgas und Kohle sowie zu ca. 12 % aus Kernkraft gedeckt [Ageb 1998]. Die Fortführung dieser Energiepolitik und die damit verbundene Kohlendioxid(CO<sub>2</sub>)-Freisetzung wird zu irreversiblen Klimaänderungen führen.

Aus heutiger Sicht ist nicht damit zu rechnen, dass steigende Heizöl- und Gaspreise bzw. die Einführung einer CO<sub>2</sub>- oder Energiesteuer die Konkurrenzkraft der fossilen Brennstoffe deutlich schwächen. Die Entwicklung der energiepolitischen Diskussion in Deutschland läßt jedoch eine zukünftige stärkere Bedeutung des Sortiments "Energiehackschnitzel" als durchaus möglich erscheinen. Waldbesitzer könnten sich auf diesem Wege neue Einkommensquellen erschließen. Daher ist es notwendig, sämtliche Rationalisierungspotentiale in der gesamten Waldhackschnitzelbereitstellungskette inklusive der Logistik aufzudecken und zu nutzen.

Die vorliegende Arbeit wurde als zweites Teilprojekt im Rahmen des Gesamtkonzeptes "Waldhackschnitzelbereitstellung und -logistik für Holzheizwerke" durchgeführt. Eine Untersuchung mit dem Titel "Vollmechanisierte Hackschnitzelbereitstellung" liegt als LWF-Bericht Nr. 16 bereits vor. Die Finanzierung des gesamten Forschungskonzeptes wird vom Bayerischen Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten sowie von der Bayernwerk AG gemeinsam getragen, wofür an dieser Stelle herzlich gedankt sei.

[Dr. G. Ohrner](#)

## Summary in English

### Autoren

### Danksagung - Vorwort

### 1 Einleitung

## 2 Teilmechanisierte Hackschnitzel-Bereitstellungsverfahren

### 2.1 Zielsetzung der Arbeitsstudien

### 2.2 Material und Methoden

#### 2.2.1 Kurzcharakteristik der Bereitstellungsverfahren

#### 2.2.2 Verfahren "Würzburg" (Laubholzhackschnitzel)

#### 2.2.3 Verfahren "Neustadt" (Nadelholzhackschnitzel)

#### 2.2.4 Versuchsbestände und Versuchsumfang

#### 2.2.5 Methodik der Arbeitsstudien

#### 2.2.6 Kostenkalkulation

### 2.3 Ergebnisse der Arbeitsstudien und kritische Würdigung

#### 2.3.1 Zeiten

#### 2.3.2 Leistungswerte im Verfahren "Würzburg"

#### 2.3.3 Leistungswerte im Verfahren "Neustadt"

#### 2.3.4 Kosten

### 2.4 Beurteilung der untersuchten Verfahren

#### 2.4.1 Bestandespfleglichkeit

#### 2.4.2 Ergonomie

#### 2.4.3 Wirtschaftlichkeit

### 2.5 Transport

## 3 Lagerung und Trocknung von Waldhackschnitzeln

### 3.1 Physikalische Zusammenhänge der Trocknung von Hackschnitzeln

#### 3.1.1 Einflussfaktoren auf die Trocknung

#### 3.1.2 Die Bedeutung des Wassergehaltes bei der Trocknung

#### 3.1.3 Der Trocknungsprozess

### 3.2 Biochemische und mikrobielle Vorgänge bei der Trocknung und Lagerung

### 3.3 Hackschnitzellagerungs- und Trocknungsverfahren

#### 3.3.1 Verfahren der natürlichen Trocknung und Lagerung

#### 3.3.2 Verfahren der technischen Trocknung und Lagerung

### 3.4 Lager- und Trocknungsversuch von Waldhackschnitzeln

#### 3.4.1 Zielsetzung

### [3.4.2 Material und Methoden](#)

### [3.4.3 Ergebnisse des Trocknungsversuches](#)

## [3.5 Hackgutlagerung im Rahmen der beiden Arbeitsstudien](#)

## [4 Logistik bayerischer Biomasseheizkraftwerke](#)

### [4.1 Zielsetzung, Material und Methoden](#)

## [4.2 Ergebnisse einer Befragung bayerischer Biomasse-Heizwerkbetreiber](#)

### [4.2.1 Realisierte Biomasse-Heizwerke in Bayern](#)

### [4.2.2 Umfragebeteiligung](#)

### [4.2.3 Eingesetzte Brennstoffe](#)

### [4.2.4 Aktuelle Preise der Biomasse](#)

### [4.2.5 Marktpartnerschaften und Gründe für den Einkauf verschiedener Brennstoffe](#)

## [4.3 Waldhackschnitzellogistik](#)

### [4.3.1 Der Begriff "Logistik"](#)

### [4.3.2 Hackschnitzellogistik bei Biomasseheizwerken](#)

## [4.4 Vermarktungsformen für Waldhackschnitzel](#)

## [4.5 Hackschnitzellieferverträge](#)

## [4.6 Qualitätskriterien und Möglichkeiten der Qualitätsbeurteilung](#)

## [4.7 Preisfindung und Abrechnungsvarianten für Waldhackschnitzel](#)

## [4.8 Transport der Biomasse](#)

## [4.9 Lagerung und Lagerhaltung von Hackschnitzeln bei Biomasseheizwerken](#)

## [4.10 Aschenverwertung](#)

## [5 Zusammenfassung](#)

## [6 Summary](#)

## [7 Sonstiges](#)

### [7.1 Literaturverzeichnis](#)

### [7.2 Abbildungsverzeichnis](#)

### [7.3 Tabellenverzeichnis](#)

### [7.4 Abkürzungsverzeichnis](#)

## [ANHANG](#)

### [Anhang A](#)

Gliederung der Teilarbeiten in Ablaufabschnitte

### [Anhang B](#)

Herleitung der durchschnittlichen Dichten in den Versuchsbeständen (nach Grosser und Teetz [1985])

## [Anhang C](#)

Gesamtübersicht über die Beurteilung und Empfehlung verschiedener Trocknungsverfahren für bestimmte KW-Leistungen

# 1 Einleitung

Der CO<sub>2</sub>-neutrale Energieträger "Biomasse" muss mit den billigeren fossilen Brennstoffen konkurrieren. Ökonomisch rentable Projekte mit "Nachwachsenden Rohstoffen" lassen sich nur mühsam realisieren. Bayern hat sich als Ziel gesetzt, mittelfristig fünf Prozent der Primärenergieversorgung durch nachwachsende Rohstoffe zu decken. Die Subventionierung der gegenüber konventionellen Anlagen höheren Investitionskosten steht deshalb im Mittelpunkt des bayerischen Förderprogramms. In Bayern wurde bis dato die Errichtung von 60 Biomasseheiz(kraft)werken unterstützt [C.a.r.m.e.n. 1999]. Zuschüsse werden nur dann gewährt, wenn der gesamte Brennstoffbedarf mindestens zur Hälfte mit Biomasse aus land- und forstwirtschaftlicher Produktion gedeckt wird. Auf Grund dieser Prämisse wird der Einsatz von Waldhackschnitzeln in aller Regel zwingend vorgeschrieben. Dies begünstigt den kostendeckenden Absatz schwach dimensionierten Holzes, für das oft keine alternativen Verwertungsmöglichkeiten bestehen.

Auf Grund der Wettbewerbsvorteile fossiler Energieträger können Heizwerkbetreiber derzeit für Holzhackschnitzel in der Regel keine kostendeckenden Preise bezahlen.

Das Sachgebiet "Betriebswirtschaft und Waldarbeit" der Bayerischen Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft beschäftigt sich unter anderem mit Fragen der Technologie und Rationalisierung der Bereitstellung von Biomasse aus Waldholz. Während niedrig mechanisierte Verfahren nur eine geringe Produktivität aufweisen und dementsprechend zeit- und kostenintensiv sind, erfordern hochmechanisierte Lösungen eine komplexe systemangepasste Organisation. Den forstbetrieblichen Möglichkeiten und der verfügbaren Maschinenausstattung vieler Waldbesitzer entsprechend erscheinen daher teilmechanisierte Verfahren der Hackguternte besonders geeignet.

Die vorliegende Untersuchung begleitete zwei Ernteverfahren in der Durchforstung von Buchen- und Kiefern-mischbeständen arbeitswissenschaftlich. Die Industrieholzpreise für diese Baumarten sind gegenüber der Fichte niedriger. Die Bereitstellung von Energieholz aus Buchen und Kiefern erscheint deshalb aus forstbetrieblicher Sicht noch am sinnvollsten. Es zeigte sich, dass unter heutigen Preis- und Kostenrelationen die Produktion von Kiefern-hackschnitzeln wirtschaftlich interessant sein kann.

Die Logistikkette von der Planung der Hackgutbereitstellung über die Zwischenlagerung und Trocknung bis zur Nutzung im Heiz(kraft)werk weist eine Reihe von Ansatzpunkten für Optimierungen auf. Ziel der Studie war es, diese aufzuzeigen und Empfehlungen für die Praxis auszusprechen. Eine Befragung bayerischer Heiz(kraft)werkbetreiber gibt Auskunft über den *status quo*.

## **2 Teilmechanisierte Hackschnitzel-Bereitstellungsverfahren**

### **2.1 Zielsetzung der Arbeitsstudien**

Bislang wurden nur wenige Verfahren der Hackschnitzelbereitstellung arbeitswissenschaftlich untersucht. Diese Studien fanden hauptsächlich in den achtziger Jahren statt (z. B. Jonas [1982; 1986; 1987]; Patzak [1984]; Wippermann [1985; 1987 a,b]). Der Schwerpunkt dieser Arbeiten liegt bei Bereitstellungsverfahren aus Nadelholzerstdurchforstungen und von Hackgut unterhalb von Industrieholzdimensionen. Für Laubholz sind keine Studien bekannt.

Ziel dieser Studie war, zwei praxisreife, teilmechanisierte Verfahren zur Bereitstellung von Waldhackschnitzeln aus Buchen- und Kiefern-mischbeständen hinsichtlich Produktivität und Wirtschaftlichkeit zu analysieren und Optimierungsansätze aufzuzeigen. Darüber hinaus wurde der Frage nachgegangen, ob Waldhackschnitzel für den Waldbesitzer eine Alternative zur Industrieholzaushaltung darstellen können.

## 2.2 Material und Methoden

### 2.2.1 Kurzcharakteristik der Bereitstellungsverfahren

Die zwei Bereitstellungsverfahren unterscheiden sich sowohl in der technischen Ausrüstung als auch im Umfang der Arbeitsorganisation. Sie wurden nach den Versuchsforstämtern "**Würzburg**" und "**Neustadt**" benannt. Beim Verfahren "Würzburg" wurden ausschließlich Buchen-Hackschnitzel, beim Verfahren "Neustadt" überwiegend Kiefern/Lärchen-Hackschnitzel produziert. Der Bereitstellungsprozess untergliedert sich in:

Hackguternte

Hacken

Hackschnitzeltransport.

Die Hackguternte umfasst das Fällen, Aufarbeiten, Vorliefern (bis zur Rückegasse) und Rücken des Baumes an die Waldstraße. Die Aufarbeitung beschränkte sich in beiden Verfahren auf ein grobes Entasten stärkerer Äste mit günstigster Schnitfführung. Soweit auf Grund der Holzqualität hochwertigeres Stammholz ausgeformt werden konnte, wurde diese Möglichkeit genutzt. Der Zopfschnitt erfolgte bei ca. 8 cm. Nach dem Rücken lag das Hackgut entlang der Waldstraße oder auf einer Freifläche, bis es gehackt wurde. Unmittelbar nach dem Hackvorgang wurden die Hackschnitzel an den Bestimmungsort transportiert.

### 2.2.2 Verfahren "Würzburg" (Laubholzhackschnitzel)

Folgende Arbeitsgeräte und Maschinen wurden beim Verfahren "Würzburg" eingesetzt:

Technische Ausrüstung:

Hackguternte:

*Fällen/Aufarbeiten*

persönliche Schutzausrüstungen

leichte bis mittlere Motorsägen

Fällheber, Äxte, Keile

*Vorliefern/Rücken*

Forstspezialschlepper mit Doppelseilwinde

Hacken: Mobiler Hacker (JENZ HEM 30 D)

Hackschnitzeltransport: LKW mit Wechselcontainer ( 35 Srm)



**Abb. 1: Mobiler Hacker JENZ HEM 30 D im Versuchseinsatz (" Würzburg")**

**Beschreibung des Arbeitsverfahrens:**

Das Verfahren ist durch eine geringe Mechanisierung und einen niedrigen Organisationsaufwand gekennzeichnet. Die Hackguternte entspricht weitgehend der Industrieholzbereitstellung baumfallender

Längen. Um Rückeschäden zu vermeiden, wurden die Stämme meist in zwei Teile aufgetrennt. Das Verfahren "Würzburg" ist überwiegend entkoppelt, lediglich das Hacken und der Hackschnitzeltransport werden kombiniert. Abbildung 2 zeigt schematisch die Arbeitsschritte des Verfahrens.

Arbeits- Teil- arbeit	Bestand	Rückegasse	Waldstraße	Heizwerk/ Zwischenlager
Fällen/ Aufarbeiten				
Vorliefern/ Rücken				
Hacken/ Transport				

Abb. 2: Hackschnitzelbereitstellung in Laubholzbeständen (Verfahren "Würzburg")

Hackguternte:

**Fällen/Aufarbeiten** Motormanuell im gelösten Zwei-Mann-Verfahren

Vorliefern/Rücken Vorliefern mit Funkseilwinde an die Rückegasse; anschließendes Rücken mit Forstspezialschlepper und Poltern entlang der Waldstraße

**Hacken** Mit Mobilhacker an der Waldstraße auf LKW

Hackschnitzeltransport:

Per LKW an den Bestimmungsort

### 2.2.3 Verfahren "Neustadt" (Nadelholzhackschnitzel)

Beim Verfahren "Neustadt" wurden folgende Arbeitsgeräte und Maschinen eingesetzt:

**Technische Ausrüstung:**

**Hackguternte:**

**Fällen/Aufarbeiten/Vorliefern**

persönliche Schutzausrüstungen

leichte bis mittlere Motorsägen

Fällheber

Forstspezialschlepper mit Seilwinde

Rücken Zangenschlepper

**Hacken** Mobiler Hacker (HEIZOHACK HM 4)

- **Hackschnitzeltransport** LKW mit Wechselcontainer (25 Srm)/landwirtschaftlicher Schlepper mit Anhänger (25 Srm)



Abb. 3: Hacker Heizohack HM 4 im Versuchseinsatz ("Neustadt")

**Beschreibung des Arbeitsverfahrens:**

Das Verfahren "Neustadt" ist ein gekoppeltes Arbeitsverfahren. Der Mechanisierungsgrad ist höher als im Verfahren "Würzburg", die Arbeitsorganisation ist anspruchsvoller. Die Bereitstellung des Hackguts erfolgt in zwei getrennten Arbeitsschritten. Zuerst wird in der "Zangenzone" gearbeitet. Die "Zangenzone" besteht aus der Fläche der Rückegasse und den angrenzenden Bestandteilen innerhalb der Zangenreichweite des Schleppers. Nachdem das Hackgut aus der "Zangenzone" an die Waldstraße gerückt ist, wird auf der Restfläche ("Seilzone") weitergearbeitet. In der "Seilzone" wird in einem Seillinienverfahren gefällt und vorgeliefert. Das an der Rückegasse vorkonzentrierte Hackgut wird anschließend mit einem Zangenschlepper an die Waldstraße gerückt und dort gepoltert. Nachfolgend ist das Verfahren skizziert und schematisch dargestellt.

**Hackguternte in der Zangenzone:**

Fällen/Aufarbeiten Motormanuell im gelösten Zwei-Mann-Verfahren auf und in einer beidseitigen Zone von 5 - 10 m entlang der Rückegassen (Fällrichtung zur Rückegasse)

Rücken: Rücken mit Zangenschlepper

**Hackguternte in der Seilzone:**

Fällen/Aufarbeiten/Vorliefern Seilwindenunterstütztes Fällen und Vorliefern (Zwei-Mann-Verfahren)

Rücken: Mit Zangenschlepper

Hacken: Mit Mobilhacker auf LKW/landwirtschaftlichen Anhänger

Hackschnitzeltransport: Mit LKW/landwirtschaftlichem Gespann

Arbeits- Teil- arbeit	Zangenzone	Rückegasse	Waldstraße	Heizwerk/ Zwischenlager
Fällen/ Aufarbeiten				
(Vorliefern)/ Rücken				
	Seilzone	Rückegasse	Waldstraße	Heizwerk
Fällen/ Aufarbeiten/ Vorliefern				
Rücken				
Hacken/ Transport				

Abb. 4: Hackschnitzelbereitstellung in Nadelholzbeständen (Verfahren "Neustadt")

### 2.2.4 Versuchsbestände und Versuchsumfang

Die Versuche zur teilmechanisierten Hackschnitzel-Bereitstellung wurden im Bereich der staatlichen Forstämter Würzburg und Bad Neustadt an der Saale durchgeführt. Nachfolgend sind in Tabelle 1 die wesentlichen Merkmale der vier Versuchsbestände zusammengestellt.

Die Zeitstudien umfassten eine Aufnahmedauer von 103 Stunden im Zeitraum Februar bis Juni 1998. Dabei wurden insgesamt 463 Schüttraummeter Waldhackschnitzel geerntet.

Tab. 1: Charakteristika der Versuchsbestände

Merkmal	Bestand			
	a	b	c	d
<b>Waldort</b>	FoA Würzburg Gemeindewald Greußenheim I 6 a 1 Buchären	FoA Würzburg Gemeindewald Greußenheim I 5 a 1 Reichertshöll	FoA Würzburg Staatswald XIX 3 c 4 Mühlrain	FoA Neustadt/Saale Gemeindewald Burglauer I 4 b 4 Bockleterweg
Baumarten- zusammensetzung (%)	95 Bu 5 Ndh	80 Bu 20 SLbh	60 Bu 40 Kie	45 Kie 30 Lä 25 Ei/Bi
<b>Schlussgrad</b>	geschlossen	dicht/geschlossen	dicht/geschlossen	licht/geschlossen
mittleres Alter (Jahre, Altersspanne)	70 (55-125)	30 (20-40)	35 (25-50)	45 (35-50)
<b>mittlerer BHD (cm)</b>	26,2	16,9	16,0	15,8
<b>mittlere Höhe (m)</b>	21,4	20,1	17,8	17,4
<b>Versuchsfläche (ha)</b>	0,73	0,71	0,70	1,53
<b>Anzahl entnommener Bäume</b>	68	193	180	666
Baumarten- zusammensetzung (% der Erntemenge)	95 Bu 5 Kie	87 Bu 13 SLbh	72 Bu 28 Kie	45 Lä 35 Kie 20 Bi/Ei
Entnahmesatz (Efm m.R./ha)	44	52	37	68

### 2.2.5 Methodik der Arbeitsstudien

Die den Arbeitsstudien zugrundegelegte Methodik entspricht der von REFA empfohlenen Vorgehensweise [REFA 1991]. Die Gesamtarbeitszeit (GAZ) wird in Ablaufabschnitte gegliedert und getrennt nach Bearbeitungseinheiten (z. B. ein Baum) aufgenommen. Die Ablaufabschnitte lassen sich in Reine Arbeitszeit (RAZ) und Allgemeine Zeiten (AZ) aufteilen. Die RAZ setzt sich aus den Zeiten zusammen, die ausschließlich durch den betreffenden Arbeitsgegenstand verursacht werden. Die AZ

stehen mit der Bearbeitungseinheit entweder überhaupt nicht im Zusammenhang oder können dieser nicht zugeordnet werden, da sie unregelmäßig auftreten und nicht unmittelbar zur Erfüllung der Arbeitsaufgabe dienen. Die Gliederung der GAZ und die dazugehörigen Bearbeitungseinheiten sind im Anhang A dargestellt.

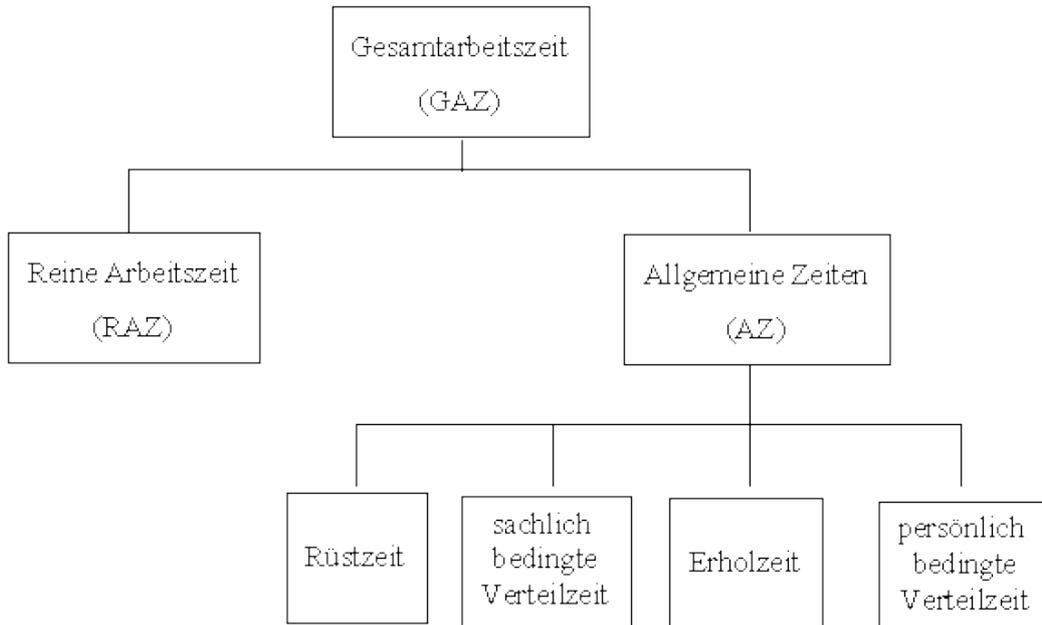


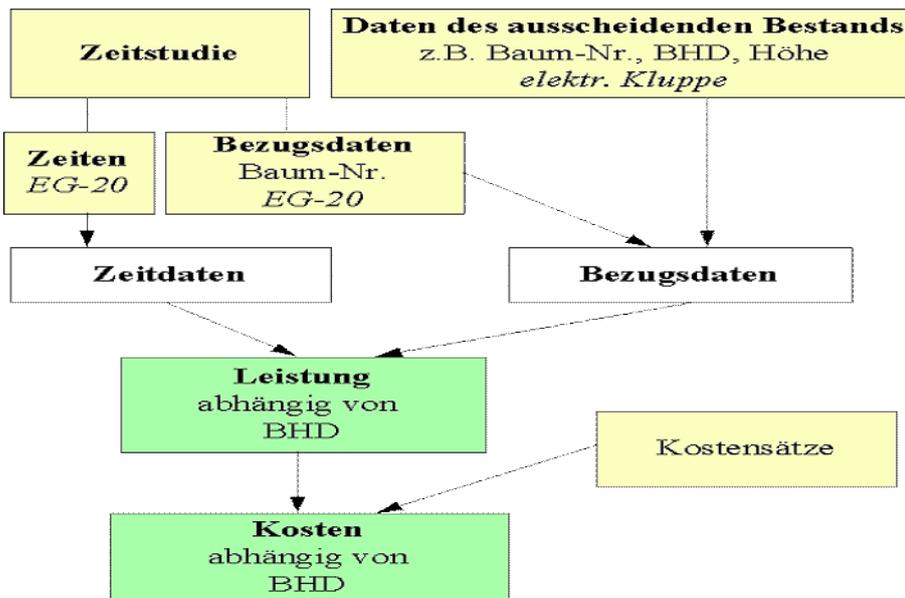
Abb. 5: Gliederung der GAZ (nach Löffler [1992])

Die Zeiten wurden mit mobilen Datenerfassungsgeräten im Fortschrittszeitverfahren erfasst. Auf eine Leistungsgradbeurteilung wurde verzichtet. Den berechneten Leistungszahlen kann daher Durchschnittsleistungsniveau unterstellt werden. Das Konzept der Datenaufnahme und -auswertung ist nachfolgend am Beispiel des Fällens/Aufarbeitens dargestellt.

Die Anteile der Allgemeinen Zeiten wurden für beide Verfahren errechnet. Für repräsentative Aussagen war die Datenbasis jedoch zu gering, weshalb für die Leistungs- und Kostenberechnung auf empirische Durchschnittswerte zurückgegriffen wurde. Bei überwiegend händischen Arbeiten wurden 30% AZ, bei stark mechanisierten Arbeiten wie dem Rücken oder Hacken 10% bzw. 20% AZ angesetzt. Eine Ausnahme stellt das Fällens/Aufarbeiten im Seillinienvorfahren "Neustadt" dar. Hier wurde mit dem tatsächlich gemessenen Anteil von 15% AZ gerechnet. Begründet war dies durch hohe verfahrensbedingte Wartezeiten (ca. 25%). Diese können als persönliche Verteilzeit oder zur Erholung genutzt werden.

Leistungswerte lassen sich über eine Verknüpfung von Zeit- und Bezugsdaten (z. B. Volumen eines Baums) berechnen. Die in der Studie erfassten Bezugsdaten und leistungsbeeinflussenden Faktoren sind nachfolgend für die einzelnen Arbeitsschritte dargestellt:

Bezugseinheit beim **Fällen/Aufarbeiten** ist das Erntevolumen der Bäume. Zuerst wurde das Derbholzvolumen jedes Baumes mit den *Formhöhenfunktionen* nach Franz [1971] aus dem Brusthöhendurchmesser (BHD) und der Höhe bestimmt. Der BHD wurde in mm ohne ein forstübliches Abrunden bzw. einen Rindenabzug erhoben.



**Abb. 6:**  
**Datenaufnahme**

### **und Auswertung bei der Arbeitsstudie am Beispiel Fällen/Aufarbeiten**

Die Baumhöhe konnte aus bestandsspezifisch hergeleiteten *Höhenkurven* abgegriffen werden. Aus der Differenz zwischen dem Derbholzvolumen und dem gemessenen Erntevolumen "frei Waldstraße" wurde der Ernteverlust berechnet. Die Leistungswerte beziehen sich auf das gemessene Erntevolumen "frei Waldstraße" (Efm m. R.).

Neben BHD und Höhe wurden folgende Einflussfaktoren aufgenommen:

- Baumart
- Entfernung zur Rückegasse
- Stammform
- Kronenausformung

Diese Bezugsdaten konnten durch fortlaufende Baumnummern, die während der Zeitstudie parallel zur Zeiterfassung mitgespeichert wurden, zugeordnet werden.

Bezugseinheit beim **Vorliefern/Rücken** ist das Volumen. Nach dem Fällen und Aufarbeiten wurde jeder Stamm vermessen (Länge in dm; Mittendurchmesser in mm). Ein forstübliches Abrunden sowie ein Rindenabzug wurde nicht vorgenommen. Dadurch konnten sowohl die Massen (Efm m. R.) je Rückezyklus als auch die Gesamtmasse der einzelnen Polter bestimmt werden. Die *Rückeentfernung* wurde je Rückefahrt durch Schrittmaß erhoben.

Bezugseinheit beim **Hacken** ist das Volumen der Hackschnitzel eines Polters in Schüttraummetern (Srm). Nach dem Hacken wurde das jeweilige Schüttvolumen in den Transportbehältern gemessen. Aus dem gemessenen Festmaß und Schüttmaß konnte ein Umrechnungsfaktor hergeleitet werden. Die Anzahl der Stämme je Hackvorgang wurde erfasst und die Hackschnitzelfraktion angeschätzt. Der Wassergehalt wurde an repräsentativen Proben bestimmt (vgl. Kap. 4.5).

Bezugseinheit beim **Transport** ist das Volumen in Schüttraummetern. Eine Transportstudie wurde in Neustadt durchgeführt.

### **2.2.6 Kostenkalkulation**

Um eine Vergleichbarkeit zu gewährleisten, wurde mit einheitlichen Lohn- und Maschinensätzen kalkuliert. Die Maschinenkosten basieren auf Berechnungen vergleichbarer Maschinen des Kuratoriums für Waldarbeit und Forsttechnik [KWF 1996]. Die *Lohnkosten* wurden mit 40,- DM/h (inklusive Lohnnebenkosten), die *Motorsägenentschädigung* und die Kosten für einfache Handgeräte ("Werkzeuggeld") wurden zusammen mit 9,- DM/h angesetzt. Die Lohnkosten liegen zwischen

Maschinenringsätzen (18,- DM/h) und den Stundensätzen für Forstwirte der Bayerischen Staatsforstverwaltung (58,- DM/h, Lohnstatistik 1997). Sie entsprechen in ihrer Höhe Unternehmersätzen. Eine Zusammenstellung der kalkulierten Kosten ist in Tabelle 2 dargestellt.

*Tab. 2: Kalkulierte Lohn-, Maschinen- und Gesamtkosten der einzelnen Teilarbeiten [Kuratorium für Waldarbeit und Forsttechnik 1996; Remler u. Fischer 1996]*

Teilarbeit	Maschine	Kosten DM/h		
		Maschine	Lohn	Gesamt
Fällen/Aufarbeiten	Leichte/Mittlere Motorsäge	9,-	40,-	49,-
Vorliefern/Rücken	Seilschlepper	30,-	40,-	70,-
Rücken	Zangenschlepper	70,-	40,-	110,-
Hacken	Mobiler Hacker	170,-	40,-	210,-
Transport	Landwirtschaftl. Schlepper und Anhänger	40,-	40,-	80,-
	LKW mit einem Wechselcontainer	90,-	40,-	130,-

## 2.3 Ergebnisse der Arbeitsstudien und kritische Würdigung

### 2.3.1 Zeiten

Gliederung der Gesamtarbeitszeit:

Tab. 3: Gliederung der GAZ bei der "Hackguternte" (Fällen/Aufarbeiten/Vorliefern/Rücken) und beim "Hacken"

Verfahren	Teilarbeit	RAZ	AZ
"Würzburg"	Hackguternte	83%	17%
	Hacken	92%	8%
"Neustadt"	Hackguternte	90%	10%
	Hacken	92%	8%

Die Gesamtarbeitszeit (GAZ) gliedert sich in den Verfahren "Würzburg" und "Neustadt" wie in Tabelle 3 dargestellt.

Bei hochmechanisierten Arbeiten (Hacken) waren in beiden Verfahren nur geringe Anteile an Allgemeinen Zeiten zu beobachten. Die Hackguternte im Verfahren "Würzburg" weist auf Grund geringerer Mechanisierung höhere Anteile Allgemeiner Zeiten auf.

### Gliederung der Reinen Arbeitszeit

#### **Hackguternte:**

Die Anteile der Teilarbeiten an der RAZ sind für beide Verfahren nachfolgend dargestellt in Abbildung 7 und 8.

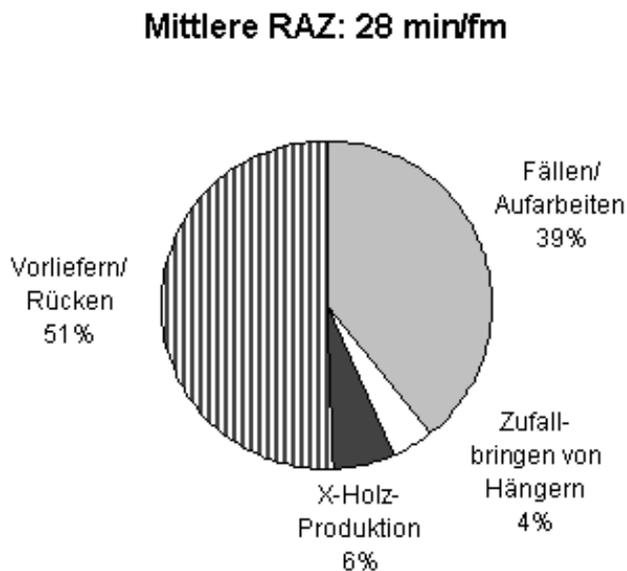


Abb. 7: Anteile der Teilarbeiten an der RAZ bei der Hackguternte ("Würzburg")

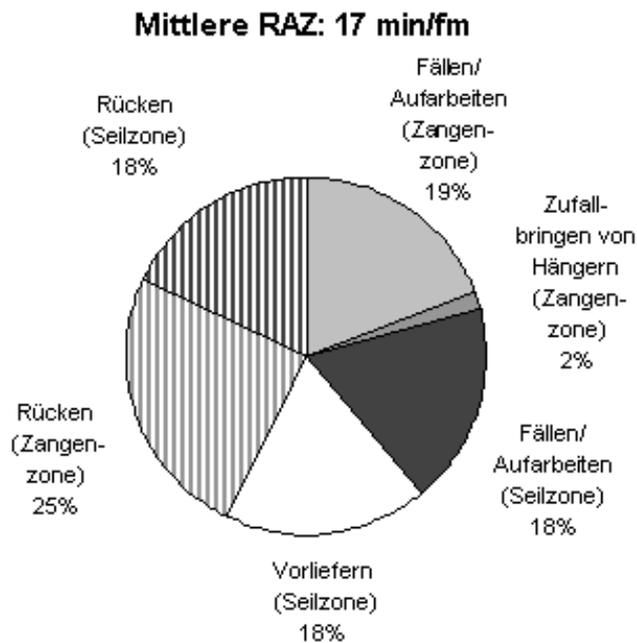


Abb. 8: Anteile der Teilarbeiten an der RAZ bei der Hackguternte ("Neustadt")

In beiden Verfahren ergeben sich vergleichbare Zeitanteile für die einzelnen Teilarbeiten. Im Verfahren "Würzburg" nimmt die "X-Holz-Produktion" sechs Prozent der RAZ ein. Den dafür aufgewendeten Zeiten steht kein verwertbares Hackgut gegenüber (vgl. Kap. 3.3.2). Vier Prozent der RAZ entfallen auf das Zufallbringen von hängengebliebenen Bäumen (Hängern). Beim Verfahren "Neustadt" sind dies lediglich 2% der RAZ. Die Ursache liegt darin, dass in der Zangenzone der Rückegassenauftrieb und die schwache Kronenbildung der Kiefer die Fällung erleichterte. In der Seilzone entstanden durch die Seilwindenunterstützung beim Fällen keine Zeitverzögerungen durch hängengebliebene Bäume.

Das Verfahren "Würzburg" weist einen um mehr als 60% höheren Zeitbedarf je Festmeter auf als das Verfahren "Neustadt". Die Hackguternte im Verfahren "Neustadt" ist somit gegenüber dem Verfahren "Würzburg" erheblich produktiver.

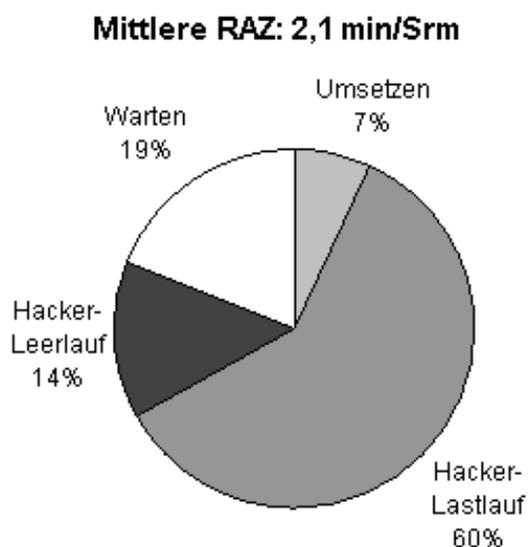


Abb. 9: Anteile der Teilarbeiten an der RAZ beim Hacken ("Würzburg")

**Hacken:**

Die Anteile der Teilarbeiten an der RAZ sind für beide Verfahren in den Abbildungen 9 und 10 dargestellt.

Trotz unterschiedlicher Versuchsbedingungen sind die Zeitanteile beider Verfahren nahezu gleich. Rund 60% der RAZ sind Lastlaufzeiten, in denen der Hacker produzierte. 40% der RAZ entfallen auf unproduktive Zeiten, vor allem Warte- und Hackerleerlaufzeiten. Die Wartezeiten ergaben sich durch Verzögerungen in der Abfuhr, z. B. wenn ein Transportfahrzeug nicht rechtzeitig wieder zur Stelle war. Im Verfahren "Würzburg" lagen die Wartezeiten höher als in "Neustadt".

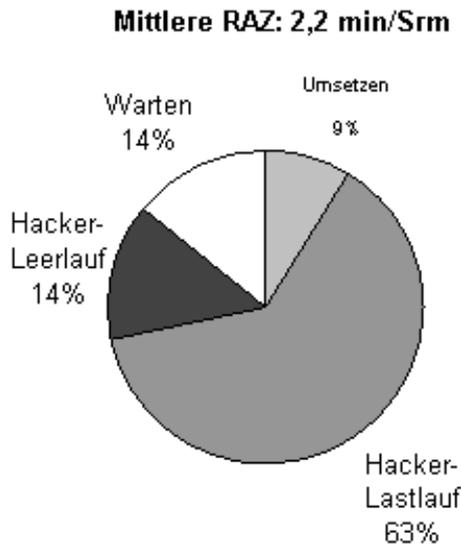


Abb. 10: Anteile der Teilarbeiten an der RAZ beim Hacken ("Neustadt")

Leerlaufzeiten entstehen durch manipulationsbedingte Unterbrechungen beim Beschicken des Hackers. Beim Verfahren "Würzburg" waren diese in erster Linie durch eine für Waldhackgut ungünstige Konstruktion des Hackers (Abb. 1) verursacht. Dieser ist für das Hacken von Landschaftspflegematerial konzipiert. Er verfügt über den dort notwendigen breiten Zuführungstisch, hat aber beengte Verhältnisse bei längerem Hackgut. Über 5 m langes Hackgut verursacht unter eingeschränkten Platzverhältnissen (Waldstraße) einen erheblichen Manipulationsaufwand, um Kollisionen mit dem Führerhaus des Zugfahrzeugs zu vermeiden.

Der beim Verfahren "Neustadt" untersuchte Hacker war für den Einsatz auf Waldstraßen gut geeignet. Weil er sich gut rangieren ließ, konnte der Hacker spitzwinklig zum Polter gestellt werden. Dies erleichterte die Beschickung erheblich. Da der Hacker erst wenige Wochen zuvor angeschafft worden war, ist davon auszugehen, dass der Maschinenführer die Übungsschwelle noch nicht voll erreicht hat. Insofern dürfte die maximale Leistung der Maschine noch nicht voll ausgeschöpft sein. Wolf und Pfeil [1976] sowie Wörndl und Dörffel [1981] stellten in Versuchseinsätzen mit Mobilhackern technische Ausnutzungsgrade von nur 40 bis 50% der GAZ fest. Nach Jonas [1983a] sowie Remler und Fischer [1996] können unter Praxisbedingungen diese "unproduktiven" Zeiten die Maximalleistung (lt. Herstellerangaben) auf bis zu 50% reduzieren.

Durch eine verbesserte Organisation des Transports lassen sich Wartezeiten des teuren Hackers senken. Eine Möglichkeit ist, weitere Transportfahrzeuge einzusetzen. Diese haben zwar dann höhere Wartezeiten und damit Stillstandskosten. Auf Grund der weit geringeren Maschinenkosten ergeben sich für das System trotzdem Kostenvorteile, solange die Stillstandskosten der Transportfahrzeuge die Wartekosten des Hackers nicht übersteigen. Wartezeiten des Hackers können auch dadurch minimiert werden, dass die Hackschnitzel am Hacker zwischengebunkert werden, solange kein Transportfahrzeug verfügbar ist. Wenn die Platzverhältnisse es zulassen, sind auch Wechselcontainer- oder Anhängerrotationssysteme denkbar.

Geringere Leerlaufzeiten des Hackers sind über eine verbesserte Beschickung (Konstruktion) sowie günstige Arbeitsbedingungen (Hackgutlagerung) zu erreichen.

### **2.3.2 Leistungswerte im Verfahren "Würzburg"**

In den Versuchsbeständen a, b und c war der jeweilige Versuchsumfang gering und die beobachteten Zeiten streuten so stark, dass zwischen den Teilflächen keine statistisch gesicherten Unterschiede festgestellt werden konnten. Sie wurden deshalb zusammengefasst.

#### **Fällen/Aufarbeiten**

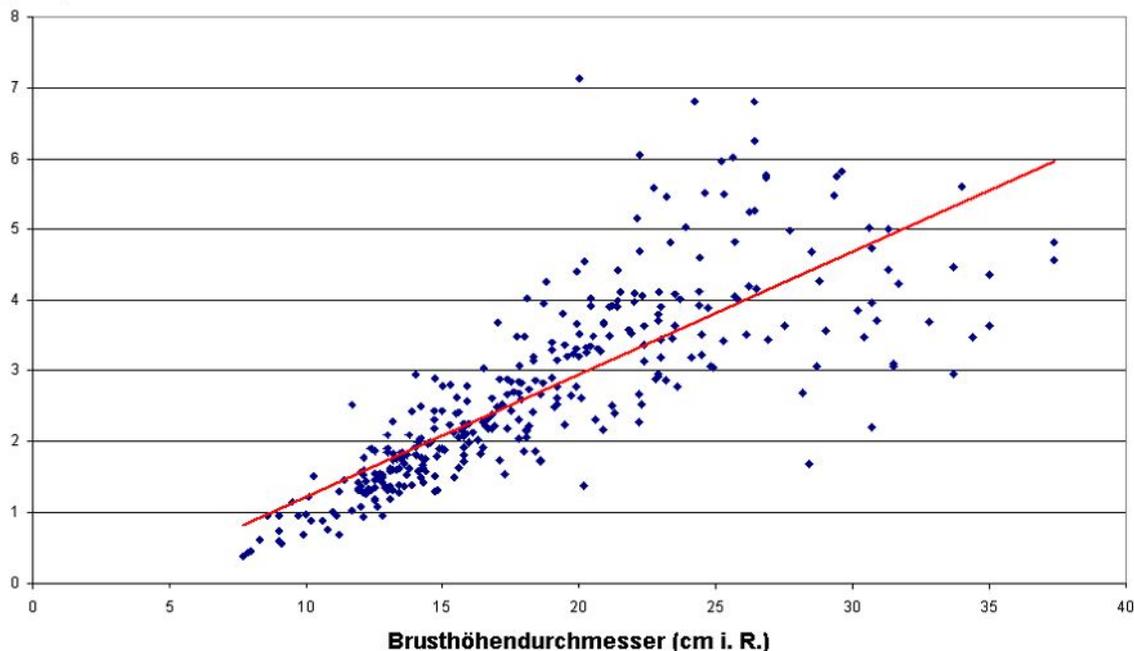
Insgesamt wurden 432 Bäume mit einem Derbholzvolumen von 133 Vfm m. R. gefällt und aufgearbeitet. 204 Bäume blieben beim Fällvorgang in Nachbarkronen hängen, davon konnten 114 Bäume so zu Boden gebracht werden, dass sie noch verwertbar waren. 90 Bäume hatten sich in dichten Bestandesteilen so in Nachbarkronen verkeilt, dass sie nur durch mehrmaliges Absägen von Meterstücken unter Beachtung der Unfallverhütungsvorschriften gefällt werden konnten. Sie waren damit unverwertbar (ca. 14 fm X-Holz). Dem Zeitaufwand dafür stand keine Erntemasse gegenüber. Zusammen mit dem im Bestand verbliebenen Kronenderholz (ca. 24 fm) ergab sich ein Ernteverlust von rund 30%. Die Erntemenge lag bei 95 Efm m. R.. Der Mittelstamm des ausscheidenden Bestandes hatte einen BHD von 19 cm und ein Erntevolumen von 0,28 Efm m. R.. Aus 22 Bäumen konnte ein Stammholzstück ausgeformt werden. Der Massenanteil an Stammholz lag bei 12 Efm o. R.. Die Massen und die aufgewandten Zeiten blieben bei der Leistungsberechnung ausser Betracht.

Am stärksten wird die Leistung vom Brusthöhendurchmesser (BHD) der aufgearbeiteten Bäume beeinflusst. Die Entfernung zur Rückegasse erwies sich als weitere signifikante Einflussgröße. Mit zunehmender Entfernung stieg der Zeitaufwand für den Fällvorgang. Da Rückegassen Lücken im Kronendach ergeben, erleichtert sich der Fällvorgang in Gassennähe erheblich. Im Bestandesinneren erschwert der dichte Kronenschluss der Bäume das Fällen. Baumart, Stammform und Kronenausformung hatten keinen signifikanten Einfluss auf die Leistung. Dies erklärt sich durch den erheblich reduzierten Aufarbeitungsgrad. Patzak [1984] kam zu einem vergleichbaren Ergebnis.

Die mittlere Technische Arbeitsproduktivität (TAP) für das "Fällen/Aufarbeiten" betrug 2,8 Efm m. R. in der Stunde. In Abbildung 11 ist die Arbeitsproduktivität in Abhängigkeit vom BHD des ausscheidenden Bestandes dargestellt (incl. 30% AZ).

Die beobachteten Waldarbeiter waren beide geübt und eingearbeitet, dennoch waren sie in ihrer Leistung deutlich unterschiedlich. Die erbrachte Leistung dürfte der eines durchschnittlichen Waldarbeiterkollektivs entsprochen haben. Ein Vergleich der erbrachten Leistung mit Leistungswerten, wie sie sich bei einer Abrechnung dieser Hiebsmaßnahme nach dem EST (IL-baumfallende Längen unentrindet, unvermessen, gezählt) ergeben hätte, zeigte, dass sich die Leistung im oberen Mittelfeld bewegte. Dabei ist jedoch zu berücksichtigen, dass Zeiteinsparungsmöglichkeiten gegenüber dem EST in der Entastung (größerer Entastungsgrad) und dem Wegfall der Stückzahlermittlung bestehen. Beide Kriterien führten jedoch nicht zu einer deutlichen Produktivitätssteigerung. In der Praxis kann daher für dieses Verfahren auf Vorgabezeiten des EST zurückgegriffen werden.

**Arbeitsproduktivität  
(fm/h)**



**Abb. 11:** Leistung beim Fällen/Aufarbeiten in Abhängigkeit vom Brusthöhen-durchmesser des ausscheidenden Bestandes (Regression:  $TAP = -0,57 + 0,18 * BHD$  ( $r^2=0,63$ ))

**Vorliefern/Rücken**

Die Studie umfasste 67 Rückefahrten mit einem Rückevolumen von 84 Efm m. R.. Der Rückegassenabstand lag bei 35 Metern. Dies ergibt eine mittlere Vorlieferentfernung von ca. 8 m. Die mittlere Rückeentfernung lag bei 137 Meter und das mittlere Rückevolumen bei 1,25 Efm m. R.. Durchschnittlich wurden je Lastfahrt sieben Einzelstämme mit einer mittleren Stückmasse von 0,18 fm zu einer Last zusammengefasst. Im Mittel wurden während der Studie 4,0 fm/h gerückt. Die Leistung wurde durch die Rückeentfernung, die durchschnittliche Stückmasse sowie die Anzahl der angehängten Einzelstämme beeinflusst. Sie lässt sich mit folgender Regressionsfunktion beschreiben (incl. 10% AZ):

$$TAP \text{ (fm/h)} = 1,258 + 14,22 * \text{durchschnittliche Stückmasse} - 0,01 * \text{Rückeentfernung} + 0,146 * \text{Stückzahl} \text{ (} r^2 = 0,75 \text{)}$$

Die Stückzahl der angehängten Stämme wirkt sich nicht uneingeschränkt positiv auf die Leistung aus. Bei Seillasten von mehr als zehn Stämmen wurde der Rückevorgang zunehmend ineffizienter. Häufig ergaben sich dann Schwierigkeiten bei der Lastbündelung sowie durch Verlieren einzelner Stämme. Bei den beobachteten Stückmassen dürfte das Leistungsoptimum bei ca. sieben Stämmen liegen.

Dummel und Branz [1986] geben die Leistung von Seilschleppern bei einem BHD von 20 cm mit 4,0 fm/MAS an. Die von uns beobachtete Leistung liegt auf etwa gleicher Höhe.

In Tabelle 4 ist die Arbeitsproduktivität in Abhängigkeit von der mittleren Stückmasse und der mittleren Rückeentfernung bei 7 Stämmen je Rückefahrt dargestellt (incl. 10% AZ).

**Tab. 4:** Leistung (in fm/h) beim Vorliefern/Rücken (Verfahren "Würzburg")

Stückmasse (fm m.R.)	Rückeentfernung (m)			
	50	100	200	300
0,10	3,2	2,7	1,7	0,7
0,15	3,9	3,4	2,4	1,4

0,20	4,6	4,1	3,1	2,1
0,25	5,3	4,8	3,8	2,8
0,30	6,0	5,5	4,5	3,5

## Hacken

Insgesamt wurden zehn Polter mit einer Gesamtmasse von 74 Efm m. R. gehackt. Ein weiterer Polter mit einem Volumen von ca. 7 Efm m. R. blieb ausserhalb der Zeitnahme. Aus dem Hackgut wurden 176 Srm Hackschnitzel gewonnen, die nach okularer Anschätzung als Feinhackschnitzel anzusprechen wären. Als Umrechnungsfaktor von Festmeter auf Schüttraummeter konnte der Wert 2,4 ermittelt werden.

Auf Grund unterschiedlicher Lagerorte konnte bei der Auswertung zwischen Hacken auf der Freifläche und Hacken an der Waldstraße unterschieden werden. Auf der Freifläche wurde auf Grund höherer Manipulationsfreiheit eine durchschnittliche TAP von 10,4 fm/h erreicht, wohingegen die Leistung an der Waldstraße nur 8,3 fm/h betrug. Im Mittel lag die TAP bei 9,9 fm/h bzw. 23,4 Srm/h.

Das Einkürzen des Hackgutes bei einem Polter an der Waldstraße auf drei bis fünf Meter lange Stücke erbrachte eine Leistungssteigerung auf das Niveau der Freifläche. Dort ergaben sich durch das Einkürzen keine Leistungsänderungen.

Die **mittlere Stückmasse** sowie die **Anzahl** der dem Hacker gleichzeitig zugeführten Stämme liessen sich als Einflussfaktoren auf die Hackleistung statistisch nicht absichern. Durch das gleichzeitige Greifen und Zuführen von mehreren Bäumen sowie die permanente und sich überlappende Beschickung des Hackers wurde der Stückmasseeinfluss weitgehend aufgehoben. Dagegen konnte Patzak [1984] bei kranbeschickten Hackern einen deutlichen Einfluss des BHD auf die TAP nachweisen. Auch Becker et al. [1987] belegen einen signifikanten Stückmasseeinfluss. Schwache Hackgutdimensionen schnitten trotz der Möglichkeit, mehrere Bäume zu bündeln und dem Hacker gleichzeitig zuzuführen, mit deutlich geringerer Leistung gegenüber stärkeren Baumdimensionen ab.

Veröffentlichte Leistungsangaben schwanken je nach Einsatzort (Waldstraße/zentraler Platz) und Baumdimension erheblich. Wolf und Pfeil [1976] dokumentierten beim Hacken von Buchenvollbäumen (BHD 26 cm) an der Waldstraße durch einen mobilen Großhacker Leistungen von 20 Srm/h. Stampfer [1997] beobachtete eine Leistung von rund 35 Srm/h beim Hacken von Weichlaubholz (9 cm mittlerer Durchmesser). Wesentlich höhere Hackleistungen sind bei starker Konzentration des Hackguts z.B. in Zwischenlagern möglich. So leistete ein mobiler Großhacker aus Aspenvollbäumen (BHD 19 cm) bis zu 45 Srm/h [Becker; Pfeil 1974]. Eine noch höhere Leistung von rund 60 Srm/h erreichte ein Mobilhacker bei vier Meter langen Eichenstämmen (Mittendurchmesser ca. 10 cm) [Stampfer 1997]. Die im Rahmen dieser Studie gemessene Leistung von rund 23 Srm/h liegt damit am unteren Rand des Leistungsspektrums.

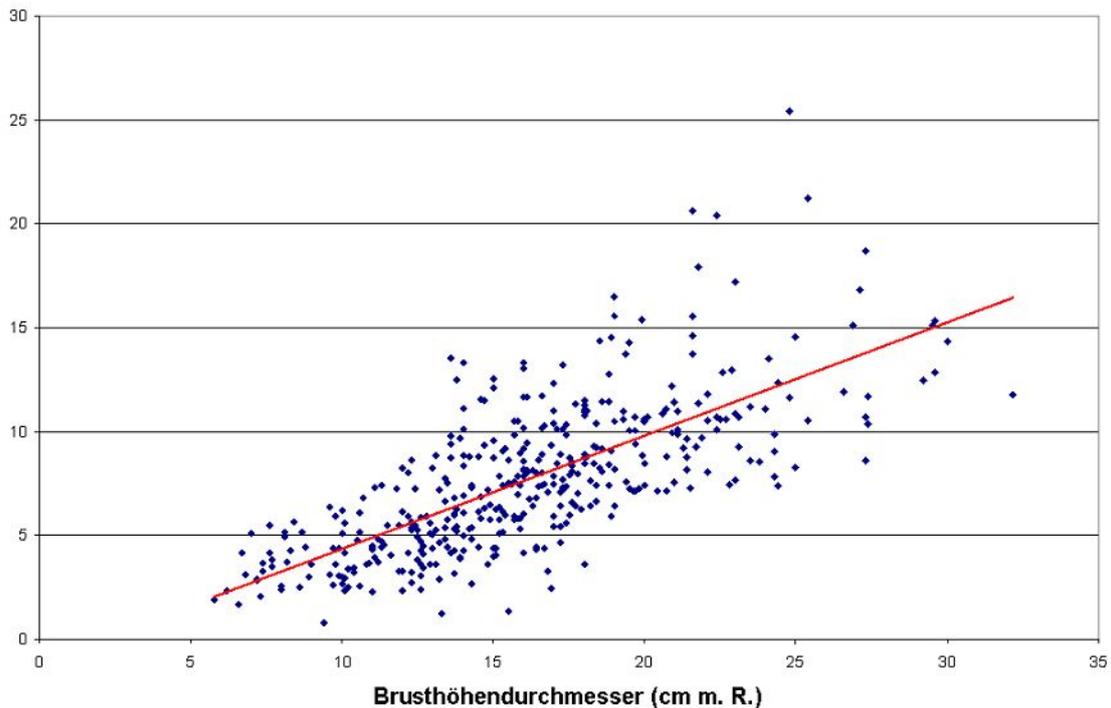
### 2.3.3 Leistungswerte im Verfahren "Neustadt"

Die Waldarbeiter im Verfahren "Neustadt" waren ebenfalls geübt und eingearbeitet. Beide Arbeiter zeigten annähernd die gleiche Leistung. Ihre Leistungsbereitschaft und -hergabe lagen sehr hoch, so dass die nachfolgenden Leistungswerte nicht unbesehen auf (unter)durchschnittliche Waldarbeiter übertragen werden können.

### Fällen/Aufarbeiten (Zangenzone)

Insgesamt wurden in der Zangenzone 410 Bäume mit einem Erntevolumen von 66 Efm m. R. gefällt und aufgearbeitet. Der ausscheidende Bestand hatte einen mittleren BHD von 16 cm und ein mittleres Erntevolumen von 0,16 Efm m. R.. Der Ernteverlust gegenüber der Vorratsmasse des ausscheidenden Bestands lag bei lediglich 12% und umfasste ausschließlich Kronenderbholz.

## Arbeitsproduktivität (fm/h)



**Abb. 12:** Leistung beim Fällen/Aufarbeiten (Zangenzone) in Abhängigkeit vom Brusthöhendurchmesser des ausscheidenden Bestandes (Regression:  $TAP = -1,13 + 0,54 * BHD$  ( $r^2 = 0,52$ ))

Der BHD des ausscheidenden Bestandes beeinflusst die Leistung am stärksten. Die *Baumart*, *Stammform* und *Kronenausformung* lassen sich als Einflussfaktoren statistisch nicht nachweisen. Dies kann auf die Rückegassennähe und den geringen Aufarbeitungsgrad zurückgeführt werden.

Die mittlere TAP beim Fällen/Aufarbeiten in der Zangenzone beträgt 7,6 fm/h. In Abbildung 12 ist die Produktivität in Abhängigkeit vom BHD der ausscheidenden Bäume dargestellt (incl. 30% AZ).

### Fällen/Aufarbeiten/Vorliefern (Seilzone)

Das Seillinienvorfahren bedingt die gleichzeitige Zusammenarbeit von zwei Personen, dem **Motorsägenführer** und dem **Windenführer**.

#### Motorsägenführer

Insgesamt wurden in der Seilzone 256 Bäume mit einem Erntevolumen von 39 Efm m. R. gefällt und aufgearbeitet. Der ausscheidende Bestand hatte einen mittleren BHD von 16 cm und ein durchschnittliches Erntevolumen von 0,15 Efm m. R.. Der Ernteverlust gegenüber der Vorratsmasse betrug ca. 13% und bestand ausschließlich aus Kronenderholz.

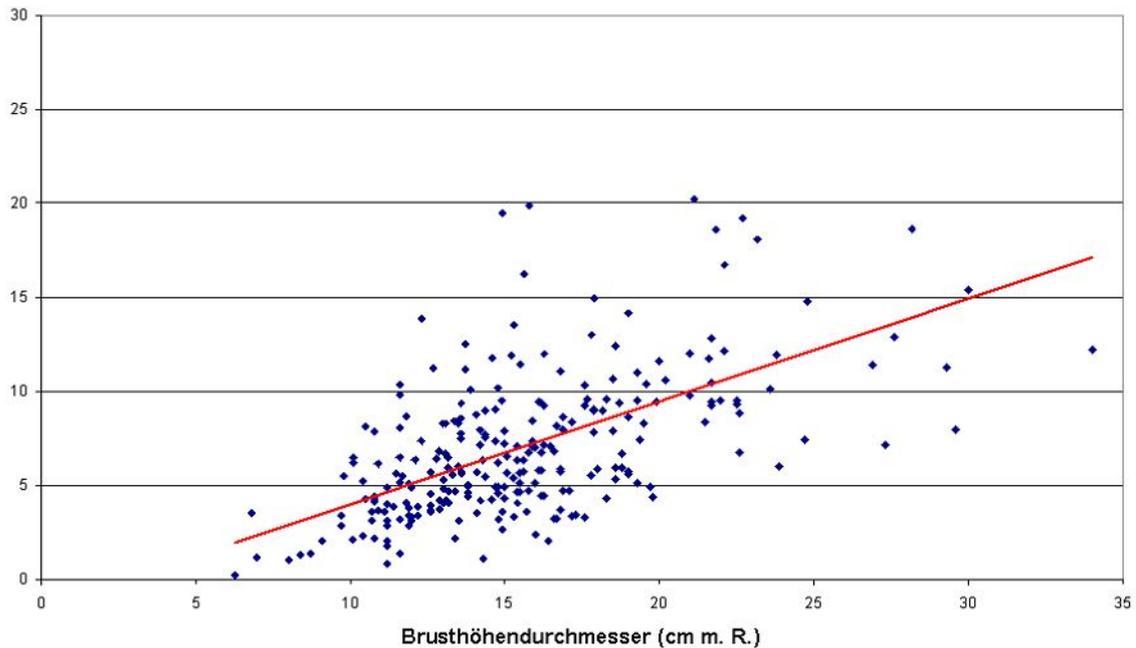
Haupteinflussfaktor auf die Leistung war der BHD des ausscheidenden Bestandes. Bestandesparameter wie *Baumart*, *Stammform* und *Kronenausformung* hatten wegen des geringen Aufarbeitungsgrads sowie die *Entfernung zur Rückegasse* auf Grund des seilwindenunterstützten Fällens keinen statistisch nachweisbaren Einfluss auf die TAP.

Die TAP des Motorsägenführers lag im Mittel bei 7,1 Efm m. R./h. In Abbildung 13 ist die Arbeitsproduktivität des Motorsägenführers in Abhängigkeit vom BHD des ausscheidenden Bestandes dargestellt (incl. 15% AZ s. 3.2.5).

Die Leistung des Motorsägenführers lag gegenüber der in der Zangenzone um rund 7% niedriger. Zu erklären ist dies durch Wartezeiten des Motorsägenführers auf den Windenführer sowie durch die

geringe Zahl hängengebliebener Bäume in der Zangenzone.

### Arbeitsproduktivität (fm/h)



**Abb. 13:** Leistung des Motorsägenführers im Seillinienverfahren in Abhängigkeit vom Brusthöhendurchmesser (Regression:  $TAP = -1,5 + 0,55 * BHD$  ( $r^2 = 0,42$ ))

### Windenführer

Insgesamt wurden 181 Seillinien angelegt und dabei 257 Bäume mit einem Erntevolumen von 42 Efm m. R. an die Rückegasse vorgeliefert. Die mittlere Stückmasse lag bei 0,16 Efm m. R.. Durchschnittlich wurden 1,4 Stämme (1 bis 5) bei einer mittleren Vorlieferentfernung von 12 Metern an der Rückegasse vorkonzentriert.

Hauptsächlich wurde die Leistung durch die mittlere Stückmasse, die Anzahl der vorgelieferten Bäume sowie die Vorlieferentfernung beeinflusst. Sie lässt sich mit folgender Regressionsfunktion beschreiben (incl. 20% AZ):

$$TAP \text{ (fm/h)} = 3,35 + 49,6 * \text{durchschnittliche Stückmasse} + 1,66 * \text{Anzahl} - 0,44 * \text{Vorlieferentfernung} \quad (r^2 = 0,62)$$

Die mittlere TAP des Windenführers beträgt 8,9 Efm m. R./h. Die im Vergleich zum Motorsägenführer höhere TAP ergibt sich daraus, dass bereits gefällte und aufgearbeitete Bäume aus der Zangenzone an die Gasse mitvorgeliefert wurden. Diese Bäume waren bei der Bearbeitung der Zangenzone zurückgeblieben, da sie außerhalb der Reichweite des Zangenschleppers lagen. Das Vorliefern dieser Bäume verursachte leistungsmindernde Wartezeiten beim Motorsägenführer.

Zur Verfahrensoptimierung wäre der Einsatz von Chokerketten denkbar. Dadurch entfällt das Öffnen und Schließen der Seilschlinge bei mehreren Bäumen in einer Seillinie. Da im Durchschnitt nur 1,4 Bäume je Seillinie vorgeliefert wurden, bewegt sich die dadurch mögliche Zeitersparnis in einem bescheidenen Rahmen.

### Rücken

Insgesamt wurden 59 Rückefahrten des Zangenschleppers mit einem Rückevolumen von 105 Efm m. R. beobachtet. Der Rückegassenabstand lag bei 30 Metern und die mittlere Rückeentfernung bei 274 Meter. Durchschnittlich wurden je Rückefahrt 11 Stämme (6 bis 19) mit einer jeweiligen Stückmasse

von 0,16 fm zu einer Last von 1,8 fm zusammengefasst. Die mittlere TAP betrug in der Zangenzzone 7,3 fm/h und in der Seilzone 9,1 fm/h. Die in den Seillinien an der Rückegasse vorkonzentrierten Bäume ermöglichten eine um ca. 25% höhere Rückeleistung.

Einflussfaktoren auf die Leistung waren die Rückeentfernung, die durchschnittliche Stückmasse sowie die Anzahl der Stämme. Die Rückeleistung in der Seilzone lässt sich mit folgender Regressionsfunktion beschreiben (incl. 10% AZ):

$$TAP \text{ (fm/h)} = 2,94 + 46,84 * \text{durchschnittliche Stückmasse} - 0,02 * \text{Rückeentfernung} + 0,36 * \text{Stückzahl} \quad (r^2 = 0,60)$$

In Tabelle 5 ist die Leistung in Abhängigkeit von der mittleren Stückmasse und der mittleren Rückeentfernung bei einer Rückelast von 11 Stämmen je Fahrt dargestellt (incl. 10% AZ).

Dummel und Branz [1986] geben beim Rücken vorkonzentrierter Lasten mit Zangenschlepper eine durchschnittliche Leistung von 8,2 fm o. R./h bei einem BHD von 16 cm an. Dieser Wert liegt ca. 10% unter der von uns gemessenen Leistung bei vorkonzentrierten Bäumen.

**Tab. 5: Rückeleistung (in fm/h) mit Zangenschlepper**

Stückmasse (fm m. R.)	Rückeentfernung (m)							
	50		100		200		300	
	Zangen- zone	Seilzone	Zangen- zone	Seilzone	Zangen- zone	Seilzone	Zangen- zone	Seilzone
0,10	8,9	10,7	7,8	9,7	5,7	7,6	3,7	5,5
0,15	11,2	13,1	10,2	12,0	8,1	10,0	6,0	7,9
0,20	13,6	15,4	12,5	14,4	10,5	12,3	8,4	10,3
0,25	15,9	17,8	14,9	16,7	12,8	14,7	10,8	12,6
0,30	18,3	20,2	17,3	19,1	15,2	17,1	13,1	15,0

### Vergleich der Leistung mit anderen Verfahren

Das Verfahren "Neustadt" lässt sich am ehesten mit dem "Modifizierten Goldberger Verfahren" oder dem "Winden-Verfahren" vergleichen. Diese Verfahren setzen wie das Verfahren "Neustadt" auf ein seilwindenunterstütztes Fällen/Vorliefern. Das "Modifizierte Goldberger Verfahren" ist ein gekoppeltes Zweimann-Verfahren und sieht das Rücken der Sortimente an die Waldstraße vor. Die Arbeitskette im "Winden-Verfahren" (Einmann-Verfahren) endet an der Rückegasse. Der Vergleich basiert auf durchschnittlichen Leistungswerten des KWF [Morat et al. 1998] für einen BHD von 16 cm und folgenden Aufarbeitungsgraden:

- Modifiziertes Goldberger Verfahren: Fichten-Vollbäume
- Winden-Verfahren: Buchen-IL baumfallende Längen

Das Verfahren "Neustadt" hat eine um ca. 80% höhere Leistung als die Vergleichsverfahren, trotz eines geringeren Aufarbeitungsgrads im "Modifizierten Goldberger Verfahren" (Tab. 6). Der gewählte Aufarbeitungsgrad im "Winden-Verfahren" dürfte dem des "Neustädter Verfahrens" entsprechen. Dies kann teilweise auf das überdurchschnittlich leistungsfähige Waldarbeiterkollektiv in "Neustadt", die einfachen Bestandesverhältnisse (Zweiteingriff) sowie die deutlich geringere Vorlieferentfernung zurückgeführt werden. Letztere ist bei den Vergleichsverfahren etwa doppelt so groß.

**Tab. 6: Vergleich der Leistung der Verfahren "Neustadt", "Modifiziertes Goldberger Verfahren" und "Winden-Verfahren"**

Verfahren	Leistung (fm/h)	Ort
"Neustadt"	2,5	frei Waldstraße

"Modifiziertes Goldberger"	1,4	
"Neustadt"	3,6	frei Rückegasse
"Winden"	2,0	

Beim "Modifizierten Goldberger Verfahren" entstehen durch das Rücken an die Waldstraße hohe Wartezeiten für den Motorsägenführer. Dieser muss das Wiedereintreffen des Rückeschleppers abwarten, bevor er weiterarbeiten kann. Außerdem ist der im Verfahren "Neustadt" eingesetzte Zangenschlepper einem Seilschlepper leistungsmäßig etwa doppelt überlegen.

Beim "Windungsverfahren" bedient der Motorsägenführer gleichzeitig die Seilwinde. Der Arbeiter muss stets sein Werkzeug mit sich führen oder in die neue Seillinie nachholen, womit sich die Wegezeiten deutlich erhöhen. Im Verfahren "Neustadt" treten für den Motorsägenführer zwar Wartezeiten auf, doch kann er sich während dieser Pausen erholen und neue Seillinien vorplanen. Die Zusammenarbeit von Winden- und Motorsägenführer hat somit positive Synergieeffekte. Insgesamt nutzt das Verfahren "Neustadt" die Vorteile der beschriebenen Vergleichsverfahren und verbessert deren Leistungsfähigkeit.

## Hacken

Insgesamt wurden 12 Polter mit einer Erntemasse von 105 Efm m. R. gehackt und daraus 287 Srm Hackschnitzel erzeugt, die nach okularer Abschätzung als Feinhackschnitzel einzustufen sind. Als Umrechnungsfaktor von Festmeter auf Schüttraummeter wurde der Wert 2,7 ermittelt. Das Kürzen der Stämme auf drei Meter Länge führte nicht zu einer Verbesserung der Hackerleistung. Das Platzangebot und die damit verbundene Manipulationsfreiheit reichte für den eingesetzten Mobilhacker auf der Waldstraße aus. Dieser hatte sich spitzwinklig zum Polter auf die Waldstraße gestellt. Die mittlere TAP beim Hacken lag bei 8,2 fm/h bzw. 22,3 Srm/h.

Vergleichswerte für Hackerleistungen bei Nadelholz schwanken erheblich. Beim Hacken vollmechanisiert geernteter Kiefernvollbäume (BHD 16 cm) mit einem mobilen Hacker (Bruks 800 CT) an der Waldstraße wurde eine durchschnittliche Leistung von 27 Srm/h erreicht [Plath u. Kroop 1996]. Wolf und Pfeil [1976] dokumentierten beim Hacken von Kiefernvollbäumen (BHD 20 cm) durch einen Mobilhacker an der Waldstraße Leistungen von 33 Srm/h.

Stampfer [1997] berichtet über eine Leistung von 35 Srm/h, die beim Hacken von Fichtenvollbäumen aus Durchforstung (Länge 5,5 m; Durchmesser 9 cm) durch einen LKW-Aufbauhacker mit Kranbeschickung (Biber 8) an der Waldstraße erreicht wurde. Weiterhin leistete ein anderes Fabrikat (Strachl U-120) beim Zerkleinern von mehrere Meter hohen Haufen von Ast- und schwachem Kronenmaterial aus Fichtendurchforstung nach Prozessoreinsatz rund 23 Srm/h.

Die Hackerleistung im Verfahren "Neustadt" ist als allenfalls durchschnittlich zu beurteilen. Der Hacker war erst wenige Wochen vor dem Einsatz angeschafft worden. Insofern konnte die maximale Leistung der Maschine wohl noch nicht voll ausgeschöpft werden.

### 2.3.4 Kosten

In den nachfolgenden Tabellen werden die ermittelten Kosten je Festmeter für beide Verfahren für eine einheitliche Rückeentfernung von 200 m dargestellt. Die Sätze basieren auf den in Tabelle 2 dargestellten Maschinen- und Lohnkosten. Der Umrechnung von Festmeter auf Schüttraummeter bzw. von Festmeter auf Tonnen liegen folgende Faktoren zugrunde:

- Verfahren "Würzburg": fm auf Srm 2,4  
fm auf t 1,06
- Verfahren "Neustadt": fm auf Srm 2,7  
fm auf t 0,9

Der Umrechnungsfaktor von Festgehalt auf Gewicht wurde über die baumartenspezifischen atro-Darrdichten des Hackgutes und den Wassergehalt zum Zeitpunkt des Hackens (40%) ermittelt (s.

Anhang B). Für das Verfahren "Würzburg" ergeben sich folgende Kosten (Tab. 7; Abb. 14):

Tab. 7: Kostenübersicht für das Verfahren "Würzburg"

BHD (cm)	Kosten (DM/fm)			Gesamtkosten (DM)		
	Fällen	Rücken	Hacken	je fm	je Srm	je t
10	40,70	37,00	21,20	98,90	41,20	93,30
11	35,50	34,10	21,20	90,80	37,80	85,70
12	31,50	31,60	21,20	84,30	35,10	79,50
13	28,20	29,50	21,20	78,90	32,90	74,50
14	25,60	27,60	21,20	74,40	31,00	70,20
15	23,50	26,00	21,20	70,70	29,40	66,60
16	21,60	24,50	21,20	67,30	28,10	63,50
17	20,10	23,20	21,20	64,50	26,90	60,80
18	18,70	22,00	21,20	61,90	25,80	58,40
19	17,50	20,90	21,20	59,60	24,90	56,30
20	16,50	20,00	21,20	57,70	24,00	54,40

Bei einem BHD von 16 cm sind die Kostenanteile der drei Teilarbeiten annähernd gleich (Tab. 14).

Die Kostenübersicht für das Verfahren "Neustadt" gibt die nachstehende Tabelle 8 wieder. Sie basiert auf einem Massenanteil 60/40 zwischen Zangen-/Seilzone. Das Verfahren "Würzburg" hat ca. 40%

höhere Kosten auf Basis DM/fm bzw. ca. 60% bezogen auf DM/Srm als das Verfahren "Neustadt".

**Gesamtkosten: 28,05 DM/Srm**

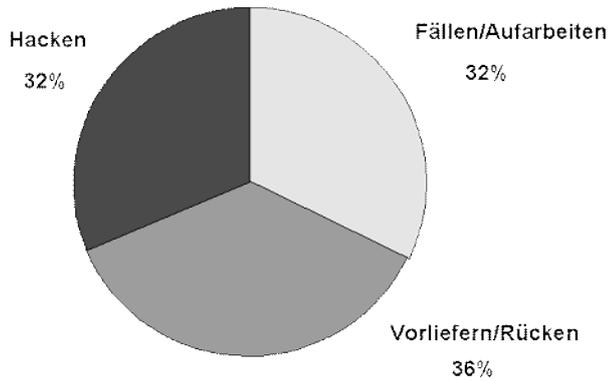


Abb. 14: Verteilung der Kosten auf die einzelnen Teilarbeiten im

**Verfahren "Würzburg"**

Die Differenz bezogen auf den Preis je Tonne ist dagegen deutlich geringer (ca. 20%). Die Ursache hierfür liegt in der höheren Darrdichte der Buchenhackschnitzel. Das durchschnittliche atro-Gewicht je Festmeter war in Würzburg 640 Kilogramm, in Neustadt lediglich 540 Kilogramm.

Tab. 8: Kostenübersicht für das Verfahren "Neustadt"

BHD (in cm)	Kosten (DM/fm)						Gesamtkosten (DM)		
	Zangenzone		Seilzone			Hacken	je fm	je Srm	je t
Fällen	Rücken	Fällen	Vorliefern	Rücken					
10	11,40	23,50	12,30	18,00	16,90	25,50	65,30	24,20	72,50
11	10,10	20,60	10,80	15,70	15,30	25,50	60,70	22,50	67,40
12	9,10	18,40	9,70	13,40	14,10	25,50	56,80	21,10	63,10
13	8,20	16,60	8,70	11,40	13,00	25,50	53,60	19,90	59,60
14	7,60	15,10	7,90	10,00	12,10	25,50	51,10	18,90	56,70
15	7,00	13,80	7,30	8,80	11,30	25,50	48,90	18,10	54,40
16	6,50	12,80	6,70	7,90	10,50	25,50	47,20	17,50	52,40
17	6,00	11,90	6,30	7,40	9,90	25,50	45,70	16,90	50,80
18	5,70	11,10	5,90	6,80	9,40	25,50	44,40	16,40	49,30
19	5,30	10,40	5,50	6,20	8,90	25,50	43,20	16,00	48,00
20	5,00	9,80	5,20	5,80	8,40	25,50	42,20	15,60	46,85

**Gesamtkosten: 17,46 DM/Srm**



*Abb. 15: Verteilung der Kosten auf die einzelnen Teilarbeiten im Verfahren "Neustadt"*

Bei einem BHD von 16 cm verteilen sich beim Verfahren "Neustadt" die Kosten auf die einzelnen Teilarbeiten wie folgt:

Hauptkostenfaktor beim Verfahren "Neustadt" war das Hacken. Dies auch auf Grund der vergleichsweise geringen Produktivität beim Hacken. Entsprechend der hohen Leistung beim Fällen/Aufarbeiten reduzierte sich der Kostenanteil dieser Teilarbeit am Gesamtsystem und liegt damit deutlich unter dem in "Würzburg" beobachteten.

Literaturangaben zu Bereitstellungskosten "frei Waldstraße" schwanken in einem weiten Rahmen. Die Systemkosten teilmechanisierter Verfahren liegen zwischen 20,- und 81,- DM/Srm [Becker et al. 1987; Busch 1984; Schildt 1982; Wippermann 1985, 1987 a,b]. Bereitstellungskosten von rund 20,- DM/Srm konnten nur bei Flächenräumungen (Pappel, Kiefer) oder bei Gassenaufhieben in Nadelholz-Jungbeständen erreicht werden [Wippermann 1985, 1987 a]. Remler und Fischer [1996] geben die Kosten rein motormanueller Verfahren bei einem BHD von 10 cm mit von 25,- bis 35,- DM/Srm und bei einem BHD von 15 cm mit rund 23,- DM/Srm an. Teilmechanisierte Verfahren schnitten auf Grund relativ hoher Maschinenkosten bei nur durchschnittlichen Leistungen mit Kosten von 35,- bis 40,- DM/Srm bei einem BHD von 10 cm bzw. 25,- bis 30,- DM/Srm bei einem BHD von 15 cm noch ungünstiger ab.

Vollmechanisierte Verfahren haben meist geringere Bereitstellungskosten. Schwanitz [1994] stellte bei einer Fichten-Vollbaumernte (BHD 8 cm) mit einem Feller-Buncher und anschließendem Hacken auf der Waldstraße Kosten von 15,- DM/Srm fest. Plath und Kroop [1996] berichten von einer vollmechanisierten Kiefern-Vollbaumernte (Alter 42-45 Jahre; durchschnittliche Stückmasse 0,076 fm bis 0,134 fm) durch einen Klein-Harvester (FMG 470) und nachfolgendes Hacken mit einem mobilen Großhacker mit Schnitzelbehälter (Bruks 800 CT). Dabei entstanden Kosten von lediglich 11,- DM/Srm. Eine vollmechanisierte Durchforstung eines Fichtenbestandes durch ein Arbeitssystem Hackschnitzel-Harvester/Shuttle beobachteten Feller et al. [1998]. Im BHD-Bereich von 16 bis 19 cm errechneten sich Kosten von 17,- bis 21,- DM/Srm "frei Waldstraße".

Die Kosten von rund 18,- DM/Srm bei einem BHD von 16 cm im Verfahren "Neustadt" sind als sehr günstig zu beurteilen. Sie liegen deutlich unter den bislang publizierten Sätzen teilmechanisierter Verfahren. Im Verfahren "Würzburg" wurden als durchschnittlich zu wertende Kosten erreicht.

## **2.4 Beurteilung der untersuchten Verfahren**

### **2.4.1 Bestandespflughchkeit**

Beim Verfahren "Würzburg" muss mit Schäden an verbleibenden Bäumen gerechnet werden, wie sie bei motormanuellen Ernteverfahren für Industrieholz auftreten. Durch die erheblich reduzierte Entastung können Totaststummel beim Vorliefern/Rücken ggf. das Schadprozent noch erhöhen.

Beim Verfahren "Neustadt" ist mit insgesamt niedrigeren Schäden als im Verfahren "Würzburg" zu rechnen. Das windenunterstützte Fällen in der Seilzone ermöglicht ein exaktes Einhalten der Fällordnung und führt damit zu geringen Schäden. Beim Festlegen der Seillinien muss auf den verbleibenden Bestand in der Zangenzone besonders geachtet werden, da hier die Entnahmebäume bereits geerntet sind. Mit einem Zangenschlepper lassen sich Schäden an Gassenrandbäumen durch das Einschwenken der Rückelast auf die Rückegasse verringern.

### **2.4.2 Ergonomie**

Im Verfahren "Würzburg" sowie in der Zangenzone des Verfahrens "Neustadt" ergeben sich gegenüber der Aufarbeitung von IL keine ergonomischen Vorteile. Für die Seilzone des Verfahrens "Neustadt" entstehen positive Effekte durch das Zweimann-Seilverfahren (z. B. Windenunterstützung, geringere Unfallgefährdung, Möglichkeit zur "Jobrotation"). Ergonomisch nachteilig ist lediglich das Ausziehen des Seiles über das in der Zangenzone liegende Reisig. Das Rücken mit Zangenschlepper ist als ergonomisch günstig zu beurteilen, da die Kabine zur Lastbildung und zum Poltern nicht verlassen werden muss.

### **2.4.3 Wirtschaftlichkeit**

Derzeit lassen sich in Bayern für Waldhackschnitzel mit einem Bezugswassergehalt von 40% rund 80,- DM je Tonne "frei Werk" erzielen. Dabei müssen die Transportkosten noch berücksichtigt werden. Um eine einheitliche Kalkulationsbasis für die nachfolgende Wirtschaftlichkeitsbetrachtung zu erhalten, wurden pauschale Transportkosten von 18,- DM/t

angesetzt. Dies entspricht den Kosten für eine Transportentfernung von ca. 30 Kilometern. "Frei Waldstraße" ergibt sich daraus ein Erlös von 62,- DM/t. Im Verfahren "Würzburg" liegt der ökonomische Grenzdurchmesser bei BHD 17 cm (s. Tab. 7). Nur oberhalb dieses Durchmessers ist es möglich, kostendeckend zu produzieren. Die Kostendeckungsschwelle im Verfahren "Neustadt" ist bereits ab einem BHD von 13 cm gegeben (s. Tab. 8).

Für die Entscheidung eines Waldbesitzers, welche Sortiment er aus seinen Bäumen herstellen will, spielt neben den Absatzmöglichkeiten der Gewinn, den

er mit diesen Sortimenten erzielt, eine entscheidende Rolle. In den nachfolgenden Vergleichskalkulationen wurde mit Durchschnittswerten gerechnet, die nicht unbesehen allgemein übertragbar sind.

Das in Würzburg im Frühjahr 1998 aufgearbeitete Hackgut kann alternativ als Buchen-IL vermarktet werden. Der Verkaufserlös hierfür lag zum Zeitpunkt des Einschlags bei ca. 50,- DM/fm "frei Waldstraße". Für die Aufarbeitungskosten mit Unternehmer sind etwa 35,- DM/fm "frei Waldstraße" anzusetzen. Als erntekostenfreier Erlös verblieben dem Waldbesitzer 15 DM/fm. Können die Bäume als Brennholz an Käufer, die die Ernte selbst durchführen (Selbstwerber), vermarktet werden, so lassen sich vom Waldbesitzer bis zu 28,- DM/fm ab Stock erzielen. Bei einem Hackschnitzelerlös von 62,- DM/t und Bereitstellungskosten von 54,- bis 61,- DM/t (BHD 20 bis 17 cm) ergibt sich ein erntekostenfreier Erlös von 1,- bis 8,- DM/t. Dies entspricht rund 1,10 bis 8,50 DM/fm.

*Das Verfahren "Würzburg" stellt, sofern Buchen-IL oder Brennholz in Selbstwerbung vermarktet werden kann, unter den beobachteten Bedingungen gegenwärtig keine Alternative zu den Vergleichssortimenten dar.*

Alternativ wäre das Hackgut beim Verfahren "Neustadt" auf Grund mangelhafter Qualität nur als Kiefern-/Lärchen-IL vermarktbare gewesen. Der Preis hierfür lag zum Zeitpunkt des Einschlags bei ca. 38,- DM/fm "frei Waldstraße", die Aufarbeitungskosten durch Unternehmer bei rund 35,- DM/fm. Der Waldbesitzer erzielt somit einen erntekostenfreien Erlös von 3,- DM/fm.

Bei einem Hackschnitzelerlös von 62,- DM/t und Erntekosten von 47,- bis 60,- DM/t (BHD 20 bis 13 cm) verbleibt dem Waldbesitzer ein erntekostenfreier Erlös von 2,- bis 15,- DM/t. Dies entspricht rund 1,80 bis 13,50 DM/fm. Bereits ab einem BHD von 14 cm liegt der erntekostenfreie Erlös bei Hackschnitzeln höher als bei Kiefern-IL.

*Die Hackschnitzelproduktion im Verfahren "Neustadt" stellt somit eine klare Alternative zu Industrieholzsortimenten dar. Der Waldbesitzer kann bei der genannten Erlös- und Kostenkonstellation (Frühjahr 1998) ab einem BHD von 14 cm höhere Erlöse für Hackschnitzel erzielen als für Industrieholz. In stärkeren und qualitativ besseren Beständen erzielt die Vermarktung von Stammholz jedoch eine höhere Wertschöpfung.*

## 2.5 Transport

Im Verfahren "Neustadt" transportierten abwechselnd ein landwirtschaftlicher Schlepper mit Hochwandanhänger sowie ein LKW mit einem Container in das rund 20 Kilometer entfernte Heizwerk. Das landwirtschaftliche Gespann fasste rund 23 Srm und der Container-LKW 27 Srm Hackschnitzel je Transportvorgang.

Die durchschnittliche Transportleistung des landwirtschaftlichen Gespanns lag bei 11,7 Srm/h, die des LKW bei 12,0 Srm/h. Das annähernd gleiche Niveau erklärt sich daraus, dass beide Fahrzeuge beim Befüllen an den Hackort gebunden waren. Da der Hacker über keinen eigenen Auffangbehälter verfügte, musste sich das Transportmedium während des Hackens direkt neben dem Hacker befinden. Auf der kurzen Transportstrecke konnte der LKW zudem seine höhere Fahrgeschwindigkeit gegenüber dem leistungsfähigen Schlepper nicht ausspielen. Aus der Abbildung 16 wird dies deutlich.



Abb. 16: Verteilung der einzelnen Teilarbeiten auf die GAZ für LKW (links) und landwirtschaftliches Gespann (rechts)

Insgesamt entstanden bei den Fahrzeugen relativ geringe Wartezeiten. Aus organisatorischer Sicht wäre es jedoch besser gewesen, mehr Fahrzeuge einzusetzen, um die langen Wartezeiten des teuren Hackers von 14% (s. Kap. 2.3.1) zu verringern. Alternativ wären auch Anhängerrotationssysteme oder weitere Wechselcontainer möglich. Diese bedingen aber ideale Platzverhältnisse am Hackort oder Hacker mit einem integrierten Sammelbehälter.

Auf Grund höherer Maschinenkosten bei annähernd gleicher Leistung war der LKW-Transport wesentlich teurer. Ein Schüttraummeter Hackschnitzel kostete beim LKW ca. 11,- DM und mit dem landwirtschaftlichen Gespann ca. 7,- DM. Unter den Versuchsbedingungen wären landwirtschaftliche Gespanne deutlich günstigere Transportmedien gewesen.

### 3 Lagerung und Trocknung von Waldhackschnitzeln

"Waldfrische" Hackschnitzel haben Wassergehalte von etwa 50%. In der Regel sind bei einer Verbrennung Wassergehalte von 30 - 40% erforderlich, um die emissionsrechtlichen Vorschriften einzuhalten. Eine Trocknung ist deshalb unbedingt erforderlich. Trockene Hackschnitzel haben darüber hinaus folgende Vorteile:

bessere technologische Eigenschaften als Brennstoff durch höheren Energiegehalt

geringere gesundheitliche Belastung durch Pilzsporen beim Umgang mit Hackschnitzeln [Weingartmann 1991]

geringere Transportkosten auf Grund geringeren Gewichts.

#### 3.1 Physikalische Zusammenhänge der Trocknung von Hackschnitzeln

Im Trocknungsvorgang unterscheidet man zwischen rein physikalischen und durch Mikroorganismen verursachten Vorgängen. Diese laufen sowohl parallel als auch zeitlich versetzt ab.

##### 3.1.1 Einflussfaktoren auf die Trocknung

Verschiedene Faktoren beeinflussen die Holz Trocknung, v. a.:

Trocknungsdauer

Wassergehalt des Holzes und der Luft

Qualität der Holzhackschnitzel.

Die Trocknungsdauer ist jahreszeitlich unterschiedlich. Dies ist zurückzuführen auf unterschiedliche Wassergehalte im Holz zwischen der Saftzeit im Sommer und der Ruhezeit im Winter sowie auf jahreszeitlich stark unterschiedliche Wassersättigungsraten der Luft. Nachfolgend ist der Trocknungszeitbedarf über die Jahreszeiten dargestellt.

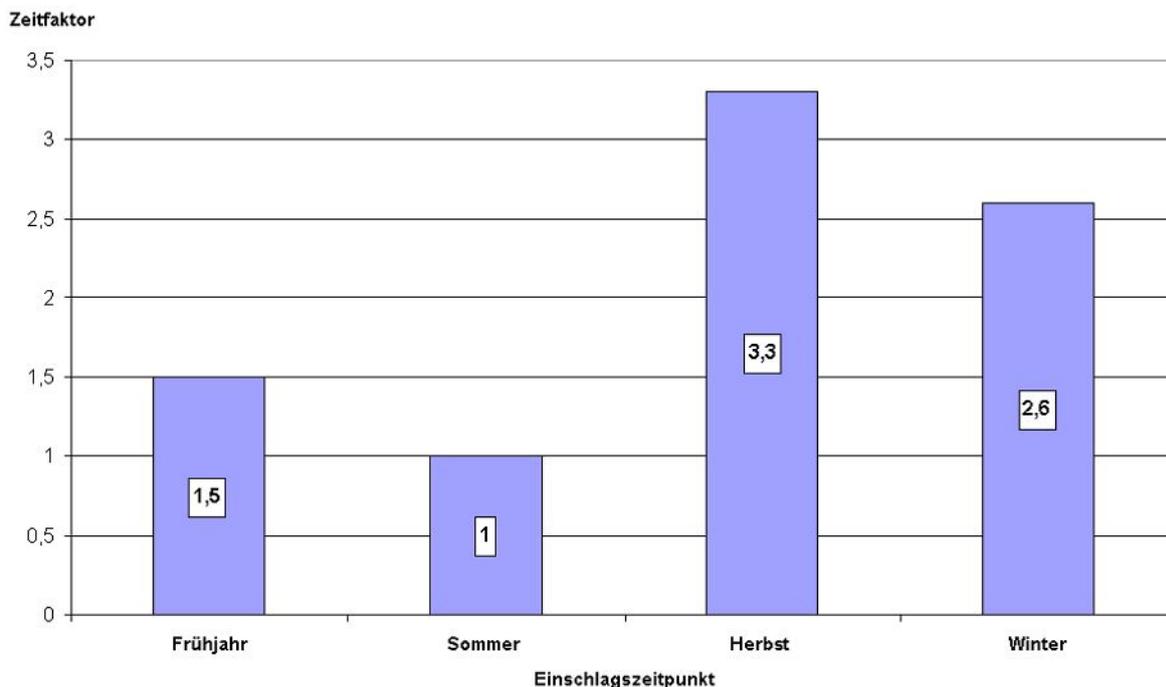


Abb. 17: Jahreszeitlicher Trocknungszeitbedarf bezogen auf eine angenommenen Einschlagszeitpunkt im Sommer (verändert n. Brusche [1983])

Neben jahreszeitlich schwankenden Wassergehalten gibt es unterschiedliche Wassergehalte im Stammverlauf (Splint, Kern) und zwischen den Baumarten. Die Wassergehalte unserer wichtigsten Baumarten sind nachstehend wiedergegeben.

Tab. 9: Wassergehalt verschiedener Baumarten (waldfrisch) (verändert n. Bellmann [1987], Bues u. Schulz [1989, 1990])

Wassergehalt (von - bis [in%])			
Splint	Kern	Gesamt	
Fichte	57 - 64	16 - 30	45 - 46
Tanne	58 - 67	23 - 33	55
Kiefer	51 - 68	18 - 33	48
Lärche	50 - 60	21 - 35	37
Strobe	68	28	48
Douglasie	54	22 - 27	-
Buche	50	50	40
Eiche	46	45	46

Die Qualität der Hackschnitzel bestimmt sich u. a. aus der Größenverteilung sowie dem Grünmasse- und Rindenanteil. Je größer die einzelnen Hackschnitzel sind, desto leichter kann Luft in der Schüttung zirkulieren. Grobe Hackschnitzel trocknen dadurch schneller ab als Feine. Mikroorganismen zersetzen Blätter, Nadeln und Rinde leichter als Holz. Je höher deren Anteil, desto aktiver sind Mikroorganismen. Diese bauen Substanz ab und führen zu einer Erwärmung der Schüttung. Einerseits verlieren die Hackschnitzel dadurch an Energiegehalt, andererseits führt die höhere Temperatur zu einer stärkeren Luftkonvektion und stärkeren Trocknung.

### 3.1.2 Die Bedeutung des Wassergehaltes bei der Trocknung

Wasser liegt im Holz in freier und gebundener Form vor. Der Fasersättigungspunkt kennzeichnet den Übergang von freiem zu gebundenem Wasser. Je nach Baumart variiert dieser zwischen 18% und 26% Wassergehalt. Freies Wasser befindet sich in Zellhohlräumen des Holzes und lässt sich leicht durch trockene Luft entziehen.

Gebundenes Wasser wird durch molekulare Bindungskräfte in den Holzzellen festgehalten. Es kann dem Holz nur durch aufwendige technische Trocknungsverfahren vollständig entzogen werden. Sie sind für Energiehackschnitzel zu teuer. Allein durch optimale Lufttrocknung können bereits Wassergehalte von 15 - 20% erreicht werden.

### 3.1.3 Der Trocknungsprozess

Im Verlauf der Trocknung wird das Wasser vom flüssigen in einen gasförmigen Aggregatzustand überführt. Dieser Vorgang heißt Verdunstung. Voraussetzungen für die Verdunstung sind nach Häckel [1990]:

- Das Wasser darf nicht durch molekulare Bindungskräfte festhalten werden.
- Die zur Verdunstung benötigte Energie stammt aus dem Wärmeverrat der Luft.
- Die Luft muss ein Sättigungsdefizit aufweisen. Nur in diesem Zustand kann sie dem Holz Wasser entziehen und abtransportieren.

Je mehr Wasser verdunstet, desto schneller nimmt die Lufttemperatur und damit das Wasserhaltevermögen der Luft ab. Wird der Taupunkt erreicht, kondensiert Wasserdampf zu flüssigem Wasser. Ein Kondensieren des Wasserdampfes an den Randbereichen des Hackschnitzelhaufens führt zu einer verstärkten Aktivität der Mikroorganismen. Insbesondere der Sporenausstoß der Schimmelpilze birgt dann gesundheitlichen Risiken beim Umgang mit Holzhackschnitzeln.

Die Luftzirkulation in der Schüttung entsteht auf Grund einer natürlichen Konvektionsströmung. Sie führt

Frischlufte zu und wassergesättigte Luft ab. Die Trocknungsgeschwindigkeit kann durch einen höheren Luftdurchsatz (z.B. künstlichen Luftstrom) erhöht werden. Dadurch laufen die Verdunstungsvorgänge und der Abtransport des Wassers schneller ab. Eine weitere Möglichkeit, die Trocknungsgeschwindigkeit zu erhöhen, besteht darin, die Wasseraufnahmefähigkeit der Trocknungsluft durch eine Erwärmung zu erhöhen. Auf natürlichem Weg geschieht dies durch die Selbsterhitzung (Mikroorganismen) oder durch Sonneneinstrahlung. Es sind aber auch technische Möglichkeiten denkbar, wie etwa der Einsatz eines Warmluftgebläses.

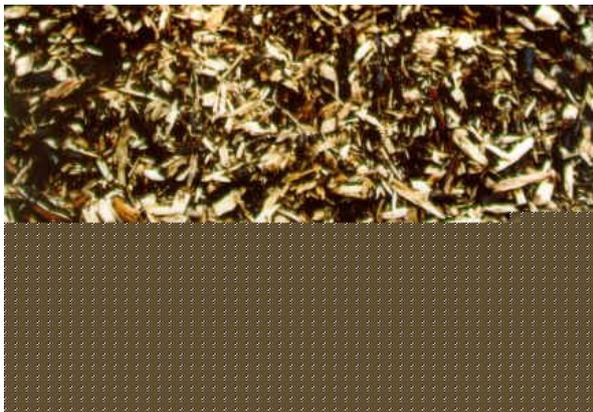
### 3.2 Biochemische und mikrobielle Vorgänge bei der Trocknung und Lagerung

Während der Lagerung und Trocknung von Biomasse bauen Mikroorganismen und Pilze Trockensubstanz ab. Dies betrifft Laubholz auf Grund der höheren Anteile lebender Zellen im Holz etwas stärker als Nadelholz. Blatt-, Nadel- und Rindenanteile in den Hackschnitzeln begünstigen ebenfalls die Entwicklung der Mikroorganismen. Im Durchschnitt werden 0,5 - 4% Trockensubstanz pro Lagerungsmonat zersetzt (Tab. 10). Als Abbauprodukte entstehen Wasser und Kohlendioxid. Je nach Einlagerungswassergehalt und Lagerungsart ergeben sich unterschiedliche Abbauraten.

Der Wassergehalt und pH-Wert der Hackschnitzel sowie die Temperatur in der Schüttung verändern sich während der Lagerung. Ursachen dafür sind zum einem physikalische Prozesse, zum anderem die Tätigkeit der Mikroorganismen selbst. Mikroorganismen und Pilze passen das Ausmaß ihrer biologischen Aktivitäten ihren Lebensbedingungen an. Pilze können nur bei Wassergehalten über 18% wachsen [Kollmann 1982]. Die Aktivitäten der Mikroorganismen bewirken einen starken Temperaturanstieg im Hackschnitzelhaufen während der ersten 40 - 60 Tage. Es besteht dann ein deutliches Temperaturgefälle vom Inneren zum Außenbereich der Schüttung. Mit der Abnahme der Aktivitäten der Mikroorganismen bei sinkenden Wassergehalten geht die Temperatur langsam wieder zurück. Oftmals bilden sich an "Konvektionsschloten" Schimmelpilzkolonien. Hier kondensiert Wasser der wassergesättigten Luft in den kühleren Randbereichen und begünstigt das Pilzwachstum.

Der für Mikroorganismen optimale pH-Wert liegt bei ca. 4,5. Einige Pilzarten können sich aktiv das für sie ideale Säuremilieu schaffen [Marutzky 1982].

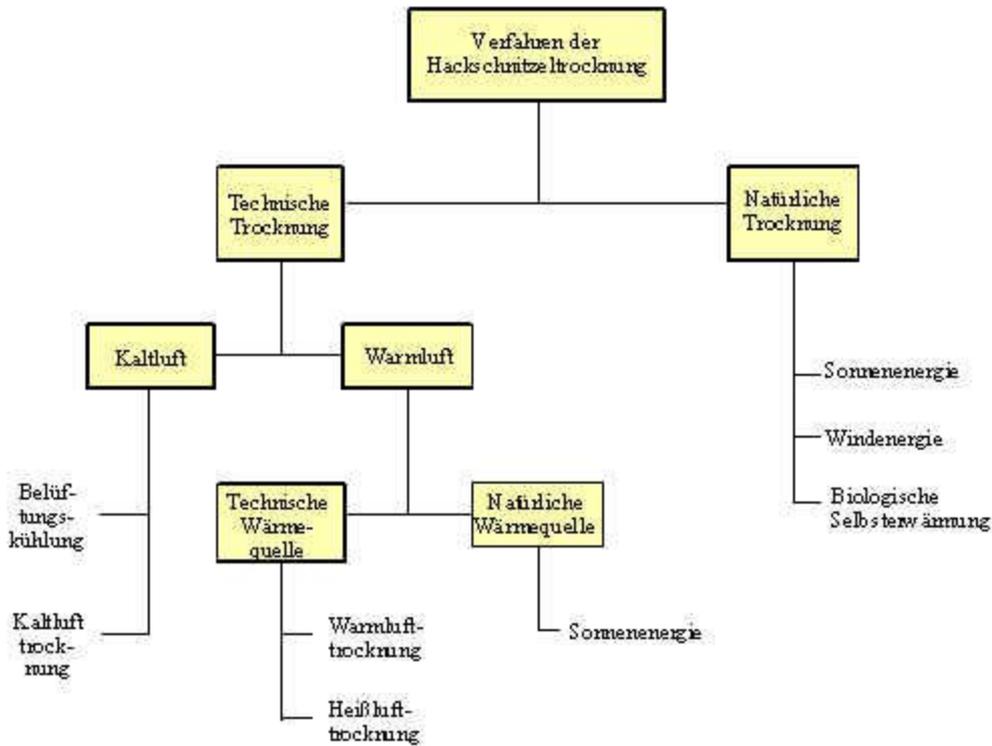
Ab einer Lagerungsdauer von mehr als sechs Monaten nimmt die Sporenbelastung durch Pilze deutlich zu. Allergische Reaktionen und Atemwegserkrankungen können auftreten [Thörnquist et al. 1982]. Desweiteren steigt der Stickstoffanteil mit Zunahme der Lagerungsdauer.



*Abb. 18: Zusammenspiel verschiedener Einflussgrößen auf die Mikroorganismen-tätigkeit*

### 3.3 Hackschnitzellagerungs- und Trocknungsverfahren

Es existieren eine Reihe von Verfahren zur Lagerung und Trocknung von Holzhackschnitzeln. Nach Art der erzeugten Trocknungsluft kann folgende systematische Einteilung vorgenommen werden (Stampfer et al. [1997]; Krausenboeck [1995]; Weingartmann [1991]; Lauer et al. [1986]).



**Abb. 19:** Verschiedene Verfahren der Hackschnitzeltrocknung

Nachfolgend werden verschiedene Verfahren der Trocknung und Lagerung nach einheitlichen Kriterien bewertet. Als Ergebnis wird eine Empfehlung für Anlagenbetreiber ausgesprochen.

**Tab. 11:** Kriterien zur Beurteilung der verschiedenen Trocknungsverfahren

Kriterium	klein	mittel	groß
Finanzieller Aufwand			
Technischer Aufwand			
Trocknungsdauer			

Trockensubstanzabbau			
Sporenbildung			
Anlagengröße			

### 3.3.1 Verfahren der natürlichen Trocknung und Lagerung

Die natürliche Trocknung nutzt die Konvektionsströmung der Luft. Diese entsteht durch das Bestreben der Luft, Feuchtigkeits- und Temperaturunterschiede auszugleichen. Die Trocknung findet ohne Zufuhr von technisch erzeugter Wärme statt. Zu den natürlichen Wärmequellen für die Trocknung zählen Sonne, Wind und Wärme aus biologischen Umsetzungsprozessen.

Auf Grund der klimatischen Witterungsbedingungen in Mitteleuropa mit längeren, kühlen Perioden und relativ hohen Niederschlägen scheidet eine Lagerung im Freien in der Regel aus. Die witterungsbedingte Wiederbefeuchtung wirkt den Trocknungsvorgängen entgegen. Deshalb werden Verfahren behandelt, die eine Lagerung unter Dach oder zumindest einen Schutz der Hackschnitzel vor Witterungseinflüssen vorsehen. Eine Lagerung unter Dach führt jedoch zu einer Steigerung der Kosten pro Schüttraummeter Hackschnitzel. Wird auf ein Lager verzichtet, so können sich die Kosten um ca. 30% pro Schüttraummeter reduzieren [Hänger et. al. 1987].

#### Trocknung durch Sonnenenergie

##### **Arbeitsprinzip**

Eine bis zu 5 cm mächtige Hackschnitzelschicht wird großflächig ausgebracht. Bei starker Sonneneinstrahlung kann die Trocknung innerhalb eines Tages abgeschlossen sein. Das Verfahren ist sehr von der Witterung abhängig.

##### **Anlagenbeschreibung**

Es sind keine besonderen technischen Einrichtungen notwendig. Eine befestigte Fläche und die erforderlichen Arbeitsmittel sind in der Regel auf landwirtschaftlichen Höfen vorhanden.

--	--	--	--	--	--

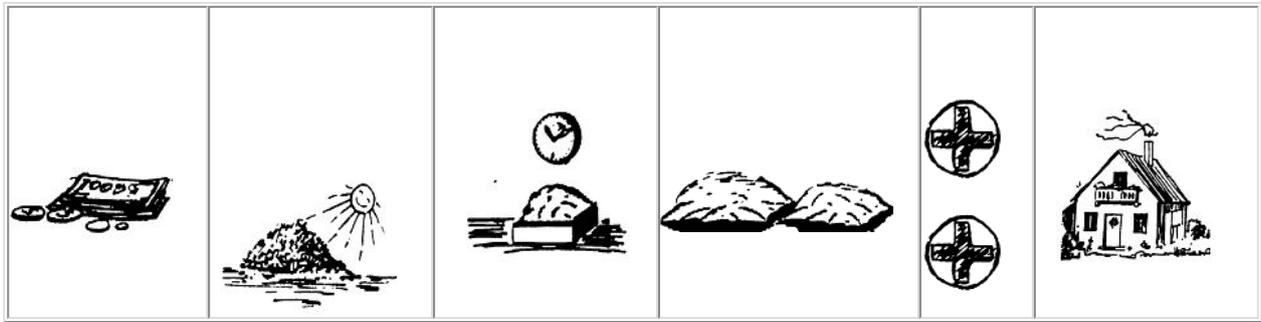


Abb. 20: "Trocknung durch Sonnenenergie" - monetärer und technischer Aufwand, Trocknungsdauer, Trockensubstanzabbau, Sporenbildung sowie Anlagengröße

#### Empfehlung

Dieses Verfahren zeichnet sich durch einfache Handhabung und geringe bauliche Kosten aus. Die Hackschnitzel können innerhalb kurzer Zeit allein durch Sonneneinstrahlung trocknen. Der hohe manuelle Arbeitsaufwand, der große Bedarf an befestigter Fläche und die Witterungsabhängigkeit beschränken dieses Trocknungsverfahren aber auf kleinere Mengen. Das Verfahren eignet sich vor allem für Kleinanlagen.

Trocknung durch Windenergie (und Sonne)

#### Arbeitsprinzip

Die Hackschnitzel werden in einem nach oben abgeschlossenen, luftdurchlässigen Behälter gelagert. Durch Zusammenwirken von Wind und Sonne trocknen sie ab.

#### Anlagenbeschreibung

Der technische und bauliche Aufwand ist gering. Es handelt sich um eine luftdurchlässige Gitterbox. Sie soll etwa einen Meter tief sein und kann beliebig hoch gebaut werden.



Abb. 21: "Trocknung durch Windenergie" - monetärer und technischer Aufwand, Trocknungsdauer, Trockensubstanzabbau, Sporenbildung sowie Anlagengröße

#### Empfehlung

Die Handhabung ist sehr einfach, die Anlage deswegen preiswert. Unabhängig von den wechselnden Witterungsverhältnissen trocknen die Hackschnitzel, auch im Winter, in vier bis sechs Monaten ab. Auf Grund der langen Trocknungszeit sind meist nur zwei Umläufe pro Jahr möglich.

#### Trocknung durch biologische Selbsterwärmung (System Bioconvert)

#### Arbeitsprinzip

Das Verfahren macht sich die biologischen Umsetzungsprozesse durch Mikroorganismen zunutze. Ein 40 - 60-tägiger starker Temperaturanstieg bewirkt eine Absenkung des Wassergehaltes auf 16 - 18%.

#### Anlagenbeschreibung

Die siloartigen Anlagen sind relativ einfach konstruiert. In einem allseitig geschlossenen Lagerraum von 12 -

15 m<sup>3</sup> Größe werden zusätzlich Belüftungsschächte eingerichtet. Nach dem Anlaufen biogener Umsetzungsprozesse entweicht die feuchte Luft auf Grund der Konvektionsströmung nach außen. Die Beschickung und Entnahme ist technisch aufwendig und erfordert entsprechendes landwirtschaftliches Arbeitsgerät. In der Regel ist der Maschinenpark landwirtschaftlicher Unternehmen aber mit diesen Geräten ausgestattet.

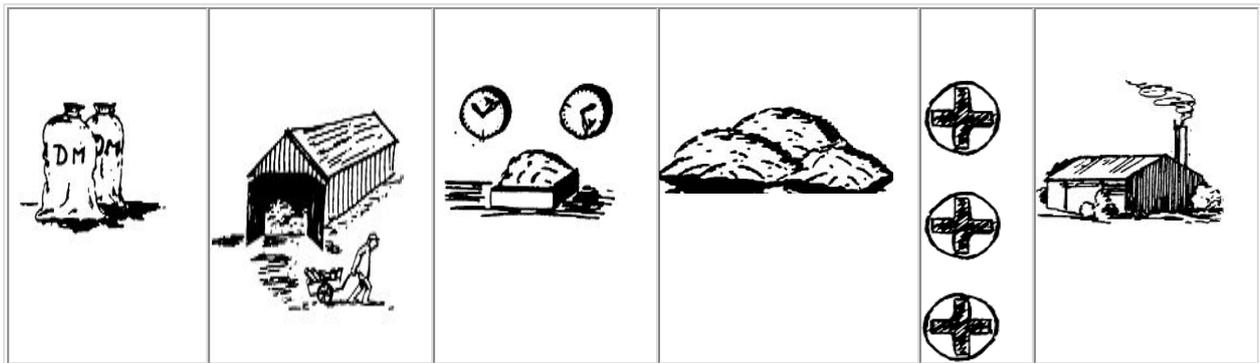


Abb. 22: "System Bioconvert" - monetärer und technischer Aufwand, Trocknungsdauer, Trockensubstanzabbau, Sporenbildung sowie Anlagengröße

**Empfehlung**

Dieses Verfahren besteht durch seine Einfachheit. Es nutzt die Wärme aus den mikrobiellen Umsetzungsprozessen zur Trocknung aus. Auch größere Mengen können innerhalb von 40 - 60 Tagen einen Wassergehalt von 16 - 18% erreichen. Nachteilig sind die möglichen gesundheitlichen Belastungen durch Pilzsporen. In einem Jahr sind bis zu fünf Umläufe möglich. Bisher sind allerdings keine praktischen Erfahrungen aus einem langfristigen Betrieb vorhanden.

### 3.3.2 Verfahren der technischen Trocknung und Lagerung

Die technische Trocknung beruht auf der maschinellen Erzeugung eines Luftstromes. Zum einen kann die Luft erwärmt werden (Belüftungstrocknung), zum anderen kann sie kalt durch den Holzhackschnitzelhaufen hindurch geblasen werden (Belüftungskühlung). In der Regel werden dabei die Hackschnitzel unter Dach gelagert, um sie gegen die Wiederbefeuchtung durch Regen und Schnee zu schützen.

#### Kaltbelüftung

##### Arbeitsprinzip

Außenluft wird durch die Hackschnitzel geblasen. Für die Trocknung ist dabei die relative Feuchtigkeit der Trocknungsluft wichtig. Sie sollte unter 90% liegen. Wie in Kapitel 4.1.3 erläutert, ist das Sättigungsdefizit der Luft für die Trocknungsgeschwindigkeit entscheidend.

##### Anlagenbeschreibung

Die Holzhackschnitzel werden unter Dach gelagert. Durch ein Gebläse gelangt die Kaltluft über ein Leitungssystem in die Schüttung.

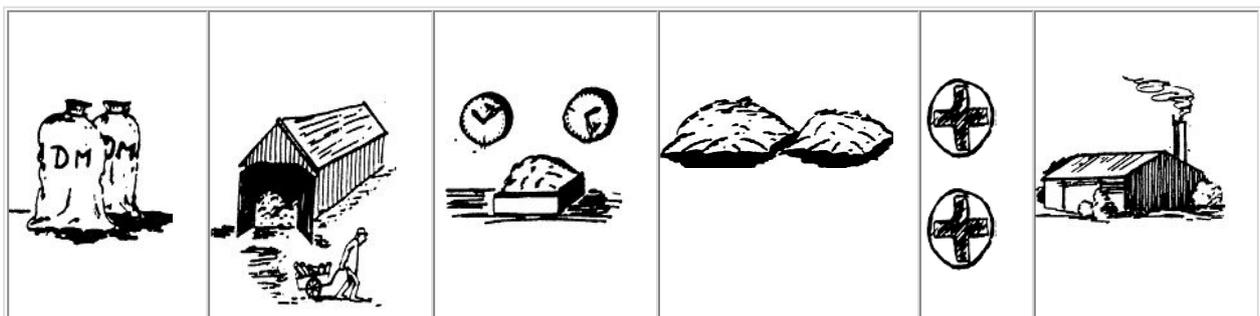


Abb. 23: "Kaltbelüftung" - monetärer und technischer Aufwand, Trocknungsdauer, Trockensubstanzabbau,

### Empfehlung

Der Vorteil dieses Verfahrens liegt im gebremsten Ablauf der Umsetzungsprozesse. Damit bilden sich weniger Pilzsporen und verlangsamt sich der Trockensubstanzabbau. Diese Art der Trocknung und Lagerung kann nur in den wärmeren Monaten des Jahres durchgeführt werden, da niedrige Temperaturen den Trocknungsfortschritt begrenzen. Im Winter sind Sättigungsdefizit und Wasserhaltevermögen der Luft für eine effektive Trocknung zu niedrig.

Beim Einblasen zu kalter Außenluft kann es auch zum Gefrieren der Hackschnitzel kommen. Die lange Trocknungszeit ermöglicht nur ein bis zwei Umläufe im Jahr. Das Verfahren ist nur bedingt empfehlenswert. Der finanzielle und technische Aufwand ist groß und steht einem nur bescheidenen Nutzen gegenüber.

### Belüftungskühlung

#### Arbeitsprinzip

Durch den Wechsel von Kaltbelüftung und Belüftungspausen wird bei diesem Verfahren zusätzlich zur reinen Kaltluft die im Hackschnitzelhaufen entstehende Wärme zur Trocknung genutzt. Die Belüftungsintervalle bestimmen den Trocknungsverlauf.

#### Anlagenbeschreibung

Ähnlich wie bei der Kaltbelüftung erfolgt die Lagerung der Hackschnitzel unter Dach. Damit der Effekt der biologischen Selbsterwärmung genutzt werden kann, muss die Schüttung eine Mindestgröße von etwa 15 Smr besitzen. Die Steuerung des Gebläses über eine Zeitschaltuhr stellt die Einhaltung der Belüftungsintervalle sicher.

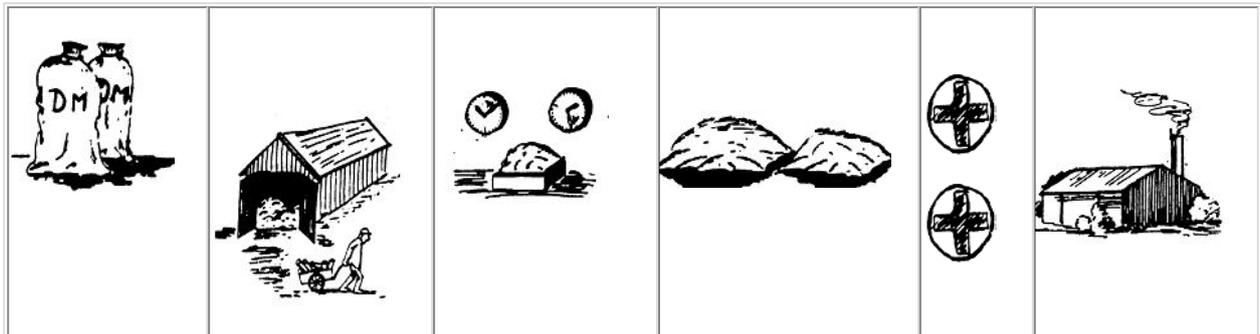


Abb. 24: "Belüftungskühlung" - monetärer und technischer Aufwand, Trocknungsdauer, Trockensubstanzabbau, Sporenbildung sowie Anlagengröße

### Empfehlung

Diese Trocknungsvariante arbeitet witterungsunabhängig und nutzt die Wärme aus den Umsetzungsprozessen. Dadurch kann sie auch im Winter genutzt werden. Die Belüftung mit kalter Luft senkt die Temperatur in der Schüttung und verlangsamt die von den Mikroorganismen ausgelösten Umsetzungsprozesse. In einem Jahr sind bis zu vier Umläufe möglich.

### Trocknung durch Solarenergie

#### Arbeitsprinzip

Von der Sonne erwärmte Luft wird durch den Hackschnitzelhaufen geblasen und entzieht dabei dem Hackgut die Feuchtigkeit.

#### Anlagenbeschreibung

Die Hackschnitzel werden unter Dach auf einem befestigten Untergrund gelagert. Die über Sonnenkollektoren erwärmte Luft wird durch ein mit einem Luftleitungssystem verbundenes Gebläse in den Hackschnitzelhaufen eingeblasen. Diese Methode hat ihren Ursprung aus der in der Landwirtschaft bekannten Heutrocknung. Als Alternative zu den Sonnenkollektoren bietet sich die Nutzung eines Lagers

mit einem durchsichtigem Dach an. Die Luft darunter erwärmt sich mit Hilfe der Sonneneinstrahlung.

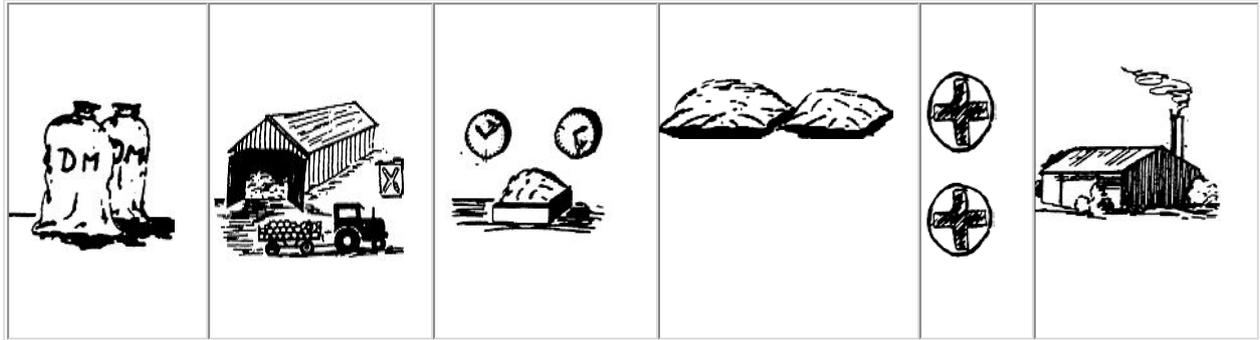


Abb. 25: "Technische Trocknung unterstützt durch Solarenergie" - monetärer und technischer Aufwand, Trocknungsdauer, Trockensubstanzabbau, Sporenbildung sowie Anlagengröße

### Empfehlung

Diese Art der Trocknung kann als Zusatzmethode eingesetzt werden. Die Anzahl der Sonnentage reicht nicht aus, um die Hackschnitzel allein durch Sonnenenergie zu trocknen. Bedingt durch die hohen Investitionskosten für Sonnenkollektoren ist diese Form der Hackschnitzeltrocknung in der Regel unwirtschaftlich.

Die Variante der Lufterwärmung mittels eines Glasdaches ist effektiver, so dass auf diese Weise größere Hackschnitzelmengen getrocknet werden können. Es sind bis zu vier Umläufe im Jahr möglich.

### Verfahren mit künstlicher Wärmequelle

#### Arbeitsprinzip

Bei dieser Trocknungsmethode werden die Hackschnitzel mit angewärmter, trockener Luft durchblasen. Der grundlegende Unterschied zu den anderen Verfahren besteht in der höheren Arbeitstemperatur und der Geschwindigkeit der Hackschnitzeltrocknung. Je nach System liegt die Temperatur zwischen 40 und 130 °C bei der Warmlufttrocknung sowie 600 – 1000°C bei der Heißlufttrocknung. Auf diese Weise können in sehr kurzer Zeit große Wassermengen entzogen werden. In der Regel dauert das Trocknen einer Hackschnitzelladung von 10 Schüttraummetern je nach verwendetem System 10 - 120 min [Strehler 1984].

#### Anlagenbeschreibung

Anlagen dieser Art werden in der Landwirtschaft bereits stationär oder mobil zur Getreidetrocknung eingesetzt. Die Warmluft wird aktiv von sehr leistungsfähigen Wärmequellen erzeugt.

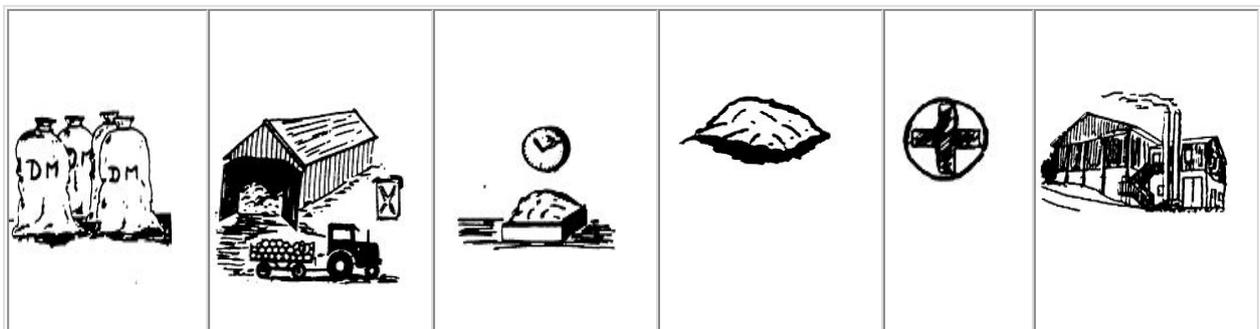


Abb. 26: "Warm- und Heißlufttrocknung" - monetärer und technischer Aufwand, Trocknungsdauer, Trockensubstanzabbau, Sporenbildung sowie Anlagengröße

### Empfehlung

Der Vorteil dieses Verfahrens liegt in der Trocknungsgeschwindigkeit und dem damit möglichen hohen Durchlauf. Sie ist auf die Bewältigung großer Hackschnitzelmengen ausgelegt. Diese Anlagen erfordern einen hohen finanziellen, technischen und organisatorischen Aufwand.

### 3.4 Lager- und Trocknungsversuch von Waldhackschnitzeln

#### 3.4.1 Zielsetzung

Ziel des Versuchs war es, den zeitlichen Trocknungsverlauf von waldfrischen, unter Dach eingelagerten Hackschnitzeln zu dokumentieren sowie die Trocknung beeinflussende Faktoren zu ermitteln. Ein praxisnahes, kostengünstiges und lagertechnisch möglichst einfaches, natürliches Trocknungssystem für Grobhackschnitzel sollte wissenschaftlich begleitet werden.

#### 3.4.2 Material und Methoden

Zwischen März und August 1998 wurde ein Trocknungsversuch in einer Halle nahe bei Freising durchgeführt. Die eingelagerten Grobhackschnitzel wurden mit Hilfe eines Schneckenhackers (Laimet HP 25 M) aus frischen Fichtenkronen (mit Nadeln) gewonnen. Bei Versuchsbeginn betrug der Ausgangswassergehalt 41%, der Grünanteil (Nadeln) lag bei ca. 10% der Trockenmasse.

Die in Holzbauweise erstellte Lagerhalle ist nach Westen hin offen. Etwa 2 cm breite Spalten zwischen den Brettern der Seitenwände sowie der aus Rundholzbohlen hergestellte Boden, unter dem sich eine Maschinenhalle befindet, gewährleisten eine allseitige Durchlüftung. Die Halle (L: 25 m, B: 12 m, H: 3,5 m) besitzt ein Fassungsvermögen von ca. 1.000 Schüttraummetern (Srm).



Abb. 27: Mit Hackschnitzeln befüllte Lagerhalle

Um repräsentative Stichproben gewinnen zu können, wurden vor Versuchsbeginn grobmaschige Kartoffelsäcke (ca. 20 l) mit Hackschnitzeln gefüllt und 80 cm unter dem Kronenniveau der Schüttung plaziert (vgl. Stockinger [1998]). Eine ausreichend lange, an den Säcken befestigte Schnur ermöglichte die späteren Probenahmen. Versuche, die Säcke tiefer zu positionieren, scheiterten an dem zu großen Gewicht der darüberliegenden Schnitzel.

Zur Dokumentation des Trocknungsverlaufes wurden nach der Bestimmung des Einlagerungswassergehaltes alle vier Wochen Proben entnommen, gewogen und im Trockenofen bei 104°C ca. 18 Stunden lang bis zur Gewichtskonstanz gedarrt (vgl. Önorm G 1074). Aus der Differenz des Gewichtes vor und nach der Trocknung wurde der Wassergehalt bestimmt.

Eine in der Lagerhalle installierte Messanlage erfasste Temperatur und Luftfeuchtigkeit. Drei vertikal angeordnete Fühler (Abstand vom Lagerhallenboden: 0,7 m; 1,5 m; 2,2 m) ermittelten den Temperaturverlauf im Hackschnitzelhaufen im 30-Minutentakt. Der etwa einen Meter über der Hackschnitzelschüttung angebrachte Thermo- und Hygrograph lieferte in identischen Intervallen Informationen über Temperatur und Feuchte der Raumluft. Die Daten wurden elektronisch gespeichert und alle zwei Wochen abgerufen.

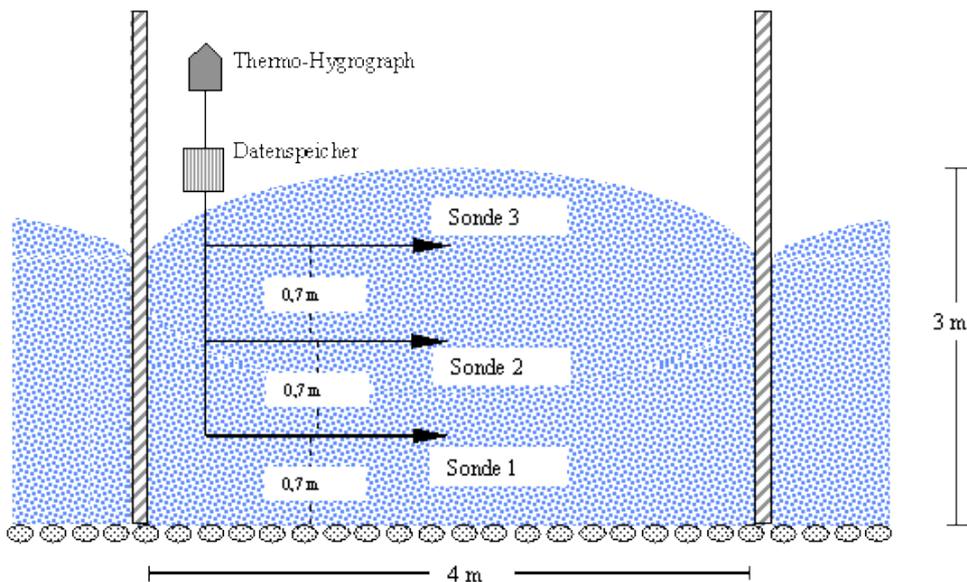


Abb. 28: Hackschnitzelschüttung und Messeinrichtungen im Querschnitt

### 3.4.3 Ergebnisse des Trocknungsversuches

#### Temperaturverlauf im Hackschnitzelhaufen

Da die Hackschnitzel zu Versuchsbeginn schon 14 Tage eingelagert waren, hatten bereits biologische Aktivitäten und damit eine Erwärmung des Ausgangsmaterials eingesetzt. Für den Zeitraum zwischen Einlagerung und Versuchsbeginn können daher keine Aussagen getroffen werden. Für die weiteren Betrachtungen ist das Datum des Versuchsbeginns, der 25.03.98 (Einlagerungstermin plus zwei Wochen), ausschlaggebend.

Der Einbau der Versuchsanlage führte zu Störungen im ursprünglichen Gefüge der Schüttung. Als Folge davon war zu Beginn der Messreihe eine Abnahme der Temperatur festzustellen. Nach drei Tagen erreichte sie das frühere Niveau wieder und es begann ein acht Tage andauernder starker Temperaturanstieg auf 27,8°C (Mittelwert der drei Messsonden). Die niedrigste Temperatur wurde an der Messsonde 1 mit 23,5°C erreicht. Die Werte der Sonden 2 und 3 lagen mit 29,2°C und 30,8°C deutlich höher. In den ersten acht Tagen nach der Normalisierung der gestörten Temperaturverhältnisse erwärmte sich die Schüttung um durchschnittlich 2,7°C je Tag. An den einzelnen Sonden ergaben sich Temperaturerhöhungen zwischen 1,0 und 5,3°C je Tag. Eine wesentlich stärkere durchschnittliche Temperatursteigerung in den ersten Tagen dokumentierte Muellerbuchhof [1993]. Bei einem Freilagertrocknungsversuch von Holzhackschnitzeln aus Kiefernganzbäumen wurde in den ersten zehn Tagen eine Temperaturerhöhung von ca. 5,9 °C/Tag beobachtet. Temperaturanstiege bis zu 13 °C je Tag maßen Stockinger und Oberberger [1998] bei der Lagerung von Rinde unter Dach. Prankl und Weingartmann [1994] ermittelten bei der Trocknung von Weichlaubholzhackschnitzeln in einem siloartigen Lagerraum sogar Werte von 6 °C je Stunde. Bei unserem Versuch lagen die maximalen Temperatursteigerungen je Stunde bei 1,5 °C. Einen Überblick über die gemessenen Temperaturextrema liefert Tabelle 12.

Im Anschluss an einen kurzzeitigen Rückgang erreichte die Temperatur in der Hackschnitzelschüttung zwischen dem 34. und 50. Tag ihr höchstes Niveau. Der höchste gemessene Temperaturwert lag bei 35,4 °C, die maximale Tagesdurchschnittstemperatur bei 34,5 °C. Nach erneutem Absinken auf 16 bis 19 °C folgten weitere "Zwischenhochs" mit Tagesdurchschnittstemperaturen von 25 bis 30 °C. Insgesamt lag das hier erreichte Temperaturniveau sehr niedrig. In den Versuchen von Muellerbuchhof [1993], Prankl und Weingartmann [1994] sowie Stockinger und Oberberger [1998] stiegen die Temperaturen binnen der ersten Wochen auf 60 bis 80°C. Nach diesen Hochtemperaturphasen pendelten sich die Werte um 25 °C [Muellerbuchhof 1993], 55 °C [Prankl; Weingartmann 1994] und 40 °C [Stockinger; Oberberger 1998] ein, oder blieben nach der "Aufheizphase" über die gesamte Versuchsdauer mit 60 bis 70 °C nahezu konstant [Stockinger; Oberberger 1998].

Temperatur in °C

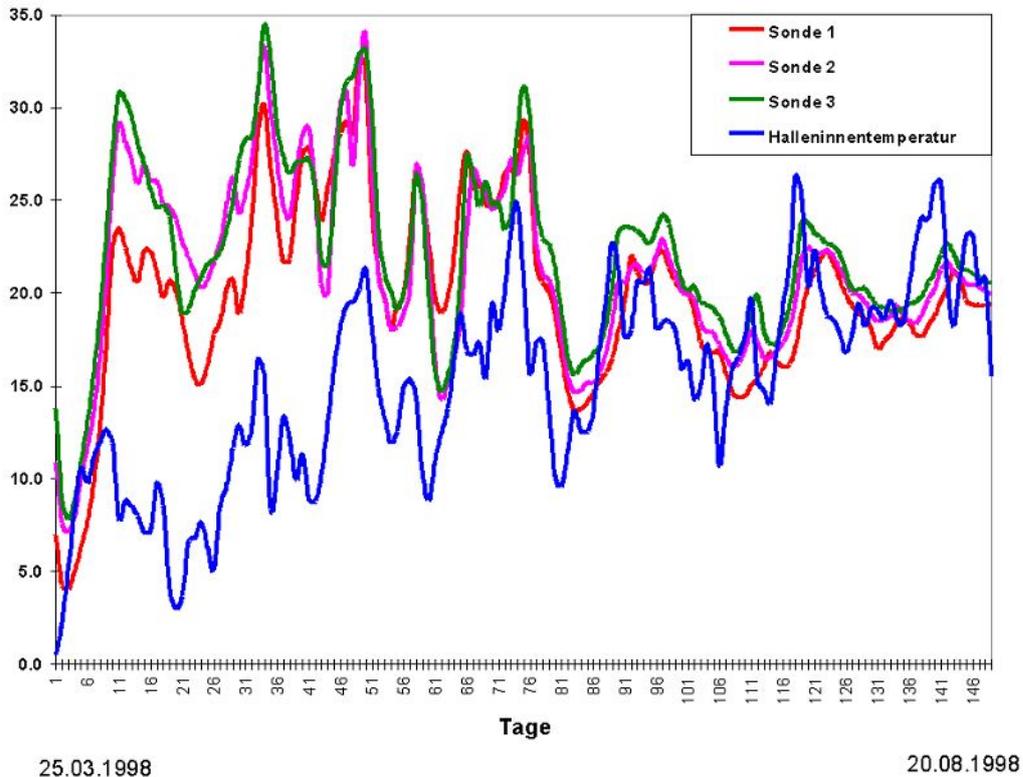


Abb. 29: Temperaturgänge der Sonden 1, 2 und 3 sowie der Halleninnentemperatur

Bei Grobhackschnitzeln ist mit einer maximalen Temperaturentwicklung von 30 bis 40°C zu rechnen [Wippermann 1985; 1987 a]. Die Ergebnisse der vorliegende Studie bestätigen diese Angaben. Charakteristisch für die von allen Messsonden aufgezeichneten Temperaturverläufe waren zeitlich leicht versetzte Schwankungen mit einer sich stetig reduzierenden Amplitude (vgl. Muellerbuchhof [1993]). Unabhängig von der Lage im Hackschnitzelhaufen ergaben sich gleichgerichtete Temperaturgänge. Nahezu identische Temperaturen wurden zwischen dem 50. und 80. Tag seit Versuchsbeginn an den drei Sonden registriert.

#### Hackschnitzelqualität (Fraktion, Grünanteil)

In Anhalt an ÖNORM M 7133 wurde eine Siebanalyse mit folgendem Ergebnis durchgeführt:

### Häufigkeit in %

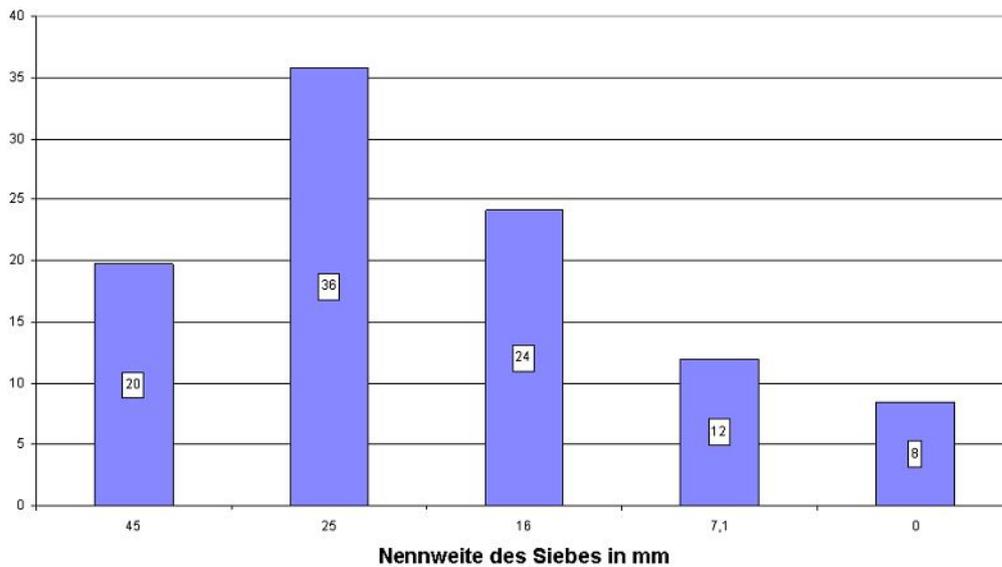


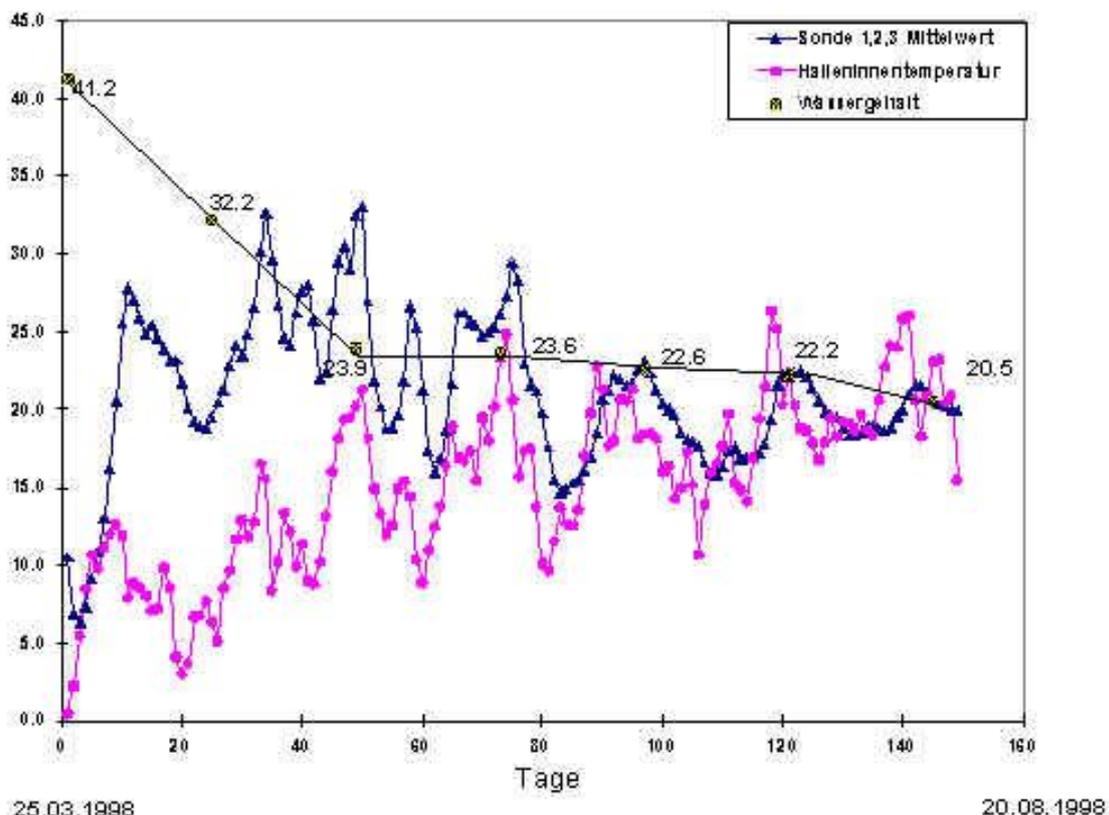
Abb. 30: Häufigkeitsverteilung der Rückstände auf den einzelnen Sieben

Die Hackschnitzel sind in Anlehnung an ÖNORM M 7133 als Grobhackschnitzel zu klassifizieren.

### Trocknungsverlauf

Innerhalb von 50 Tagen nach Versuchsbeginn verringerte sich der Wassergehalt auf 23,9%. Dieser Wert entspricht etwa der Hälfte des Ausgangswassergehaltes (41,2%). Die durchschnittliche Trocknungsleistung, bezogen auf den Einlagerungstermin Ende März, lag demnach bei ca. 0,9%/Tag. Die folgende 90tägige Lagerung bewirkte nur noch eine geringfügige weitere Reduktion des Wassergehaltes. Er betrug bei Versuchsende 20,5% (vgl. Abb. 31).

### Temperatur in °C / Wassergehalt in %



25.03.1998

20.08.1998

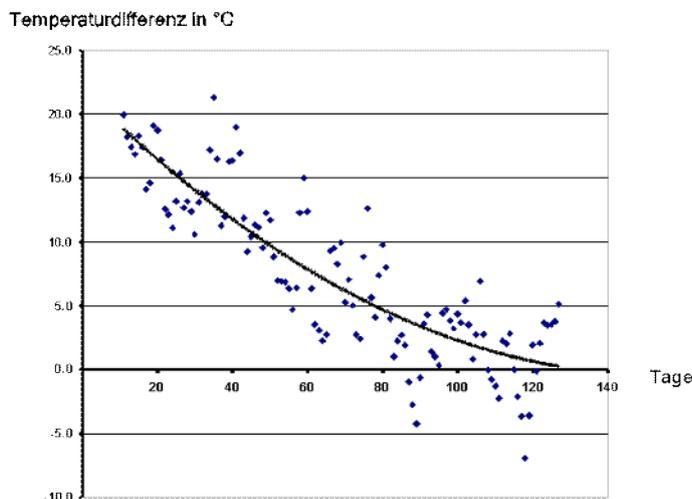
**Abb. 31:** Verlauf der Schüttungs- und Halleninnentemperatur sowie Wassergehalt der Hackschnitzel

Für die Praxis genügt folglich eine etwa zweimonatige Lagerung, um ausreichend trockenes Material zu erzeugen. Erfahrungswerte des Betreibers der untersuchten Anlage lassen den Schluss zu, dass der Trocknungsprozess während der kalten Wintermonate (Dezember bis Februar) noch effektiver ist. Grund dafür ist wohl ein noch stärkeres Temperaturgefälle vom Inneren der Schüttung zur Raumluft.

Eine ähnlich rasche Wassergehaltsabnahme fand Muellerbuchhof [1993] bei im Freien gelagerten Hackschnitzeln. Der Anfangswassergehalt sank nach 1 monatiger Lagerung von 40 auf 30%. Nach drei Monaten war ein Wassergehalt von 25% erreicht. Die Trocknungsleistung belief sich auf durchschnittlich 0,5%/Tag. Stockinger und Obernberger [1998] stellten in einem sechsmonatigen Trocknungsversuch von Rinde unter Dach eine Verringerung des Wassergehaltes von 59 auf 30% fest. Dies entsprach einer Trockenleistung von ca. 0,4% /Tag (die baulichen Anlagen beschränkten sich auf eine einfache Überdachung). Prankl und Weingartmann [1994] beobachteten während einer sechsmonatigen Einlagerung von

Hackschnitzeln in einem siloartigen Lagerraum ein Abtrocknen von 53 auf 37%. Hier wurde eine Trocknungsleistung von ca. 0,2%/Tag erreicht. Verglichen mit dem hier untersuchten Verfahren sind die baulichen Anforderungen (Lüftungsschächte, luftdichte Seitenwände) aber wesentlich höher.

**Äußere Einflussfaktoren**



**Abb. 32:** Differenz von Schüttungs- und Halleninnentemperatur

(Regression:  $y = 0.001x^2 - 0.29x + 21.938$ ;  $r^2 = 0.75$ )

Vergleicht man den Temperaturverlauf in der Hackschnitzelschüttung mit dem der Halleninnentemperatur, so erkennt man einen deutlichen Zusammenhang. Mit ein- bis zweitägiger Verzögerung folgte die Temperatur in der Schüttung den Änderungen der Raumtemperatur. Mit zunehmender Lagerdauer verringerte sich diese Differenz (Abb. 32).

Während zu Beginn des Trocknungsprozesses in der Schüttung noch ca. 20 °C höhere Temperaturen herrschten, war ab dem 120. Tag das Niveau der Raumtemperatur erreicht. Etwa seit dem 90. Tag wurden sogar niedrigere Tagesdurchschnittstemperaturen als außerhalb gemessen. Hierin kommt deutlich die gute Durchlüftbarkeit von Grobhackgut zum Ausdruck. Die Beschaffenheit der Grobhackschnitzel sowie die konstruktiven Merkmale der Lagerhalle garantierten einen ständigen Luftstrom durch den Hackschnitzelhaufen. Ein unmittelbarer Einfluss der relativen Luftfeuchtigkeit in der Lagerhalle auf Temperaturverlauf und Trocknungsvorgang ließ sich nicht feststellen.

Eine vergleichende Auswertung der Tagesdurchschnittstemperaturen der Waldklimastation Freising (Entfernung Standort - Trocknungsversuch: ca. 30 km Luftlinie) ergab nahezu identische Tagesgänge. Im Mittel lagen die Temperaturen in der Lagerhalle nur 1 °C höher. Ein Einfluss der "Wärmequelle Hackschnitzelhaufen" auf die Raumtemperatur konnte daher ausgeschlossen werden.

Muellerbuchhof [1993], Prankl [1994] und Stockinger [1998] konnten dagegen keinen unmittelbaren Zusammenhang zwischen der Lagerhallentemperatur und der Innentemperatur der Schüttung nachweisen.

**Begleitumstände des Trocknungsverlaufs**

Während die mikrobielle Tätigkeit vor allem durch die Temperaturerhöhung zum Ausdruck kam, konnten nach etwa einem Monat Lagerdauer erste Veränderungen auf der Schüttungskrone beobachtet werden. Dort bildeten sich einzelne deutlich abgrenzbare "Kondensationsschlote". Sie maßen im Durchmesser etwa 20 bis 30 cm und verursachten an diesen Stellen ein verstärktes Pilzwachstum, das mit zunehmender Lagerungsdauer und Abtrocknen dieser Stellen

wieder abklang. Beim Ausbau der Versuchsanlage wurde in den oberen 10 bis 20 cm der Haufenkrone ein "Kondensationsband" beobachtet.



Abb. 33: Kondensationsband im Bereich der Schüttungskrone

### **Kosten der Hackschnitzeltrocknung**

Nach Angabe des Unternehmers lag der Investitionsbedarf für die Lagerhalle bei ca. 30.000,- DM (ohne Grundstück). Den Abschreibungszeitraum veranschlagte er mit 25 Jahren (1.200,- DM/Jahr), den Aufwand für Einlagerungs- und Wartungsarbeiten mit ca. 2.000,- DM (30 Stunden je 65,- DM für einen Schlepper inklusive Fahrer). Daraus ergeben sich für eine einmalige Einlagerung jährliche Gesamtkosten von 3.200,- DM. Bei zwei Trocknungszyklen pro Jahr liegen die Kosten bei 5.200,- DM. Bei einem Volumen von 1.000 Kubikmetern errechnen sich bei einmaliger Einlagerung Kosten von 3,20 DM/Srm. Da die Trocknung im Wesentlichen bereits nach drei Monaten abgeschlossen ist, ließen sich ohne weiteres zwei Trocknungszyklen je Winterhalbjahr realisieren. Dadurch könnte der Aufwand um rund 20% auf 2,60 DM/Srm gesenkt werden.

Die in der Literatur gefundenen Werte bewegen sich in der Regel auf einem wesentlich höheren Niveau. Danach ist je nach Lagervariante und eingesetztem Kapital für bauliche Einrichtungen mit Kosten von 7,- bis 40,- DM/Srm zu kalkulieren (vgl. hierzu Lauer et al. [1986]; Zeilinger [1992]), um Hackschnitzel mit einem Wassergehalt von weniger als 25% zu erzeugen. Lediglich der erfolgreiche Freilagertrocknungsversuch von Muellerbuchhof [1993] lässt noch kostengünstigere Ergebnisse erwarten, da neben einem befestigten Untergrund keinerlei bauliche Anlagen nötig waren. Hierbei gilt jedoch zu bedenken, dass andere Untersuchungen zur Freilandlagerung durchaus kontroverse Ergebnisse lieferten. Die ständige witterungsbedingte Wiederbefeuchtung verhinderte eine Trocknung weitgehend und forcierte zudem den Abbau biotischer Substanz [Stockinger u. Oberberger 1998; Jonas 1983 b].

### **3.5 Hackgutlagerung im Rahmen der beiden Arbeitsstudien**

Ziel der Untersuchung war es, den Einfluss der am Lagerplatz herrschenden Witterungsbedingungen, insbesondere der Besonnung, auf das Abtrocknungsverhalten von Hackgut aufzuzeigen. Zur Ermittlung des Wassergehaltes wurden nach dem polterweisen Hacken repräsentative Stichproben gewonnen, gewogen und 18 Stunden im Trockenofen bei 104 °C bis zur Gewichtskonstanz gedarrt (vgl. ÖNORM G 1074). Aus der Differenz der Gewichte konnte der Wassergehalt bestimmt werden.

#### **Ergebnisse im Verfahren "Würzburg"**

Der Großteil der Polter befand sich auf einer baumfreien Fläche. Das restliche Holz war entlang der Waldstraße im Schatten gelagert.

Während der 20-wöchigen Lagerzeit (Anfang Februar bis Ende Juni 1998) führte die Sonneneinstrahlung auf der Freifläche zu einer Reduktion des Wassergehaltes. Die Wassergehaltsdifferenz zu den im Schatten gelagerten Poltern betrug zum Zeitpunkt des Hackens Ende Juni 10%. Das auf der Freifläche gepolterte Hackgut enthielt im Durchschnitt 41%, das beschattete 51% Wasser.

#### **Ergebnisse im Verfahren "Neustadt"**

Gepoltert wurde ausschließlich entlang der Waldstraße. Nach einer knapp 16-wöchigen Lagerung (Mitte Februar bis Ende Mai) lag der durchschnittliche Wassergehalt aller Polter bei 41%. Im Schatten des Bestandes lagernde Polter enthielten zum Zeitpunkt des Hackens 44% Wasser. Sonnenexponiertes Hackgut wies dagegen mit nur noch 37% einen 7% niedrigeren Wassergehalt auf.

## 4 Logistik bayerischer Biomasseheizkraftwerke

### 4.1 Zielsetzung, Material und Methoden

Im dritten Teil der Untersuchung sollten insbesondere für Biomasse-Heizwerke optimierte **Logistikkonzepte** und Abrechnungsvarianten aufgezeigt werden. Um Aussagen über die Hackschnitzellogistik bei den bayerischen Biomasse-Heizwerken zu erhalten, wurde eine Umfrage im Frühjahr 1998 gestartet. Durch einen Vortest bei zwei Heizwerkbetreibern wurde der Fragebogen verprobt und an die 45 aktuell in Betrieb befindlichen, staatlich geförderten Heizwerke versandt.

### 4.2 Ergebnisse einer Befragung bayerischer Biomasse-Heizwerkbetreiber

#### 4.2.1 Realisierte Biomasse-Heizwerke in Bayern

Bis zum Jahre 1997 konnten 45 Biomasse-Heiz- und -Heizkraftwerke mit staatlichen Investitionshilfen in Bayern realisiert werden. Insgesamt ist in diesen Werken eine thermische Biomasse-Feuerungsleistung von 197 MW installiert [Remler et al. 1997].

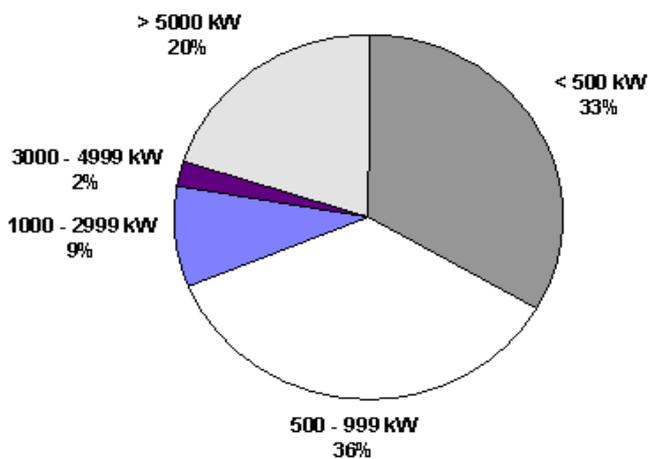
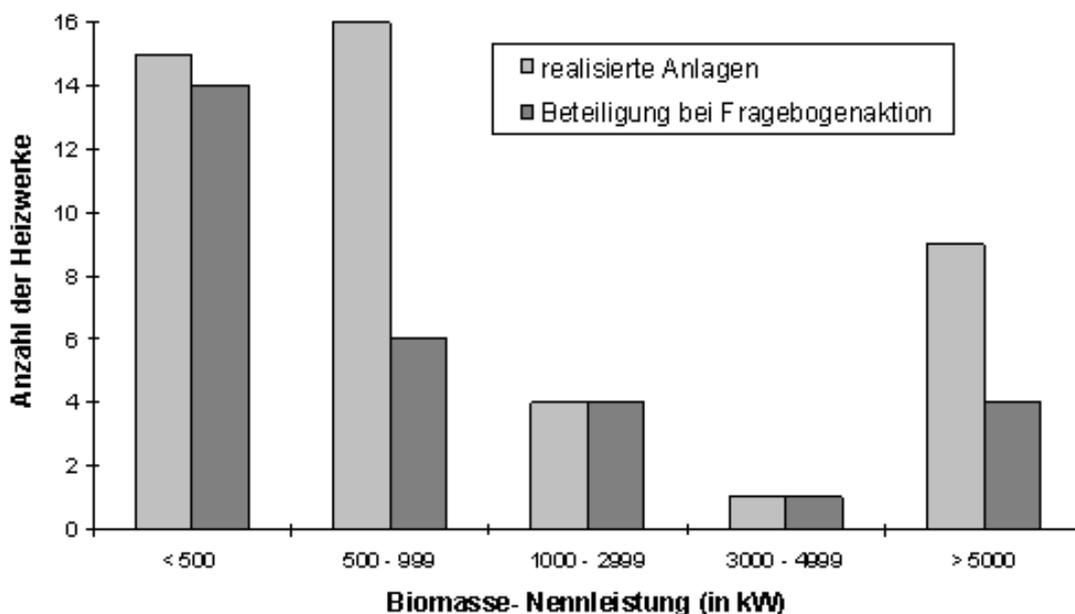


Abb. 34: Verteilung der in Bayern realisierten Biomasse-Heizwerke nach Biomasse-Feuerungsleistung

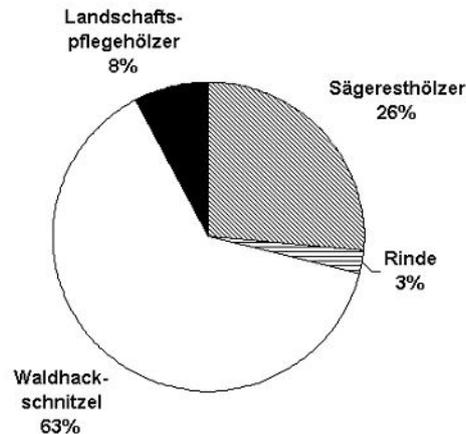
Aus Abbildung 34 ist ersichtlich, dass 69% der verwirklichten Projekte unter 1.000 kW (1 MW) Biomasse-Feuerungsleistung liegen. Stampfer [1997] ermittelte in Österreich eine Verteilung von 33% unter 1 MW bzw. 43% im Leistungsbereich 1 - 3 MW.

#### 4.2.2 Umfragebeteiligung



**Abb. 35:** Verteilung der in Bayern realisierten Biomasse-Heizwerke und Beteiligung bei der durchgeführten Umfrage

Im Frühjahr 1998 wurden alle 45 staatlich geförderten bayerischen Heizwerkbetreiber mit Hilfe eines Fragebogens um Informationen gebeten. Insgesamt kamen 29 ausgefüllte Fragebögen zurück, was einer Rücklaufquote von 65% entspricht. Im Allgemeinen liegt die Rücklaufquote bei derartigen Befragungen zwischen 20 und 30% (vgl. hierzu Böhler [1992]; Berekoven et al. [1991]; Hammann et al. [1990]). In Abbildung 35 ist die absolute Verteilung der realisierten Projekte und die Beteiligung der Heizwerke bei der Befragung dargestellt. Der Leistungsbereich bis 500 kW und der Bereich zwischen 1 und 5 MW wurde nahezu vollständig erfasst. Im Leistungsbereich 500 - 1000 kW und über 5 MW lag die Rücklaufquote unter 50%.



**Abb. 36:** Prozentuale Verteilung der eingesetzten Brennstoff

#### 4.2.3 Eingesetzte Brennstoffe

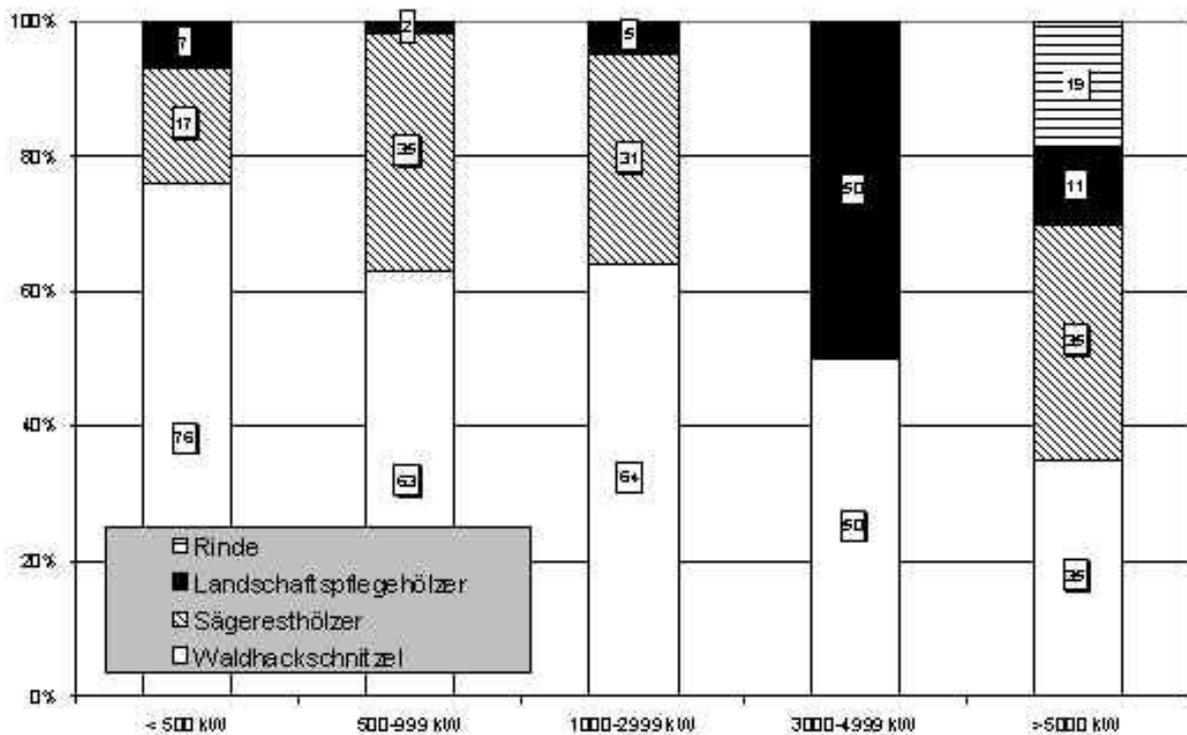
In den bayerischen Biomasse-Heizwerken werden zum überwiegenden Anteil (63%) Waldhackschnitzel eingesetzt. In sechs Fällen werden ausschließlich Waldhackschnitzel als Energieträger genutzt. Der Anteil der Sägeresthölzer beträgt 26%. Rinde hat als Brennstoff derzeit nur in größeren Heizwerken (>5 MW) eine Bedeutung (Abb. 36). Die Kategorie Landschaftspflegehölzer (8%) beinhaltet im Folgenden auch das vereinzelt angeführte unbehandelte Altholz und Kompostmaterial.

In den österreichischen Heizwerken setzt sich nach Stampfer [1997] der Brennstoffmix völlig anders zusammen. Hier werden durchschnittlich 58% des Gesamtbrennstoffbedarfs mit Rinde abgedeckt, während Waldhackschnitzel nur einen Anteil von 15% einnehmen. Der Rest entfällt auf Sägespäne und Sägehackgut.

Die Anteile der eingesetzten Brennstoffe je nach Heizwerksgröße zeigt Abbildung 37 (S. 56).

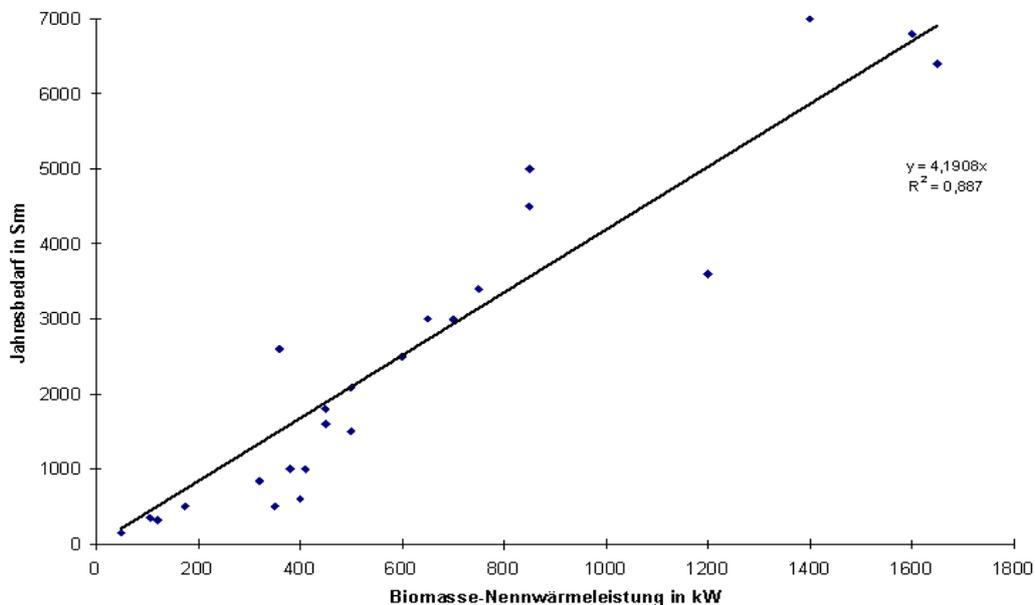
Je größer die Nennleistung, desto geringer wird der Anteil der Waldhackschnitzel bei der Verbrennung. Bei den befragten Heizwerken der Größenordnung über 5 MW liegt der Anteil der Rinde bei 19%. Insgesamt ist der Rohstoffmix bei dieser Größenordnung am vielfältigsten.

Die eingesetzten Mengen an Biomasse sind abhängig von der Nennleistung der jeweiligen Biomassekessel und von der entsprechenden Auslastung (Volllaststunden) der Anlage. Bei der überwiegenden Anzahl der Heizwerke liegt der Jahresbedarf an Biomasse (Hackschnitzel) unter 3.000 t. Bei der Darstellung des Jahresbedarfs blieben die größeren Heizwerke unberücksichtigt. In Abbildung 38 sind die Angaben verschiedener bayerischer Heizwerke in Abhängigkeit von der Biomasse-Nennwärmeleistung dargestellt. Die Trendlinie gibt den durchschnittlichen Jahresbedarf in Abhängigkeit von der Nennwärmeleistung bei der gegenwärtigen Auslastung wieder.



**Abb. 37:** Prozentuale Verteilung der eingesetzten Brennstoffe nach unterschiedlichen Biomasse-Nennwärmeleistungen

Für überschlägige Kalkulationen kann mit der Trendlinie gearbeitet werden, da zwischen den Angaben des Jahresbedarfs und der Nennwärmeleistung ein straffer Zusammenhang besteht (Jahresbedarf =  $4,19 \cdot$  Nennwärmeleistung; Bestimmtheitsmaß  $r^2 = 0,89$ ).



**Abb. 38:** Jahresbedarf bayerischer Biomasse-Heizwerke ( $N = 24$ ) in Schüttraummetern in Abhängigkeit von der Biomasse-Nennwärmeleistung

#### 4.2.4 Aktuelle Preise der Biomasse

Abbildung 39 zeigt die Preise bei der Abrechnung nach Gewicht (Tonne) und Wassergehalt. Sie bewegen sich für Waldhackschnitzel in einem Rahmen von 65,- bis 150,- DM/t, bezogen auf einen Basiswassergehalt von 20 - 30% . Bei der übrigen Biomasse wurden in aller Regel keine Angaben zu den Bezugswassergehaltsstufen

gemacht. Sägerestholz und Landschafts-pflegehölzer bewegen sich etwa zwischen 20,- und 80,- DM/t. Rinde ist am günstigsten, sie wird jedoch hauptsächlich bei größeren Heizwerken eingesetzt.

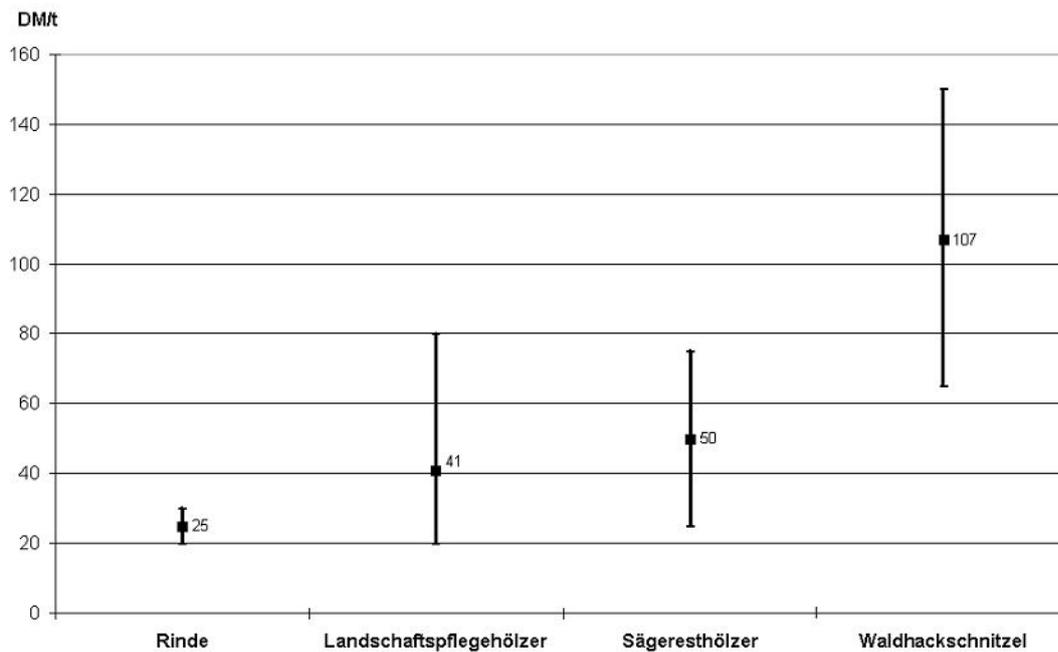


Abb. 39: Preisspannen für Biomasse bei der Abrechnung nach Gewicht

Wird Biomasse nach Schüttraummetern abgerechnet, so ergibt sich das in der Abbildung 40 dargestellte Bild. Waldhackschnitzel sind mit durchschnittlich 25,- DM/Srm am teuersten, wobei hier eine enorme Schwankungsbreite zwischen 15,- und 35,- DM/Srm vorliegt. Sägeresthölzer und die Landschaftspflegehölzer liegen durchschnittlich bei 13,- DM/Srm.

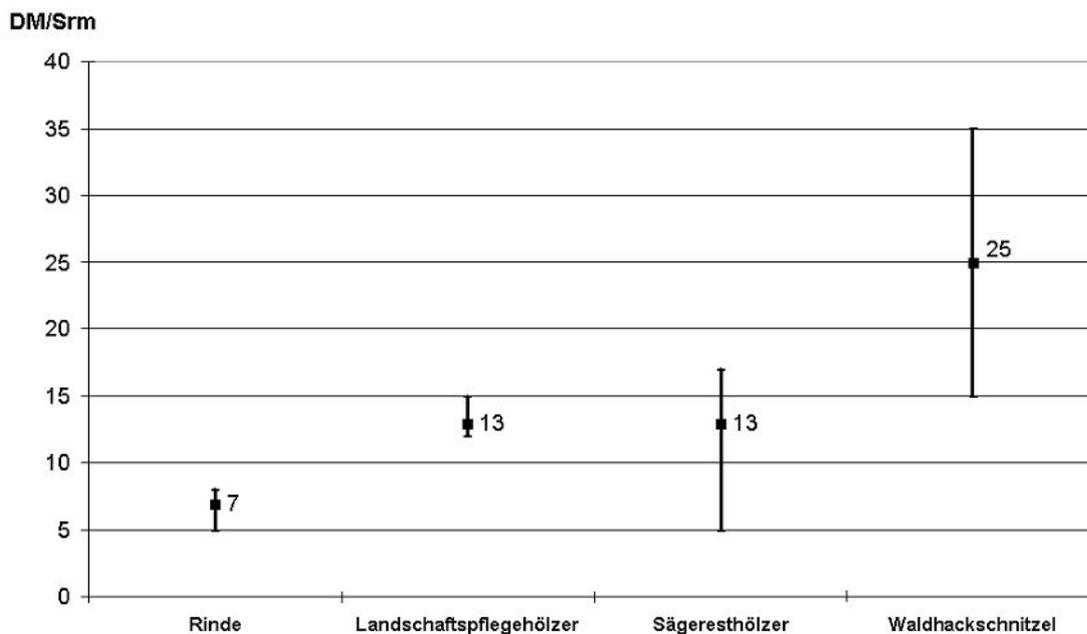


Abb. 40: Preisspannen für Biomasse bei der Abrechnung nach Schüttraummetern

#### 4.2.5 Marktpartnerschaften und Gründe für den Einkauf verschiedener Brennstoffe

Die meisten bayerischen Heizwerksbetreiber kaufen Waldhackschnitzel zu. Als Marktpartner treten Forstunternehmer, Holz- und Brennstoffhandel, Forstbetriebsgemeinschaften, Privatwaldbesitzer und sonstige Anbieter (Erzeugergemeinschaften, Autobahnmeistereien) auf. In 70% aller Fälle bestehen Geschäftsbeziehungen mit nur einem Anbieter von Waldhackschnitzeln. Wichtigste Lieferanten sind hierbei die

örtlichen Forstbetriebsgemeinschaften bzw. Waldbesitzervereinigungen, gefolgt von einzelnen privaten Waldbesitzern. Forstunternehmer treten als alleinige Lieferanten nicht auf. 30% der Heizwerkbetreiber haben verschiedene Lieferanten, wobei die Forstbetriebsgemeinschaften in aller Regel beteiligt sind. 60% der Heizwerkbetreiber sind mit ihren Waldhackschnitzellieferanten zufrieden. Verbesserungsmöglichkeiten werden vor allem bei der Preisgestaltung und bei der Materialbeschaffenheit gesehen. Die Gründe für den Kauf von Waldhackschnitzeln sind in Abbildung 41 dargestellt.

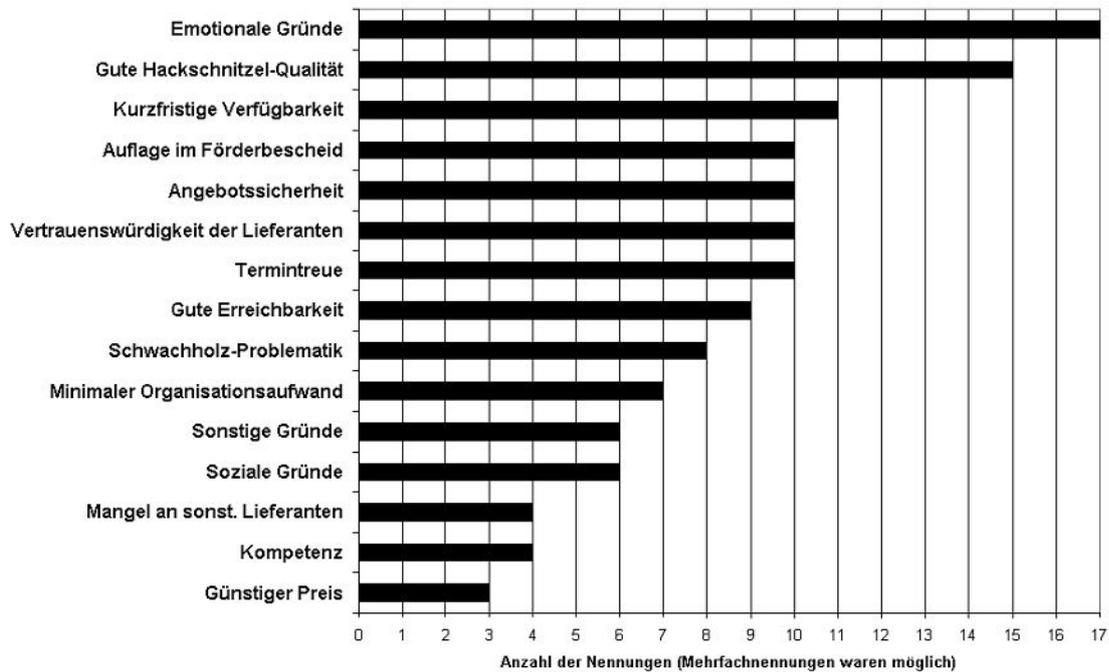


Abb. 41: Gründe für den Zukauf von Waldhackschnitzeln seitens bayerischer Heizwerkbetreiber

Von den bayerischen Biomasse-Heizwerkbetreibern übernehmen 60% selbst den Einkauf der "Sonstigen Biomasse" (z. B. Sägeresthölzer, Landschaftspflegematerial). In 20% der Fälle versorgen die Lieferanten der Waldhackschnitzel die Heizwerke auch mit der "Sonstigen Biomasse". Marktpartner sind überwiegend Sägewerksbesitzer bzw. der Holz- und Biomassehandel. Kontakte zur Holzindustrie bestehen nur selten. Die Marktpartnerschaften werden überwiegend als zufriedenstellend beurteilt. Verbesserungsvorschläge werden nicht angegeben.

Die Gründe für den Einkauf der "Sonstigen Biomasse" sind in Abbildung 42 aufgeführt. Als wesentlichster Grund wurde hier der günstige Preis genannt.

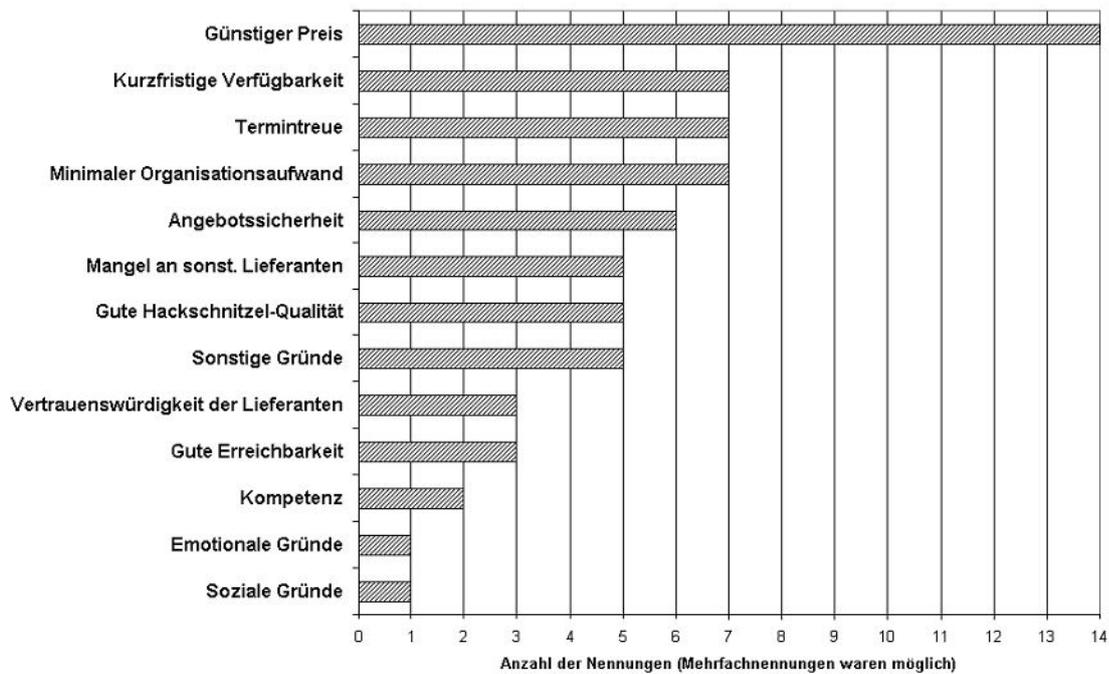
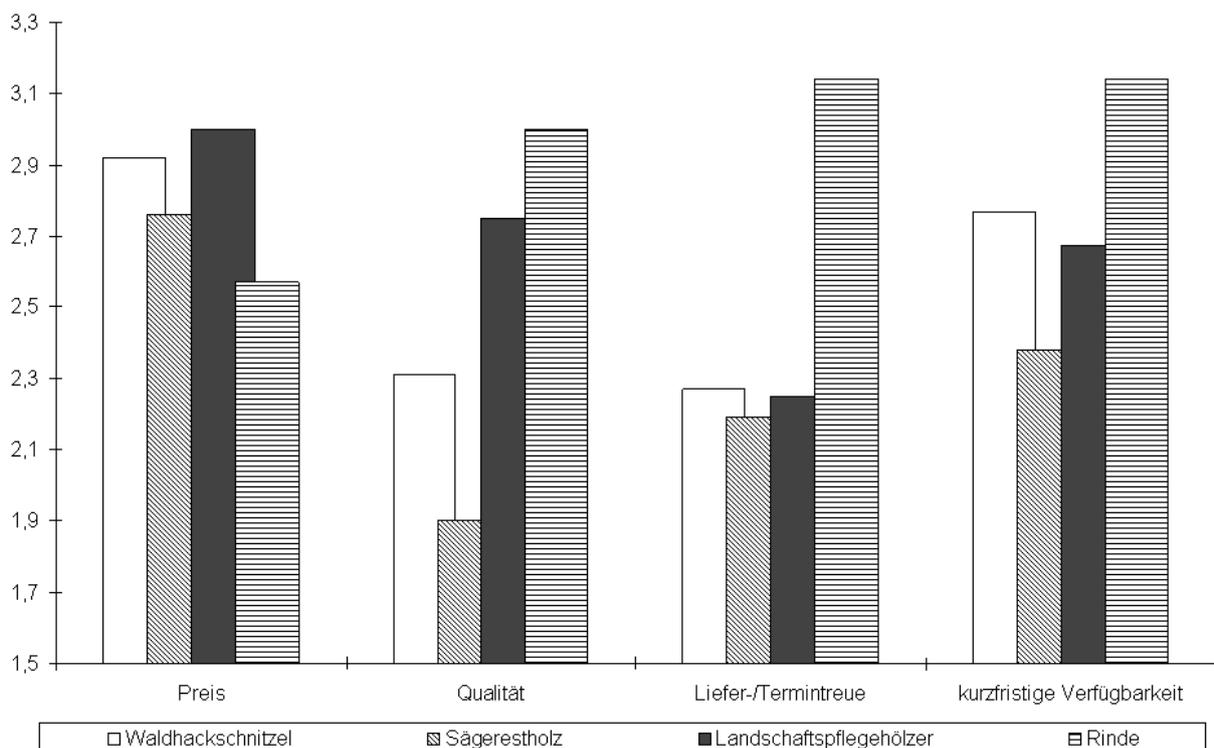


Abb. 42: Gründe für den Zukauf der "Sonstigen Biomasse" (Sägeresthölzer, Landschaftspflegehölzer, Rinde) seitens bayerischer Heizwerkbetreiber

Die Heizwerkbetreiber sollten auch die derzeitige Angebotsstruktur in ihrem räumlichen Wirkungsbereich beurteilen. Sie konnten dabei Schulnoten (1 bis 5) vergeben. Das Ergebnis dieser Einschätzung ist in Abbildung 43 dargestellt.

Die einzelnen Brennstoffe werden durch die Heizwerkbetreiber recht unterschiedlich eingeschätzt. Rinde wird preislich zwar günstig beurteilt, bei den anderen Kriterien liegen offensichtlich jedoch nicht unerhebliche Defizite vor. Sägerestholz wird insgesamt sehr positiv betrachtet. Waldhackschnitzel nehmen bei der Beurteilung nach den verschiedenen Kriterien eine Zwischenstellung ein.



*Abb. 43: Beurteilung verschiedener Kriterien der eingesetzten Biomasse durch Heizwerksbetreiber (in Schulnoten)*

## 4.3 Waldhackschnitzellogistik

### 4.3.1 Der Begriff "Logistik"

Logistik wird definiert als die Gesamtheit aller Aktivitäten (Planung, Gestaltung und Steuerung) eines Unternehmens, die die Beschaffung, die Lagerung und den Transport von Materialien und Zwischenprodukten sowie die Auslieferung von Fertigprodukten betreffen [Dudenverlag 1996; Jünemann et al. 1989].

Wichtigste Aufgabe der Unternehmenslogistik ist die effiziente Raum- und Zeitüberbrückung der Objekte. Bei logistischen Überlegungen ist zwischen **Material-** und **Informationsfluss** zu unterscheiden. Der Materialfluss ist die Verkettung aller Vorgänge beim Gewinnen, Be- und Verarbeiten sowie der Verteilung von Gütern innerhalb festgelegter Bereiche. Der Informationsfluss dient dazu,

- die richtige *Menge*
- der richtigen *Objekte*
- am richtigen *Ort*
- zum richtigen *Zeitpunkt*
- in der richtigen *Qualität*
- zu den richtigen *Kosten zur Verfügung zu stellen.*

Stockinger [1998] definiert die einzelnen Bereiche der Unternehmenslogistik nach Jünemann et al. [1989] wie folgt:

- Die Beschaffungslogistik beschäftigt sich im wesentlichen mit der Planung, Steuerung und Überwachung der Güterversorgung der Unternehmen und der Festlegung von Versorgungsstrategien.
- Die Produktionslogistik plant, steuert und überwacht den Materialfluss über die unterschiedlichen Stufen des Produktionsprozesses.
- Die Aufgabe der Distributionslogistik ist es, die Absatzseite der Unternehmung mit den nachfragenden Kunden zu verbinden. Sie umfasst damit alle Aktivitäten, die den Abnehmern die physische Verfügbarkeit der Produkte einschließlich der zugehörigen Informationen ermöglicht.
- Unter Entsorgungslogistik wird die Anwendung der Logistik auf den Bereich der Entsorgung (Beseitigung und Verwertung) von Abfall verstanden.

Als Unternehmen werden im folgenden "Energieholzproduzent(en)" und "Heizwerkbetreiber" behandelt. Wie die Umfrage bei den bayerischen Biomasse-Heizwerken gezeigt hat, können diese nicht immer getrennt werden. In 11 von 29 Antworten (= 38%) waren Heizwerkbetreiber gleichzeitig Energieholzproduzenten.

### 4.3.2 Hackschnitzellogistik bei Biomasseheizwerken

Für die Hackschnitzellogistik von Biomasse-Heizwerken sind folgende Aspekte von maßgebender Bedeutung:

- Bereitstellungsketten
- Organisation der Vermarktung
- Qualitätskriterien und Preisfindung
- Form der Lagerbewirtschaftung
- Aschenverwertung.

Eine Logistikbetrachtung ist streng genommen nur für ganz konkrete Vorhaben möglich, bei denen die spezielle Energiebedarfssituation sowohl in ihrer jahreszeitlichen als auch tageszeitabhängigen Ausprägung sowie die Lagerkapazität für Brennstoffe am Heizwerk bekannt sind [Remler 1997].

Im folgenden Teil werden die genannten Aspekte zunächst unter allgemeinen Gesichtspunkten betrachtet und anschließend mit den Ergebnissen der Befragung bayerischer Heizwerksbetreiber verglichen, um daraus, soweit möglich, Empfehlungen zu geben.

### **Bereitstellungsketten und Produktionslogistik**

Die **Bereitstellungsketten** von Waldhackschnitzeln bestehen im wesentlichen aus den Einzelprozessen:

Ernte (Fällen; Vorliefern; Rücken)

Aufbereitung (Hacken)

Lagerung (Lagerung am Heizwerk/Zwischenlager)

Transport und Umschlag.

Die Teilfunktionen Ernte und Aufbereitung von Waldhackschnitzeln mit teilmechanisierten Verfahren werden in den Kapiteln 2 und 3 ausführlich behandelt. Im Gegensatz zur konventionellen Holzernte, die i. d. R. mit der Bereitstellung der entsprechenden Sortimente an der Waldstraße endet, müssen bei der Waldhackschnitzelbereitstellung zusätzliche Teilarbeiten (Hacken/Lagerung/Transport) von Waldbesitzern oder Unternehmern übernommen werden.

Die **Produktionslogistik** von Waldhackschnitzeln umfasst alle Prozesse der Planung, Steuerung, Ausführung und Kontrolle der Raumüberwindung und Zeitüberbrückung sowie des Mengenausgleichs von Hackschnitzeln. Die Schnittstelle zu den Logistikaufgaben im Heizwerk stellt das Brennstofflager im Heizwerk dar, da die Gestaltung des Lagers wesentlichen Einfluss auf die vorangehenden Schritte der Brennstoffbereitstellung hat [Stockinger 1998]. In Abbildung 44 sind die Zusammenhänge der Hackschnitzellogistik dargestellt.

Die Aufgabe der Logistik liegt in der Bereitstellung des Brennstoffes in der richtigen Qualität und Quantität [Stockinger 1998; Kaltschmitt 1995]. Bei der Qualität spielt neben der Stückigkeit der Wassergehalt und damit letztendlich der Energiegehalt die entscheidende Rolle. Neben diesen Qualitätsstandards, die von der Feuerungsanlage vorgegeben sind, müssen insbesondere auch die lokalen Gegebenheiten (z. B. Lagerkapazitäten am Heizwerk, Transportentfernungen und Maschinenpark) berücksichtigt werden.

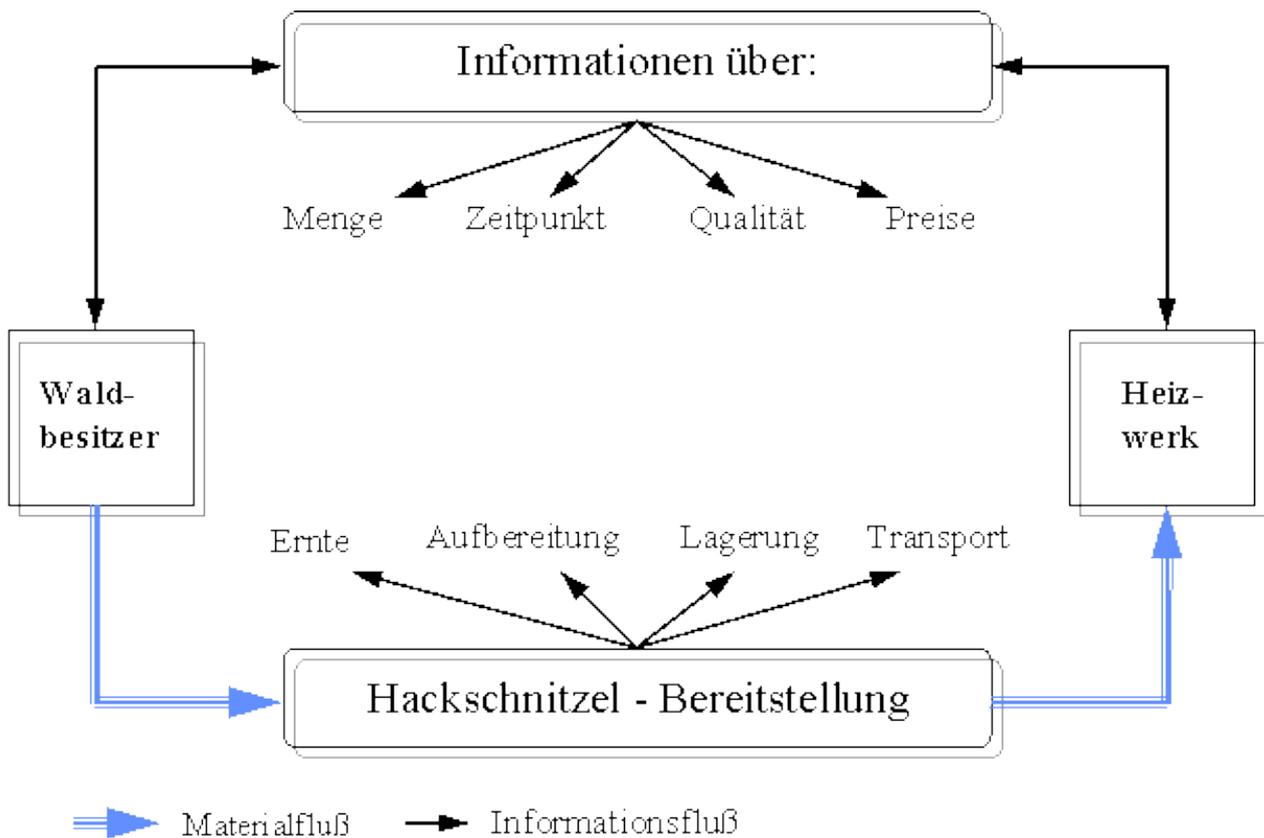


Abb. 44: Waldhackschnitzellogistik

Bei der Hackschnitzellogistik müssen die einzelnen Prozesse auf die Anforderungen der Heizwerkbetreiber ausgerichtet werden. Zu diesem Zweck besteht ein wichtiger Lösungsansatz darin, die Material- und Informationsflüsse in den Mittelpunkt der Betrachtung zu stellen und zu optimieren (vgl. Abb. 44). Hierbei spielen Verbesserungen der Kommunikation, der Abbau von Schnittstellen, die Vermeidung von Teiloptimierungen sowie die Rationalisierung von Prozessen eine wichtige Rolle (vgl. WSL [1998]).

Aus der Sichtweise der Anbieter/Produzenten von Waldhackschnitzeln sind Informationen von Seiten der Heizwerkbetreiber über

Menge und **Zeitpunkt** des Bedarfs

notwendige **Qualitäten**

Preise für Waldhackschnitzel

von besonderer Bedeutung (nach Stockinger [1998]).

Die Lieferintervalle werden dabei durch folgende "Heizwerkparameter" bestimmt:

- Jahresbrennstoffbedarf und Jahresverteilung des Bedarfs
- Lagerkapazität, tatsächliche Einlagerungsmengen, Einlagerungszeitpunkt.

Die Zusammenarbeit von Energieholzlieferanten/Produzenten und Heizwerkbetreibern bei der Bereitstellung und Logistik von Waldhackschnitzeln ist unabdingbare Voraussetzung für eine qualitätsorientierte und verwendungsgerechte Produktion von Waldhackschnitzeln. Gemeinsam müssen bereits bei der Projektierung von Heizwerken angepasste Lösungen entwickelt werden. Bei den unterschiedlichen Leistungsgrößen, Lagerhaltungskonzepten und Jahresbrennstoffmengen der jeweiligen Heizwerke können dabei völlig unterschiedliche Lösungsansätze realisiert werden. Insgesamt

besteht die Aufgabe darin, die Bereitstellungskette der Waldhackschnitzel von der biologischen Produktion über Holzernte, Transport bis zur Vermarktung so zu optimieren, dass eine möglichst hohe Wertschöpfung erzielt wird [WSL 1998].

### **Beschaffungslogistik und Distributionslogistik**

Der Einkauf als erstes Teilsystem hat nach dem Angebot des Beschaffungsmarktes die Bedarfsanforderungen des Unternehmens an Brennstoffen zu erfüllen, d. h. er muss die Zulieferkapazitäten erschließen und auch langfristig sichern. Es muss hierbei geklärt werden, welche Lieferanten die jahreszeitlich unterschiedlichen Hackschnitzelmengen der richtigen Qualität zu einem günstigen Preis bereitstellen können.

Die Beschaffungslogistik als zweites Teilsystem muss die Material- und Informationsflüsse zwischen Beschaffungsmarkt und Hackschnitzelbedarf im Heizwerk gestalten. Auf Grund der vorherrschenden Bedarfsanforderungen von Brennmaterial auf Seiten der Heizwerkbetreiber und Liefermöglichkeiten der Hackschnitzelproduzenten ergeben sich die möglichen Versorgungs- und Bereitstellungsketten. So ist zu entscheiden, ob eine just-in-time Anlieferung möglich oder das Vorhalten entsprechender Lagerhallen am Heizwerk nötig ist. Die Beschaffungslogistik für das Heizwerk kann als Spiegelbild zur Distributionslogistik der Energieholzlieferanten aufgefasst werden.

Die Aufgabe der Distributionslogistik ist es, die Absatzseite der Energieholzlieferanten mit der Nachfrage des Heizwerkes zu verbinden. Die Absatzwegewahl für Hackschnitzel (just in time/ Zwischenlager) und die Gestaltung des Distributionsnetzes bestimmen im wesentlichen die Höhe der Logistikkosten (Lagerhaltungs und Transportkosten).

In den folgenden Abschnitten wird aufgezeigt, wie die einzelnen Teilbereiche der Logistik möglichst ideal aufeinander abgestimmt werden können.

## 4.4 Vermarktungsformen für Waldhackschnitzel

Oftmals hängt die Verwirklichung von Holzheizwerken neben der Frage der Wirtschaftlichkeit davon ab, ob es gelingt, rechtzeitig eine zweckmäßige Versorgungsorganisation zu konstituieren. In jedem Fall ist eine gut aufgebaute und effizient wirkende Trägerschaft notwendig, die sich mit der Produktion, dem Vertrieb und der Verwertung von Holzhackschnitzeln befasst [Bundesamt für Konjunkturfragen 1990]. Die Belieferung von Holzheizwerken mit Waldhackschnitzeln sollte so weit wie möglich direkt erfolgen. Direktvermarktung muss in diesem Zusammenhang nicht gleichbedeutend sein mit der Alleinvermarktung durch den jeweiligen Produzenten. In vielen Fällen erweist sich der Zusammenschluss von mehreren Produzenten als wirtschaftlich sinnvoller [Freudenthaler 1987].

Schließen sich Waldbesitzer zusammen, um die Energieholzversorgung und/oder den Betrieb einer Holzfeuerungsanlage zu übernehmen, sollte vorab die zukünftige Gesellschaftsform rechtlich, institutionell, finanziell und steuerlich geprüft werden. Als mögliche Gesellschaftsformen kommen generell in Frage: Wirtschaftlicher Verein, Gesellschaft des bürgerlichen Rechts (GbR), Gesellschaft mit beschränkter Haftung (GmbH), Kommanditgesellschaft (KG) und die jeweils möglichen Sonderformen [Baur 1996]. Durch die Einschaltung eines eigenen Rechtssubjektes liegt eine überbetriebliche Kooperation vor. Sie kann einerseits in der Vermittlung, das heißt im Zusammenführen von Produzenten und Konsumenten, andererseits im An- und Verkauf von Hackschnitzeln bestehen [Schuster 1991]. Bestehende Zusammenschlüsse (Forstbetriebsgemeinschaften, Maschinenringe, Erzeugergemeinschaften) können ebenfalls als Bindeglied zwischen Brennstoffproduzenten und Anlagenbetreibern auftreten. Auf Entwicklungen in der Schweiz, wo zur Zeit regionale Hackschnitzelbörsen entstehen, wird in diesem Zusammenhang verwiesen. Voraussetzung für eine Etablierung solcher "Börsen" ist das Vorhandensein einer Vielzahl von Abnehmern (vgl. Hartmann et al. [1997]).

Wie die Umfrage bei den bayerischen Biomasse-Heizwerkbetreibern gezeigt hat, bündeln in aller Regel die örtlichen Forstbetriebsgemeinschaften bzw. Waldbesitzervereinigungen das Angebot von Hackschnitzeln. Neben diesen treten einzelne Waldbesitzer, der Handel und Forstunternehmer als Energieholzlieferanten auf. Die überwiegende Anzahl der Heizwerkbetreiber beurteilt die bestehenden Marktpartnerschaften als zufriedenstellend.

### **Empfehlungen**

Grundsätzlich wird auf die Notwendigkeit hingewiesen, vor oder spätestens während der Planungsphase den Kontakt zwischen Heizwerkbetreibern und potentiellen Energieholzlieferanten herzustellen. Hier bieten sich bestehende Organisationen wie

Forstbetriebsgemeinschaften oder Maschinenringe an, insbesondere wenn größere Mengen von Waldhackschnitzeln in der Zukunft bereitgestellt werden sollen.

Die Vermittlung von Energiehackschnitzeln durch **Forstbetriebsgemeinschaften bzw. Waldbesitzervereinigungen** hat folgende Vorteile:

- Innerhalb der Forstbetriebsgemeinschaft sind bereits Waldbesitzer zusammengeschlossen. Der Organisationsgrad ist hoch.
- Eine der wesentlichen Aufgaben der Forstbetriebsgemeinschaften ist der Absatz von Holz oder sonstigen Forstprodukten im Auftrag der Mitglieder. Die notwendige Infrastruktur (EDV, Geschäftsführer) ist bereits vorhanden. Die Vermittlerfunktion für konventionelle Holzsortimente wird bereits jetzt wahrgenommen.
- Der Ankauf von Hackern kann bei einer Abwicklung über die FBG bezuschusst werden.

Forstbetriebsgemeinschaften sind im Allgemeinen als eingetragener Verein oder als wirtschaftlicher Verein organisiert. Aus steuerlichen Gründen kann die Forstbetriebsgemeinschaft i. d. R. deshalb nur als Vermittler von Geschäften auftreten. Deshalb erscheint es zweckmäßig, die Rechtsform einer GmbH zu wählen, über die Handelsgeschäfte abgewickelt werden können [Baur 1997].

Selbstverständlich können auch **einzelne Waldbesitzer** bzw. **Forstunternehmer** die oben skizzierten Aufgaben übernehmen. Vorteilhaft ist dieser Weg, wenn es sich um geringe Mengen handelt. Der organisatorische Aufwand ist hierbei geringer, die erzielten Gewinne fließen direkt, ohne Beteiligung eines "Zwischenhandels", als Einkommen der Forstwirtschaft zu.

## 4.5 Hackschnitzellieferverträge

Die Umfrage bei den Heizwerkbetreibern hat gezeigt, dass etwa 60% keinen Vertrag mit den Lieferanten von Waldhackschnitzeln abgeschlossen haben, obwohl er zur gegenseitigen Absicherung (Qualität, Liefermengen und Lieferzeitpunkt) beitragen kann. In einem Liefervertrag müssen alle Aspekte, die sich auf den Hackschnitzelpreis und auf das Konzept der Anlage auswirken, klar definiert sein:

- Qualität: *Bandbreite des zulässigen Wassergehaltes; Stückigkeit; Anteil von größeren Endstücken; max. Feinanteil*
- Menge der zu liefernden Hackschnitzel und Lieferintervalle bzw. Lieferbedingungen: *Lieferintervalle müssen auf die Lagerkapazität oder Bunkergröße abgestimmt sein*

Neben weiteren, je nach örtlicher Situation notwendigen Regelungen und Vertragsbedingungen, sollten Preisvereinbarungen (z.B. Preisgleitklauseln; siehe hierzu Kap. 5.8), Zahlungs- und Abrechnungsmodalitäten für die Hackschnitzellieferungen festgelegt werden.

Wesentliche Bestandteile eines solchen Mustervertrages sind in Tabelle 13 aufgeführt.

Tab. 13: *Muster eines Hackschnitzelliefervertrages (Quelle: BUNDESAMT FÜR KONJUNKTUR-FRAGEN BERN [1990])*

### Mögliche Vertragspunkte:

1. Vertragsparteien
2. Definition der Hackschnitzel
  - Größe; Endstücke; max. Wassergehalt
  - max. Rinden- bzw. Staubanteil
  - Zusammensetzung Nadel- / Laubholz
3. Preis indexiert
4. Abnahme- und Liefergarantien Mengen / Termine
5. Übernahme Ort; Mengen- Gewichtsbestimmung; frei Werk
6. Transport Ankündigung der Lieferung
7. Zahlungsbedingungen
8. Vertragsdauer und Kündigungsbedingungen
9. Streitigkeiten; Gerichtsstand; Vertragsanpassungen
10. Anzahl der Ausfertigungen

### Empfehlung:

Zwischen Lieferanten und Abnehmern (Heizwerkbetreiber) von Holzhackschnitzeln sollte ein Liefervertrag abgeschlossen werden.

## 4.6 Qualitätskriterien und Möglichkeiten der Qualitätsbeurteilung

### Qualitätskriterien

In Deutschland existiert bis dato keine Normung für Hackschnitzel. Nach Hartmann et al. [1997] hätte die Einführung einer Hackschnitzelnorm folgende Vorteile:

- Vorgaben über Bestimmungsmethoden zur Prüfung der Produkteigenschaften
- Vergleichbarkeit von Brennstoffen
- Anwendersicherheit durch Einhaltung von Mindestanforderungen
- Möglichkeit der Preisstaffelung bei Definition von Qualitätsklassen
- einheitliche Bezugsgrößen bei Rechtsauseinandersetzungen
- einheitliche Begriffsdefinitionen und Sprachregelung

Qualitätsklassen für Hackschnitzel sind bei den bayerischen Biomasse-Heizwerkbetreibern in aller Regel nicht bekannt. Bei der Beurteilung der Qualität ist der Wassergehalt das entscheidende und meist alleinige Kriterium. In einigen Fällen spielt die Hackschnitzelgröße eine Rolle. Von untergeordneter Bedeutung sind die Kriterien Aschegehalt und Anteile an Fremdstoffen. Diese wurden von den befragten Heizwerkbetreibern nicht genannt.

Sollen Qualitäten für Hackschnitzel definiert werden, wird derzeit auf die österreichische Norm (ÖNORM M 7133) zurückgegriffen. In Anlehnung an diese hängt die Qualität von Holzhackschnitzeln von folgenden Faktoren ab:

- Wassergehalt
- Größe des Hackgutes
- Schüttdichte im wasserfreien Zustand
- Aschegehalt
- Fremdstoffanteil

Heizwert in kWh/kg

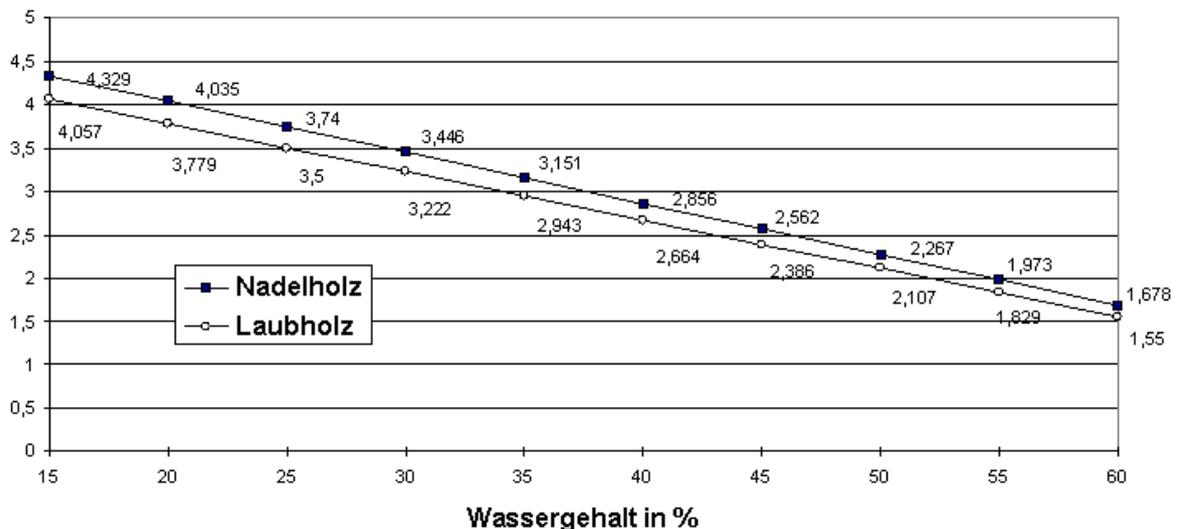


Abb. 45: Heizwert und Wassergehalt von Holz

Diese Eigenschaften kennzeichnen im Wesentlichen die physikalischen Brennstoffqualitäten und haben Einfluss auf den Transport- und Lagerraumbedarf, die Lagerfähigkeit sowie die Beschickungs- und Feuerungstechnik [Hartmann 1997].

### Wassergehalt

Der Wassergehalt von Energiehackschnitzeln ist der wesentlichste Faktor, da er die Lagerbeständigkeit, damit verbunden die Notwendigkeit einer Trocknung, und den Heizwert entscheidend beeinflusst (Abb. 45). Er sollte bei der Abrechnung von Hackschnitzeln aus diesem Grund unbedingt berücksichtigt werden. Die Einteilung gemäß ÖNORM M 7133 ist in Tabelle 14 dargestellt. Sie erfolgt in fünf Klassen und umfasst die Bandbreite zwischen lufttrocken und ertefrisch.

Tab. 14: Wassergehaltsklassen von Hackschnitzeln (nach ÖNORM M 7133)

Klasse	Grenzwert (Wassergehalt in %)	Bezeichnung
w 20	< 20	lufttrocken
w 30	20 - 29	lagerbeständig
w 35	30 - 34	beschränkt lagerbeständig
w 40	35 - 39	feucht
w 50	40 - 49	ertefrisch

### Größe

Die ÖNORM M 7133 unterscheidet drei Größenklassen von Hackschnitzeln.

Tab. 15: Größenverteilung von Energiehackschnitzeln (nach ÖNORM M 7133)

Klasse	Massenanteil des relevanten Korngrößenbereiches				Extremwerte	
	max. 20% [mm]	60 - 100% [mm]	max. 20% [mm]	max. 4% [mm]	Querschnitt [cm <sup>2</sup> ]	Länge [cm]
<b>G 30 fein</b>	> 16	16 - 2,8	2,8 - 1	< 1	3	8,5
<b>G 50 mittel</b>	> 31,5	31,5 - 5,6	5,6 - 1	< 1	5	12
<b>G 100 grob</b>	> 63	63 - 11,2	11,2 - 1	< 1	10	25

### Schüttdichte

Die Schüttdichte der Hackschnitzel stellt ein wichtiges Merkmal des jeweiligen Ernteverfahrens dar. Sie ist abhängig vom Wassergehalt, von der Schnitzelgröße und von der Verdichtung. Insbesondere ist sie eine wichtige Größe für Entscheidungen über Transport- und Lagerkapazitäten. Die Schüttdichte im wasserfreien Zustand ist außerdem ein Maß für den Energieinhalt. Die drei Schüttdichteklassen sind in Tabelle 16 dargestellt.

Tab. 16: Schüttdichte von Hackschnitzeln (nach ÖNORM M 7133)

Klasse	Grenzwert (Schüttdichte in kg TS/m <sup>3</sup> )	Bezeichnung
S 160	< 160	<b>geringe Schüttdichte</b> <i>(Fichte, Tanne, Pappel, Weide)</i>
S 200	160 - 199	<b>mittlere Schüttdichte</b>

S 250	> 200	<i>(Kiefer, Lärche, Birke, Erle)</i> <b>hohe Schüttdichte</b> <i>(Buche, Eiche, Robinie)</i>
-------	-------	--

### Aschegehalt

Die Kriterien der zwei Klassen sind in Tabelle 17 skizziert.

Tab. 17: Aschegehaltsklassen von Hackschnitzeln (n. ÖNORM M 7133)

Klasse	Grenzwert (Aschegehalt in % der TS)	Bezeichnung
A 1	< 1	geringer Aschegehalt
A 3	1 - 3	erhöhter Aschegehalt

### Anteil an Fremdstoffen

Grobe Verunreinigungen wie Steine, Metallteile und sonstige Fremdkörper sowie brennbare Fremdstoffe sind nicht zulässig.

### Empfehlungen:

*Jedes Produkt, das vermarktet werden soll, muss gewisse Qualitätsstandards aufweisen, um die Voraussetzungen für seinen problemlosen Einsatz zu erfüllen [Schuster 1991]. In jedem Fall sollte der Wassergehalt als Qualitätskriterium beurteilt werden, da dieser einen entscheidenden Einfluss auf den Heizwert der Hackschnitzel hat.*

### Qualitätsbeurteilung

#### Wassergehalt

Für die Bestimmung des Wassergehaltes gibt es mehrere Möglichkeiten:

- Schätzmethode mittels Handprobe
- Feuchtigkeitsmessgeräte
- Darmmethode

Die einfachste Methode zur Bestimmung des Wassergehaltes ist die **Schätzung mittels Handprobe**. Diese Methode ist ziemlich ungenau und setzt bei der Anwendung eine hohe Erfahrung voraus.

Derzeit gibt es mehrere **Feuchtigkeitsmessgeräte** auf dem Markt, die auch von den bayerischen Heizwerkbetreibern eingesetzt werden, mit denen einfach und schnell der Wassergehalt bestimmt werden kann. Die Messung erfolgt bei den meisten Geräten über eine Widerstandsmessung und ist daher beim Schüttgut Hackschnitzel relativ ungenau. Messungen ergaben Abweichungen von 5% [Schuster 1991]. Diese Geräte arbeiten umso genauer, je feiner und gleichmäßiger das Schüttgut ist. In jedem Fall sollten beim Einsatz solcher Messgeräte die Messungen von Zeit zu Zeit mit den Ergebnissen der Darmmethode verglichen werden. Generell ist es empfehlenswert, bei jeder Lieferung mehrere Messungen vorzunehmen.

Die genaueste Methode zur Bestimmung des Wassergehaltes ist die **Darmmethode**. Als Trocknungsgeräte können dabei Trockenschränke, Mikrowellen- oder Schnellbestimmungsgeräte verwendet werden. Die Trocknung in Darrschränken ist dann anzuraten, wenn sehr viele Proben genommen werden müssen. Die Funktionalität von Mikrowellengeräten wurde von verschiedener Seite bestätigt (vgl. Schuster [1991]). Allerdings darf hierbei nicht übersehen werden, dass bei Überhitzung des Materials Brandgefahr besteht. Somit muss die Trocknung, die zwischen 5 und 20 Minuten dauern kann, ständig kontrolliert werden.

## **Hackschnitzelgröße**

Die Größenverteilung der Hackschnitzel kann sehr genau durch eine Siebanalyse festgestellt werden. Durch den Einsatz von Sieben unterschiedlicher Maschenweiten können die unterschiedlichen Anteile der einzelnen Größenklassen ermittelt werden. Diese Methode ist zwar genau, für den praktischen Einsatz jedoch zu aufwendig. Eine okulare Einschätzung mit stichprobenartiger Messung mittels Zollstock erscheint hier zweckmäßig zu sein.

## 4.7 Preisfindung und Abrechnungsvarianten für Waldhackschnitzel

### Kriterien der Preisfindung

Die Preisbildung für Energiehackschnitzel ist wie bei den anderen Holzverkäufen frei und unterliegt keiner gesetzlichen Regelung. Von einer Preisbildung in marktwirtschaftlicher Hinsicht, also dem Zusammentreffen von Angebot und Nachfrage, kann derzeit noch nicht gesprochen werden. Der Preis für Waldhackschnitzel und die Preisbildung werden von zahlreichen Faktoren beeinflusst [Schuster 1991]. Im Einzelnen sind dies:

- Erzeugungskosten der Waldhackschnitzel
- Transportentfernung
- Ort der Übergabe (frei Waldstraße/Zwischenlager/Heizwerk)
- Hackschnitzelqualität
- Anzahl der Konkurrenzanbieter
- Preise der fossilen Konkurrenz-Energieträger (wirtschaftliche Situation).

Für die Höhe des Preises sind unterschiedliche Gesichtspunkte entscheidend. Waldbesitzer sind daran interessiert, zumindest die Selbstkosten durch den Verkauf zu erwirtschaften. Sie werden ihre Preisvorstellungen daher in erster Linie aus den Bereitstellungskosten ableiten. Dagegen können Heizwerkbetreiber unter den derzeitigen Rahmenbedingungen auf Grund ihrer wirtschaftlichen Situation nur bis zu einer bestimmten Höhe diesen Preisforderungen entsprechen. Sie werden sich primär am Preisniveau der fossilen Energieträger orientieren und bemüht sein, die Konkurrenzsituation verschiedener Anbieter zu nutzen.

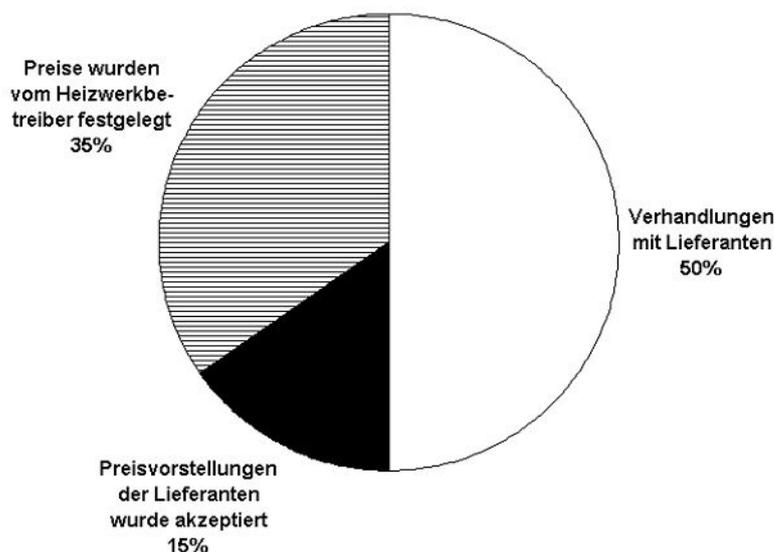


Abb. 46: Zustandekommen der Preise für Waldhackschnitzel

Bei der Befragung der Heizwerkbetreiber wurde nach dem Zustandekommen der Preise für Waldhackschnitzel gefragt. In Abbildung 46 ist das Ergebnis dargestellt. Es kommt hierbei deutlich zum Ausdruck, dass die Hälfte der Preise durch Verhandlungen zwischen Lieferanten und Abnehmern zustande kamen.



### **Empfehlungen:**

Unter dem Aspekt der Preisfindung sollten die verschiedenen Blickwinkel zwischen Heizwerksbetreiber und Waldhackschnitzelproduzenten frühzeitig und offen diskutiert werden. In aller Regel werden bei der jetzigen Förderpraxis feste Quoten für den Einsatz von Waldhackschnitzel im Förderbescheid festgelegt. Insofern sind die Heizwerksbetreiber bei der Wahl der einzusetzenden Brennstoffe nicht frei. Um so mehr erscheint es sinnvoll, Preise über Verhandlungen zu ermitteln, wie es derzeit weitgehend schon gängige Praxis ist.

### **Preis Anpassung bei langfristigen Lieferverträgen**

Zur Planungssicherheit für beide Seiten ist der Abschluss von langfristigen Lieferverträgen zwischen Energieholzlieferanten und Heizwerksbetreibern sinnvoll. Werden solche Verträge über eine längere Laufzeit abgeschlossen, ist es notwendig, auf mögliche Preisveränderungen durch indexierte Preisgleitklauseln zu reagieren. Die Bandbreite der Faktoren, die in diesen Index einbezogen werden können, ist sehr vielfältig.

Als Faktoren können berücksichtigt werden:

- Heizöl-, Erdgas-, Fernwärme- oder Strompreis
- Spreißel- oder Industriebhackschnitzelindex
- Lohnkosten- oder Lebenshaltungsindex

In Österreich werden für Hackschnitzellieferverträge hauptsächlich Heizöl, Industriebhackschnitzelpreis und Lohnkostenindex herangezogen [Schuster 1991]. Anstelle des Industriebhackschnitzelpreises schlägt Jonas [1990] einen "Energieholzindex" vor. Er setzt sich aus Brennholz (35%), Industrieholz (30%) und Sägenebenprodukten (35%: 15% Industriebhackschnitzel; 10% Sägespreißel; 10% Sägespäne) zusammen.

Bei den Preisgleitregelungen werden Formeln verwendet, die geänderte Preise der jeweiligen Faktoren in Beziehung zu den Anfangspreisen setzen, wodurch sich eine prozentuale Änderung des Hackschnitzelpreises ergibt [Schuster 1991]. Die jeweiligen Faktoren sind entsprechend ihrer Bedeutung zu gewichten.

Ein Beispiel für eine Preisgleitklausel ist nachfolgend dargestellt. Es sei hier nur der Vollständigkeit halber erwähnt, dass die Auswahl der Faktoren beispielhaft ist und in jedem Fall zwischen den Vertragsparteien individuell vereinbart werden sollte.

$$P_x = P_o * (a * H_{Lx} / H_{Lo} + b * I_x / I_o + c * L_x / L_{Ao})$$

P<sub>x</sub>: der jeweils errechnete neue Preis

P<sub>o</sub>: der Preis zum Zeitpunkt des Vertragsabschlusses

H<sub>lx</sub>: der jeweilige Preis für Heizöl leicht

H<sub>lo</sub>: der Preis für Heizöl leicht zum Zeitpunkt des Vertragsabschlusses

I<sub>x</sub>: der jeweilige Industriebhackschnitzelpreis

I<sub>o</sub>: der Industriebhackschnitzelpreis zum Zeitpunkt des Vertragsabschlusses

L<sub>x</sub>: die jeweiligen Lohnkosten (z.B. Maschinenringsätze)

L<sub>o</sub>: die Lohnkosten zum Zeitpunkt des Vertragsabschlusses

a,b,c die Buchstaben geben die anteilige Gewichtung der einzelnen Parameter an

### **Empfehlungen**

Beim Abschluss von langfristigen Lieferverträgen sollten die verhandelten Preise für

Waldhackschnitzel mit verschiedenen Faktoren indexiert werden. In jedem Fall sollte bei der Preisanpassung die Preisentwicklung für fossile Energieträger und konventionelle Holzprodukte berücksichtigt werden. Der Lohnkosten- oder der Lebenshaltungsindex kann als "neutraler" Faktor zusätzlich einbezogen werden. Die Faktoren sollten so gewählt werden, dass diese für beide Vertragsparteien zuverlässig und nachprüfbar sind. Weiterhin sollten im Verhandlungswege die prozentuale Gewichtung der einzelnen Faktoren sowie die Termine der Preisanpassung (fester Stichtag oder bei prozentualer Überschreitung eines Faktors z. B. um 5%) festgelegt werden.

### **Abrechnungsvarianten**

Für die Abrechnung von Hackschnitzeln kommen mehrere Verfahren in Betracht. In der Tabelle 18 sind die verschiedenen Möglichkeiten kurz charakterisiert. Die Abrechnung von Hackschnitzeln nach **Volumen** ist eine sehr einfache und schnelle Methode. Der Energieinhalt eines Schüttraumeters Hackschnitzel kann allerdings erheblich schwanken, da Dichte und Wassergehalt von Hackschnitzeln in einem sehr weiten Rahmen streuen. Weiterhin führen unterschiedliche Holzarten, unterschiedliche

Hackschnitzelgrößen und Verdichtungseffekte beim

Tab. 18: Varianten für die Verrechnung von Hackschnitzeln [Bundesamt für Konkunkturfragen Bern 1988]

Bestimmungsgröße für Preis	Beurteilung
Schüttvolumen (m <sup>3</sup> )	einfache Messung; Wärmeinhalt kann stark schwanken (Stückgröße; Wassergehalt)
Gewicht der feuchten Holzmasse	gut, bei konstantem Wassergehalt
Gewicht der trockenen Holzmasse (atro)	guter Zusammenhang zwischen Energieinhalt und Preis; mit Korrekturfaktor kann abweichende Feuchte berücksichtigt werden
Abgegebene Wärmemenge der Wärmeerzeugung	Problem: Wirkungsgrad der Anlage; Vorteil: Heizwert steigt bei trockenem Material

Heizwert in kWh/Srm

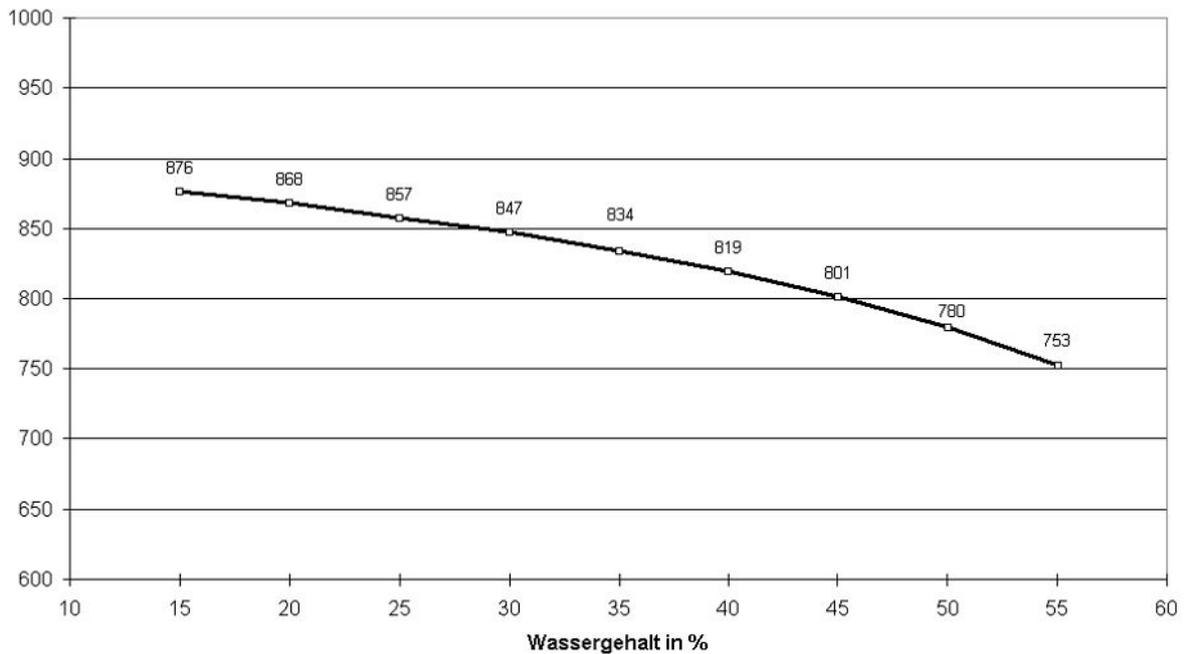


Abb. 47: Zusammenhang zwischen Heizwert in kWh/Srm und Wassergehalt für Fichtenhackschnitzel

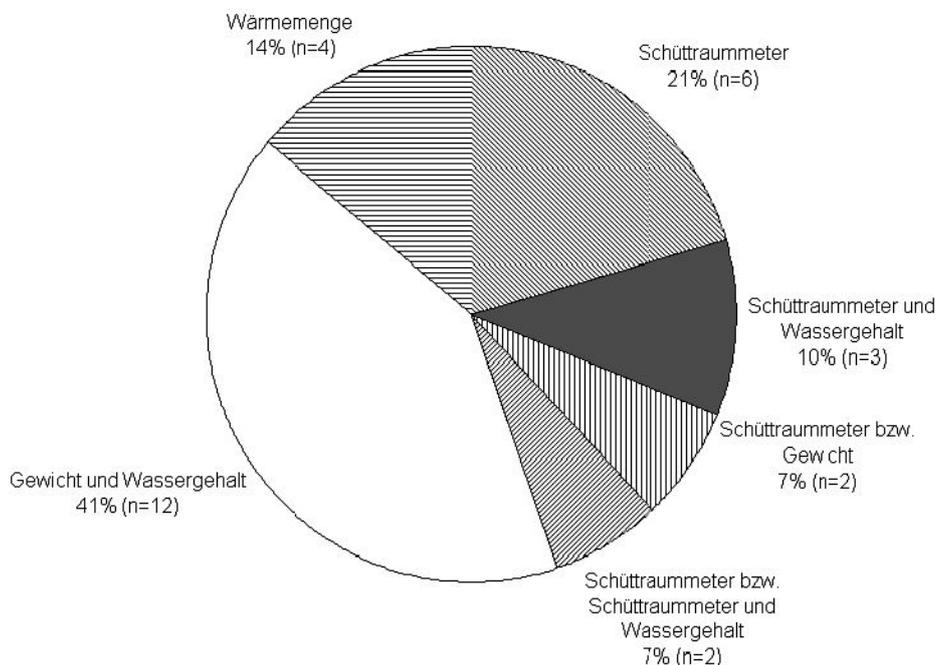
Transport zu stark unterschiedlichen Schüttdichten und damit zu unterschiedlichen Energieinhalten. Eine zusätzliche Erhebung des Wassergehaltes erhöht zwar die Genauigkeit, da der Heizwert, gemessen in kWh/Srm, bei konstant bleibender Trockenmasse pro Srm infolge des steigenden Wassergehaltes gering sinkt (Abb. 47). Wichtiger wäre in diesem Zusammenhang die Erfassung der Schüttdichte, da diese den Heizwert (in kWh/Srm) weitaus stärker beeinflusst. So hat beispielsweise ein Schüttraummeter Fichtenhackschnitzel bei einem Wassergehalt von 30% einen Energieinhalt von rund 850 kWh/Srm, ein Srm Buchenhackschnitzel weist dagegen einen Energieinhalt von 1250 kWh/Srm auf.

Werden Hackschnitzel nach **Gewicht und Wassergehalt** abgerechnet, so kann der Zusammenhang zwischen Wassergehalt und Heizwert berücksichtigt werden. Basis für die Preisbildung ist oftmals ein Wassergehalt von 30%. Über Korrekturfaktoren, die nach dem jeweiligen Heizwert der entsprechenden Wassergehalte berechnet sind, lassen sich entsprechende Preise für die unterschiedlichen Wassergehalte berechnen. In der Tabelle 19 ist ein solches Rechenbeispiel exemplarisch dargestellt.

Ein weiteres, sehr effektives und genaues Verfahren ist die Abrechnung nach der produzierten

**Wärmemenge** laut Wärmemengenzähler des Heizkessels. Hierbei muss der Wirkungsgrad der Anlage berücksichtigt werden. Es fallen keine Kosten für das Bestimmen von Volumen, Masse oder Wassergehalt des Brennstoffes an [Stockinger 1998]. Ein weiterer Vorteil liegt darin, dass der Energieholzlieferant einen großen Spielraum bezüglich der zu liefernden Schnitzelqualität hat. Tendenziell wird mit dieser Abrechnungsmethode der Anreiz geschaffen, die Qualität der Hackschnitzel zu erhöhen, da günstigere Brennstoffeigenschaften zu höheren Wärmeausbeuten führen [Hartmann et al. 1997]. Nachteilig wirkt sich aus, dass bei verschiedenen Lieferanten eine eindeutige Zuordnung nur durch eine exakte Lagerbewirtschaftung am Heizwerk möglich ist. Eine Veränderung des Wirkungsgrades beeinflusst die produzierte Wärmemenge und damit die Vergütung der Hackschnitzel.

Die Abrechnungsvarianten für Biomasse sind bei den Biomasse-Heizwerkbetreibern recht vielfältig. In aller Regel wird nur eine Abrechnungsvariante gewählt (86% aller Fälle). Am häufigsten wird die Abrechnung nach Gewicht und Wassergehalt genannt. Die Abrechnungsvarianten der bayerischen Biomasse-Heizwerkbetreiber, die an der Fragebogenaktion teilgenommen haben, sind in Abbildung 48 dargestellt:



**Abb. 48:** Abrechnungsvarianten für Biomasse bei den bayerischen Biomasse-Heizwerken

### Empfehlungen

Eine Abrechnung nach **Volumen (Srm)** wird unter folgenden Rahmenbedingungen empfohlen:

- die Vorgaben über Brennstoffqualität (Wassergehalt) sind von Seiten des Heizwerkbetreibers eng abgesteckt;
- es ist sichergestellt, dass die Vorgaben der Heizwerkbetreiber von den Hackschnitzellieferanten eingehalten werden können (Kenntnis über Ernteketten; Zwischenlagerung der Hackschnitzel);
- die Anzahl der Lieferanten von Energieholz ist überschaubar;
- die Holzartenzusammensetzung (Laub-/Nadelholz) ist bekannt und homogen.

Eine Ermittlung der Hackschnitzelvergütung über **Masse und Wassergehalt** ist dann sinnvoll, wenn:

- größere Mengen abgerechnet werden müssen;

- die Bandbreite der Hackschnitzelqualität von den Heizwerkbetreibern nicht definiert ist (sämtliche Hackschnitzelqualitäten werden angenommen; der Wassergehalt spielt bei der Verbrennung keine Rolle);
- die Lieferantenstruktur und die gelieferten Hackschnitzelqualitäten vielfältig sind;
- ein Anreiz geschaffen werden soll, möglichst trockene Hackschnitzel anzuliefern (durch entsprechende Preisstaffelung werden die Lieferanten die Qualität der Hackschnitzel danach ausrichten);
- vorhandene Waagen genutzt werden können.

Eine Abrechnung der Hackschnitzel über die produzierte **Wärmemenge** ist das geeignete Verfahren, wenn

- die Anzahl der Lieferanten gering ist;
- die Lagerbewirtschaftung so gestaltet werden kann, dass die gelieferten Partien abgrenzbar sind.

## 4.8 Transport der Biomasse

Grundsätzlich kann der Transport des Energieholzes vom Erzeugungsort zum Heizwerk in Eigenregie oder durch beauftragte Unternehmer erfolgen.

Der Grad der Aufarbeitung - *Vollbäume, Schlagabraum oder Hackschnitzel* - bestimmt die benötigten Transportmittel und die Organisation des Transportes. Entscheidende Einflussgrößen auf die Leistungsfähigkeit des entsprechenden Systems sind in erster Linie die Transportentfernung (Fahrgeschwindigkeit) und das realisierbare Transportvolumen. Bei Ernteverfahren, bei denen das Beladen unmittelbar mit dem Hacken verbunden ist, beeinflusst insbesondere die Hackerleistung die Transportleistung [Remler u. Fischer 1996].

### Hackguttransport (Transport von Rohschäften)

Der Ferntransport von Vollbäumen oder baumfallenden Längen (Hackgut) wird erforderlich, wenn nicht im Wald gehackt werden soll, sondern stationär beim Verbraucher bzw. an einem Zwischenlager. Abgesehen vom landwirtschaftlichen Betrieb, der das Hackgut mit schleppergezogenen Anhängern (Rungenwagen) über kurze Distanzen zu seinem Anwesen oder zu einem Zwischenlager transportiert, kommt für den Ferntransport nur ein mit einem Ladekran ausgestatteter Spezial-LKW in Frage. Entscheidend ist, dass beim Vollbaum- und Schlagabraumtransport das Transportgut so vorkonzentriert und gelagert wird, dass die Belade- und Wartezeiten minimiert werden [Remler u. Fischer 1996].

Vorteile kann der Hackguttransport dann bieten, wenn beispielsweise Umsetzzeiten für den Hacker auf Grund der möglichen massiven Vorkonzentration des zu hackenden Materials vermieden werden. Da der Transport von Rohschäften (Hackgut) aber eher die Ausnahme darstellt, wird hier auf die Darstellung von Leistungs- und Kostenwerten verzichtet (vgl. hierzu Stampfer [1997]; Remler u. Fischer [1996]; Patzak [1984]).

### Hackschnitzeltransport

In aller Regel werden die Hackschnitzel direkt in die Transportbehälter geblasen. Zusätzliches Gerät ist daher nicht erforderlich. Jedoch ist das Transportfahrzeug für die Dauer des Hackvorgangs an den Hackort gebunden. Da die Transportphase daher mit langen Wartezeiten belastet ist, zeichnen sich gerade solche Transportverfahren positiv aus, bei denen der eigentlichen Fahrzeugeinheit mehrere Ladeaufbaueinheiten zugeordnet sind. Dies kann einerseits mit dem Anhänger-Rotationssystem und andererseits mit dem Wechselcontainersystem geschehen [Patzak 1981].

Der Transport der Hackschnitzel ist in verschiedenen Verfahren möglich. Bei relativ kurzen Transportwegen kann häufig ein Schlepper mit einem oder zwei landwirtschaftlichen, hochwandigen Kippanhängern oder mit umgebauten Ladewägen eingesetzt werden. Je nach Ausführung dieser Anhänger kann das Transportvolumen zwischen 8 und 20 m<sup>3</sup> Hackschnitzel betragen.

Bei größeren Transportentfernungen und beim Einsatz von Hackern mit Container-Konstruktionen werden meist LKW mit großen Wechselcontainern zum Ferntransport der Hackschnitzel herangezogen [Remler u. Fischer 1996]. Das Fassungsvermögen dieser Wechselcontainer variiert zwischen 25 und 40 Srm Hackschnitzel. Denkbar ist außerdem der Einsatz von großen Sattelaufliegern mit einem Fassungsvermögen bis zu 90 Srm. In Tabelle 20 sind die durchschnittlichen Kapazitäten von verschiedenen Transportmitteln mit den damit verbundenen Energieinhalten gegenübergestellt.

Tab. 20: Durchschnittliche Kapazitäten und Energieinhalte verschiedener Transportmittel (n. Laucher [1995])

Transportmittel	Transportkapazität [Srm]	Transportkapazität [t]	Transportgut	Energieinhalt [kWh]
LKW mit Hänger Sattelzug	90	25	Rinde	55.000
			frische Hackschnitzel	65.000
LKW mit Container	25 - 40	7 - 10	Rinde	18.000
			frische Hackschnitzel	22.000

<b>Schlepper mit Anhänger</b>	10 - 12	3	frische Hackschnitzel	7.000
<b>Schlepper mit Anhänger</b>	15 - 20	6	frische Hackschnitzel	14.000

Bei der Betrachtung der Kosten des Hackschnitzeltransportes wurde auf die Angaben von Remler et al. [1996] und Stampfer [1997] zurückgegriffen. Ebenso wurden im Rahmen der Versuchseinsätze ermittelte Daten berücksichtigt.

Tab. 21: Transportkosten verschiedener Transportmittel bei unterschiedlichen Transportentfernungen

Transportmedium	Kapazität Srm	DM/Srm			
		5 km	10 km	15 km	30 km
<b>Schlepper+1 l.w.Anhänger<sup>1</sup></b>	12	5,8	9,3	12,7	
<b>Schlepper+2 l.w.Anhänger<sup>2</sup></b>	30	2,6	4,5	6,4	11,4
<b>LKW+1 Wechselcontainer<sup>2</sup></b>	25	2,6	3,6	4,5	7,7
<b>LKW+2 Wechselcontainer<sup>2</sup></b>	50	1,9	2,5	3,2	5,0
<b>LKW+2 Wechselcontainer<sup>1;3</sup></b>	68			3,9	4,6

Quellen:

1 Stampfer [1997] Kostensätze ÖKL-Richtwerte

2 Remler et al. [1996]; Maschinenringkostensätze

3 Direktbeladung durch Hacker

Stampfer [1997] ermittelte bei einer Transportentfernung von 62 km Transportkosten für ein Solofahrzeug mit 40 Srm von 7,- DM/Srm, für einen LKW-Zug mit 85 Srm 5,40 DM/Srm. Feller et al. [1998] errechneten bei einer Transportentfernung von 65 km und bei einem LKW-Zug mit zwei Wechselcontainern (62 Srm durchschnittliche Transportkapazität) Transportkosten von 8,- DM/Srm. Bei dem Versuch "Neustadt" ergaben sich für den Transport in das 20 Kilometer entfernte Heizwerk durchschnittliche Kosten von 9,- DM/Srm. Die eingesetzten Transportmedien waren jedoch für die Dauer des Befüllens an den Hackort gebunden.

Der Kostenvergleich in der Tabelle 21 zeigt, dass der Transport von Hackschnitzeln mit landwirtschaftlichen Gespannen bei einer Vollkostenkalkulation teurer ist als der Transport mit LKW und Wechselcontainern. Es darf bei dieser Betrachtung allerdings nicht vergessen werden, dass die Organisation des Transportes mit LKW einen größeren Aufwand erfordert. Insbesondere bei kleineren Mengen und kurzen Transportentfernungen kann es dennoch günstiger sein, eigene landwirtschaftliche Maschinen auszulasten.

Bei den bayerischen Biomasse-Heizwerken erfolgt die Anlieferung der Biomasse sowohl mit landwirtschaftlichen Gespannen als auch durch LKW mit Wechselcontainern bzw. normalen Kippmechanismen. Vereinzelt werden eigene Transportfahrzeuge eingesetzt, v. a dann, wenn Landwirte Mitglieder der Betreibergesellschaft sind.

### Empfehlungen

Der Transport mit **landwirtschaftlichen Anhängern und Schleppern** ist dann sinnvoll, wenn

- der vorhandene Fuhrpark ausgelastet werden soll;

- es sich um geringe Mengen und kurze Transportentfernungen handelt;
- mit entsprechenden Bordaufsätzen die Ladekapazität erhöht werden kann oder großvolumige Anhänger eingesetzt werden können;
- schnellfahrende (55 km/h) Schlepper eingesetzt werden.

Der Transport mit **LKW und Wechselcontainern** ist dann sinnvoll, wenn größere Entfernungen und Mengen zu bewältigen sind.

#### 4.9 Lagerung und Lagerhaltung von Hackschnitzeln bei Biomasseheizwerken

Bei der Betrachtung der erforderlichen Logistik für Holzheizwerke kommt der Lagerhaltung am Heizwerk eine entscheidende Bedeutung zu. Lagerkapazität und die Lagerart beeinflussen dabei die Brennstoffgesamtkosten und die vorangehende Logistikkette wesentlich [Stockinger 1998].

##### Lagerkapazität

Die mögliche Lagerkapazität von Biomasse-Heizwerken kann von zwei Strategien eingegrenzt werden:

- "Langzeitlagerung": größtmögliche Vorratshaltung, die sich am Jahresbedarf orientiert;
- "Kurzzeitlagerung": minimale Lagerkapazität - Brennstoffanlieferung erfolgt "just-in-time".

##### Langzeitlagerung

Die Lagerkapazität kann hierbei bis zur Höhe des jährlichen Brennstoffbedarfs reichen. Der wesentliche Vorteil dieser Variante besteht in der höchstmöglichen Versorgungssicherheit durch eigene Vorratshaltung [Stockinger 1998]. Durch die Möglichkeit, große Teile des Jahresbedarfs zu jedem Zeitpunkt im Jahr einzukaufen, können Preisschwankungen beispielsweise von Sägereholz vorteilhaft genutzt werden. Als essentieller Nachteil sind hierbei die Kosten für die

Lagerhaltung (Investitionskosten, Betriebskosten, Mietkosten und Zinskosten für das gebundene Kapital des Brennstoffes) zu berücksichtigen [Stockinger 1998]. Weiterhin muss bedacht werden, dass mit der Lagerung von Hackschnitzeln sowohl positive als auch negative Effekte verbunden sind. Einerseits kann unter idealen Lagerbedingungen eine Heizwerterhöhung durch Trocknung erreicht werden, andererseits wird dieser Umstand in jedem Fall mit einem Abbau der Trockensubstanz erkauft.

##### Kurzzeitlagerung

Bei dieser Variante wird i. d. R. keine Lagerkapazität außerhalb des Austragungs bunkers vorgehalten. Die Versorgungssicherheit erstreckt sich bei maximaler Bunkerfüllung auf nur wenige Tage. Hier entscheidet die Kapazität des Austragungs bunkers über die notwendigen Anlieferintervalle und damit über die erforderliche Hackschnitzellogistik. Die Anlieferung des Brennstoffes muss ständig erfolgen. Ein ideales Zusammenspiel zwischen Lieferanten und Heizwerkbetreibern (Zuverlässigkeit und Liefertreue) ist hier unbedingte Voraussetzung. Damit ist der Organisationsaufwand erhöht. In aller Regel setzt dieses Modell eine Zwischenlagerhaltung bei den Lieferanten voraus, insbesondere dann, wenn vom Heizwerkbetreiber ein trockener Brennstoff gefordert wird. Ohne restriktive Lieferverträge scheint die Verwirklichung der "just-in-time" Lieferung nicht möglich. Der größte Vorteil dieses Konzeptes liegt für den Heizwerkbetreiber in der Einsparung der Lagerhaltungskosten.

Tab. 22: Lagerkapazität bayerischer Heizwerke in % des Jahresbrennstoffbedarfs

Nennwärmeleistung (kW)	max. Lagerkapazität (% des Jahresbedarfs)			tatsächl. Lagerungsmenge (% des Jahresbedarfs)		
	Mittel	Min.	Max.	Mittel	Min.	Max
< 500	52	2	220	39	2	117
500 - 1.000	26	9	69	17	2	38
1.000 - 3.000	28	3	60	13	3	29
3.000 - 5.000 <sup>1</sup>	32			30		
> 5.000	17	11	32	15	8	30

Die Konzepte der bayerischen Heizwerke hinsichtlich der Lagerhaltung sind sehr unterschiedlich. In Tabelle 22 sind die Ergebnisse der Befragung hinsichtlich der Lagerkapazität dargestellt. Die Bandbreite reicht von der Möglichkeit, den kompletten Jahresbedarf einzulagern bis hin zu fehlenden Lagerräumen am Heizwerk. In aller Regel ist die mögliche Lagerkapazität höher als die tatsächlich eingelagerte Brennstoffmenge. Es zeigt sich, dass zwischen den verschiedenen Leistungsgruppen erhebliche Unterschiede bestehen. Die durchschnittliche Lagerkapazität ist bei der Leistungsgruppe unter 500 kW insgesamt am größten. Ebenso ist hier die Schwankungsbreite am weitesten. Mit zunehmender Nennwärmeleistung wird sie immer enger. Insgesamt kann festgestellt werden, dass bei den bayerischen Heizwerken sowohl die Extreme der just-in-time Anlieferung mit minimaler Vorratshaltung als auch die Langzeitlagerung verwirklicht sind. Dazwischen sind vielfältige Variationen anzutreffen, mehrere Heizwerkbetreiber halten noch Zwischenlager vor.

### Lagerform

Prinzipiell kann hier zwischen der Lagerung unter Dach und der Lagerung im Freien unterschieden werden (Kapitel 3). Wenn Hackschnitzel am Heizwerk außerhalb des eigentlichen Bunkers gelagert werden, geschieht dies in aller Regel unter Dach. Freilager stellen die Ausnahme dar.

### Monetäre Bewertung der Lagervarianten

Im Folgenden wird im Wesentlichen auf die Ergebnisse von Stockinger [1998] zurückgegriffen. Für die Bewertung der einzelnen Lagervarianten können nachfolgend aufgeführte Einflussgrößen definiert werden:

- Investitionskosten/Mietkosten und Betriebskosten für den Lagerraum und das Grundstück
- Zinskosten für das gebundene Kapital vom Zeitpunkt des Brennstoffeinkaufs bis zum Verbrauch
- Kostendifferenzen auf Grund der saisonalen Schwankungen der Brennstoffpreise
- Änderungen des Energiegehaltes der gelagerten Hackschnitzel durch Substanzabbau und Trocknung
- Bewertung der erhöhten Versorgungssicherheit bei eigener Lagerung

Verschiedene Lagerstrategien wurden am Beispiel für den Brennstoff Rinde monetär bewertet. In Tabelle 23 sind die Grundlagen dieser Bewertung dargestellt.

Tab. 23: Monetäre Bewertung verschiedener Lagerstrategien für den Brennstoff Rinde (n. Stockinger [1998])

	Langzeitlagerung			Kurzzeitlagerung
	Massivbau	Flugdachhalle	Freilager	Massivbau
Lagerdauer (in Monaten)	6	6	6	0,1
Änderung des Energiegehaltes während Lagerung (in %)	+ 1	+ 1	- 12	0
Einkaufspreis (in DM/Srm)	8,50	8,50	8,50	10,30
Einkaufspreis (in Pf/kWh)	1,21	1,21	1,21	1,47
Kosten der Energiegehaltänderung (in Pf/kWh)	- 0,015	- 0,015	0,16	0
Zinskosten (in Pf/kWh)	0,029	0,029	0,029	0
Lagerkosten (in Pf/kWh)	1,5	1,03	0,54	0,029
Brennstoffkosten gesamt (in Pf/kWh)	2,72	2,25	1,94	1,50
Kostenrelation bezogen auf die Kurzzeitlagerung	181%	150%	129%	100%

Die in Tabelle 23 aufgeführte Kalkulation zeigt deutlich, dass trotz höherer Winterpreise die Kurzzeitlagerung die geringsten Gesamtkosten aufweist. Weiterhin ist ersichtlich, dass die Lagerkosten die wesentliche Einflussgröße auf die Gesamtkosten bei der Langzeitlagerung darstellen. Die Auswirkungen der Energiegehaltänderung des Brennstoffes und die Zinskosten des gebundenen Kapitals während der Lagerung sind dagegen von untergeordneter Bedeutung.

**Empfehlungen:**

Kostengesichtspunkte bei der Bemessung der Größe des Hackschnitzellagers am Heizwerk bzw. einer möglichen Einbindung von Zwischenlagern sollten stärker als bisher bei der Heizwerksplanung berücksichtigt werden. Aus ökonomischer Sicht ist die Kurzzeitlagerung am Heizwerk die wirtschaftlichste Lagervariante. Wenn ein Lager für Hackschnitzel aus Gründen der Versorgungssicherheit notwendig wird, so sollten einfache Bauweisen, die letztendlich geringe Investitionskosten nach sich ziehen, *bevorzugt werden. Werden von der Heizanlage an den Wassergehalt geringe Ansprüche gestellt, bieten sich auch Freilager an.*

## 4.10 Aschenverwertung

Bei der Verbrennung von Holz in Biomasseheizwerken mit moderner Feuerungs- und Filtertechnik unterscheidet Obernberger [1994] zwischen drei verschiedenen Aschefraktionen: Grobasch (Rostasche), Zyklonflugasche und Feinstflugasche.

Voraussetzung für eine Verwertung von Holzaschen im Wald ist, dass diese ausschließlich aus der Verbrennung von unbehandeltem Holz stammen. Da die verschiedenen Aschefraktionen unterschiedliche Belastungen an Schwermetallen aufweisen, muss aus Vorsorge zum Schutz der Waldböden darauf geachtet werden, dass möglichst große Anteile der in den Holzaschen angereicherten Schwermetalle aus dem Stoffkreislauf entfernt werden. Eine sorgfältige Trennung der anfallenden Aschefraktionen ist daher unbedingt erforderlich. Für eine Ausbringung im Wald kommt derzeit nur die Grobasche in Betracht. Die Feinstflugasche ist dafür nicht geeignet und muss auf andere Weise verwertet oder deponiert werden. Bei der Zyklonflugasche entscheidet der jeweilige Belastungsgrad (v. a. Cadmium) über die Verwertbarkeit. In vielen Fällen kann ihre Ausbringung im Wald nicht empfohlen werden [Zollner et al. 1997]. Generell ist die Verwertung von Holzaschen in verschiedenen Bereichen der Wirtschaft, Landwirtschaft oder Kompostwirtschaft denkbar.

Lediglich in 20% der Fälle werden die verschiedenen Aschefraktionen bei den bayerischen Heizwerken getrennt. Die Ausbringung der Aschen erfolgt überwiegend auf landwirtschaftlichen Flächen.

### **Empfehlungen:**

Bei der Konzeption von Biomasse-Heizwerken sollte unbedingt darauf geachtet werden, dass die unterschiedlichen Aschefraktionen separat erfasst werden. Mit den Energieholzlieferanten sollten Vereinbarungen im Liefervertrag über die Rücknahme der Grobasche getroffen werden. Die Zyklon- und Feinstflugasche muss in der Regel deponiert werden.

## 5 Zusammenfassung

### Teilmechanisierte Hackschnitzel-Bereitstellungsverfahren

Zwei praxisreife, teilmechanisierte Bereitstellungsverfahren wurden arbeitswissenschaftlich untersucht. Die Bezeichnung der Verfahren erfolgte nach den Untersuchungsforstämtern: Im Verfahren "Würzburg" (Buchenbestände) entsprach die Hackguternte im wesentlichen der Aufarbeitung von "Industrieholz Lang" (IL). Die Vorgabezeiten des EST sind auf dieses Verfahren übertragbar.

Die Hackguternte im Verfahren "Neustadt" (Kiefern-mischbestand) war höher mechanisiert. In zwei Arbeitsschritten wurde zuerst auf der Rückegasse und auf der vom Zangenschlepper erreichbaren Zone geerntet und gerückt. Anschließend wurden die Bäume der Restfläche in einem Seillinienverfahren gefällt und an die Rückegasse vorgeliefert. Der Aufarbeitungsgrad beschränkte sich auf grobes Entasten und Zopfen bei etwa 8 cm. "Frei Waldstraße" ergab sich eine Systemleistung von 2,5 fm/h.

Die Leistung beim Hacken lag in beiden Verfahren bei 23 Schüttraummeter (Srm)/h. Beim Transport der Hackschnitzel zum Heizwerk wurde ein Wert von 12 Srm/h erreicht.

Die Kosten/Srm sind vergleichsweise günstig. Ab einem BHD von 17 cm können im Verfahren "Würzburg" kostendeckend Hackschnitzel "frei Werk" bereitgestellt werden. Die Verwertung als Brennholz für Selbstwerber oder als IL ist aber, sofern dafür eine Absatzmöglichkeit besteht, für den Waldbesitzer lukrativer.

Im Verfahren "Neustadt" ist es bereits ab einem BHD von 13 cm möglich, Hackschnitzel "frei Werk" kostendeckend bereitzustellen. Vor allem in Kiefern-Mischbeständen geringer Qualität kann dieses Verfahren für den Waldbesitzer eine bessere Wertschöpfungsmöglichkeit darstellen als das Sortiment Industrieholz (auf dem Preisniveau vom Frühjahr 1998).

### Lagerung und Trocknung von Hackschnitzeln

Einführend werden einige Grundlagen zur Einlagerung und Trocknung dargestellt. Bei der Trocknung spielen neben rein physikalischen Prozessen vor allem mikrobielle Vorgänge eine Rolle. Im Verlauf der mikrobiell verursachten Selbsterwärmung, die zur Trocknung beiträgt, wird Holzsubstanz abgebaut. Die Einflussfaktoren wie "Ausgangswassergehalt", "Hackschnitzelqualität" und "Sättigungsdefizit der Luft" werden erläutert.

Bei der Trocknung wird zwischen natürlichen und künstlichen Verfahren unterschieden. Natürliche Verfahren benötigen keinen Energieinput von außen. In einem Überblick werden Leistungsfähigkeit und Kosten gängiger

Trocknungsverfahren aufgezeigt.

Zwischen März und Juli 1998 wurde ein Unterdach-Trocknungsversuch durchgeführt. Die in Holzbauweise erstellte Halle hatte ein Fassungsvermögen von 1.000 Schüttraummeter. Neben dem Trocknungsverlauf wurde die Temperaturentwicklung innerhalb der Hackschnitzelschüttung erfasst. Der Wassergehalt der Hackschnitzel aus Fichtenkronen sank innerhalb der ersten zwei Monate auf unter 25%, wobei die Temperaturen in der Schüttung maximal 40°C erreichten. Die gute Durchlüftung der Grobhackschnitzel äußerte sich an den ähnlichen Temperaturverläufen an verschiedenen Messstellen innerhalb der Schüttung. Hinsichtlich der Trockenkosten je Schüttraummeter schnitt die Anlage auf Grund der hohen Trocknungsleistung sowie der geringen Investitionskosten sehr günstig ab.

Das in den Verfahren "Würzburg" und "Neustadt" gewonnene Hackgut wurde erst nach einer Zwischenlagerung im Wald gehackt. Sonnenexponierte und luftig gelagerte Polter trockneten deutlich besser ab als beschattete. Die unterschiedlichen Lagerbedingungen hinsichtlich der Besonnung ergaben Wassergehaltsdifferenzen von ca. 10 bis 15%.

### **Logistik bayerischer Biomasseheizkraftwerke**

Bis 1997 förderte Bayern 45 Biomasseheizkraftwerke mit einer Gesamtleistung von 197 MW. Zur Klärung logistischer Aspekte fand im Frühjahr 1998 eine schriftliche Befragung statt.

Annähernd 2/3 der eingesetzten Brennstoffe sind Waldhackschnitzel (63%). Desweiteren werden Sägeresthölzer (26%), Sonstige Biomasse (8%), und Rinde (3%) verfeuert. Mit steigender Nennwärmeleistung werden Waldhackschnitzel zunehmend durch billigere Brennstoffe ersetzt. Die aktuellen Preise für Waldhackschnitzel (Bezugswassergehalt 20 bis 30%) bewegen sich in einem Rahmen von 65,- bis 150,- DM/t. Das durchschnittliche Preisniveau für Sägerestholz und Landschaftspflegehölzer liegt zwischen 20,- und 80,- DM/t. Am wenigsten wird für Rinde bezahlt, ihre Preise schwanken von 20,- bis 40,- DM/t. Wassergehaltsangaben zu den genannten Beträgen wurden nicht gemacht.

Für den Einkauf von Waldhackschnitzeln sprechen vor allem emotionale Gründe sowie die gute Qualität. Das wichtigste Kriterium für den Einsatz der "Sonstigen Biomasse" ist mit Abstand der günstige Preis. Bei der Beurteilung der Angebotsstruktur im räumlichen Wirkungsbereich der Heizwerke schneidet Sägerestholz am besten ab. Neben dem günstigen Preis wird vor allem die Qualität positiv bewertet.

Hackschnitzel werden am häufigsten nach Gewicht und Wassergehalt abgerechnet. Wichtigste Marktpartner für Waldhackschnitzel sind örtliche Forstbetriebsgemeinschaften bzw. Waldbesitzervereinigungen. 70% der

Heizwerkbetreiber unterhalten nur zu einem einzigen

Waldhackschnitzellieferanten Geschäftsbeziehungen. Bei der "Sonstigen Biomasse" sind Sägewerke sowie der Holz- und Biomassehandel Marktpartner. Der überwiegende Anteil der Werke beurteilt die bestehenden Geschäftsbeziehungen als zufriedenstellend.

Schriftliche Lieferverträge zur gegenseitigen Absicherung (Qualität, Liefermengen, Lieferzeitpunkt) werden von 60% der Heizwerkbetreiber abgeschlossen.

Die Lagerhaltung an den Heizwerken reicht von der *just-in-time*-Anlieferung mit minimaler Vorratshaltung bis zur Langzeitlagerung der gesamten Jahresbrennstoffmenge.

Die anfallenden Aschefraktionen (Grob-, Zyklonflug- und Feinstflugasche) werden in 20% der Heizwerke getrennt erfasst. Die Entsorgung erfolgt überwiegend auf landwirtschaftlichen Flächen.

Weitere logistische Fragen wie Vermarktungsformen, Gestaltung von Lieferverträgen, Qualitätskriterien und Möglichkeiten der Qualitätsbeurteilung von Hackschnitzeln, Preisfindung, Abrechnungsvarianten sowie die Lösung von Transportproblemen werden erörtert. Dazu werden Empfehlungen für die forstliche Praxis gegeben.

## 6 Summary

### **Partially mechanised processes for the provision of woodchips**

A work study was carried out of two well tested, partially mechanised processes for the provision of woodchips. The processes were named after the forest offices in whose areas the research was conducted. In the "Würzburg" process (beech stands), the timber harvested for chipping corresponded essentially to that logged as long industrial timber. The standard times of EST are applicable to this process.

The harvesting of timber for chipping in the "Neustadt" process (mixed pine stand) was more highly mechanised in comparison. In a two-step process, first trees on the skidroad and those in the area reachable by the grapple skidder were harvested and skidded. Then the trees on the remaining area were felled using a cable winching process and deposited on the strip road. Processing of the trees was limited to rough delimiting and topping at approx. 8 cm. The system produced 2.5 cubic metres/hour "ex forest road".

Around 23 m<sup>3</sup>(loose)/h of woodchips were chipped in both processes. They were transported to the heat station at a rate of approximately 12 m<sup>3</sup>(loose)/h.

The calculated costs per m<sup>3</sup>(loose) are relatively favourable. From a BHD of 17 cm, costs are covered for the provision of woodchips at the heating plant using the Würzburg process. Selling the timber whole for firewood (to be processed by the purchaser) or as long industrial timber is however more lucrative for the forest owner, assuming he has a sales opportunity.

With the "Neustadt" process it is possible to cover costs delivering woodchips to the heating plant from a BHD of 13 cm. Particularly in mixed pine stands of lesser quality, this process gives the forest owner a better net product than harvesting for industrial timber (at the price level as in spring 1998).

### **Storage and drying of woodchips**

As an introduction, some basic information about storing and drying is presented. Apart from purely physical processes, microbiological processes especially play a role in drying. As the woodchips warm up due to the microbiological processes, which contribute to the drying, the wood is reduced in substance. The influencing factors, such as the "initial water content", "quality of the woodchips", and "saturation deficit of the air" are explained. For the drying, a distinction is made between natural and artificial processes. Natural processes require no external input of energy. The efficiency and costs of common drying processes are shown in an overview.

In the period March to July 1998 an experiment was conducted to investigate drying under a roof. The shed, built of wood, had capacity for 1000 cubic metres

(loose). As well as the progress in drying, developments in temperature within the pile of woodchips were recorded. The water content of the stored woodchips of spruce crown material decreased within the first two months to under 25%. Temperatures in the pile reached a maximum of 40 C. Good ventilation of the coarse woodchips was evident in similar developments of temperature at different points of measurement within the pile of woodchips. With regard to the cost of drying per loose cubic metre, this system came off very favourably because of the high drying performance and low investment costs.

The timber harvested for chipping in the "Würzburg" and "Neustadt" processes was chipped only after being stored temporarily in the forest. Stacks stored in the sun and with plenty of air circulation around them dried significantly better than those stored in shadow. Differences in water content of approx. 10 - 15% were established because of variations in the amount of exposure to the sun.

### **The logistics of Bavarian biomass heat (and power) stations**

Until 1997, 45 biomass heat (and power) stations with a combined output of 197 MW were subsidised. In the spring of 1998, a written survey was conducted to shed light on logistic aspects.

Forest woodchips make up a proportion of 63% of the fuels used. A further 26% is leftovers from sawmills, 8% material such as brushwood from landscape tending, and 3% bark is also incinerated. With increasing nominal thermal output, the use of forest woodchips decreases in favour of cheaper fuels. Current prices for forest woodchips (with a water content of 20 - 30%) range between 65 DM and 150 DM/t. The average price level of sawmill leftovers and material such as brushwood from landscape tending is between 20 DM and 80 DM/t. Bark costs least. Prices swing between 20 DM and 40 DM/t. Details of water content for these prices were not given.

Reasons given for buying forest woodchips are above all emotional reasons and good quality. The most important criterion by far for using "other" biomass is the favourable price. An evaluation of the fuels available in the region surrounding the heat station shows that leftovers from sawmills are best. Apart from the favourable price, the quality is especially valued.

Woodchips are docketed mainly according to weight and water content. Woodchip users' most important suppliers are local forestry companies and forestry owners' cooperatives. 70% of heat station operators maintain business relations with just one supplier of forest woodchips. In the case of "other" biomass, sawmills as well as timber and biomass dealers are the suppliers. The vast majority of heat stations judge existing business relations to be satisfactory.

Written delivery agreements for mutual safeguarding (quality, quantities delivered, delivery dates) are drawn up by just 60% of heat station operators.

Stock-keeping practices at the heat stations are very diverse. They range from "just in time" delivery with minimum stocking to long-term storing of the entire year's supply of fuel.

The resulting ash fractions (coarse ash, cyclone-separated ash and fine flying ash) are collected separately in just 20% of the heating stations. Disposal is predominantly over agricultural areas.

Further logistical questions such as marketing forms, the form delivery contracts take, quality criteria and ways of evaluating the quality of woodchips, pricing, different ways of calculating the value, and the resolution of transport problems are discussed. For these areas, recommendations for forestry practice are made.

## 7 Sonstiges

### 7.1 Literaturverzeichnis

AGEB (1997): Primärenergieverbrauch in der Bundesrepublik Deutschland 1998. Arbeitsgemeinschaft für Energiebilanzen, [http://www.diw-berlin.de/Projekte/AgEb/daten\\_home.htm](http://www.diw-berlin.de/Projekte/AgEb/daten_home.htm)

Baur, H. (1997): Verkauf von Forstprodukten. AFZ/Der Wald Nr. 12. S. 640

Bellmann, H. (1987): Zur Bedeutung der Holzfeuchte bei der Kesseldrucktränkung von Nadelhölzern. Holzzentralblatt, Nr. 126, S. 1858

Becker, G.; Pfeil, C. (1974): Ganzbaum-Waldhackschnitzel - technische und wirtschaftliche Aspekte der Waldhackung. Mitteilungen der Forstlichen Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg, Heft 62

Becker et al. (1986): Nutzung forstlicher Biomasse durch Hackung - Aufkommen, Bereitstellung und Qualität von Hackschnitzeln. Abschlussbericht zum EG-Projekt BOS/002/D(B), Freiburg

Becker, G.; Böltz, K.; Müller, A. (1987): Nutzung forstlicher Biomasse durch Hackung. Österreichische Forstzeitung, Nr. 4, S. 56-57

Berekoven, L.; Eckert, W.; Ellenrieder, P. (1991): Marktforschung; Methodische Grundlagen und praktische Anwendung. 5. Auflage, Gabler Verlag, Wiesbaden

Böhler, H. (1992): Marktforschung. 2. Auflage, Kohlhammer Verlag, Stuttgart

Brusche, R. (1983): Hackschnitzel aus Schwachholz; KTBL - Schrift 290, KTBL Schriftenvertrieb im Landwirtschaftsverlag, Münster, Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. (KTBL)

Busch, H.P. (1984): Bereitstellung von Waldhackschnitzeln aus Kiefern-Läuterungsbeständen. Forsttechnische Informationen, Groß-Umstadt, Nr. 10, S. 73-76

Bues, C.T.; Schulz, H. (1989): Festigkeit und Feuchtegehalt von Buchenholz aus Waldschadensgebieten. Holz als Roh- und Werkstoff Nr. 47, S. 512-520, Springer-Verlag, München

Bues, C.T.; Schulz, H. (1990): Festigkeit und Feuchtegehalt von Eichenholz aus Waldschadensgebieten. Holz als Roh- und Werkstoff Nr. 48, S. 85-89, Springer-Verlag, München

Bundesamt für Konjunkturfragen Bern (1988): Holz-Zentralheizungen. Eidg. Drucksachen- und Materialzentrale, Bern

Bundesamt für Konjunkturfragen Bern (1990): Energieholzversorgung, Brennschnitzel-Produktion und -Vertrieb. Eidg. Drucksachen- und Materialzentrale, Bern

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (1992): Umweltpolitik - Bericht der Bundesregierung über die Konferenz der Vereinten Nationen für Umwelt und Entwicklung im Juni 1992 in Rio de Janeiro

Dummel, K.; Branz, H. (1986): Holzernteverfahren. Schriftenreihe des Bundesministeriums für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten, Reihe A, Heft 33, Münster

Feller, S.; Remler, N.; Weixler, H. (1998): Vollmechanisierte Waldhackschnitzel-Bereitstellung. Berichte aus der LWF Nr. 16, Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft, Freising, 61 S.

Franz, F. (1971): Funktionen und Tabellen der Derbholzformhöhen für die wichtigsten Baumarten in Bayern. unveröffentlichtes Manuskript

Freudenthaler, P. (1987): Ansatzpunkte zur Vermarktung von Energiehackgut aus bäuerlichen Betrieben. Diplomarbeit am Institut für Agrarökonomik der Universität für Bodenkultur, Wien

Grosser, D.; Teetz, W. (1985): Einheimische Nutzhölzer (Loseblattsammlung). Centrale Marketinggesellschaft der deutschen Agrarwirtschaft m. b. H. und Arbeitsgemeinschaft Holz e. V., Bonn

Hammann, P.; Erichson, B. (1990): Marktforschung. 2. Auflage, UTB Gustav Fischer Verlag, Stuttgart

Hartmann, H.; Madeker, U. (1997): Der Handel mit biogenen Brennstoffen. Landtechnik-Bericht Heft 28, Freising

Häckel, H. (1990): Meteorologie. 3. Auflage, UTB 1338, Verlag Eugen Ulmer, Stuttgart

Hänger, M; Hugentobler, Ch.; Schuler, B.A. (1987): Die Versorgungsketten in "Wärme aus Holz - Grunddokumentation zur Nutzung der Holzenergie". Bundesamt für Konjunkturfragen, Bern

Jonas, A. (1982): Versuchsreihe "Forstliche Arbeitsketten bei der Gewinnung von forstlicher Biomasse im Zuge der Pflegemaßnahme." Niederösterreichische Landes-Landwirtschaftskammer, unveröffentlichtes Manuskript

Jonas, A. (1983a): Welche Hackerleistungen sind realistisch? Praktische Landtechnik, Nr. 4, S. 104-105

Jonas, A. (1983b): Hackschnitzelerzeugung: Holz Trocknung durch

Zwischenlagerung. Praktische Landtechnik, Nr. 5, S. 134-136

Jonas, A. (1986): Versuch: Hackschnitzelerzeugung-Erstdurchforstung. Abschlussbericht, Niederösterreichische Landes-Landwirtschaftskammer, unveröffentlichtes Manuskript

Jonas, A. (1987): Hackschnitzelerzeugung im Bauernwald. Österreichische Forstzeitung, Nr. 4, S. 54-55

Jonas, A. (1990): Wir brauchen einen Energieholzindex. Holzkurier

Jünemann, R; Pfohl, H.-Ch. (1989): Materialfluss und Logistik. Springer-Verlag, München

Kaltschmitt, M. (1995): Optimierung der Bereitstellungskette fester Biobrennstoffe. Der Schlüssel für eine wirtschaftliche Biomassenutzung? Schriftenreihe Nachwachsende Rohstoffe, Band 5: Logistik bei der Nutzung biogener Festbrennstoffe, Landwirtschaftsverlag GmbH, Münster

Knigge, W.; Schulz, H. (1966): Grundriss der Forstbenutzung. Verlag Paul Parey, Berlin

Kollmann, F. (1982): Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe. Band 1, 2. Auflage, Springer Verlag, Berlin

Krausenboeck, B. (1995): Erfassung der Zusammenhänge von Lagerungs- und Trocknungstechniken von Holzhackgut als Brennstoff. Diplomarbeit Ludwig-Maximilians-Universität, München

Kuratorium für Waldarbeit und Forsttechnik (1996): Forsttechnik für naturnahe Waldwirtschaft. Tagungsführer zur 12. KWF-Tagung 1996 in Oberhof, Groß-Umstadt

Laucher, A. (1995): Biomasse-Ortszentralheizung, technische und betriebswirtschaftliche Überlegungen. Unterlagen zum Seminar: Planung und Realisierung von Nahwärmekonzepten. Bauzentrum München

Lauer, M.; Bergmayer, M. (1986): Einfache Methoden zur natürlichen Trocknung von Hackgut und Rinde für kleine und mittlere Feuerungsanlagen bis 500 kW. Institut für Energieforschung, Graz

Löffler, H. (1992): Arbeitswissenschaft für Studierende der Forstwissenschaft. Manuskript zu den Lehrveranstaltungen, Lehrstuhl für Forstliche Arbeitswissenschaft und Angewandte Informatik, Freising

Marutzky, R.; Keserü, G. (1981/1982): Herstellung von Spanplatten aus gelagerten Hackschnitzeln. Sonderdruck aus Holzzentralblatt, Nr. 107/108, München

Messner, K.; Serentschy, W. (1978): Ökologische Faktoren und Pilzflora in industriellen Sägespäne-Piles. Holzforschung und Holzverwertung, München, Nr. 30 (4/5), S. 77-80

Mitchell, C. P.; Hudson, J. B.; Gardener, D.; Storry, (1988): A Comparative Study of Storage and Drying of Chips and Chunks in the United Kingdom, Production, Storage and Utilization of Wood Fuels. The Swedish University of Agricultural Sciences, Department of Operational Efficiency, Research Notes 134, Schweden

Morat, J.; Forbrig, A.; Graupner, J. (1998): Holzernteverfahren. Vergleichende Erhebung und Beurteilung der Holzernteverfahren in der Bundesrepublik Deutschland. KWF-Bericht Nr. 25, Groß-Umstadt

Müller, E. (1995): Studie der Materiallogistik ausgewählter Biomasse-Heizwerke des Bundeslandes Steiermark. Landesenergieverein Steiermark

Muellerbuchhof, G. (1993): Lagertrocknung von Holz-Hackschnitzeln. Institut für Energieversorgung, Ingenieurbetrieb der Vereinigten Energiewerke AG, Dresden

Obernberger, I. (1994): Mengen, Charakteristik und Zusammensetzung von Aschen aus Biomasse-Heizwerken. Tagungsband zum Symposium: Sekundärrohstoff Holzasche, Institut für Verfahrenstechnik der Technischen Universität Graz

Önorm M 7133: Holzhackgut für energetische Zwecke, Anforderungen und Prüfbestimmungen. Österreichisches Normungsinstitut, Wien

Ortmaier, E.; Thoma, H. (1993): Agrarökonomische Begleitforschung für Biomasse-Heizwerke in Bayern

Patzak, W. (1981): Untersuchungen zum Transport von Biomasse vom Wald zu einem zentralen Lagerplatz für die Verhältnisse in Emmelshausen. Unveröffentlichtes Manuskript

Patzak, W. (1984): Bereitstellung forstlicher Biomasse aus Erstdurchforstung in Fichten- und Kiefernbeständen. Forschungsbericht (C 076) Bereitstellung forstlicher Biomasse für das Bundesministerium für Forschung und Technologie, Teil I und Teil II, München

Plath, H.-J.; Kroop, M. (1996): Gewinnung und Aufarbeitung von Ganzbäumen zu Heizhackschnitzeln. AFZ/Der Wald Nr. 17, S. 956-958

Prankl, H.; Weingartmann, H. (1994): Hackguttrocknung Wippenham. Forschungsberichte der Bundesanstalt für Landtechnik. Wieselburg, Österreich

Refa (1991): Anleitung für forstliche Arbeitsstudien. REFA-Verband für

Arbeitsstudien und Betriebsorganisation e.V., KWF, Groß-Umstadt

Remler, N.; Fischer, M. (1996): Kosten und Leistung bei der Bereitstellung von Waldhackschnitzeln. Berichte aus der LWF Nr. 11, Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft, Freising, 48 S.

Remler, N.; Kornell, P. (1997): Aktueller Stand der Holzenergienutzung in Bayern. Holz-Zentralblatt Nr. 146, S. 2203

Remler, N. (1997): Logistische Aspekte der Waldhackschnitzel-Bereitstellung für Holz-Heizwerke. Tagungsband zum sechsten Symposium Biobrennstoffe und umweltfreundliche Energietechnik, Ostbayerisches Technologie Transfer Institut e. V. (OTTI)

Schildt, J. (1982): Producing fuel chips with Unimog truck. Folia Forestalia 519, Helsinki

Schuster, K. (1991): Überbetriebliche Aufbringung und Vermarktung von Brennhackschnitzeln. Landtechnische Schriftenreihe, Heft 179, Österreichisches Kuratorium für Landtechnik; Wien

Schwanitz, P. (1994): Hackschnitzelgewinnung in Dänemark. Forsttechnische Informationen, Nr. 10

Stampfer, E. (1997): Bereitstellung von Waldhackgut. Universität für Bodenkultur, Österreichische Elektrizitätswirtschafts-Aktiengesellschaft, Wien

Stockinger, H.; Obernberger, I. (1998): Langzeitlagerung von Rinde. Bericht zu Lagerversuchen von Rinde bei unterschiedlichen Randbedingungen. Teilbericht zum FWF-Forschungsprojekt P10669-ÖTE, Life-Cycle Analyse für Bioenergie, Institut für Verfahrenstechnik, Arbeitsgruppe Thermische Biomassenutzung, TU Graz, Österreich

Strehler, A. (1984): Möglichkeiten der Trocknung von Hackschnitzeln. Bayerische Landesanstalt für Landtechnik, Freising

Thörnquist, T.; Lundström, H. (1982): Health hazards caused by fungi in stored wood chips. Forest Product Journal, Nr. 32, S. 11-12, 29-32

Weingartmann, H. (1991): Hackguttrocknung. Österreichisches Kuratorium für Landtechnik, Institut für Landtechnik und Energiewirtschaft, Universität für Bodenkultur, Landtechnische Schriftenreihe, Heft 178, Wien, Österreich

Wippermann, H.J. (1985): Wirtschaftliche Nutzung von Waldrestholz. Holz-Zentralblatt, Nr. 95-98, S. 1389-1391, 1408-1410, 1418-1420

Wippermann, H.J. (1987 a): Rationelle Verfahren zur Gewinnung von Waldhackgut. Österreichische Forstzeitung, Nr. 9, S. 43-45

Wippermann, H.J. (1987 b): Brennstoff von nebenan: Restholz aus dem Großprivatwald. Holz-Zentralblatt Nr. 149, S. 2164-2165

Woerndl, R.; Doerffel, P. (1981): Einsatz eines Mobilhackers in Kiefern-Vornutzungsbeständen. Holz-Zentralblatt Nr. 136, S. 2091-2093

Wolf, E.; Pfeil, C. (1976): Versuchsbericht über den Einsatz eines mobilen Großhackers Morbak-Chipharvester Modell 22. Mitteilungen der Forstlichen Versuchsanstalt Baden-Württemberg, Freiburg

Zeilinger, J. (1992): Analyse der Wirtschaftlichkeit verschiedener Hackgutttrocknungssysteme. Diplomarbeit an der Universität für Bodenkultur, Institut für Landtechnik und Energiewirtschaft, Wien, Österreich

Zollner, A.; Remler, N.; Dietrich, H.-P. (1997): Eigenschaften von Holzaschen und Möglichkeiten der Wiederverwertung im Wald. Berichte aus der LWF Nr. 14, Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft, Freising

## 7.2 Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Mobiler Hacker JENZ HEM 30 D im Versuchseinsatz ("Würzburg")

Abb. 2: Hackschnitzelbereitstellung in Laubholzbeständen (Verfahren "Würzburg")

Abb. 3: Hacker Heizohack HM 4 im Versuchseinsatz ("Neustadt")

Abb. 4: Hackschnitzelbereitstellung in Nadelholzbeständen (Verfahren "Neustadt")

Abb. 5: Gliederung der GAZ (nach Löffler [1992])

Abb. 6: Datenaufnahme und Auswertung bei der Arbeitsstudie am Beispiel Fällen/Aufarbeiten

Abb. 7: Anteile der Teilarbeiten an der RAZ bei der Hackguternte ("Würzburg")

Abb. 8: Anteile der Teilarbeiten an der RAZ bei der Hackguternte ("Neustadt")

Abb. 9: Anteile der Teilarbeiten an der RAZ beim Hacken ("Würzburg")

Abb. 10: Anteile der Teilarbeiten an der RAZ beim Hacken ("Neustadt")

Abb. 11: Leistung beim Fällen/Aufarbeiten in Abhängigkeit vom Brusthöhendurchmesser des ausscheidenden Bestandes (Regression:  $TAP = -0,57 + 0,18 * BHD$  ( $r^2=0,63$ ))

*Abb. 12: Leistung beim Fällen/Aufarbeiten (Zangenzone) in Abhängigkeit vom Brusthöhendurchmesser des ausscheidenden Bestandes  
(Regression:  $TAP = -1,13 + 0,54 * BHD$  ( $r^2 = 0,52$ ))*

*Abb. 13: Leistung des Motorsägenführers im Seillinienverfahren in Abhängigkeit vom Brusthöhendurchmesser (Regression:  $TAP = -1,5 + 0,55 * BHD$  ( $r^2 = 0,42$ ))*

*Abb. 14: Verteilung der Kosten auf die einzelnen Teilarbeiten im Verfahren "Würzburg"*

*Abb. 15: Verteilung der Kosten auf die einzelnen Teilarbeiten im Verfahren "Neustadt"*

*Abb. 16: Verteilung der einzelnen Teilarbeiten auf die GAZ für LKW (links) und landwirtschaftliches Gespann (rechts)*

*Abb. 17: Jahreszeitlicher Trocknungszeitbedarf bezogen auf einem angenommenen Einschlagszeitpunkt im Sommer (verändert nach Brusche [1983])*

*Abb. 18: Zusammenspiel verschiedener Einflussgrößen auf die Mikroorganismenaktivität*

*Abb. 19: Verschiedene Verfahren der Hackschnitzeltrocknung*

*Abb. 20: "Trocknung durch Sonnenenergie" - monetärer und technischer Aufwand, Trocknungsdauer, Trockensubstanzabbau, Sporenbildung sowie Anlagengröße*

*Abb. 21: "Trocknung durch Windenergie" - monetärer und technischer Aufwand, Trocknungsdauer, Trockensubstanzabbau, Sporenbildung sowie Anlagengröße*

*Abb. 22: "System Bioconvert" - monetärer und technischer Aufwand, Trocknungsdauer, Trockensubstanzabbau, Sporenbildung sowie Anlagengröße*

*Abb. 23: "Kaltbelüftung" - monetärer und technischer Aufwand, Trocknungsdauer, Trockensubstanzabbau, Sporenbildung sowie Anlagengröße*

*Abb. 24: "Belüftungskühlung" - monetärer und technischer Aufwand, Trocknungsdauer, Trockensubstanzabbau, Sporenbildung sowie Anlagengröße*

*Abb. 25: "Technische Trocknung unterstützt durch Solarenergie" - monetärer und technischer Aufwand, Trocknungsdauer, Trockensubstanzabbau, Sporenbelastung sowie Anlagengröße*

*Abb. 26: "Warm- und Heißlufttrocknung" - monetärer und technischer Aufwand, Trocknungsdauer, Trockensubstanzabbau, Sporenbelastung sowie Anlagengröße*

*Abb. 27: Mit Hackschnitzeln befüllte Lagerhalle*

*Abb. 28: Hackschnitzelschüttung und Messeinrichtungen im Querschnitt*

*Abb. 29: Temperaturgänge der Sonden 1, 2 und 3 sowie der Halleninnentemperatur*

*Abb. 30: Häufigkeitsverteilung der Rückstände auf den einzelnen Sieben*

*Abb. 31: Verlauf der Schüttungs- und Halleninnentemperatur sowie Wassergehalt der Hackschnitzel*

*Abb. 32: Differenz von Schüttungs- und Halleninnentemperatur (Regression:  $y = 0.001x^2 - 0.29x + 21.938$ ;  $r^2 = 0.75$ )*

*Abb. 33: Kondensationsband im Bereich der Schüttungskrone*

*Abb. 34: Verteilung der in Bayern realisierten Biomasse-Heizwerke nach Biomasse-Feuerungsleistung*

*Abb. 35: Verteilung der in Bayern realisierten Biomasse-Heizwerke und Beteiligung bei der durchgeführten Umfrage*

*Abb. 36: Prozentuale Verteilung der eingesetzten Brennstoffe*

*Abb. 37: Prozentuale Verteilung der eingesetzten Brennstoffe nach unterschiedlichen Biomasse-Nennwärmeleistungen*

*Abb. 38: Jahresbedarf bayerischer Biomasse-Heizwerke (N = 24) in Schüttraummetern in Abhängigkeit von der Biomasse-Nennwärmeleistung*

*Abb. 39: Preisspannen für Biomasse bei der Abrechnung nach Gewicht*

*Abb. 40: Preisspannen für Biomasse bei der Abrechnung nach Schüttraummetern*

*Abb. 41: Gründe für den Zukauf von Waldhackschnitzeln seitens bayerischer Heizwerkbetreiber*

*Abb. 42: Gründe für den Zukauf der "Sonstigen Biomasse" (Sägeresthölzer, Landschaftspflegehölzer, Rinde) seitens bayerischer Heizwerkbetreiber*

*Abb. 43: Beurteilung verschiedener Kriterien der eingesetzten Biomasse durch Heizwerkbetreiber (in Schulnoten)*

*Abb. 44 Waldhackschnitzellogistik*

*Abb. 45: Heizwert und Wassergehalt von Holz*

*Abb. 46: Zustandekommen der Preise für Waldhackschnitzel*

*Abb. 47: Zusammenhang zwischen Heizwert in kWh/Srm und Wassergehalt für Fichtenhackschnitzel*

*Abb. 48: Abrechnungsvarianten für Biomasse bei den bayerischen Biomasse-Heizwerken*

### **7.3 Tabellenverzeichnis**

**Tab. 1:** *Charakteristika der Versuchsbestände*

Tab. 2: Kalkulierte Lohn-, Maschinen- und Gesamtkosten der einzelnen Teilarbeiten [Kuratorium für Waldarbeit und Forsttechnik 1996; Remler u. Fischer 1996]

Tab. 3: Gliederung der GAZ bei der "Hackguternte" (Fällen/Aufarbeiten/Vorliefern/Rücken) und beim "Hacken"

Tab. 4: Leistung (in fm/h) beim Vorliefern/Rücken (Verfahren "Würzburg")

Tab. 5: Ruckeleistung (in fm/h) mit Zangenschlepper

Tab. 6: Vergleich der Leistung der Verfahren "Neustadt", "Modifiziertes Goldberger Verfahren" und "Winden-Verfahren"

Tab. 7: Kostenübersicht für das Verfahren "Würzburg"

Tab. 8: Kostenübersicht für das Verfahren "Neustadt"

Tab. 9: Wassergehalt verschiedener Baumarten (waldfrisch) (verändert n. Bellmann [1987], Bues u. Schulz [1989, 1990])

Tab. 10: Zusammenhang zwischen Einlagerungswassergehalt, Lagerungsort und Substanzabbau bei der Hackschnitzellagerung

Tab. 11: Kriterien zur Beurteilung der verschiedenen Trocknungsverfahren

Tab. 12: Temperaturextrema an den einzelnen Messsonden

Tab. 13: Muster eines Hackschnitzelliefervertrages (Quelle: Bundesamt für Konkunkturfragen Bern [1990])

Tab. 14: Wassergehaltsklassen von Hackschnitzeln (nach ÖNORM M 7133)

Tab. 15: Größenverteilung von Energiehackschnitzeln (nach ÖNORM M 7133)

Tab. 16: Schüttdichte von Hackschnitzeln (nach ÖNORM M 7133)

Tab. 17: Aschegehaltsklassen von Hackschnitzeln (n. ÖNORM M 7133)

Tab. 18: Varianten für die Verrechnung von Hackschnitzeln [Bundesamt für Konkunkturfragen Bern 1988]

Tab. 19: Heizwert und Rohstoffpreis von Nadelholz-Hackschnitzeln in Abhängigkeit von Wassergehalt und Basispreis (n. Ortmaier et al. [1993])

Tab. 20: Durchschnittliche Kapazitäten und Energieinhalte verschiedener Transportmittel (n. Laucher [1995])

Tab. 21: Transportkosten verschiedener Transportmittel bei unterschiedlichen Transportentfernungen

Tab. 22: Lagerkapazität bayerischer Heizwerke in % *des Jahresbrennstoffbedarfs*

Tab. 23: Monetäre Bewertung verschiedener Lagerstrategien für den Brennstoff Rinde (n. Stockinger [1998])

## 7.4 Abkürzungsverzeichnis

Holz	Arbeitsstudien
fm Festmeter	AZ Allgemeine Zeit
Efm Erntefestmeter	EST Erweiterter Sortentarif
Srm Schüttraummeter	GAZ Gesamtarbeitszeit
t Tonne	h Stunde
t atro Tonne absolut trocken	MAS Maschinenarbeitsstunde
STM Stückmasse	RAZ Reine Arbeitszeit
IS Industrieholz Industrieschichtholz	kurz; TAP Technische Arbeitsproduktivität
IL Industrieholz lang	
m. R. mit Rinde	

BHD Brusthöhendurchmesser

w Wassergehalt

u Holzfeuchte

Energie

Sonstige

kWh Kilowattstunde

N Anzahl

KJ Kilojoule

ha Hektar

KW Kilowatt

MJ Megajoule

GJ Gigajoule

SKE Steinkohleeinheit

## Anhang A

Gliederung der Teilarbeiten in Ablaufabschnitte

Teilarbeit: **Fällen/Aufarbeiten**

Aufnahmekonzept für: Verfahren "Würzburg", Verfahren "Neustadt" (Zangenzone)

Bezugsdaten: Entnahmebaum mit Nummer

Ablaufabschnitt	Trennpunkt
Aufsuchen	Baum erreicht
Fällen	Baum liegt
Arbeiten im Zusammenhang eines hängengebliebenen Entnahmebaumes	Baum liegt
Aufarbeiten von Hackgut (Entasten, Zopfschnitt)	Zopfschnitt
Sonstiges (z.B. Technische Entnahme, Zusammenschneiden von Wipfeln, Warten auf Kollegen usw.)	Wiederaufnahme der Arbeit
Verteilzeit Sachlich (z.B. Wartung der Motorsäge)	Wiederaufnahme der Arbeit
Verteilzeit Persönlich (z.B. Weg von/zur Mittagspause)	Wiederaufnahme der Arbeit
Rüsten (Auf/Ab)	erster Baum/Werkzeug verstaut
Störung des Arbeiters durch Dritte	Wiederaufnahme der Arbeit
Pausen (Erholung, Mittag)	Wiederaufnahme der Arbeit
Nicht auswertbare Zeiten	Wiederaufnahme der Arbeit

Teilarbeit: **Seilwindenunterstütztes Fällen/Vorliefern**

Aufnahmekonzept für: Verfahren "Neustadt" (Seilzone)

Bezugsdaten: Entnahmebaum mit Nummer, Vorlieferentfernung (m)

Ablaufabschnitt	Trennpunkt
Fahren	Schlepper hält
Seilauszug	Seil stoppt
Anhängen eines Baumes	Seil wird geschlossen
Warten auf Fällschnitt	Seil läuft
Vorliefern	Seil stoppt

Warten auf Aufarbeitung	Seil läuft
Ablegen der Seillast in Rauheigen	Schlepper fährt
Sonstiges (z.B. Entfernen von hinderlichem Reisig)	Wiederaufnahme der Arbeit
Verteilzeit Sachlich (z.B. Wartung der Seilwinde)	Wiederaufnahme der Arbeit
Verteilzeit Persönlich (z.B. Weg von/zur Mittagspause)	Wiederaufnahme der Arbeit
Rüsten (Auf/Ab)	Schlepper hält/Wartungsarbeiten beendet
Störung des Arbeiters durch Dritte	Wiederaufnahme der Arbeit
Pausen (Erholung, Mittag)	Wiederaufnahme der Arbeit
Nicht auswertbare Zeiten	Wiederaufnahme der Arbeit

Teilarbeit: **Vorliefern/Rücken mit Seilwindenschlepper**

Aufnahmekonzept für: Verfahren "Würzburg"

Bezugsdaten: Anzahl, Polternummer (Volumen/Rückefahrt wurde am Polter durch Vollvermessung erhoben)

<b>Ablaufabschnitt</b>	<b>Trennpunkt</b>
Leerfahrt	Bergstütze wird abgesenkt
Seilauszug	Seil wird geschlossen
Vorliefern	Seil wird an Bergstütze geöffnet
Bündeln der Seillast	Bergstütze wird angehoben
Lastfahrt	Schlepper hält am Polter oder weiterem Stamm
Poltern	Schlepper fährt vom Polter weg
Sonstiges (z.B. Entfernen von hinderlichem Reisig)	Wiederaufnahme der Arbeit
Verteilzeit Sachlich (z.B. Wartung der Seilwinde)	Wiederaufnahme der Arbeit
Verteilzeit Persönlich (z.B. Weg von/zur Mittagspause)	Wiederaufnahme der Arbeit
Rüsten (Auf/Ab)	Schlepper hält/Wartungsarbeiten beendet
Störung des Arbeiters durch Dritte	Wiederaufnahme der Arbeit
Pausen (Erholung, Mittag)	Wiederaufnahme der Arbeit
Nicht auswertbare Zeiten	Wiederaufnahme der Arbeit

Teilarbeit: **Rücken mit Zangenschlepper**

Aufnahmekonzept für: Verfahren "Neustadt"

Bezugsdaten: Anzahl, Polternummer (Volumen/Rückefahrt wurde am Polter durch Vollvermessung erhoben)

Ablaufabschnitt	Trennpunkt
Leerfahrt	Zange wird geöffnet
Lastbildung	Zangenschlepper fährt los
Lastfahrt	Zangenschlepper hält am Polter oder weiterem Stamm
Poltern	Zangenschlepper fährt vom Polter weg
Sonstiges (z.B. Entfernen von hinderlichem Reisig)	Wiederaufnahme der Arbeit
Verteilzeit Sachlich (z.B. Wartung an Hydraulik)	Wiederaufnahme der Arbeit
Verteilzeit Persönlich (z.B. Weg von/zur Mittagspause)	Wiederaufnahme der Arbeit
Rüsten (Auf/Ab)	Zange wird geöffnet/Wartungsarbeiten beendet
Störung des Arbeiters durch Dritte	Wiederaufnahme der Arbeit
Pausen (Erholung, Mittag)	Wiederaufnahme der Arbeit
Nicht auswertbare Zeiten	Wiederaufnahme der Arbeit

Teilarbeit: **Hacken**

Aufnahmekonzept für: Verfahren "Neustadt", Verfahren "Würzburg"

Bezugsdaten: Anzahl, Polternummer (Volumen/Polter war durch vorhergehende Messung bekannt)

Ablaufabschnitt	Trennpunkt
Umsetzen/Fahren	Hacker hält
Hackerleerlauf	akustisch leise
Hackerlastlauf	akustisch laut
Warten (Container voll)	Wiederaufnahme der Arbeit
Verteilzeit Sachlich (z.B. Wechsel des Hackmessers)	Wiederaufnahme der Arbeit
Verteilzeit Persönlich (z.B. Weg von/zur Mittagspause)	Wiederaufnahme der Arbeit
Rüsten (Auf/Ab)	Hacker hält/Wartungsarbeiten beendet
Störung des Arbeiters durch Dritte	Wiederaufnahme der Arbeit
Pausen (Erholung, Mittag)	Wiederaufnahme der Arbeit
Nicht auswertbare Zeiten	Wiederaufnahme der Arbeit

## Anhang B

Herleitung der durchschnittlichen Dichten in den Versuchsbeständen (nach Grosser und Teetz [1985])

Baumart	mittlere atro Darrdichte (g/cm <sup>3</sup> )
Buche	0,66
Eiche	0,64
Hainbuche	0,79
Birke	0,61
Fichte	0,43
Kiefer	0,49
Lärche	0,55

Die mittleren Bestandesdarrdichten der Versuchsbestände errechnen sich aus den massengewogenen baumartspezifischen Darrdichten:

mittlere Bestandesdarrdichte w = 0% "Würzburg": **0,64 g/cm<sup>3</sup>**

mittlere Bestandesdarrdichte w = 0% "Neustadt": **0,54 g/cm<sup>3</sup>**

Bei einem Wassergehalt von 40% (vgl. Kap. 4.5) ergeben sich folgende Dichten:

mittlere Bestandesdichte w = 40% "Würzburg": **1,06 g/cm<sup>3</sup>**

mittlere Bestandesdichte w = 40% "Neustadt": **0,90 g/cm<sup>3</sup>**

## Anhang C

Gesamtübersicht über die Beurteilung und Empfehlung verschiedener Trocknungsverfahren für bestimmte KW-Leistungen

Verfahren	Einteilungskriterien				Anlagen- größe	
	Aufwand		Trocknungszeitbedarf	Trockensubstanzabbau		Sporenbildung
	Finanziell	Technisch	<i>Natürliche</i>	<i>Trocknung</i>		
Trocknen durch Sonnenenergie	+	+	+	+	++	KA
Trocknen durch Wind (und Sonne)	+	+	-	++	0 / -	KA / MA
Trocknen mit biologischer Selbsterwärmung	+ / 0	+ / 0	+ / 0	--	-	MA
			<i>Technische</i>	<i>Trocknung</i>		
Kaltlufttrocknung	0	0	0	+	0 / -	MA
Belüftungskühlung	0	-	0	+ / 0	0 / -	MA

Belüftungstrocknung						
a. mit natürlicher Wärmequelle						
- mit Sonnenenergie	0 / -	-	+	+ / 0	0 / -	MA / GA
b. mit künstlicher Wärmequelle						
- Warmlufttrocknung	++	++	--	--	--	GA
- Heißlufttrocknung	++	++	--	--	--	GA

Legende zu Anhang C

KA: Kleinanlagen mit einer Leistung bis 300 KW

MA: Mittlere Anlagen mit einer Leistung von 300 KW - 1 500 KW

GA: Großanlagen mit einer Leistung von > 1 500 KW

Wertungsstufen zu den einzelnen Kriterien:

++	sehr hoch
+	hoch
0	=
-	niedrig
--	sehr niedrig