

Bereitstellung von Hackgut zur thermischen Verwertung durch Forstbetriebe in Bayern

Stefan Wittkopf

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät Wissenschaftszentrum
Weihenstephan für Ernährung, Landnutzung und Umwelt der
Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen
Grades eines

Doktors der Forstwissenschaft (Dr. rer. silv.)

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr. Reinhard Mosandl

Prüfer der Dissertation:

1. Univ.-Prof. Dr. Walter Warkotsch
2. Univ.-Prof. Dr. Dr. h.c. Gerd Wegener

Die Dissertation wurde am 29.12.2004 bei der Technischen Universität
München eingereicht und durch die Fakultät Wissenschaftszentrum
Weihenstephan für Ernährung, Landnutzung und Umwelt am 20.04.2005
angenommen.

Vorwort

Die Idee für die vorliegende Arbeit entsprang meiner Tätigkeit als Fachberater für Holzenergie an der Bayerischen Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft (LWF). Ziel war es, Fragestellungen aus meiner Beratungspraxis aufzugreifen und mit wissenschaftlichen Methoden Kalkulations- und Entscheidungsgrundlagen zur Bereitstellung von Energieholz zu entwickeln.

Besonders danken möchte ich dem Leiter der Arbeit, Prof. Dr. Walter Warkotsch, Inhaber des Lehrstuhls für Forstliche Arbeitswissenschaft und Angewandte Informatik. Obwohl es sich um eine „externe“ Promotion handelte, hatte er stets ein offenes Ohr für mich und mein Thema. Er gab mir wertvolle, auch über den Inhalt der Arbeit hinausreichende Anregungen. In gleicher Weise gilt dies auch für seine Mitarbeiter am Lehrstuhl. Sie waren mir gegenüber stets für Diskussionen offen und unterstützen mich.

Für die Durchsicht des Manuskripts und die Bereitschaft, die Zweitkorrektur zu übernehmen, danke ich Prof. Dr. Dr. h.c. Gerd Wegener, Lehrstuhl für Holzkunde und Holztechnik, ebenso Prof. Dr. Reinhard Mosandl, Lehrstuhl für Waldbau und Forsteinrichtung, der die Prüfungskommission leitete.

Von Anfang an unterstützte mich bei meinem Promotionsvorhaben der Präsident der LWF, Olaf Schmidt, der die Anfertigung von Doktorarbeiten durch LWF-Mitarbeiter ausdrücklich begrüßt, nicht zuletzt wohl deshalb, weil sie den Zusammenhalt am Zentrum Wald-Forst Holz Weihenstephan fördern.

Dr. Gunther Ohrner, Leiter des Sachgebiets Waldarbeit und Forsttechnik an der LWF, zeigte stets auf sehr motivierende Art und Weise Interesse für die Inhalte meiner Beratungs- und Projektarbeit, auch hinsichtlich meiner Promotion. Er unterstützte mich dabei, dass ich 15 Monate Teilzeit arbeiten konnte. In dieser Zeit stellte ich die wesentlichen Teile der Arbeit fertig. Er setzte sich auch dafür ein, dass ich entlastet wurde durch einen zweiten Energieholzberater, Christoph Baudisch. Ihm sei an dieser Stelle für die gute und unkomplizierte Zusammenarbeit gedankt.

Mit Dr. Klaus Wagner und Christian Krichbaum bearbeitete ich Projekte im Bereich Holzenergie an der LWF. Die Ergebnisse trugen wesentlich zum Gelingen der vorliegenden Arbeit bei. Weitere Bausteine haben die Diplom-Forstwirte Martin Mall und Johann Schuhbauer geliefert, deren Diplomarbeiten ich betreute.

Bedanken möchte ich mich für die Unterstützung durch meine Sachgebietskollegen an der LWF. Hervorheben möchte ich dabei Norbert Remler, Helmut Weixler und Stefan Feller deren Studienergebnisse an vielen Stellen in diese Arbeit eingeflossen sind. Vielen Dank auch an Tessa Feller für Übersetzungsarbeiten.

Fachlich hilfreich waren mir auch die guten Kontakte zu Mitarbeitern von C.A.R.M.E.N. e.V. und dem Technologie- und Förderzentrum in Straubing.

Frau Dr. Alexandra Wauer danke ich für das professionelle Korrekturlesen meiner Arbeit.

Meiner Lebensgefährtin Carmen Weber danke ich für ihre Geduld und ihre moralische wie tatkräftige Unterstützung in der Schlussphase der Arbeit.

Freising, im Juni 2005

1	Einleitung	1
2	Zielsetzung und Aufbau der Arbeit	3
2.1	Zielsetzung	3
2.2	Aufbau.....	5
3	Situationsanalyse.....	7
3.1	Stand der energetischen Verwertung von Holz in Bayern	7
3.1.1	Scheitholz.....	7
3.1.2	Pellets	9
3.1.3	Hackschnitzel	12
3.2	Motivation zur Steigerung der energetischen Verwertung von Holz.....	16
4	Theoretische Grundlagen.....	18
4.1	Umrechnungsfaktoren	18
4.1.1	Holzfeuchte und Wassergehalt	18
4.1.2	Fest- und Schüttmaß	19
4.1.3	Volumen- und Gewichtsmaß.....	21
4.1.4	Gewichts- und Energiemaß	27
4.1.5	Energie- und Abrechnungsmaß.....	30
4.2	Energieholz-Potentiale.....	30
4.2.1	Waldenergieholz.....	32
4.2.2	Holz aus Energiewäldern.....	33
4.2.3	Flurholz.....	34
4.2.4	Industrierestholz	35
4.2.5	Altholz	36
4.3	Biomasseentnahme und Nährstoffaustrag.....	36
4.3.1	Biomasseentnahme	36
4.3.2	Nährstoffaustrag	38
4.4	Lagerung und Trocknung	39
4.5	Abrechnung.....	42
4.5.1	Abrechnungsmöglichkeiten.....	42
4.5.2	Empfehlungen für Lieferverträge.....	46
5	Methoden	53
5.1	Schriftliche Befragung.....	53
5.2	Modellierung.....	54
5.2.1	Biomasseentnahme und Nährstoffaustrag	54
5.2.2	Abstimmung von Hack- und Transportkapazität.....	55
5.2.3	Logistikketten für Waldhackschnitzel frei Heizanlage.....	57

5.3	Fallstudie	59
5.3.1	Fallstudie Biomasseentnahme und Nährstoffaustrag	59
5.3.2	Fallstudie zur Abhängigkeit der Hack- und Transportkosten	60
5.4	Zeitreihenanalyse	60
5.5	Deckungsbeitragskalkulation.....	61
5.6	Arbeitsstudie	61
5.7	Literaturstudie	61
5.7.1	Ablaufabschnitte bei der Bereitstellung von Waldhackschnitzeln	62
5.7.2	Vergleich der ausgewählten Logistikketten	63
5.8	Sensitivitätsanalyse	64
5.9	Nutzwertanalyse	65
6	Ergebnisse und Interpretation	72
6.1	Heizwerksumfrage.....	72
6.1.1	Beteiligung.....	72
6.1.2	Eingesetzte Mengen.....	73
6.1.3	Preise für Hackschnitzel	76
6.1.3.1	Nach Heizwerksgröße.....	76
6.1.3.2	Nach Vertragsbindung	78
6.1.3.3	Nach Lieferant	81
6.2	Biomasseentnahme und Nährstoffaustrag.....	83
6.2.1	Berechnungsmodell.....	83
6.2.2	Praxisbeispiel	85
6.2.3	Mehrausbeute und Mengenabschätzung.....	92
6.3	Vergleich der Bereitstellung von Industrieholz und Energieholz	96
6.3.1	Industrieholzpreise	96
6.3.2	Deckungsbeiträge.....	97
6.4	Ablaufabschnitte der Bereitstellung von Hackschnitzeln	102
6.4.1	Fällen/Aufarbeiten	102
6.4.2	Vorliefern/Rücken	103
6.4.3	Bündeln	105
6.4.4	Hacken	106
6.4.5	Transport.....	108
6.5	Abstimmung von Hack- und Transportkapazität	109
6.5.1	Modellrechnung.....	109
6.5.2	Sensitivitätsanalyse	112

6.6	Logistikketten zur Bereitstellung von Waldhackschnitzeln frei Heizanlage	114
6.6.1	Teilmechanisiert – „Kleinprivatwald“	115
6.6.2	Teilmechanisiert – „Seilschlepper“	118
6.6.3	Teilmechanisiert – „Rückewagen“	121
6.6.4	Teilmechanisiert – „Zangenschlepper“	124
6.6.5	Teilmechanisiert – „Hacken auf der Rückegasse“	127
6.6.6	Vollmechanisiert – „Harvester“	130
6.6.7	Vollmechanisiert – „Hackschnitzel-Harvester“	133
6.6.8	Vollmechanisiert – „Mehrfachfällkopf“	136
6.6.9	Vollmechanisiert – „Kronenholz – Rückewagen“	139
6.6.10	Vollmechanisiert – „Kronenholz – Bündler“	142
6.7	Vergleich der ausgewählten Logistikketten	145
6.7.1	Leistung und Kosten	145
6.7.2	Energieverbrauch	146
6.8	Entscheidungsfindung zur Auswahl einer Logistikkette	147
7	Diskussion	149
7.1	Methoden	149
7.2	Technologie	151
7.2.1	Auswahl der Logistikketten	151
7.2.2	Einfluss des Mechanisierungsgrades.....	151
7.2.3	Neue Forsttechnik	153
7.3	Ökologie	158
7.3.1	Nährstoffhaushalt	158
7.3.2	Energiebilanz.....	163
7.4	Sozioökonomie	165
7.4.1	Marktpreise für Energieholz	165
7.4.2	Sonstige positive Auswirkungen auf den Forstbetrieb.....	166
7.5	Entscheidungsfindung	167
8	Zusammenfassung	169
9	Summary	172
10	Verzeichnisse	175
10.1	Literatur	175
10.2	Abbildungen	184
10.3	Tabellen	186
10.4	Abkürzungen	189
11	Anhang	190

1 Einleitung

Laut der Energiebilanz 2001 stützt sich die **Energieversorgung in Bayern** zu 93 % auf Kohle, Erdöl, Erdgas und Uran (StMWVT, 2003). Wer fossile und nukleare Energieträger in dieser Größenordnung nutzt, verursacht zum einen erhebliche **Klima- und Umweltprobleme**, zum anderen nimmt er eine immense **Importabhängigkeit** in Kauf. Damit verbunden fällt auch die regionale Wertschöpfung sehr bescheiden aus.

Allein ein Drittel der gesamten Energie wird in Bayern verbraucht, um **Wärme** zu erzeugen. Neben der positiven Ökobilanz sprechen gerade auch ökonomische Gründe dafür, verstärkt mit Holz zu heizen. Unter allen erneuerbaren Energieträgern, aus denen sich Wärme gewinnen lässt, gilt Holz als kostengünstigste Variante. Zusätzlich konnte die **Verbrennungstechnik für Holz** in den letzten Jahren entscheidend weiterentwickelt werden. Vom elektronisch geregelten Kaminofen über Zentralheizungen für Scheitholz, Hackschnitzel oder Pellets, vom kommunalen Heizwerk mit Nahwärmenetz bis hin zu industriellen Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen – für alle Verbrauchergruppen und Größenordnungen stehen technisch ausgereifte Lösungen zur Verfügung.

Heute schon deckt die aus Holz gewonnene Energie in Bayern etwa 2,5 % des Primärenergiebedarfs. Bundesweit liegt der Anteil nur halb so hoch. Bund und Länder versuchen, ihn über verschiedene **Förderprogramme** zu erhöhen. Auf Bundesebene gilt das Marktanreizprogramm¹. Seit Jahren fließen etwa 50 % der daraus für Anlagen zur Holzverbrennung abgerufenen Mittel allein nach Bayern. Auf Landesebene gibt es in Bayern zusätzliche Zuschüsse. Das „Gesamtkonzept Nachwachsende Rohstoffe in Bayern“ des Bayerischen Ministeriums für Landwirtschaft und Forsten (StMLF, 2003) gibt Fördergrundsätze und auf unterschiedliche Größen und Betreiber von Heizwerken zugeschnittene Programme vor.

Um den Anteil der Holzenergie am Primärenergieverbrauch zu steigern, muss verstärkt Holz eingeschlagen werden. Dabei ist es grundsätzlich sinnvoll, Holz zunächst stofflich zu nutzen. Es ersetzt so im ersten Schritt stoffliche Produkte, die energieintensiv hergestellt werden oder gar direkt auf Erdöl als Rohstoff basieren. Wenn Holz am Ende des Produktweges zur Energiegewinnung verbrannt wird, resultiert daraus eine nochmalige **Substitution fossiler Energieträger**.

¹ Über die „Richtlinien zur Förderung von Maßnahmen zur Nutzung erneuerbarer Energien“ vom 25. Juli 2001 (Marktanreizprogramm) werden zentrale Holzheizungen bezuschusst.

Dennoch kann eine deutliche Steigerung des Anteils der Holzenergie am Primärenergieverbrauch kurz- bis mittelfristig wohl nur erreicht werden, wenn die direkte energetische Nutzung gefördert wird. Eine Ausweitung der stofflichen Nutzung würde erst langfristig – nach Durchlaufen der Produktzyklen – größere Potentiale für eine verstärkte energetische Nutzung bieten. Zudem konnten auch aufwändige Holzwerbekampagnen in der Vergangenheit die stoffliche Nachfrage bisher kaum ausweiten.

Einschlagserhöhungen, um gezielt Energieholz zu gewinnen, und die **verstärkte Nutzung von Holz** in Form von bisher nach dem Einschlag im Wald verbliebener Sortimenten, könnten dagegen eine verstärkte Energieholznachfrage auch kurz- bis mittelfristig decken.

Die Zahl der automatisch beschickten Holzheizungen wächst kontinuierlich. Insbesondere Heizwerke, die in größerem Umfang Hackschnitzel benötigen, sind für Forstbetriebe als Marktpartner interessant. Forstbetriebe benötigen aber Informationen, Hinweise und verlässliche **Kalkulationsgrundlagen** gerade zur Bereitstellung von Hackschnitzeln. Nur wenn rechnerisch nachvollzogen werden kann, dass es sich lohnt, Hackschnitzel bereitzustellen, werden sich Forstunternehmer, Händler und Waldbesitzer entsprechend engagieren.

2 Zielsetzung und Aufbau der Arbeit

2.1 Zielsetzung

Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, **Kalkulations- und Entscheidungsgrundlagen für Forstbetriebe** zur Bereitstellung von Energieholz für Hackschnitzelheizungen und Heizwerke mit Nahwärmenetzen zu entwickeln und darzustellen.

Mit den Ergebnissen dieser Arbeit sollen Forstbetriebe in die Lage versetzt werden, abzuschätzen, ob und wie sich Energieholz wirtschaftlich sinnvoll mobilisieren lässt. Die betriebliche Ausgangslage und Zielsetzung muss dabei individuell berücksichtigt werden.

Folgende zentrale Hypothese liegt der Arbeit zugrunde:

- **Forstbetriebe können unter den gegenwärtigen Bedingungen mit Gewinn Energieholz frei Heizanlage bereitstellen.**

Um Waldbesitzern eine umfassende Beurteilung zu ermöglichen, sollen folgende Sachverhalte dargestellt und Fragen beantwortet werden:

- a) Energieinhalt (Umrechnung/Abrechnung)
 - Wie viel Energie enthalten die verschiedenen Baumarten volumenbezogen?
 - Wie hängen die Größen festes und geschüttetes Volumen, die Masse und der Energieinhalt zusammen?
 - Nach welchen Einheiten kann das Energieholz gehandelt werden und was sollte dabei beachtet werden?
- b) Bereitstellung (modular nach Teilarbeitsschritten aufgebaut)
 - Welche Logistikketten sind für den jeweiligen Forstbetrieb sinnvoll?
 - Mit welchen Leistungen bzw. Kosten kann gerechnet werden?
 - Wie viel Energie wird zur Bereitstellung von Energieholz verbraucht?
- c) Wirtschaftlichkeit (Mengenabschätzung, Deckungsbeiträge)
 - Wie viel Energieholz fällt bei einer konkreten Holzerntemaßnahme an?
 - Wie viel bezahlen Heizwerke für Hackschnitzel?
 - Wann ist es wirtschaftlicher Energieholz bereitzustellen, wann Industrieholz?

d) Biomasseentnahme und Nährstoffaustrag

- Wie hoch ist der Anteil der einzelnen Baumkompartimente bei unterschiedlich intensiver Nutzung?
- Wie hoch ist der Nährstoffaustrag?
- Welche Regeln sollten eingehalten werden?

e) Nutzwertanalyse

- Wie lassen sich alle wichtigen Aspekte in eine abgewogene, nachvollziehbare Entscheidungsfindung einbeziehen?

Abbildung 1 zeigt exemplarisch, auf welche Fragen Waldbesitzer treffen, wenn sie erwägen, Hackschnitzel zu produzieren. Dabei soll deutlich werden, dass die verschiedenen Einflussgrößen gegenseitig von einander abhängen.

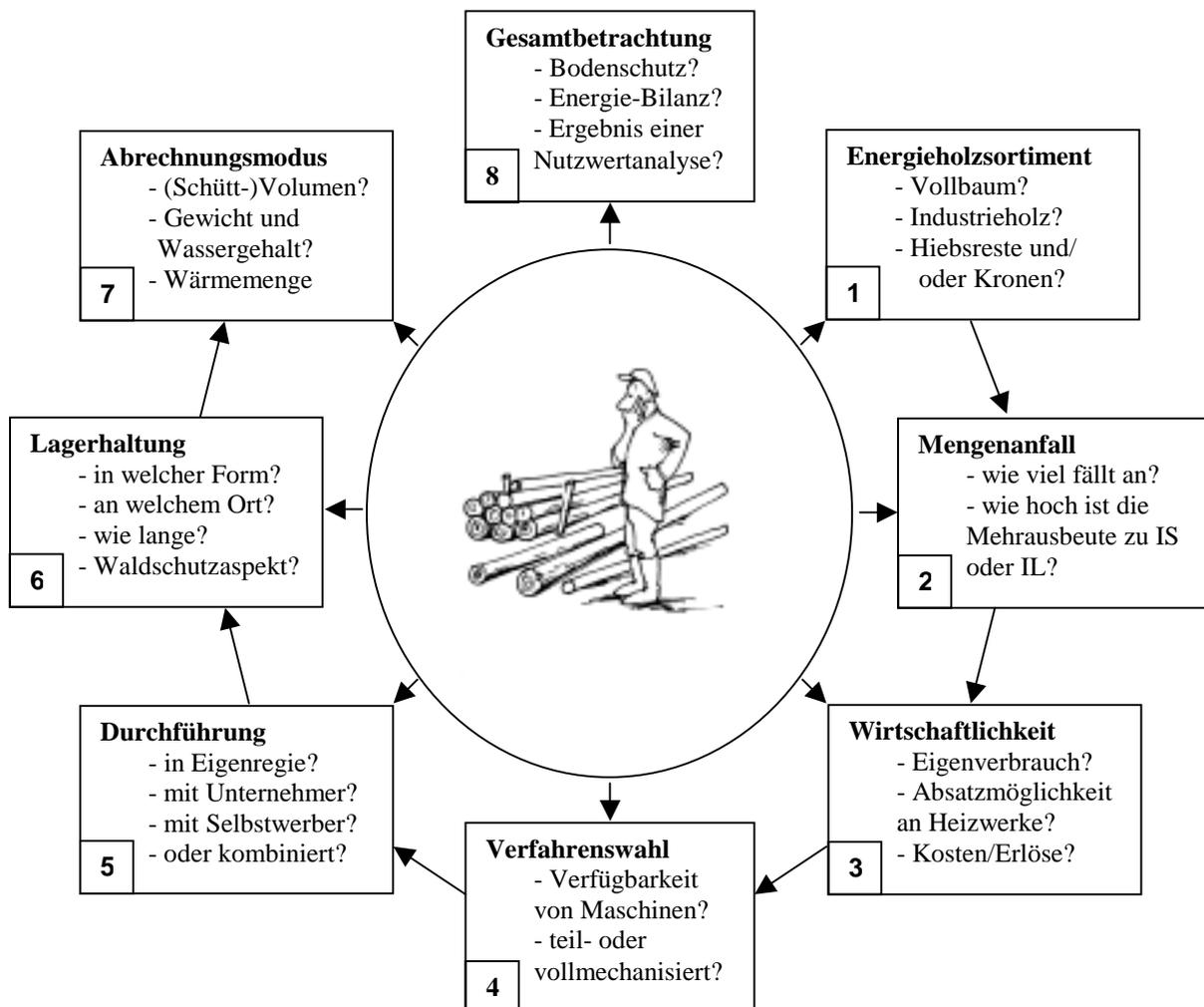


Abbildung 1: Exemplarische Darstellung von Einflussgrößen bei der Bereitstellung von Energieholz

2.2 Aufbau

Der Aufbau der vorliegenden Arbeit ist in Abbildung 2 schematisch dargestellt.

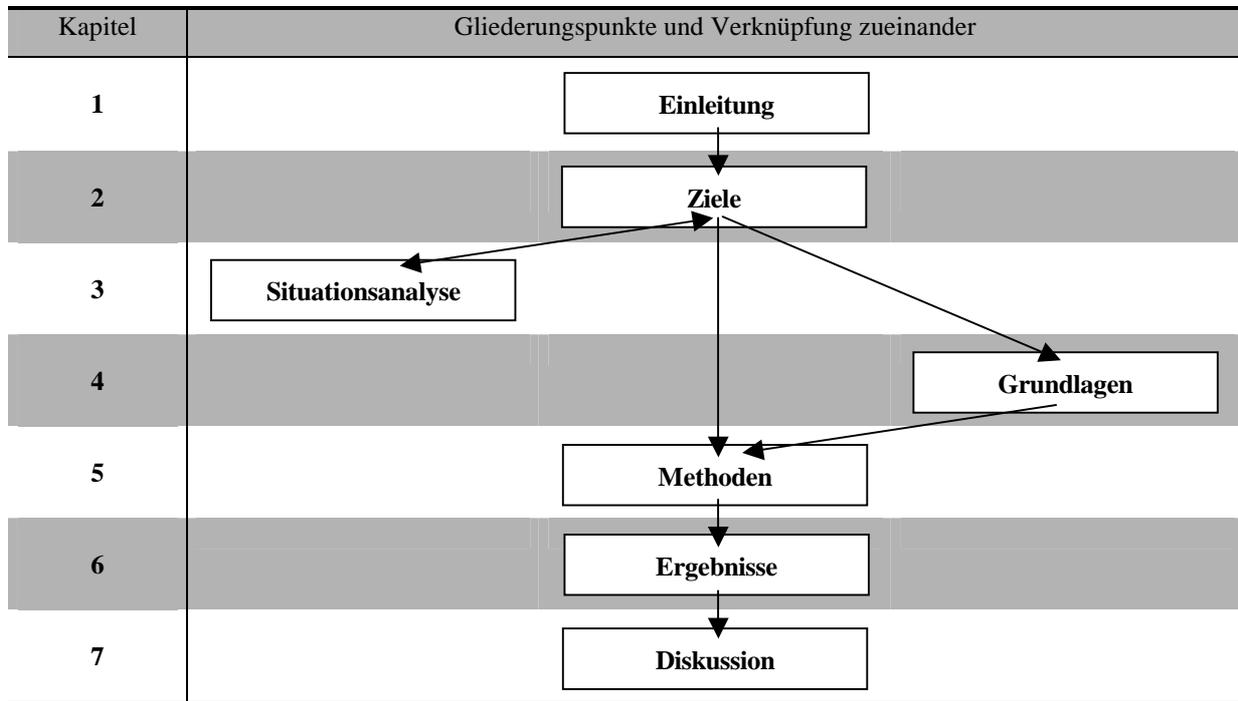


Abbildung 2: Aufbau der Arbeit

Kapitel 1 bietet eine kurze **Einleitung** in das Thema der Arbeit.

In Kapitel 2 werden die **Ziele**, die zentrale Hypothese und der Aufbau der Arbeit vorgestellt.

In Kapitel 3 wird zunächst eine **Situationsanalyse** der energetischen Verwertung von Holz in Bayern vorgenommen. Zielsetzung und Situationsanalyse bauen dabei aufeinander auf.

In Kapitel 4 werden **Grundlagen** angegeben, die Forstbetriebe benötigen, wenn sie Energieholz bereitstellen wollen. Dies entspricht bereits einem Teil der Zielsetzung dieser Arbeit. So werden Umrechnungszahlen, Energieholzpotentiale sowie Basisdaten zur Abschätzung von Biomasseentnahme und Nährstoffaustrag genannt. Hinweise zur Lagerung und zur Abrechnung von Hackschnitzeln runden die Grundlagen ab.

In Kapitel 5 werden die **Methoden** beschrieben, die zur Ermittlung der Ergebnisse dieser Arbeit angewendet wurden. Bei allen Umrechnungen zu Volumen, Masse oder Heizwerten von Holzsortimenten sowie der Erstellung eines Modells für die Biomasseentnahme und den damit verbundenen Nährstoffaustrag fließen im Kapitel Grundlagen angegebene

Basisinformationen ein. Zum Einsatz kommen u. a. die Methoden schriftliche Befragung, Arbeitsstudium, Literaturanalyse, Modellbildung und Nutzwertanalyse.

In Kapitel 6 werden alle **Ergebnisse** dargestellt und interpretiert. Zunächst werden die Ergebnisse der Umfrage bei bayerischen Heizwerksbetreibern präsentiert. In der Folge werden unter anderem zehn komplette Logistikketten vom Wald bis zur Heizanlage getrennt beschrieben und analysiert. Den Abschluss in Kapitel 6 bildet eine Nutzwertanalyse. Diese und die weiteren Ergebnisse dieser Arbeit, werden zur Überprüfung der beiden zentralen Hypothesen der Arbeit benötigt.

In Kapitel 7 geht die **Diskussion** zunächst auf die Methodik ein, gliedert sich dann übergreifend in die Bereiche Technologie, Ökologie und Sozioökonomie und schließt mit einer Betrachtung der durchgeführten Nutzwertanalyse ab.

3 Situationsanalyse

3.1 Stand der energetischen Verwertung von Holz in Bayern

Bayern ist mit 2,5 Mio. Hektar Wald das walddreichste deutsche Bundesland. Über **700.000** Bürger, Kommunen und sonstige rechtliche Personen agieren als **Waldbesitzer** (BSTMLF 2004a). Insbesondere im flächenmäßig vorherrschenden kleineren Privatwald wird bereits ein hoher Anteil des Einschlags als Energieholz genutzt. PERSCHL et al. (2002) weisen für private Forstbetriebe bis 10 Hektar Wald 50 %, für Betriebe von 10-200 Hektar 28 % des Einschlages im Jahr 2001 als Energieholz aus. Den größten Anteil des Energieholzes nimmt das Scheitholz ein, gefolgt von den Hackschnitzeln. Hackschnitzel und – von einer niedrigen Basis ausgehend – Pellets weisen hohe Zuwachsraten auf.

Die folgenden Daten zu **Produktion** und **Verbrauch** von Scheitholz, Pellets und Hackschnitzeln beziehen sich auf Bayern.

3.1.1 Scheitholz

Nach wie vor ist Scheitholz² der mengenmäßig bedeutendste Holzbrennstoff, den Forstbetriebe bereitstellen. Scheitholz wird auf konstantem Niveau vor allem in den ländlichen Regionen produziert und verbraucht.

Produktion

In Bayern stammen aus dem Wald pro Jahr etwa 680.000 Tonnen Trockenmasse in Form von Scheitholz (WAGNER und WITTKOPF 2000). Bezogen auf die Baumartenverteilung in Bayern³ entspricht dies ca. 1.360.000 Festmeter (fm) oder 1.940.000 Ster Holz, also annähernd **2 Mio. Ster jährlich**⁴. Geordnet aufgesetzt – einen Meter breit, 1 Meter hoch – könnte jedes Jahr ein 2.000 Kilometer langer Holzstoß aufgerichtet werden.

Die Preise für Scheitholz liegen in Ballungsräumen häufig deutlich höher als in ländlichen Regionen. Harthölzer wie Buche oder Eiche werden, ihrem höheren Energieinhalt pro Volumeneinheit entsprechend, teurer gehandelt als Nadelholz oder Weichlaubholz.

² Definition von Scheitholz im Anhalt an CEN (2003): ein geschnittener und gespaltener Holzbrennstoff, der im Haushalt in Holzverbrennungsstätten wie Öfen, Herden und Zentralheizungssystemen verwendet wird und bei dem das meiste Material eine Länge von 200 mm und darüber hat.

³ Fichte 48 %, Kiefer 23 %, Buche 11 %, Eiche 5 %, Sonstige 13 % (BSTMLF 2004a)

⁴ 1 Tonne Trockenmasse entspricht etwa 2 fm, 1 fm entspricht 1,43 rm (Ster).

Durchschnittlich kann der Ster gespaltenes Scheitholz für Bayern mit einem Marktwert von 45 € frei Heizung angesetzt werden (vgl. HARTMANN und MADEKER, 1997). Demnach stellen Land- und Forstwirte sowie spezialisierte Unternehmer jedes Jahr Scheitholz mit einem theoretischen **Marktwert von 90 Mio. €** bereit. Ein Großteil dieses Holzes gelangt allerdings nicht auf den freien Markt, da viele Waldbesitzer damit ihre eigenen Holzheizungen versorgen.

Ein Ster Holz ersetzt etwa 150 Liter Heizöl. 2 Mio. Ster ersetzen 300 Mio. Liter Heizöl. Gemessen am Ölpreis errechnet sich ein Wert von 105 Mio. €, der alternativ für Heizöl bezahlt werden müsste (ein Liter Heizöl kostet derzeit⁵ 0,35 €). Bei Heizöl fließt das Geld überwiegend in das Ausland, bei Brennholz bleibt die Wertschöpfung in der Region. Nimmt man überschlägig zwei Stunden für die Bereitstellung von einem Ster Brennholz an – von der Ernte des Holzes bis zur Auslieferung – , so könnte man **2.000 Vollzeit Arbeitsplätze** im Bereich Scheitholz ansetzen. In der Regel handelt es sich aber um Arbeit im Nebenerwerb. Scheitholz ermöglicht land- und forstwirtschaftlichen Betrieben eine verbesserte Auslastung ihrer Arbeitskapazität und liefert ein willkommenes Zusatzeinkommen.

Sowohl bei Produktion als auch Vermarktung von Scheitholz ist eine zunehmende **Professionalisierung** zu beobachten. Mittlerweile gibt es in Bayern – neben zahlreichen spezialisierten Unternehmern – acht Biomassehöfe, die Holzbrennstoffe in großem Umfang aufbereiten und vertreiben. Leistungsfähige (Säge-)Spaltautomaten sind inzwischen weit verbreitet.

MALL (2003) untersuchte im Rahmen seiner Diplomarbeit unterschiedlich mechanisierte Verfahren zur Scheitholzbereitstellung. Er erhob Leistungszahlen und Kosten für ein motormanuelles Verfahren für Meterholz sowie für das Spalten von Industrieholz mit Sägespaltautomaten. Für das **motormanuelle Verfahren** ermittelte der Autor für Fällen, Spalten und Aufsetzen von Buchenschwachholz eine Stundenleistung von 1,3 Ster. Die Kosten lagen bei 22 € für einen Ster Meterholz frei Rückegasse. Das Verfahren eignet sich als Nebenerwerb für Forstarbeiter oder versierte Waldbesitzer.

Zwei unterschiedlich mechanisierte, mobile **Sägespaltmaschinen** erreichten Leistungen von 4,6 bzw. 7,5 Ster je Stunde. Im Optimalfall sollte ein Arbeitsanfall von 2.000 bzw. 5.000 Ster pro Jahr für diese Maschinen gewährleistet sein. Die Kosten für das Sägen und Spalten liegen dann nur bei 8 bzw. 5 € je Ster. Arbeitsanfänge dieser Größenordnung lassen sich

⁵ Durchschnittswert für private Haushalte bei Bezug von 3.000 Litern Heizöl für die Jahre 2001, 2002 und 2003 (TECSON 2004)

jedoch nur als Hauptgewerbe oder im überbetrieblichen Einsatz erreichen. Die untersuchte vollmechanisierte, stationäre Anlage eignet sich nur für Produzenten mit einem Absatz von über 5.000 Ster, der beispielsweise durch Belieferung mehrerer Zwischenhändler (z. B. Baumärkte) oder eines Biomassehofes erreicht werden kann.

Verbrauch

Die Anzahl der Scheitholz-Öfen sowie deren Feuerungsleistungen, Jahresbetriebsstunden und die dort eingesetzten Holzmengen können nur geschätzt werden. Aus einer Gebäude- und Wohnungserhebung des Bayerischen Landesamtes für Statistik und Datenverarbeitung von 1993⁶ wird eine Anzahl von **1,76 Mio. Holzöfen und offenen Kaminen** abgeleitet (WAGNER und WITTKOPF 2000). Daneben existieren weitere 0,3 Mio. überwiegend mit Kohle, Koks oder Briketts beheizte Öfen. HRUBESCH (1996) geht davon aus, dass in 25 % dieser Öfen zusätzlich auch Holz verbrannt wird.

Nach einer vorsichtigen Schätzung werden in diesen Öfen etwa 905.000 Tonnen Trockenmasse Scheitholz jährlich verbrannt (WAGNER und WITTKOPF 2000). Vermutlich 75 % davon (HUBRESCH 1996) stammen direkt aus dem Wald. Der Rest setzt sich zusammen aus der Holznutzung in der Feldflur und in Gärten, aus Industrierestholz und Altholz.

3.1.2 Pellets

Das Pellet⁷ ist der jüngste Holzbrennstoff. Es erschließt neue Abnehmergruppen für Holzbrennstoffe, insbesondere auch im urbanen Umfeld.

Produktion

In der Regel fertigen **Betriebe der holzbe- und verarbeitenden Industrie** Pellets. Pellets müssen genormte Eigenschaften aufweisen. Für ihre Produktion sind kapitalintensive Anlagen und erhebliches Wissen nötig. In der Regel werden Hobelspäne oder trockene Sägespäne als Ausgangsmaterial eingesetzt. Pellets direkt aus Waldholz herzustellen ist nicht sinnvoll, solange noch erhebliche Mengen an Sägerestholz auf dem Markt verfügbar

⁶ Eine aktuellere derart detaillierte Erhebung existiert nicht. Eine Zusatzerhebung 2002 zum regelmäßigen Mikrozensus (1 %-Stichprobe der Haushalte) des Bayerischen Landesamtes für Statistik erfasste die überwiegend verwendete Energieart bei der Beheizung. Demnach werden 151.000 und damit 2,9 % der insgesamt 5,2 Mio. bewohnten Wohneinheiten Bayerns überwiegend mit der Kategorie „Holz oder sonstige erneuerbare Energien“ beheizt (RIMMELSPACHER 2004).

⁷ Die Definition von Pellet im Anhang an CEN (2003) lautet: ein mit oder ohne Bindemittel gepresster Biobrennstoff aus pulverisierter Biomasse, gewöhnlich in zylindrischer Form mit gebrochenen Enden; die Streubreite der Länge beträgt typischerweise 5 mm bis 30 mm.

sind. Dieses liegt bereits entrindet und zerkleinert vor und weist daher erhebliche Produktions- und Kostenvorteile auf.

Die Produktionskapazität für Pellets lag in Deutschland Ende 2002 bei 120.000 t pro Jahr. FISCHER (2004) erwartet bis Ende 2004 einen Anstieg auf über 220.000 t pro Jahr.

In Bayern lag nach eigenen Erhebungen die **Produktionskapazität** Ende 2003 bei 86.000 Tonnen (Tabelle 1). Bei den Angaben ist zu beachten, dass sich die Kapazitätsnennungen auf die maximale Anlagenauslastung beziehen. Diese wird häufig unterschritten, da die Anlagen teilweise nur saisonal arbeiten. Einige Betreiber orientieren sich am Anfall der eigenen Resthölzer, der bei Schwankungen oftmals nicht die volle Auslastung der Pelletpressen erlaubt.

Tabelle 1: Produktionskapazität für Holzpellets in Bayern (Stand Ende 2003)

Firma	Produktions-Standort	Produktionskapazität [t/a]
Schiller	Regen	ca. 30.000
Biomasseveredelung	Bobingen	ca. 30.000
Glechner/Wimmer	Pfarrkirchen	ca. 20.000
Haas	Falkenberg	ca. 3.000
Trocknungsgenossenschaften ¹	Weißenburg	ca. 2.000
	Neuhof-Zenn	ca. 2.000
Summe	N = 6	ca. 86.000

¹ Für die Trocknungsgenossenschaften wurde nur das jährliche Produktionsvolumen angeschätzt.

Die **Gestehungskosten** für Pellets gibt THEK (2001) mit 73,5 bis 94,6 € je Tonne ab Werk für Anlagen mit Trocknung der Späne und 52,2 bis 81,3 € für Anlagen ohne Trocknung an. Demnach erhöht die notwendige Trocknung, wenn feuchte Sägespäne verwendet werden, die Gesamtkosten deutlich. Die Werte beruhen auf Umfrageergebnissen aus Österreich und Südtirol. Sie beinhalten die Kosten für Rohstoff, Personal, Peripherie, Lagerung, Kühlung, Pelletierung, Zerkleinerung, Trocknung und allgemeine Investitionen (Abbildung 3).

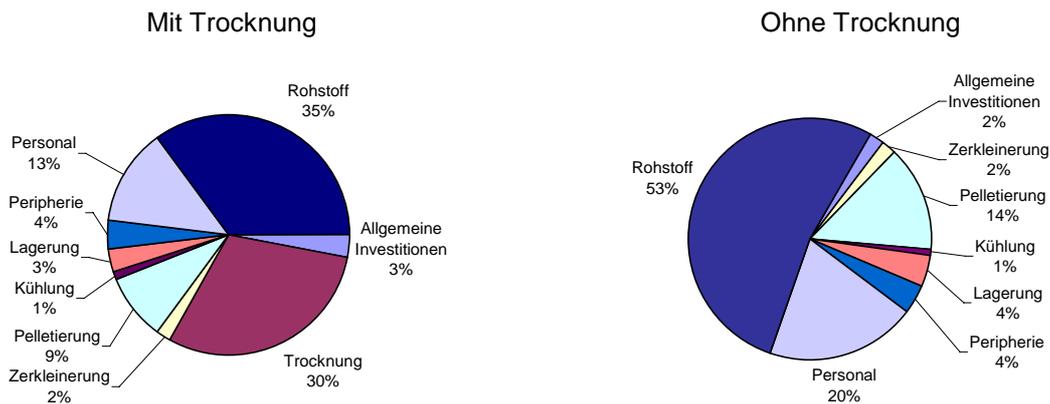


Abbildung 3: Durchschnittliche Zusammensetzung der Pelletproduktionskosten mit und ohne Trocknung der Holzspäne nach THEK (2001)

Lässt man die Rohstoffkosten außer acht, kann man aus den Ergebnissen von THEK (2001) durchschnittliche Produktionskosten je Tonne von 31,4 € bei trockenem und 55,5 € bei feuchtem Ausgangsmaterial ableiten. Die Ergebnisse sind allerdings nicht ohne weiteres auf Deutschland übertragbar. Der Personalkostenanteil ist höher anzusetzen, da die durchschnittlichen Löhne und Gehälter höher liegen als in Österreich⁸.

Verbrauch

FISCHER und PILZ (2004) schätzen den **Bestand an Pelletheizungen** in Deutschland zum Ende des Jahres 2003 auf rund 19.100 Anlagen (Stand 01.12.2003). Daraus lässt sich über einen geschätzten Verbrauch von 4 t je Heizung (FISCHER 2003) ein Brennstoffbedarf von etwa 80.000 t pro Jahr herleiten. Die Zuwächse lagen 2001 und 2002 bei 5.000 Anlagen pro Jahr, 2003 bei 6.000. Für 2004 schätzt die Pelletbranche selbst eine Zunahme von 9.000 Stück (FISCHER und PILZ 2004). Geht man davon aus, dass über die Hälfte der deutschen Pelletheizungen in Bayern stehen⁹, kann für Ende 2003 ein Bestand von 10.000 Anlagen angenommen werden. Analog zu FISCHER (2003) leitet sich daraus ein ungefährender Verbrauch von 40.000 t in Bayern ab.

Insgesamt ist anzunehmen, dass in Bayern Ende 2003 die Produktionskapazität mit 86.000 t mehr als doppelt so hoch wie der aktuelle Verbrauch an Pellets lag.

⁸ Das Bruttojahresgehalt 2003 eines Beschäftigten im Wirtschaftssektor „Säge-, Hobel und Holzimprägnierwerke“ lag in Deutschland bei 28.916 € (Fachserie 16, Reihe 2.3, Tabelle 7, STATISTISCHES BUNDESAMT 2004). Dieser Wert übersteigt um 11 % die in Österreich innerhalb dieses Sektors bezahlten 26.153 € (MILOTA 2004).

⁹ Bis Dezember 2003 sind 53 % der über das bundesweite Marktanreizprogramm geförderten Pelletheizungen in Bayern entstanden (FISCHER 2004).

Zum aktuellen **Pelletpreis** befragt C.A.R.M.E.N. E.V. (2003) monatlich etwa 25 vorwiegend in Bayern angesiedelte Händler. Die Ergebnisse werden grafisch im Internet dargestellt. Im Jahr 2003 lagen die Werte zwischen 160 und 220 €/je Tonne. Das Mittel betrug etwa 180 € und schwankte jahreszeitlich nur geringfügig. Die Preisangaben beziehen sich auf die Lieferung von fünf Tonnen frei Heizanlage im Umkreis von 50 km.

3.1.3 Hackschnitzel

Bäuerliche Waldbesitzer produzieren Hackschnitzel¹⁰ direkt aus Waldholz. Sie beschicken damit eigene Heizungen oder versorgen Heizwerke. Sägewerke nutzen ihr beim Einschnitt anfallendes Restholz zunehmend selbst. In gehackter Form dient es dazu, Trockenkammern für Schnittholz zu beheizen. Die höchsten Zuwachsraten bei den Verbrauchern verzeichneten die kommunalen Heizwerke.

Produktion

Sägeresthölzer wie Hackschnitzel, Säge- und Hobelspäne sowie Rinden fallen in Sägewerken an. Sie werden teilweise direkt von den Betreibern energetisch verwertet, teilweise über Restholzhändler einer stofflichen oder energetischen Nutzung zugeführt. Altholz bringen Entsorgungsbetriebe in den Handel. **Flurholz**¹¹ wird in zunehmendem Maße ebenfalls vermarktet, da die zuständigen Behörden beispielsweise die Pflege von Straßen ausschreiben. Bewerber müssen deshalb Erlöse aus der Hackschnitzelverwertung einkalkulieren, um konkurrenzfähig zu bleiben. Flurholz stellen teilweise die gleichen Unternehmen bereit, die auch im Wald Hackschnitzel produzieren.

Um den aktuellen Stand der **Waldhackschnitzelproduktion** festzustellen, befragte HARTIG (2000) im Frühjahr 2000 bundesweit Hackschnitzelerzeuger. Die Daten für die bayerischen Betriebe wurden gesondert ausgewertet (HARTIG 2001), um zu ermitteln, welche Rahmenbedingungen bei der Waldhackschnitzelproduktion dort gelten. Die Ergebnisse werden im Folgenden zusammengefasst:

Die jährlichen Produktionsmengen differierten bei den befragten 32 Unternehmen zwischen 100 und 50.000 t Srm Hackschnitzel. Die Gesamtheit der Befragten gliederte sich deutlich in zwei Gruppen, eine große mit geringen und eine kleine mit großen Produktionsmengen.

¹⁰ Definition von Hackschnitzeln im Anhalt an CEN (2003): gehackte holzartige Biomasse in Form von Stücken mit einer festgelegten Partikelgröße, hergestellt durch mechanische Behandlung mit scharfen Werkzeugen wie Messern.

¹¹ Das Holz, das bei der Pflege von Bäumen und Sträuchern außerhalb von Wäldern anfällt (vgl. Kapitel 4.2.3).

Die Erlöse frei Werk lagen umgerechnet zwischen 8,20 und 21,70 €/Srm Hackschnitzel. Das arithmetische Mittel betrug 14,20 €/Srm.

Mehr als die Hälfte der Hackschnitzel wurde aus Nadelholz, gut ein Drittel aus hartem Laubholz (Buche, Eiche) hergestellt. Am häufigsten wurden Nichtderbholz¹² wie Astholz und Baumkronen, darüber hinaus aber auch ganze Bäume mit Kronen zu Hackschnitzeln verarbeitet. **Teilmechanisierte Verfahrensketten** zur Waldhackschnitzelproduktion sind am weitesten verbreitet. Seilwindenunterstütztes Fällen, Rücken mittels Seil-, Klemmbank- oder Zangenschleppern, Hacken auf der Waldstraße mit kranbeschickten Hackern und Hackschnitzeltransport per LKW kennzeichnen sie im Wesentlichen.

Im Vergleich zur Auswertung der bundesweiten Projektstudie „Verfahrensketten in der Waldhackschnitzelproduktion“ des Instituts für Forstliche Arbeitswissenschaft und Verfahrenstechnologie (HARTIG 2000) konnten für Bayern keine erheblichen Differenzen festgestellt werden. Dies ist unter anderem auf eine hohe Beteiligung bayerischer Betriebe an der Projektstudie zurückzuführen. Bemerkenswerterweise lag jedoch bei befragten bayerischen Betrieben der mittlere Erlös frei Heizwerk um 0,50 €/je Schüttraummeter Hackschnitzel höher als bei der Projektstudie. Ursache dafür war wohl die bis in das Jahr 2000 geltende **Förderrichtlinie für Heizwerke in Bayern**. Sie schrieb einen Anteil von 50 % aus direkter land- oder forstwirtschaftlicher Produktion am gesamten Brennstoffmix vor.

Für die Produktion von Hackschnitzeln stehen unterschiedlichste für den Einsatz im Forstbereich geeignete mit **Kran beschickte Hacker** zur Verfügung. Vom Anbauhacker mit Antrieb über die Zapfwelle über Anhängenhacker unterschiedlichster Leistungsfähigkeit mit und ohne eigenen Antriebsmotor bis hin zu LKW-Aufbauten mit mehreren Hundert PS Leistung stehen zumindest in Süddeutschland Hacker in ausreichender Zahl zum Einsatz bereit. Einer Erhebung von WITTKOPF und NEUGEBAUER (2004) zufolge halten Unternehmer in Bayern mindestens 130 mit Kran beschickte Hacker vor.

Verbrauch

Die Anlagen, in denen Hackschnitzel verbrannt werden, gliedern sich grob in

- kleinere Hackschnitzelheizungen bis 100 kW,
- geförderte Heizwerke und
- nicht geförderte Heizwerke.

¹² Als Nichtderbholz wird die oberirdische Biomasse unter 7 cm Durchmesser mit Rinde bezeichnet.

Die Anzahl der **kleineren Hackschnitzelheizungen** in Bayern und deren Holzverbrauch lassen sich nur grob abschätzen. Aus Angaben des Landesinnungsverbands des Bayerischen Kaminkehrerhandwerks errechnen sich 992 Erstmessungen von mechanisch beschickten Feuerungsanlagen ohne Pelletfeuerungen als Durchschnitt der Jahre 1996 bis 2002 (WAZULA 2003). Eine Mindestbetriebszeit von zehn Jahren vorausgesetzt, dürfte die Zahl der kleineren Hackschnitzelheizungen bis 100 kW damit mindestens bei 10.000 liegen. Nimmt man eine durchschnittliche Leistung von 50 kW und 1.300 Volllaststunden an, errechnet sich ein Verbrauch von 180.000 Tonnen Trockenmasse pro Jahr. Unterstellt sind dabei ein Jahresnutzungsgrad der Heizanlage von 80 % sowie ein Heizwert von 4,5 MWh je Tonne Trockenmasse (vgl. Kapitel 4.1.5 und 4.1.4).

Dazu kommen etwa 436.000 Tonnen Trockenmasse pro Jahr bei **nicht geförderten Heizwerken** in Bayern (WAGNER und WITTKOPF 2000). Davon stammen allerdings nur 2 % (rund 9.000 Tonnen Trockenmasse) direkt aus dem Wald. 8 % sind Altholz, zu 90 % wird Industrierestholz eingesetzt. Weitere 513.000 Tonnen Trockenmasse mit nur geringer Beteiligung von Waldholz werden in den bayerischen Schreinereien und Zimmereien verbraucht, die ihre Resthölzer selbst zum Heizen und Trocknen nutzen (WAGNER und WITTKOPF 2000).

Seit dem Jahr 1992 entstanden über ein Programm des Bayerischen Ministeriums für Landwirtschaft und Forsten 125 **geförderte Heizwerke**, Heizkraftwerke und Trocknungswerke über 500 kW Gesamtleistung. Abbildung 4 zeigt die räumliche Lage der Heizwerke.

In der Summe verbrennen diese etwa 300.000 Tonnen Trockenmasse Holz pro Jahr. Davon müssen, über die unterschiedlichen **Brennstoffauflagen** der einzelnen Anlagen gesichert, mindestens 110.000 Tonnen Trockenmasse Hackschnitzel aus direkter land- oder forstwirtschaftlicher Produktion stammen. Der tatsächliche Anteil der Waldhackschnitzel liegt wohl deutlich höher (vgl. Kapitel 6.1.2).



Abbildung 4: Karte der geförderten Heizwerke mit Waldhackschnitzelauflage in Bayern (Stand 31.12.2003)

3.2 Motivation zur Steigerung der energetischen Verwertung von Holz

Derzeit wird in Bayern der Zuwachs der heimischen Wälder nur zu zwei Dritteln geerntet. Zum einen wird dabei das **Wertschöpfungspotential** nicht voll genutzt, zum anderen wird eine einfache Möglichkeit verschenkt, den klimaschädlichen Treibhauseffekt einzudämmen.

Die **CO₂-Bilanz** bei der Nutzung von Holz als regenerativem Energieträger ist im Gegensatz zu den fossilen Konkurrenten neutral. Auch die „graue Energie“¹³, die für die Aufbereitung und Bereitstellung eines Energieträgers frei Verbraucher aufgewendet werden muss, unterschreitet häufig deutlich aufgrund der kürzeren Transportwege die für die fossilen Energieträger aufgewendete.

Hackschnitzel bereitzustellen ist häufig angewandter **Waldschutz**. Den rindenbrütenden Schadinsekten wird die Vermehrungsgrundlage entzogen. Zudem bietet der Verkauf von Hackschnitzeln die Möglichkeit, Waldschutzmaßnahmen kostendeckend zu gestalten, z. B. wenn von Borkenkäfern befallenes Holz gehackt und an Heizwerke verkauft wird.

Die Produktion von Hackschnitzeln für Holzheizwerke kann als **Preisregulativ und Mengenventil** gegenüber der holzbe- und verarbeitenden Industrie dienen. Häufig fällt Industrieholz als Kuppelprodukt bei der Aushaltung höherwertiger Sortimente an, teilweise in großen Mengen. Gleichzeitig unterliegen die Märkte für Industrieholz einem starken Preisdruck. Papier und Zellstoff sowie Span- und Faserplatten weisen tendenziell fallende Absatzpreise aufgrund der zunehmenden Globalisierung auf. Neben der negativen Preisentwicklung kommt es auch immer wieder zu Abfuhrstopps, wenn – mangels Absatzmöglichkeiten – die Industrie die Produktion drosselt. Dies erschwert die Planung und kann die Handlungsfreiheit von Forstbetrieben einengen.

Das Sortiment Energieholz stellt nur geringe Anforderungen an Baumart, Sortierung, Qualität und Einschlagszeitpunkt. Häufig charakterisiert ein **hoher Eigenleistungsanteil** seine Bereitstellung, da sich betriebseigene Maschinen und Arbeitskräfte einbinden lassen. Ein **geringes Investitionsrisiko** zeichnet die Holzenergie aus, die deshalb ein neues Geschäftsfeld für die Land- und Forstwirtschaft bietet. Der Absatzmarkt „Wärme“ ist in Mitteleuropa sicher und vergleichsweise gut einzuschätzen. Auch für Landwirte ohne Waldbesitz besteht die Möglichkeit, auf landwirtschaftlichen Stilllegungsflächen Holz zu produzieren (vgl. Kapitel 4.2.2).

¹³ Die „graue Energie“ entspricht der Energie, die in einen Energieträger gesteckt wurde, bis er verbraucht wird. Zu berücksichtigen ist auch ein eventueller Energieaufwand bei der Entsorgung nach Gebrauch. Die Größenordnung der grauen Energie stellt eine wichtige Information für energie- und umweltrelevante Entscheidungen dar.

Häufig ist bei Waldbesitzern bereits aus dem Betrieb kleinerer Hackschnitzelheizungen **Erfahrung vorhanden**. Sie erlaubt es, auch weiterreichende Dienstleistungen wie den Betrieb der Heizanlage bis hin zur kompletten Lieferung von Wärme an Endkunden anzubieten. So werden Arbeitsplätze in der Region erhalten und neu geschaffen. Gleichzeitig wird die Pflege der Kulturlandschaft weiter gewährleistet.

Abbildung 5 zeigt, dass die Preise für die fossilen Energieträger zur Wärmeerzeugung, Erdgas und Heizöl, stetig zunehmen. Dies gilt auch für die **Fernwärmepreise**, deren Anstieg aber deutlich ausgeglichener verläuft. Die Preise für Industrieholz dagegen bewegen sich seit Jahren kaum.

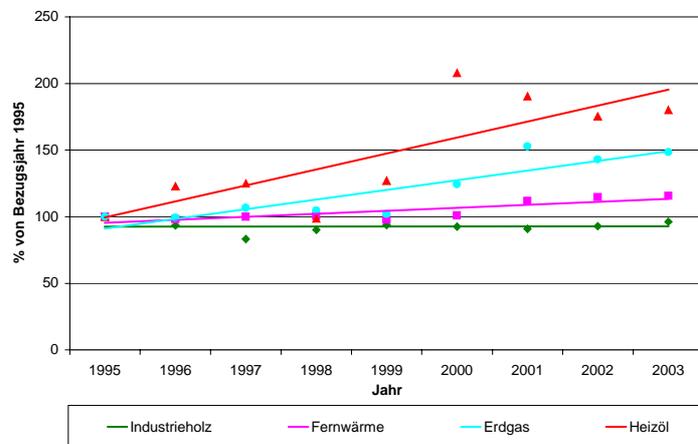


Abbildung 5: Entwicklung der Preise für Industrieholz, Fernwärme, Heizöl und Gas; Bezugsjahr 1995; (STATISTISCHES BUNDESAMT 2004, Fachserie 17, Reihen 1 und 2)

Bei der stofflichen Nutzung stagnieren die Holzvergütungen seit längerem. Dort führt der Trend auch mittelfristig eher seitwärts. Dagegen garantieren **steigende Energiepreise** in Zukunft wohl eine verstärkte Nachfrage und entsprechend **steigende Preise für Energieholz**.

4 Theoretische Grundlagen

Zunächst werden wichtige Grundlagen für die folgenden Kapitel angegeben oder hergeleitet. Dies ist erforderlich, da innerhalb der Literatur im Holzenergiebereich Berechnungen, Einschätzungen und Handlungsempfehlungen häufig deutlich voneinander abweichen. Zugleich deckt dieses Kapitel bereits den Teil a) „Energieinhalt (Umrechnung/Abrechnung)“ der in der Zielsetzung formulierten Fragen ab.

4.1 Umrechnungsfaktoren

Die im Folgenden hergeleiteten Umrechnungsfaktoren für Energieholz wurden für die Berechnungen innerhalb dieser Arbeit verwendet. Sie werden ausführlich beschrieben und diskutiert, da sich noch keine allseits bekannten oder akzeptierten Faktoren herausgebildet haben. Das gewachsene Naturprodukt Holz als nicht normgerecht produzierter Rohstoff hat vor allem baumarten- und standortsbedingt unterschiedliche sowie zugleich breit **streuende Holzeigenschaften**. Für Energieberechnungen ist neben dem Wassergehalt vor allem die Dichte ganz wesentlich.

Um die Vergleichbarkeit mit anderen Studien und Forschungsarbeiten zu gewährleisten, müssen deshalb die Berechnungsgrundlagen dargelegt und ihre Auswahl erläutert werden.

4.1.1 Holzfeuchte und Wassergehalt

Die **Holzfeuchte** u ist der Quotient aus enthaltenem Wasser m_w und der Trockenmasse m_{atro} des Holzes.

$$u = \frac{m_w}{m_{atro}} \text{ in \%}$$

Dagegen bezieht der **Wassergehalt** w die Wassermasse m_w auf die Gesamtmasse m_f des (feuchten) Holzes. Letztere entspricht wiederum der Summe aus Trockenmasse und Wasser.

$$w = \frac{m_w}{m_f} = \frac{m_w}{m_{atro} + m_w} \text{ in \%}$$

Während die holzbe- und verarbeitende Industrie häufig mit Holzfeuchteangaben arbeitet, wird für Energieholz überwiegend der Wassergehalt angegeben.

Abbildung 6 veranschaulicht den Zusammenhang von Wassergehalt und Holzfeuchte.

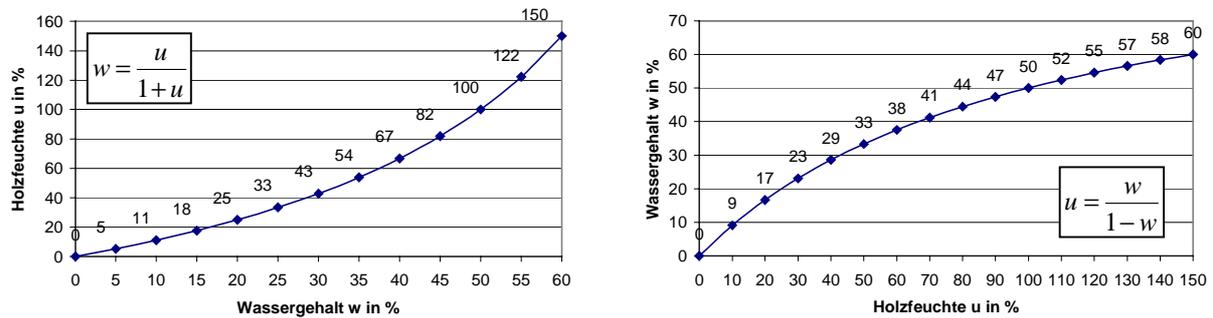


Abbildung 6: Zusammenhang von Wassergehalt und Holzfeuchte

Ein Wassergehalt von 50 % entspricht einer relativen Holzfeuchte von 100 %. Bei einer Holzfeuchte von 50 % liegt der Wassergehalt bei 33 %.

- In dieser Arbeit wird grundsätzlich mit dem Wassergehalt gerechnet.

4.1.2 Fest- und Schüttmaß

Für die Umrechnung von Festmaß Hackholz¹⁴ auf Schüttvolumen Hackschnitzel kann grundsätzlich ein durchschnittlicher **Auflockerungsfaktor von etwa 2,5** gelten (ÖNORM M 7132, 1986). Legt man die in der Forstwirtschaft häufig verwendeten Festmeter ohne Rinde (fm o. R.) zugrunde, erhöht sich der Faktor. Die Rinde wird tatsächlich mit gehackt und geht in das Schüttvolumen ein.

Bei einem forstüblichen pauschalen Rindenabzug von 1 cm liegt der Faktor zur Umrechnung von fm o. R. auf Schüttraummeter (Srm) je nach Stärke des Holzes bei 2,7 (Durchmesser 30 cm o. R.) bis 3,0 (Durchmesser 10 cm o. R.). Bei Dimensionen unter 10 cm steigt der Faktor stark an (Abbildung 7).

Aus Abbildung 7 lassen sich die Auflockerungsfaktoren von 5 bis 30 cm Durchmesser (o. R.) ablesen. Für in Festmeter ohne Rinde (fm o. R.) vermessenes Industrie- bzw. Energieholz im üblichen Durchmesserbereich von 10 bis 20 cm kann überschlägig ein Auflockerungsfaktor von 2,8 angenommen werden (vgl. WEIXLER et al. 1999).

¹⁴ Hackholz ist in manipulierbare Längen eingekürztes, (grob-)entastetes Derb- und/oder Reisholz, das zur Hackguterzeugung bestimmt ist (ÖNORM M 7132, 1986).

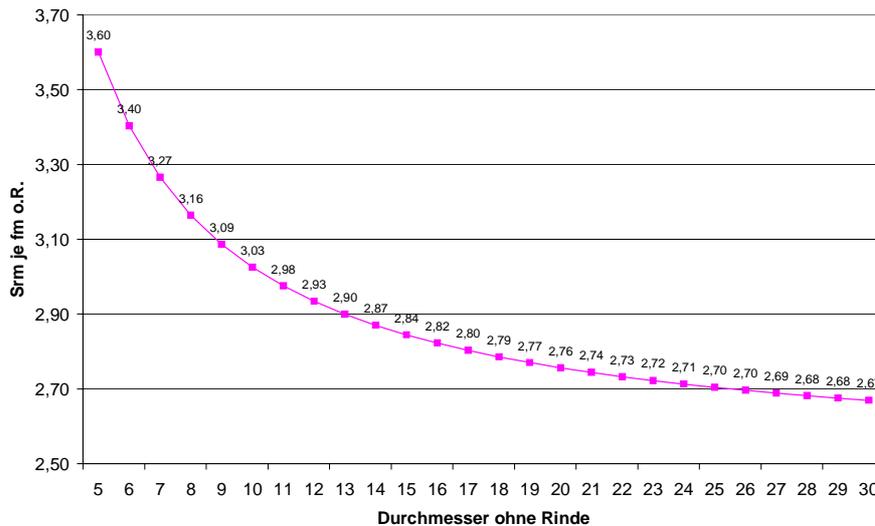


Abbildung 7: Auflockerungsfaktor vom Festmaß des Hackholzes, gemessen ohne Rinde (fm o. R.), zu Schüttvolumen Hackschnitzel (Srm)

Grundsätzlich ist es aber sinnvoll, zum Hacken vorgesehenes Holz **ohne Rindenabzug** zu messen. Vom Ausgangsmaß Festmeter mit Rinde kann dann konstant mit dem Faktor 2,5 umgerechnet werden.

Daneben wirkt es sich insbesondere bei schwächeren Dimensionen erheblich aus, wenn forstüblich auf ganze Zentimeter abgerundet wird. Die **Fehler beim Abrunden** der tatsächlichen Durchmesser fallen wie bei den pauschalen Rindenabzügen umso stärker ins Gewicht, je schwächer das Holz ist.

Problematisch für genaue Kalkulationen mit geschütteten Gütern erweisen sich **Verdichtungsvorgänge**. Diese treten vor allem auf, wenn locker in Container eingeblasene Hackschnitzel transportiert werden. So ist beispielsweise bei Transporten mit Wechselcontainern von einer Volumenabnahme bis zu 10 % aufgrund des Einrüttelns der Partikel auszugehen. Ein Container, der im Wald mit 40 Srm Hackschnitzeln befüllt wurde, liefert am Heizwerk demnach nur ein „gerütteltes Maß“ von 36 Srm ab.

Je nach Länge und Qualität der Fahrstrecke tritt dieser Effekt stärker oder schwächer auf. Eine durchgängige, eindeutige Volumenerfassung während der Logistikkette vom Wald bis zur Heizanlage ist daher kaum möglich.

Grundlage für Umrechnungen und Kalkulationen sollte daher das Maß beim Befüllen sein, da es das maximale Transportvolumen bestimmt. Hackerunternehmer und Frächter müssen ihr Handeln nach diesem Volumen ausrichten.

- In dieser Arbeit gelten Volumen oder Durchmesserangaben grundsätzlich in Rinde (fm = fm m. R. bzw. cm = cm m. R.).
- Als Volumen wird das im Wald anfallende angenommen, Verdichtungen während des Transportes bleiben außer Betracht.

4.1.3 Volumen- und Gewichtsmaß

Um aus Volumenmaßen Gewichte abzuleiten, kann mit bekannten Dichtezahlen gerechnet werden oder jeweils das Gewicht (und der Wassergehalt) konkret ermittelt werden.

Die Dichte des Holzes schwankt inter- aber auch intraspezifisch erheblich (Abbildung 8). Einflussfaktoren für die **intraspezifischen Schwankungen** sind unter anderem Genetik, Standort, Alter sowie Lage am Stamm (KOLLMANN 1982).

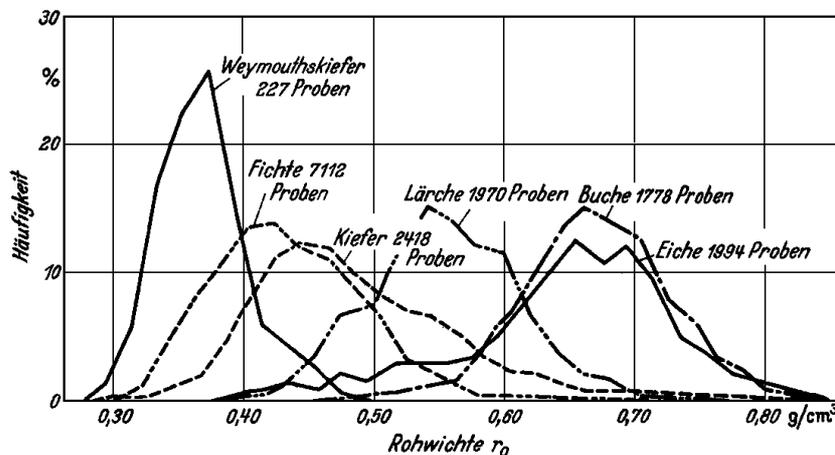


Abbildung 8: Häufigkeitskurven für die Darrdichte bzw. Rohwichte (r_0) nach TRENDELENBURG (aus KOLLMANN 1982)

Alle Angaben zur Dichte des Holzes sollten daher nur als **Anhaltswerte** verstanden werden. Schwankungen, im Einzelfall auch erhebliche Abweichungen vom Mittelwert, liegen in der Natur des Holzes.

Bei Holz unterscheidet man verschiedene Dichtebegriffe:

Die **Rohdichte** p_f ist der Quotient aus Masse m_f und äußerem Volumen V_f . Der Rohdichtewert hängt von der Feuchte f des Holzes ab (VEB 1990).

$$p_f = \frac{m_f}{V_f} \text{ in g/cm}^3$$

Die **Darrdichte** p_{atro} ist eine besondere Bezeichnung für die Rohdichte von absolut trockenem Holz. Sie gibt das Gewicht je Volumeneinheit im jeweils absolut trockenen Zustand an.

$$p_{atro} = \frac{m_{atro}}{V_{atro}} \text{ in g/cm}^3$$

Die **Rohdichte nach DIN** p_{12} gilt für eine Holzfeuchte von 12 % (DIN 52182, 1976). Diese stellt sich bei Lagerung bis zur Massekonstanz bei einer Temperatur von 20 °C und einer relativen Luftfeuchtigkeit von 65 % ein.

$$p_{12} = \frac{m_{12}}{V_{12}} \text{ in g/cm}^3$$

Die **Raumdichte** R gibt dagegen an, wie viel trockene Holzsubstanz m_{atro} eine Volumeneinheit gequollenes Rohholz V_{\max} enthält. Der Wassergehalt des Holzes entspricht dabei mindestens dem Fasersättigungspunkt¹⁵. Der Wert der Raumdichte von Holz liegt definitionsgemäß unter der Darrdichte und bis zum Fasersättigungspunkt unter der Rohdichte, da im Nenner der Formel ein höheres (ungeschwundenes) Volumen steht. Erst oberhalb des Fasersättigungspunktes, bei voll gequollenem Holz, haben sich Raum- und Rohdichte angeglichen. Zur besseren Unterscheidung von Angaben zu Roh- und Darrdichte gibt man die Raumdichte in kg/m³ an (KNIGGE und SCHULZ 1966).

$$R = \frac{m_{atro}}{V_{\max}} \text{ in kg/m}^3$$

Tabelle 2 führt Angaben zur Raumdichte verschiedener Autoren an. Grau hinterlegt sind die Angaben von KOLLMANN (1982), die nach Einschätzung des Autors am häufigsten in der Literatur zur energetischen Verwertung von Holz aufgegriffen werden.

¹⁵ Wassergehalt, bei dem die Zellwände des Holzes noch mit Wasser gesättigt sind und noch kein Schwindprozess eingesetzt hat. Der Fasersättigungspunkt liegt etwa bei 25 % Wassergehalt.

Tabelle 2: Angaben verschiedener Autoren zur Raumdichte in kg/m³ von Fichte, Kiefer, Buche, Eiche und Pappel

Quelle\Baumart	Fichte	Kiefer	Buche	Eiche	Pappel
DIETZ (1975)	403	419	581	577	347
WAGENFÜHR (1996)	379	431	558	571	371
SCHULZ (1966)	377	431	554	561	377
KOLLMANN (1982)	379	431	558	571	353

Forstbetriebe sollten mit der Raumdichte kalkulieren, da das Holz bei Ernte und Verkauf üblicherweise in gequollener Form vorliegt.

Raumdichte und Darrdichte sind über das Quell- bzw. **Schwindmaß**¹⁶ β_v unmittelbar verbunden.

$$R = p_{atro} (1 - \beta_v); \quad \beta_v = \frac{p_{atro} - R}{p_{atro}}$$

Tabelle 3 zeigt Angaben verschiedener Autoren zu Schwindmaßen. Grau hinterlegt sind wiederum die Angaben von KOLLMANN (1982).

Tabelle 3: Angaben verschiedener Autoren zum Schwindmaß in % des Frischmaßes von Fichte, Kiefer, Buche, Eiche und Pappel

Quelle\Baumart	Fichte	Kiefer	Buche	Eiche	Pappel
DIETZ (1975)	13,5	13,1	17,4	13,2	12,9
WAGENFÜHR (1996)	11,6...12,0	11,2...12,4	14,0...17,9... 21,0	12,6...15,6	10,7...14,3
SCHULZ (1966)	11,8	12,5	17,3	13,9	13,4
KOLLMANN (1982)	11,9	12,1	17,9	12,2	13,8

Die Buche schwindet demnach bei der Trocknung besonders stark. Mit 17,9 % liegt ihr Schwindmaß verglichen mit Fichte, Kiefer und Eiche etwa 70 % höher.

Tabelle 4 fasst die gängigsten Literaturangaben zu Dichtewerten zusammen. Die Werte von KOLLMANN (1982) sind nach Ansicht des Autors in sich schlüssige Werte, die auch mit den DIN-Normen harmonieren. Sie liegen daher den Berechnungen dieser Arbeit zugrunde.

¹⁶ Maß für den Volumenschwund vom frischen bis zum gedarrten Zustand bezogen auf die Abmessungen im frischen Zustand in %

Tabelle 4: Darrdichte, Rohdichte, Raumdichte und Schwindmaß für ausgewählte Baumarten

	Darrdichte p_{atro}	Rohdichte p_{12}	Raumdichte R	Schwindmaß β_v
Baumart	[g/cm ³]	[g/cm ³]	[kg/m ³]	[%]
Fichte	0,43	0,47	379	11,9
Kiefer	0,49	0,52	431	12,1
Buche	0,68	0,72	558	17,9
Eiche	0,65	0,69	571	12,2
Pappel	0,41	0,45	353	13,8
Quelle	KOLLMANN (1982), DIN 4076 (1985)	DIN 52182 (1976)	KOLLMANN (1982)	KOLLMANN (1982)

Als **Gleichgewichtsfeuchten** im Gebrauchszustand des Holzes gelten nach DIN 68100 (1984) die in Tabelle 5 genannten Werte. Die Angaben zur relativen Holzfeuchte wurden zu den im Energiebereich gebräuchlicheren Wassergehalten umgerechnet.

Tabelle 5: Gleichgewichts-Holzfeuchten bzw. -Wassergehalte in Anhalt an DIN 68100 (1984)

Gebrauchszustand		Gleichgewichts-Holzfeuchte u [%]	Gleichgewichts-Wassergehalt w [%]
Bei allseitig geschlossenen Bauwerken	mit Heizung	9 ± 3	8 ± 3
	ohne Heizung	12 ± 3	11 ± 3
Bei überdeckten, offenen Bauweisen		15 ± 3	13 ± 3
Bei der Witterung allseitig ausgesetzten Konstruktionen		18 ± 6	15 ± 3

Bei geeigneter Lagerung im Freien kann Holz demnach einen Wassergehalt von 15 % erreichen. Bei Lagerung in geschlossenen Räumen stellt sich ein Gleichgewicht zur Umgebungsluft bei etwa 11 % Wassergehalt ein. Bei Holz in geheizten Räumen sind 8 % möglich. Frisch geschlagenes Holz weist dagegen häufig einen Wassergehalt von über 50 % auf. Je geringer die Rohdichte der Hölzer, desto höhere Werte werden erreicht. Pappelholz kann beispielsweise auch Wassergehalte von 65 % annehmen.

Wichtig sind in bestimmten Fällen Angaben zur absolut trockenen Holzsubstanz in Bezug auf das Volumen des geschwundenen Holzes. So etwa, wenn getrocknetes Energieholz verkauft wird, das auch Wassergehalte von 15 % und weniger vorweist.

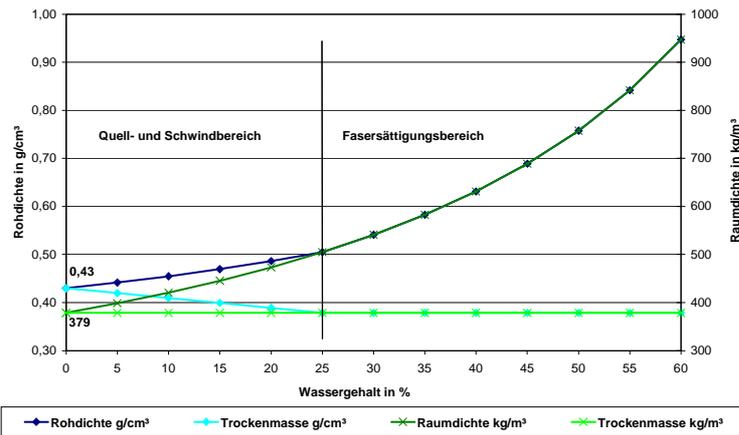


Abbildung 9: Zusammenhang von Rohdichte und Trockenmasse bei Fichte bezogen auf g/cm^3 (Volumen beim jeweiligen Wassergehalt bestimmt) sowie Raumdichte und Trockenmasse in kg/m^3 (mit einmaliger Volumenbestimmung im Fasersättigungsbereich)

Über Schwindmaße (KOLLMANN 1982) und Darrdichten (DIN 4076 (1976), KOLLMANN 1982) lassen sich Trockenmassenangaben auch für Wassergehalte unter Fasersättigung herleiten (Tabelle 6). Unterstellt wurden zur Berechnung eine gleichmäßige Volumenabnahme und das Schwindmaß ab Fasersättigungspunkt (angenommen mit 25 % Wassergehalt) bis zum absolut trockenen Zustand (0 % Wassergehalt).

Tabelle 6: Umrechnungstabelle für Gewicht und Trockenmasse der Fichte mit und ohne Berücksichtigung des Schwindens

Fichte Wassergehalt	Fall 1: Ein über Fasersättigung ($w = 25\%$) gemessener fm Holz		Fall 2: Ein beim jeweiligen Wassergehalt gemessener fm Holz		
	Gewicht [kg]	Trockenmasse [kg]	Gewicht [kg]	Trockenmasse [kg]	[%] von Fall 1
[%]					
0	379	379	430	430	114
5	399	379	442	420	111
10	421	379	455	409	108
15	445	379	470	399	105
20	473	379	486	389	103
25	505	379	505	379	100
30	541	379	541	379	100
35	582	379	582	379	100
40	631	379	631	379	100
45	688	379	688	379	100
50	757	379	757	379	100
55	841	379	841	379	100
60	947	379	947	379	100

Demnach wiegt ein Festmeter Fichte, frisch nach dem Einschlag im Wald gemessen, wenn er auf 15 % Wassergehalt getrocknet wird, 445 kg. Er enthält 379 kg Trockenmasse. Ein trockener, bei Wassergehalt 15 % gemessener Festmeter weist dagegen mit einem Gewicht von 470 kg bzw. einer Trockenmasse von 399 kg um 5 % höhere Werte auf.

Weitere Umrechnungstabellen für Kiefer, Buche, Eiche und Pappel ausgehend vom gequollenen Festmeter sowie vom trockenen (Schnitt-)Holz sind im Anhang 9 angegeben.

Tabelle 7 zeigt Angaben verschiedener Autoren zur **Dichte von Rinden**. Die Rindendichten liegen im Schwankungsbereich der Holzdichten (vgl. Abbildung 8). Zudem überwiegt bei den Energieholzsortimenten in der Regel der Anteil des Holzes deutlich. Eine gesonderte Betrachtung der Rindenanteile für die Umrechnung von Volumen- auf Gewichtsmaß wird daher im Weiteren nicht vorgenommen.

Tabelle 7: Angaben verschiedener Autoren zur Dichte der Rinde von Fichte, Kiefer, Buche, Eiche und Pappel

Quelle/Baumart	Fichte	Kiefer	Buche	Eiche	Pappel	Einheit
DIETZ (1975)	342	304	579	423	412	Raumdichte [kg/m ³]
DAUBER et al. (1979)	0,66	0,49	0,82	-	-	Darrdichte [g/cm ³]
WAGENFÜHR (1996)	340 - 400	300 - 490	579	423	412	Raumdichte [kg/m ³]

Für die **Dichte von Nadeln** bzw. Blättern liegen nur wenige Werte vor. DAUBER et al. (1979) geben für Fichtennadeln eine Raumdichte von 350 kg/m³, für Kiefernadeln von 373 kg/m³ an. Damit liegen die Nadeldichten ebenso wie die Rindendichten im Schwankungsbereich der Holzdichten (vgl. Abbildung 8). Eine schwierig durchführbare, gesonderte Ausweisung des relativ geringen Nadelanteils erscheint deshalb für die Herleitung beispielsweise der Schüttdichte einer Energieholzlieferung in der Praxis nicht erforderlich.

Grundsätzlich kann davon ausgegangen werden, dass die bisher genannten Dichteangaben vorsichtig angenommene Berechnungsgrundlagen darstellen. Auswertungen der Bayerischen Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft (LWF) ergaben zumindest für süddeutsche Verhältnisse regelmäßig höhere Werte.

Hackschnitzel aus **Pappel**, geerntet auf Versuchsflächen der LWF, wiesen eine durchschnittliche Trockenschüttdichte von 170 kg/Srm auf (Datengrundlage 785 Srm, Werte von 142 bis 191 kg/Srm, Standardabweichung 18 kg/Srm). Dieser Wert liegt 20 % über den erwarteten 141 kg (vgl. Anhang 10).

SCHWARZMEIER (2000) untersuchte an einer Waldklimastation der LWF in Ebersberg einen Bestand mit 85-jähriger **Fichte**. Sie ermittelte mit 407 kg/m^3 eine um 7 % höhere Raumdichte. Ebenfalls am Standort Ebersberg erhob der Autor dieser Arbeit für Hackschnitzel aus **Fichtenkronen** eine durchschnittliche Trockenschüttdichte von 191 kg/Srm und damit 27 % über dem erwarteten Wert von 151 kg/Srm (Datengrundlage 6.581 Srm, Werte von 149 bis 248 kg/Srm , Standardabweichung 24 kg/Srm).

Auch andere Autoren weisen auf höhere Holzdichten in der Praxis hin verglichen mit den DIN-Angaben. Beispielsweise ermittelte FISCHER (1991) in Sachsen für **Buchenfaserholz** anhand von 703 Probehölzern eine Raumdichte von 626 kg/m^3 . Dieser Wert liegt etwa 12 % über den hier zugrunde gelegten Raumdichten.

- **In dieser Arbeit wird grundsätzlich mit der Raumdichte gerechnet, es wird also vom Festmeter wie er im Wald anfällt ausgegangen.**
- **Für etwaige Rinden- oder Nadelanteile gelten die Raumdichten des Holzes der jeweiligen Baumarten.**
- **Als Grundlage für Umrechnungen werden die Angaben zur Raumdichte von KOLLMANN (1982) herangezogen.**
- **Die Umrechnungsfaktoren können als sichere Schätzgrößen angesehen werden. Die tatsächlichen Dichtewerte liegen für süddeutsche Verhältnisse in der Praxis wohl regelmäßig höher.**

4.1.4 Gewichts- und Energiemaß

Der Heizwert H ¹⁷ kann in MJ/kg oder in kWh/kg bzw. MWh/t angegeben werden¹⁸. Für Kalkulationen im Energieholzbereich wird vorwiegend mit kWh bzw. MWh gerechnet. Heizwertnennungen in dieser Arbeit beschränken sich deshalb auf die Angabe von kWh bzw. MWh (1.000 kWh).

¹⁷ Der Heizwert H (früher unterer Heizwert genannt) berücksichtigt die Verdampfungswärme des Wassers in den Verbrennungsgasen nicht. Der Brennwert dagegen (früher oberer Heizwert) übersteigt den Heizwert um den Betrag der Verdampfungswärme des in den Abgasen enthaltenen Wassers. In den meisten Holzfeuerungen enthalten die Abgase den Wasserdampf, so dass bei Energieholzkalkulationen in der Regel mit dem Heizwert zu rechnen ist.

¹⁸ 1 kWh entspricht 3,6 MJ .

Tabelle 8: Angaben verschiedener Autoren zum Heizwert von Fichte, Kiefer, Buche, Eiche und Pappel in kWh/kg atro

Quelle/Baumart	Fichte	Kiefer	Buche	Eiche	Pappel
KOLLMANN (1981)	5,3		5,0		
SELL u. SCHNELL (1988)	5,3		5,0		
HAKKILA (1989)	5,3	5,4	(5,3 für Moorbirke)		
ÖNORM (1998)	5,3		5,0		
HARTMANN et al. (2000)	5,2	-	5,1	-	5,1
NURMI (2000)	5,3	5,4	-	-	5,2
LWF (2003)	5,2		5,0		

Im Sinne einer vorsichtigen Abschätzung kann für Nadelholz ein Durchschnittswert von 5,2 kWh/kg Trockenmasse angenommen werden, für Laubholz 5,0 kWh/kg.

Analog zur Dichte kann auch bei den Heizwerten wegen der geringen Unterschiede und des geringen Anteils in der Praxis für Kalkulationen im Energieholzbereich auf eine Trennung von Holz und Rinde sowie Nadeln/Blätter verzichtet werden (Tabelle 9 und Tabelle 10).

Tabelle 9: Angaben verschiedener Autoren zum Heizwert der Rinde von Fichte, Kiefer, Buche, Eiche und Pappel in kWh/kg atro

Quelle/Baumart	Fichte	Kiefer	Buche	Eiche	Pappel
DAUBER et al. (1979)	5,3 - 5,8				
SELL und SCHNELL (1988)	5,2	5,7	4,9	-	-
NURMI (2000)	5,7	5,6	-	-	5,9

Tabelle 10: Angaben verschiedener Autoren zum Heizwert der Nadeln und Blätter von Fichte, Kiefer, Buche, Eiche und Pappel in kWh/kg atro

Quelle/Baumart	Fichte	Kiefer	Buche	Eiche	Pappel
Hakkila (1989)	5,9	5,4	5,4 (Moorbirke)		
NURMI (2000)	5,3	5,8	-	-	5,5

Der Heizwert hängt vom **Wassergehalt** des Holzes ab. Je mehr Wasser bei der Verbrennung verdampft werden muss, desto niedriger liegt der Heizwert. Die Verdampfungswärme pro kg Wasser ist konstant und beträgt 0,68 kWh¹⁹. Mit der folgenden Formel kann für verschiedene Wassergehalte w der Heizwert H_w aus dem Heizwert der Trockenmasse H_{atro} abgeleitet werden.

¹⁹ 2,44 MJ/kg bezogen auf eine Ausgangstemperatur von 25 °C (KALTSCHMITT und HARTMANN 2001)

$$H_w = \frac{H_{atro} \cdot (100 - w) - 0,68w}{100} \text{ in kWh/kg}$$

Beispiel: Ein Holzsplit aus Fichte soll 2 kg wiegen bei einem Wassergehalt von 50 %. Es enthält also 1 kg Wasser und 1 kg Trockenmasse mit einem Heizwert von 5,2 kWh/kg. Um das Wasser zu verdampfen, gehen 0,68 kWh verloren, die restliche Energie, 4,52 kWh, kann zu Heizzwecken genutzt werden. Das Holzsplit hat demnach einen Heizwert von 2,26 kWh je kg der Gesamtmasse, bezogen auf das kg Trockenmasse 4,52 kWh (vgl. Tabelle 11).

Tabelle 11: Heizwert in Abhängigkeit vom Wassergehalt bezogen auf Gesamtmasse und enthaltene Trockenmasse für Nadelholz und Laubholz

Wassergehalt in %	Nadelholz		Laubholz	
	Heizwert der Gesamtmasse in kWh/kg	Heizwert pro kg Trockenmasse in kWh/kg	Heizwert der Gesamtmasse in kWh/kg	Heizwert pro kg Trockenmasse in kWh/kg
0	5,20	5,20	5,00	5,00
5	4,91	5,16	4,72	4,96
10	4,61	5,12	4,43	4,92
15	4,32	5,08	4,15	4,88
20	4,02	5,03	3,86	4,83
25	3,73	4,97	3,58	4,77
30	3,44	4,91	3,30	4,71
35	3,14	4,84	3,01	4,64
40	2,85	4,75	2,73	4,55
45	2,55	4,65	2,44	4,45
50	2,26	4,52	2,16	4,32
55	1,97	4,37	1,88	4,17
60	1,67	4,18	1,59	3,98

Wesentlich ist die Spalte Heizwert pro kg Trockenmasse. Für Bedarfskalkulationen von Heizwerken in t atro darf nicht mit 5,2 bzw. 5,0 MWh gerechnet werden. Liegt der erwartete Wassergehalt des Energieholzes z. B. bei 40 %, so muss richtigerweise mit einem Heizwert – für Nadelholz – von 4,75 MWh/t atro gerechnet werden.

- **Aufgrund der Heizwerte in vergleichbarer Höhe werden Rinde und Nadeln mit dem gleichen Heizwert je Gewichtseinheit wie Holz angesetzt.**
- **Als Berechnungsgrundlage für Laubholz wird ein Ausgangswert von 5,0 MWh, für Nadelholz ein Wert von 5,2 MWh je t Trockenmasse angesetzt.**

4.1.5 Energie- und Abrechnungsmaß

Holzheizungen wandeln nur einen Teil der im Holz angelieferten Energie tatsächlich in **Nutzwärme** um. Nach BRÖKELAND (2003) geben den Ausschlag dafür

- der feuerungstechnische Wirkungsgrad der Heizung, bestimmt von

- Wärmeverlusten über das Abgas und
- chemischen Verlusten auf Grund unvollständiger Verbrennung,

- der Kesselwirkungsgrad in Form von

- Strahlungsverlusten des Kessels und
- Verlusten durch Unverbranntes in der Asche.

Der **Jahresnutzungsgrad** beschreibt die Differenz zwischen dem Energieinhalt des eingesetzten Energieträgers und der erzeugten Nutzwärme. Als Erfahrungswert für gut ausgelastete Heizwerke wird ein Jahresnutzungsgrad von 80 % angenommen (C.A.R.M.E.N. e.V. 2003). Hackschnitzelheizungen, die häufig im Teillastbereich oder Gluterhaltungsbetrieb arbeiten, liegen teilweise auch deutlich darunter. Wenn das Holz also nach der über Wärmemengenzähler gemessenen Nutzwärme vergütet wird, sollte ein möglichst realistischer Jahresnutzungsgrad zugrunde gelegt werden.

- **Für Heizanlagen wird in dieser Arbeit ein Jahresnutzungsgrad von 80 % zugrunde gelegt.**

4.2 Energieholz-Potentiale

In Studien, die sich mit der Nutzung von alternativen Energien beschäftigen, nehmen Potentialabschätzungen häufig einen großen Raum ein (vgl. FISCHER 1995, DREINER et al. 1994, KALTSCHMITT und WIESE 1993, HASCHKE 1998, Dieter et al. 2001). Die verwendeten Begriffe werden hier kurz erklärt.

Das **theoretische Potential** enthält das gesamte, physikalische Angebot der unterschiedlichen Holzsorten. Es stellt daher eine Obergrenze für das Energieangebot dar. Zwischen den unterschiedlichen Autoren herrscht jedoch nur selten Einigkeit über die Teilmengen, die im theoretischen Potential berücksichtigt werden sollen. Dies erschwert einen Vergleich unterschiedlicher Studien. Die Angabe eines theoretischen Potentials hat vor allem dann einen Sinn, wenn derzeit technische Probleme eine Ausschöpfung des Potentials verhindern, diese aber in absehbarer Zeit gelöst werden könnten.

Das **technische Potential** beschreibt die Holzmenge, die unter Berücksichtigung von technischen und ökologischen Restriktionen genutzt werden kann. Als eine klassische Restriktion der Holznutzung wird die Hangneigung angegeben. In Steilhängen ist es oft zu gefährlich, Holz zu nutzen.

Unter dem **wirtschaftlichen Potential** versteht man denjenigen Teil des technischen Potentials, der unter Berücksichtigung wirtschaftlicher Restriktionen genutzt werden kann. Dabei muss die Grundfrage beantwortet werden, ob die Erlöse für das Energieholz die Kosten für die Produktion decken und eine Gewinnerzielung erlauben. Die Preise der fossilen Energieträger beeinflussen das wirtschaftliche Potential stark. Je höher diese Preise, desto höher sind auch die Erlösmöglichkeiten für Energieholz. Weitere Einflussfaktoren sind technische Neuerungen²⁰ und Änderungen der rechtlichen Rahmenbedingungen²¹. Das wirtschaftliche Potential ist somit keine konstante Größe.

Als **mobilisierbares Potential** kann wiederum nur eine Teilmenge des wirtschaftlichen Potentials gelten. Insbesondere im Privatwald wird derzeit deutlich unter dem Zuwachs und häufig ausschließlich für den Eigenbedarf Holz geerntet. Welche Einflussfaktoren eine Rolle spielen, um Holz aus dem wirtschaftlichen Potential zu mobilisieren, war und ist Gegenstand zahlreicher wissenschaftlicher Studien.

Als primäre Holzquellen zur energetischen Nutzung stehen **Waldenergieholz**, **Flurholz** und **Holz aus Energiewäldern** zur Verfügung. Letztere sind speziell für diesen Zweck auf landwirtschaftlichen Flächen angelegte Kurzumtriebswälder. **Industrierestholz** tritt erst nach der Be- oder Verarbeitung hinzu, **Altholz** nach einer vorangegangenen stofflichen Nutzung. Abbildung 10 zeigt vereinfacht die Zusammenhänge.

²⁰ Beispielsweise erlaubt die neuere Generation von Harvestern inzwischen eine wirtschaftliche Nutzung von Holz in immer steileren Hanglagen.

²¹ Gerade bei der thermischen Nutzung von Altholz und dem Anbau von schnellwachsenden Baumarten in Energiewäldern können sich Gesetzesänderungen stark auswirken.

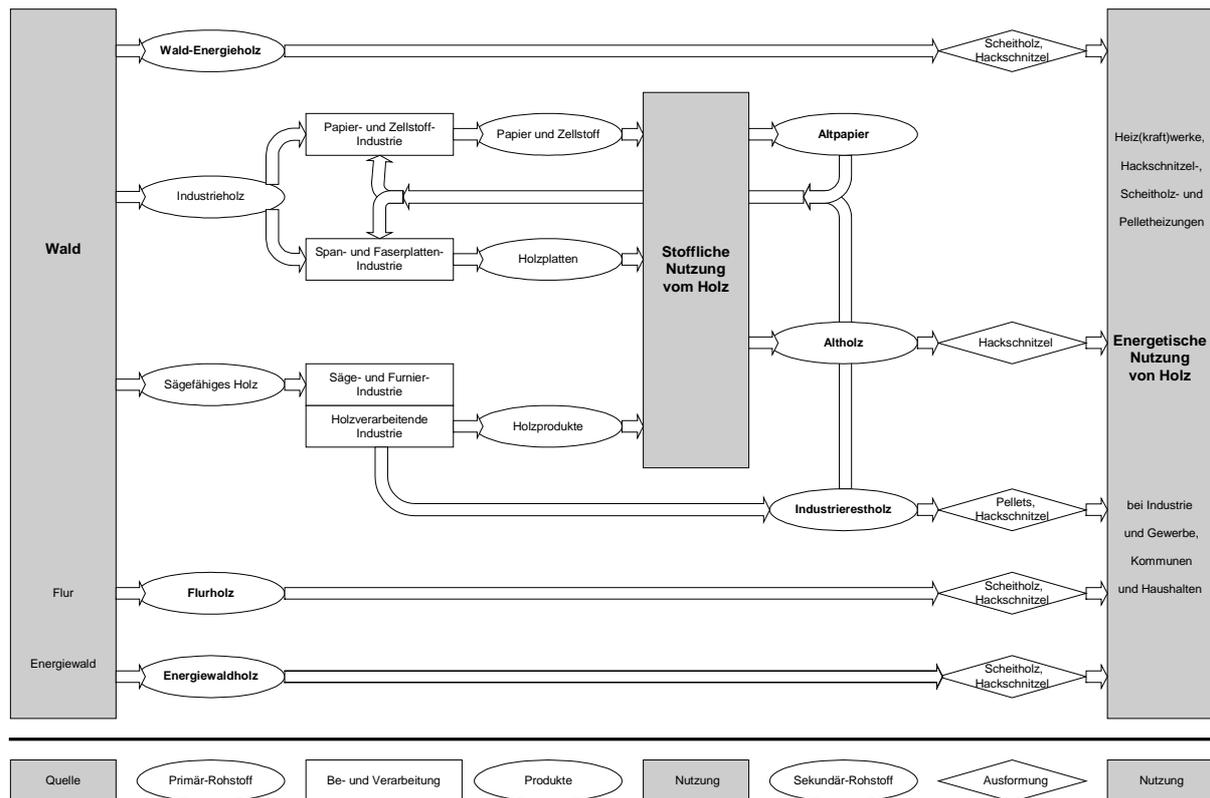


Abbildung 10: Vereinfachter Zusammenhang zwischen Holzquellen, Be- und Verarbeitung, stofflicher und energetischer Nutzung von Holz

4.2.1 Waldenergieholz

Das technische und wirtschaftliche Potential für Waldenergieholz in Bayern leiteten WAGNER und WITTKOPF (2000) her. Grundlage waren die Angaben von NÜSSLEIN (1996) zum potentiellen Aufkommen von Schwachholz in Bayern. Für das wirtschaftliche Potential wurden die Kosten und Erlöse der Hackschnitzel- und Scheitholznutzung analysiert und mit denen der Industrieholznutzung verglichen. Als möglicher Erlös für die Hackschnitzel wurden etwa 66 €/t atro (129 DM) angenommen.

Tabelle 12: Waldenergieholzpotentiale in Bayern auf Basis des nachhaltig möglichen Einschlags und die derzeitige Nutzung nach WAGNER und WITTKOPF (2000)

Potential/Nutzung	[1.000 t atro/a]
technisches Potential	5.485
wirtschaftliches Potential	2.541
derzeitige Nutzung	756
„freies“ wirtschaftliches Potential	1.785

Etwa die Hälfte des technischen Potentials kann demnach nur als wirtschaftliches Potential gelten (Tabelle 12). Fichtenindustrieholz war im technischen Potential enthalten, im wirtschaftlichen dagegen nicht mehr aufgrund seiner hohen Erlöse in der stofflichen Verwertung („Papierholz“). Daraus resultiert der große Unterschied.

Zieht man das derzeit bereits energetisch genutzte Holz vom wirtschaftlichen Potential ab, so bleibt ein verfügbares Potential von etwa 1,8 Mio. t atro/a.

Fraglich ist allerdings, wie viel davon sich – selbst bei deutlich höheren Energieholzerlösen – tatsächlich mobilisieren lässt. Insbesondere im Privatwald liegt die Nutzung selbst wenn der Einschlag von Stammholzsortimenten mit hohem Deckungsbeitrag zur Diskussion steht, seit langem deutlich unter dem Zuwachs.

4.2.2 Holz aus Energiewäldern

Der Anbau von schnellwachsenden Baumarten zur Energieholzproduktion kommt vor allem auf landwirtschaftlichen Stilllegungsflächen in Frage. Landwirte erhalten beim Anbau von nachwachsenden Rohstoffen auf solchen Flächen eine Stilllegungsprämie²². Bei schnellwüchsigen Forstgehölzen mit einer Umtriebszeit von höchstens zehn Jahren entfällt zudem der bei anderen Pflanzen erforderliche Nachweis von Anbau- und Abnahmeverträgen (BSTMLF 2004b). Eine gesetzliche Gleichstellung stillgelegter und landwirtschaftlich genutzter Flächen (BUNDESREGIERUNG 1995) regelt, dass Landwirte stillgelegte Ackerflächen jederzeit wieder landwirtschaftlich nutzen können.

Die Stilllegungsfläche in Bayern beträgt seit Jahren etwa 300.000 ha. Aufgrund der laufenden EU-Osterweiterung sind mittelfristig eher Ausweitungen dieser Fläche zu erwarten. Die durchschnittliche Massenleistung von Energiewäldern in Bayern wird angenommen mit 8 bis 10 t atro je Hektar und Jahr.

Für Bayern berechneten WAGNER und WITTKOPF (2000) verschiedene Szenarien für 10 bis 50 % Energiewaldanteil an den Stilllegungsflächen. Das technische Potential für Energiewälder liegt demnach zwischen 0,23 und 4,87 Mio. t atro/a.

²² Die Stilllegungsprämie beträgt 353 €/ha und Jahr (Stand 2004).

4.2.3 Flurholz

Flurholz fällt bei der Pflege von Bäumen und Sträuchern an, die nicht im Wald oder in Energieholzplantagen wachsen. In Anlehnung an HARTMANN und STREHLER (1995) sowie RÖSCH (1996) fallen darunter:

- Feldgehölze und Hecken,
- land- und forstwirtschaftliche Sonderkulturen, z. B. Obst- und Weinbau, Baumschulen,
- Bäume und Sträucher in Gemeinden und Städten,
- Straßenbegleitgehölze,
- Eisenbahnbegleitgehölze und
- Gewässerrandgehölze.

Eine Potentialabschätzung erweist sich in allen Fällen wegen unvollständiger bzw. unsicherer Flächen- und Zuwachsbestimmung als schwierig und fehlerträchtig.

Feldgehölze werden normalerweise nicht regelmäßig beschnitten, sondern nur aus Alters- oder Gesundheitsgründen gefällt. Der Anfall ist darum sehr dezentral. Das Material wird häufig bereits als Brennholz genutzt. Ein Potential kann nicht abgeschätzt werden.

Hecken werden aus Gründen der Landespflege regelmäßig teilweise oder insgesamt auf den Stock gesetzt. Dabei fällt die Biomasse konzentriert an. WAGNER und WITTKOPF (2000) schätzten das **Potential an Heckenschnitt auf 40.000 t atro/a** (Tabelle 13).

Für das Aufkommen bei der Pflege von **land- und forstwirtschaftlichen Sonderkulturen** errechneten WAGNER und WITTKOPF (2000) anhand Angaben von RÖSCH (1996) ein **technisches Potential von 7.500 t atro/a**.

Aus dem theoretischen Aufkommen von **Gehölzschnitt aus Städten und Gemeinden** nach RÖSCH (1996) lässt sich ein theoretisches Potential von 158.000 t atro/a ableiten. Den größten Teil des Gehölzschnittes kompostieren die Kommunen bisher. Bei einer Nutzung von 90 % des theoretischen Potentials ergibt sich ein **technisches Potential an kommunalem Gehölzschnitt von 143.000 t atro/a**.

Zu den Pflichtaufgaben der Autobahn- bzw. Straßenmeistereien gehört die regelmäßige Pflege von **straßenbegleitenden Bäumen und Sträuchern**. Die Pflegearbeiten entlang der Autobahnen werden über öffentliche Ausschreibungen an Unternehmen vergeben, die anschließend auch für die Verwertung der Hackschnitzel zuständig sind. WAGNER und WITTKOPF (2000) schätzten das **technische Potential auf 18.000 t atro/a**.

Tabelle 13: Technisches Flurholzpotential für Bayern nach WAGNER und WITTKOPF (2000)

Quelle des Flurholzes	[1.000 t atro/a]
Heckenschnitt	39,8
land- und forstwirtschaftliche Sonderkulturen	7,4
Gehölzschnitt aus Städten und Gemeinden	142,4
Pflege von straßenbegleitenden Gehölzen	18,4
Summe	208

Das **technische Flurholzpotential** in Bayern beträgt **0,21 Mio. t atro/a**.

4.2.4 Industrierestholz

Das Aufkommen stammt fast zu gleichen Teilen aus der holzbearbeitenden Industrie, im Wesentlichen aus den Sägewerken, wie aus der Holzverarbeitenden Industrie (Tabelle 14).

Tabelle 14: Aufkommen von Industrierestholz in Bayern nach WAGNER und WITTKOPF (2000)

Quelle	[%]	[Mio. t atro]
holzbearbeitende Industrie	55,0	1,45
Sägeindustrie	52,5	1,26
Sonstige	2,5	0,19
holzverarbeitende Industrie	45,0	1,18
Gesamtaufkommen	100,0	2,63

MANTAU und SÖRGEL (2004) geben für Bayern den Anfall von Sägenebenprodukten mit 2,4 Mio. m³ an. Dieser Wert entspricht in etwa den in Tabelle 14 für die Sägeindustrie angegebenen 1,26 Mio. t atro.

Tabelle 15 zeigt die Nutzung des in Bayern anfallenden Industrierestholzes. Etwa die Hälfte des Industrierestholzes (1,23 Mio. t atro) wird demnach bereits thermisch verwertet.

Tabelle 15: Nutzung des Industrierestholzes in Bayern nach WAGNER und WITTKOPF (2000)

Nutzung	[%]	[Mio. t atro]
stofflich	23,2	0,61
thermisch	46,7	1,23
Industrie	36,8	0,97
Heiz(kraft)werke	1,3	0,03
private Haushalte	8,6	0,23
Deponie, Export ¹ , unbekannt	30,1	0,80
Gesamtverbrauch	100,0	2,63

¹ In der Außenhandelsstatistik werden Industrieresthölzer und Althölzer nicht getrennt erfasst.

Als freies Potential können in erster Linie die 800.000 t atro gelten, die laut Tabelle 15 deponiert oder exportiert werden oder deren Verbleib unbekannt ist.

4.2.5 Altholz

WAGNER und WITTKOPF (2000) schätzen ein technisches Potential von 890.000 t atro Altholz pro Jahr in Bayern²³. Dies entspricht einem Anfall je Einwohner von 72 kg/a. Diese Menge reduziert sich vor allem durch stofflich genutzte Mengen auf ein für die thermische Nutzung verbleibendes Potential von 700.000 t atro/a. Zum Stand der Studie von WAGNER und WITTKOPF (2000) wurden nur 300.000 t atro/a in Bayern thermisch verwertet. Etwa die Hälfte des Altholzaufkommens wurde exportiert.

4.3 Biomasseentnahme und Nährstoffaustrag

4.3.1 Biomasseentnahme

In der Praxis kennt man häufig nur die entnommene Derbholzmenge. Die Trockenmassen der zusätzlich entnommenen Baumkompartimente „Äste und Reisig“ sowie „Nadeln/Blätter“ müssen abgeschätzt werden. Dazu lassen sich nach JACOBSEN et al. (2002) als Anhaltswerte die in Tabelle 16 angegebenen durchschnittlichen prozentualen **Biomasseanteile der Baumkompartimente** heranziehen.

²³ MANTAU und WEIMAR (2003) ermittelten für Deutschland ein jährliches Aufkommen von 6.170.475 t Altholz, davon 870.310 t aus Bayern (14 %).

Tabelle 16: Durchschnittliche Biomasseanteile der Baumkompartimente

Baumkompartimente	Fichte	Kiefer	Buche	Eiche	Pappel	Mittelwert
Derbholz m.R.	80%	81%	80%	78%	81%	80%
Äste	13%	15%	19%	20%	14%	16%
Nadeln/Blätter	7%	4%	1%	2%	5%	4%
Summe	100%	100%	100%	100%	100%	100%

Der **Hauptanteil der Biomasse** liegt bei allen Hauptbaumarten einheitlich **im Derbholz**. Im Durchschnitt sind hier 80 % der Biomasse gespeichert. Die Äste nehmen etwa ein Sechstel ein. Äste beim Nadelholz weisen gegenüber der Buche und der Eiche einen um etwa 5 % geringeren Anteil an der Biomasse auf. Die Nadelmasse nimmt dagegen um ein Mehrfaches höhere Anteile ein als die Blattmasse bei Buche und Eiche. Die Werte der Pappel ähneln insgesamt eher den Nadelholzwerten.

In Abhängigkeit vom **Alter der Bäume** verändern sich die Anteile der Baumkompartimente. Nadel- und Astanteile liegen in der Jugend höher und nehmen mit dem Alter zugunsten des Derbholzes ab. JACOBSEN et al. (2002) geben in ihrer Datensammlung entsprechende Zusammenhänge an. Für die Fichte zeigt Abbildung 11 die Kurven und nennt die Funktionen. Der in Tabelle 16 angegebene Durchschnittswert für Fichte entspricht demnach der im Alter 80 erreichten Verteilung.

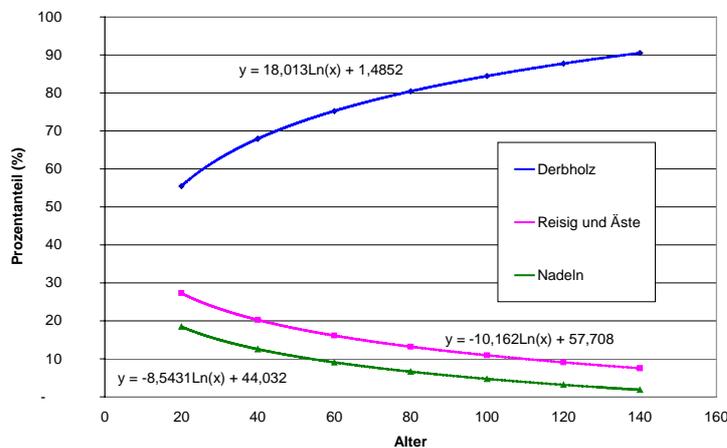


Abbildung 11: Anteile der Baumkompartimente in Abhängigkeit vom Alter für Fichte

Im Anhang 6 finden sich entsprechende Abbildungen und Funktionen für die Baumarten Kiefer und Buche.

4.3.2 Nährstoffaustrag

Die im Baum gespeicherten Nährstoffe sind nicht homogen auf alle Kompartimente verteilt. Reisholz, Rinde und Nadeln speichern den überwiegenden Teil der Nährstoffe.

Der Nährstoffaustrag bei der Nutzung von Kronen- und Restholz lässt sich im Anhalt an die Daten von JACOBSEN et al. (2002) näherungsweise berechnen. In ihre Zusammenstellung gingen verschiedene Standorte, Bonitäten und Altersstufen ein. Die Daten zu den Haupt-Nährelementen basieren auf 115 untersuchten Beständen. Tabelle 17 gibt den durchschnittlichen Nährstoff-Gehalt für Stickstoff (N), Phosphor (P), Kalium (K), Calcium (Ca) und Magnesium (Mg) in kg/t atro bezogen auf die unterschiedlichen Baumkompartimente für ausgewählte Baumarten an.

Tabelle 17: Biomasse und Nährstoffgehalte der Baumkompartimente Derbholz m. R., Reisig und Äste sowie Nadeln/Blätter für verschiedene Baumarten nach JACOBSEN et al. (2002)

Baumart	Baumkompartimente	Biomasse	N	P	K	Ca	Mg
		[t/ha]	[kg/t atro]				
Fichte	Derbholz m.R.	172,0	1,2	0,2	0,8	1,4	0,18
	Reisig und Äste (< 7 cm)	28,4	5,2	0,7	2,4	3,3	0,53
	Nadeln/Blätter	14,7	13,4	1,3	5,7	6,0	0,79
Kiefer	Derbholz m.R.	91,2	1,1	0,1	0,7	1,1	0,24
	Reisig und Äste (< 7 cm)	17,1	3,6	0,3	1,7	2,1	0,43
	Nadeln/Blätter	4,5	14,5	1,3	5,0	4,1	0,87
Buche	Derbholz m.R.	231,0	1,5	0,1	1,0	1,8	0,26
	Reisig und Äste (< 7 cm)	54,2	4,3	0,5	1,5	4,0	0,36
	Nadeln/Blätter	4,0	26,0	1,5	8,7	8,9	1,25
Eiche	Derbholz m.R.	150,1	2,1	0,1	1,1	2,5	0,18
	Reisig und Äste (< 7 cm)	37,8	6,2	0,4	2,0	1,4	0,44
	Nadeln/Blätter	4,5	26,2	1,7	7,4	11,4	2,27
Pappel	Derbholz m.R.	84,6	1,2	0,1	0,6	1,0	0,22
	Reisig und Äste (< 7 cm)	14,8	2,9	0,4	1,9	3,8	0,67
	Nadeln/Blätter	5,3	10,0	1,3	6,2	4,5	0,99

Die Ausarbeitung von JACOBSEN et al. (2002) bietet auch detaillierte Werte für weitere Baumarten.

Zur Berechnung des Nährstoffaustrags bei konkreten Hiebsmaßnahmen multipliziert man die Trockenmassen (t atro) der entnommenen Baumkompartimente mit den in Tabelle 17 angegebenen Werten für die Nährstoffgehalte (kg/t atro). Die angegebenen Werte ermöglichen es auch, den Nährstoffvorrat des Gesamtbestandes bzw. des verbleibenden Bestandes herzuleiten.

Über alle Baumarten hinweg liegt die **Nährstoffkonzentration** im Kompartiment „Reisig und Äste“ überschlägig dreimal so hoch wie bei „Derbholz mit Rinde“. „Nadeln/Blätter“ werden näherungsweise mit dem neunfachen Wert angesetzt (Tabelle 18).

Tabelle 18: Relative Nährstoffgehalte der Baumkompartimente bezogen auf Derbholz m. R.

Baumart	Baumkompartimente	Relative Nährstoffgehalte bezogen auf Derbholz m. R.					
		N	P	K	Ca	Mg	Mittelwert
Fichte	Derbholz m.R.	1	1	1	1	1	1
	Reisig und Äste (< 7 cm)	4	4	3	2	3	3
	Nadeln/Blätter	11	9	7	4	4	7
Kiefer	Derbholz m.R.	1	1	1	1	1	1
	Reisig und Äste (< 7 cm)	3	3	3	2	2	3
	Nadeln/Blätter	13	12	8	4	4	8
Buche	Derbholz m.R.	1	1	1	1	1	1
	Reisig und Äste (< 7 cm)	3	3	1	2	1	2
	Nadeln/Blätter	17	10	8	5	5	9
Eiche	Derbholz m.R.	1	1	1	1	1	1
	Reisig und Äste (< 7 cm)	3	4	2	1	2	2
	Nadeln/Blätter	12	15	7	5	13	10
Mittelwert	Derbholz m.R.	1	1	1	1	1	1
	Reisig und Äste (< 7 cm)	3	4	2	2	2	3
	Nadeln/Blätter	13	11	8	4	6	9

Für die Praxis liegt der über die durchschnittlichen Biomasseanteile der Kompartimente und deren Nährstoffgehalte errechnete Austrag zu hoch. Gerade bei den Kompartimenten „Reisig und Äste“ sowie „Nadeln/Blätter“ ist auch bei der Vollbaumnutzung mit erheblichen Ernteverlusten zu rechnen, insbesondere bei niedrig mechanisierten Verfahren. KREUTZER (1979) geht beispielsweise bei seinen Berechnungen davon aus, dass bei einer Vollbaumnutzung 50 % der Ast- und Nadelbiomasse im Bestand verbleiben.

Unter Kapitel 6.2.2 wird die Biomasse-Entnahme bei der Nutzung von Fichtenkronen innerhalb einer Fallstudie dargestellt.

4.4 Lagerung und Trocknung

Waldfrisches Holz weist in der Regel Wassergehalte von 50 Prozent und mehr auf. Bei geeigneter Lagerung trocknet Holz in unseren Breitengraden natürlich auf etwa 15 % Wassergehalt herunter, der Gleichgewichtsfeuchte zur umgebenden Luft.

Hackschnitzel, die mit hohen Wassergehalten gelagert werden, erleiden erhebliche **Substanzverluste**, da sie von holzersetzenen Pilzen und Bakterien besiedelt werden. Monatliche Abbauraten von bis zu 5 % der Trockenmasse sind aus der Literatur bekannt (WEINGARTMANN 1992). Hohe Fein-, Rinden- oder Grünanteile (Blätter, Nadeln) begünstigen

zusätzlich die Aktivität der Mikroorganismen und damit den Substanzabbau. Erst bei Wassergehalten unter 25 %, dem Fasersättigungspunkt des Holzes, kommen die Abbauprozesse zum Erliegen. Ein nennenswerter Substanzverlust muss dann nicht mehr befürchtet werden. Mit Wassergehalten unter 25 % ist Holz auch längerfristig lagerfähig.

Um trockene, lagerfähige Hackschnitzel zu erzeugen, sollte jede Möglichkeit genutzt werden, das ungehackte Energieholz mittels entsprechender Lagerung vorzutrocknen und erst bei Bedarf zu hacken. Dazu sollte es an lichte Stellen im Wald, am Waldrand oder gezielt außerhalb des Waldes geworfen werden und vor dem Hacken mehrere Monate trocknen (Abbildung 12). Ein idealer **Lagerplatz zum Vortrocknen** des Energieholzes sollte gut durchlüftet und besonnt sein, walddah liegen, trockenen Untergrund aufweisen und ganzjährig anzufahren sein (LWF 2002)



Abbildung 12: Hackholzlagerplatz außerhalb des Waldes bei Greußenheim

Die **Polter mit Hackholz** dürfen im Gegensatz zu Industrieholzpoltern auch „locker“ aufgesetzt sein. Allerdings muss darauf geachtet werden, dass später der Kran des Hackers alle Stücke gut greifen und dem Einzug zuführen kann. Von Vorteil sind „zugige“ Stellen. Rückegassen in geschlossenen Beständen, Gräben oder Muldenlagen sind nicht geeignet. Eine mehrmonatige Lagerung des Hackholzes bietet zudem den Vorteil, dass eventuell noch anhaftende Nadeln und Blätter zunächst noch Feuchtigkeit entziehen, bevor sie abfallen. So wird die Lagerfähigkeit erhöht und der spätere Ascheanteil verringert. Für Borkenkäfer fängisches Holz aus Fichtenbeständen sollte mindestens 500 m außerhalb des Waldes verbracht werden²⁴.

²⁴ Mindestentfernung für einen Zuschuss zur Abwehr rindenbrütender Insekten im Rahmen des waldbaulichen Förderprogramms des Bayerischen Staatsministeriums für Landwirtschaft und Forsten (BSTMLF 2002).

Für den Substanzabbau sind **Schimmelpilze** an und für sich unwesentlich. Problematisch ist die reichliche Sporenbildung. In Hackschnitzelhaufen enthaltene Sporen von Schimmelpilzen können bei wiederholtem Einatmen höherer Konzentrationen allergische Reaktionen des Körpers hervorrufen („Holzschnitzelalveolitis²⁵“).

Große Sporenmengen in Hackschnitzelhaufen entstehen bei Wassergehalten über 25 %. Wenn frische Hackschnitzel mit einem Wassergehalt von über 40 % gelagert werden, herrschen vom ersten Tag der Lagerung an beste Bedingungen für das Pilzwachstum. Schimmelpilze entwickeln sich bereits bei sehr niedrigen Temperaturen, ihr **Wachstumsoptimum** liegt jedoch im Bereich 25 bis 50 °C. Diese Temperaturen treten in unseren Breiten selbst im Sommer nicht häufig auf. Insofern müsste eigentlich angenommen werden, dass Schimmelpilze im Freiland nur selten optimale Wachstumsbedingungen antreffen.

Tatsächlich tritt Schimmelpilzbefall in größeren Ansammlungen organischen Materials aber selten allein auf. Meist sind **Actinomyceten** (Strahlenpilze) beim Stoffabbau mit beteiligt. Diese Organismen verursachen eine **Selbsterwärmung von Hackschnitzelschüttungen**. Infolge der Selbsterwärmung sind dann für Schimmelpilze gute Wachstumsbedingungen vorhanden. Sowohl die hohen Temperaturen im Inneren als auch niedrigere Temperaturen in den Außenbereichen bieten Schimmelpilzen ausreichend Möglichkeit, hygienisch bedenkliche Konzentrationen zu erreichen.

Die LWF (2002) hat ein Merkblatt herausgegeben, wie man sich beim Umgang mit Hackschnitzeln möglichst wenig mit Schimmelpilzsporen belastet. Eine Liste mit Empfehlungen daraus wurde als Anhang 12 aufgenommen.

²⁵ Unter Alveolitis versteht man eine entzündliche Reaktion der Lungenalveolen (Lungenbläschen). Beeinträchtigt wird dabei der Gasaustausch zwischen Blut und Luft. Die Holzschnitzelalveolitis wird durch die allergische Reaktion vor allem gegen die Sporen von Schimmelpilzen hervorgerufen, die in Hackschnitzelschüttungen wachsen (FEICHT 2002, FEICHT et al. 2002).

4.5 Abrechnung

4.5.1 Abrechnungsmöglichkeiten

Hackschnitzel werden verbrannt, um Wärme zu erzeugen. Die Verkaufseinheit und ihre Bewertung sollten sich deshalb am **Energieinhalt** orientieren. Für Lieferanten von Energieholz bestehen drei grundsätzliche Möglichkeiten nach Energieinhalt der Hackschnitzel abzurechnen: Die Ermittlung des Volumens, die Ermittlung des Gewichtes und des Wassergehaltes sowie die Ermittlung der im Heizwerk produzierten Wärmemenge. Die folgenden Ausführungen für die einzelnen Abrechnungsarten bewerten den Energieinhalt mit 0,02 €/je kWh. Mit Tabellenkalkulationsprogrammen lassen sich einfach Tabellen mit anderen Bezugswerten erstellen.

Abrechnung nach Volumen

Das Volumen der Hackschnitzel ist meist einfach zu ermitteln. Probleme bereitet die Abrechnung nach Volumen jedoch, wenn verschiedene Baumarten angeliefert werden. Die volumenbezogenen Energieinhalte der Baumarten weisen deutliche Unterschiede auf. Ein Schüttraummeter Buche enthält etwa 50 % mehr Energie als ein Schüttraummeter Fichte. Weniger stark beeinflusst den **Energieinhalt je Volumeneinheit** der Wassergehalt. Bei frischem Holz mit einem Wassergehalt von 50 % liegt der volumenbezogene Energieinhalt nur 10 % tiefer als bei vorgetrocknetem Holz mit einem Wassergehalt 30 % (Abbildung 13).

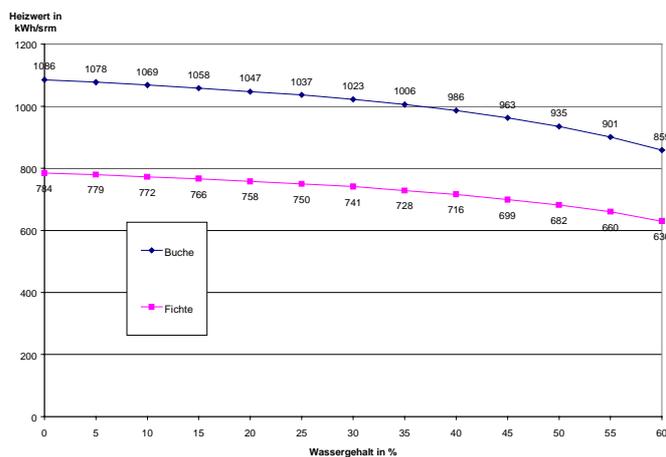


Abbildung 13: Energieinhalt je Schüttraummeter in Abhängigkeit vom Wassergehalt für Fichte und Buche

Beschränkt sich die (einzelne) Hackschnitzellieferung auf eine Baumart, kann – relativ genau – nach Volumen und Baumart abgerechnet werden. Wenn zusätzlich der Wassergehalt bekannt ist oder erhoben wird, lässt sich der Energieinhalt je Schüttraummeter exakt ableiten (Tabelle 19). Der **Verkauf nach Volumenmaß** ermöglicht dann eine genaue und zugleich

einfach durchzuführende Abrechnung. Fehler in der Wassergehaltsbestimmung wirken sich dabei weniger gravierend aus als bei der Abrechnung nach Gewicht und Wassergehalt. Werden beispielsweise statt tatsächlicher 40 % Wassergehalt nur 30 % angenommen, werden je Schüttraummeter nur 0,5 € oder 3 % zuviel bezahlt.

Tabelle 19: Abrechnungstabelle nach Schüttraummeter in Abhängigkeit von Baumart und Wassergehalt (Ausgangswert: Vergütung 0,02 €/je kWh Energieinhalt)

0,02 €/kWh	Fichte		Kiefer		Buche/Eiche		Pappel	
Wassergehalt [%]	Energieinhalt [kWh/Srm]	Preis [€/Srm]						
0	784	15,7	896	17,9	1.086	21,7	690	13,8
5	779	15,6	891	17,8	1.078	21,6	685	13,7
10	772	15,4	883	17,7	1.069	21,4	679	13,6
15	766	15,3	876	17,5	1.058	21,2	673	13,5
20	758	15,2	866	17,3	1.047	20,9	665	13,3
25	750	15,0	857	17,1	1.037	20,7	659	13,2
30	741	14,8	847	16,9	1.023	20,5	650	13,0
35	728	14,6	833	16,7	1.006	20,1	639	12,8
40	716	14,3	819	16,4	986	19,7	627	12,5
45	699	14,0	799	16,0	963	19,3	612	12,2
50	682	13,6	779	15,6	935	18,7	594	11,9
55	660	13,2	755	15,1	901	18,0	573	11,5
60	630	12,6	720	14,4	859	17,2	546	10,9

Angelehnt an Tabelle 19 lassen sich individuelle Abrechnungstabellen mit beliebigen Vergütungssätzen nach kWh Energieinhalt je Schüttraummeter erstellen.

Abrechnung nach Gewicht und Wassergehalt

Stark vom Wassergehalt hängt der **gewichtsbezogene Energieinhalt** ab. Ein kg vorgetrocknetes Holz (Wassergehalt 30 %, Heizwert 3,3 kWh/kg) weist einen 50 % höheren Heizwert auf als ein kg frisch geschlagenes Holz (Wassergehalt 50 %, 2,2 kWh/kg). Bei der Abrechnung nach Gewicht ist deshalb die Ermittlung des Wassergehaltes unabdingbar.

Die Heizwerte je kg der einzelnen Baumarten unterscheiden sich kaum. Unterschieden werden sollte allenfalls zwischen Nadel- und Laubholz. Aufgrund des höheren Gehaltes an Harzen und Lignin übersteigt der Heizwert für Nadelhölzer um etwa 5 % den von Laubholz. Je nachdem, ob überwiegend Laubholz oder Nadelholz angeliefert wird, kann mit einer Tabellenkalkulation der Heizwert, der **Energieinhalt je kg, als Eingangsgröße** justiert werden. Tabelle 20 zeigt ein Beispiel mit einem Ausgangswert von 5,2 kWh/kg bezogen auf die Trockenmasse.

Tabelle 20: Abrechnungstabelle nach Tonnen in Abhängigkeit vom Wassergehalt (Ausgangswerte: Energieinhalt der Trockenmasse 5,2 kWh/kg, Vergütung 0,02 €/je kWh Energieinhalt)

Wassergehalt [%]	Energieinhalt [kWh/kg]	Preis pro t [€/t]	Preis pro t enthaltene Trockenmasse [€/t atro]
0	5,2	104	104
5	4,9	98	103
10	4,6	92	102
15	4,3	86	102
20	4,0	80	101
25	3,7	75	99
30	3,4	69	98
35	3,1	63	97
40	2,9	57	95
45	2,6	51	93
50	2,3	45	90
55	2,0	39	88
60	1,7	33	84

Bei der Abrechnung nach Gewicht und Wassergehalt spielt die **genaue Ermittlung des Wassergehaltes** eine größere Rolle als bei der Abrechnung nach Volumen. Eine fehlerhafte Bestimmung des Wassergehaltes um 10 % führt bei der Abrechnung nach Gewicht zu einem Fehler von 20 %. Als Beispiel sei auf Tabelle 20 verwiesen: Angenommen statt tatsächlich vorhandenen 40 % werden nur von 30 % Wassergehalt angesetzt. Statt 57 würden dann 69 €/t bezahlt werden, 12 € zuviel. Mit höheren Wassergehalten über dem Fasersättigungspunkt (Wassergehalt 25 %) arbeiten gerade Schnellbestimmungsverfahren zunehmend ungenauer. Exakte Messungen liefert dort nur das Trocknen der Schnitzel auf Gewichtskonstanz im Trockenschrank.

Abrechnung nach Wärmemenge

Bei der Abrechnung nach Wärmemenge wird die vom Heizwerk produzierte Wärme zugrunde gelegt. Dazu messen **Wärmemengenzähler** die im erwärmten Wasser enthaltene Energie beispielsweise am Übergang Heizwerk zu Wärmenetz. Zwischen Energieinhalt des Holzes und der gemessenen "Nutzenergie" besteht allerdings eine Differenz. Ein Teil der Energie geht über Strahlungsverluste des Kessels verloren, ein Teil mit den heißen Rauchgasen über den Kamin.

Der "**Nutzungsgrad**" gibt an, wie viel der im Holz enthalten Energie über das Jahr gesehen in Nutzwärme umgewandelt wird. C.A.R.M.E.N. e.V. (2003) nimmt den "Nutzungsgrad" für Heizwerke mit durchschnittlich etwa 80 % an. Tabelle 21 zeigt ein Berechnungsbeispiel.

Tabelle 21: Erlös je Srm Hackschnitzel bei Vergütung nach Wärmemenge (Ausgangswerte: Wassergehalt 30 %, Sollvergütung 0,02 €/je kWh Energieinhalt, Nutzungsgrad 80 %)

Baumart	Energieinhalt [kWh/Srm]	Produzierte Wärmemenge [kWh/Srm]	Vergütung nach Wärmemenge [€/kWh]	Erlös [€/Srm]
Fichte	741	593	0,025	14,8
Kiefer	847	678	0,025	16,9
Buche/Eiche	1.023	818	0,025	20,5
Pappel	650	520	0,025	13,0

Die Abrechnung nach Wärmemenge bietet ein hohes Maß an **Kalkulationssicherheit für Betreiber von Heizwerken**. Den Heizwertverlust durch holzfäulebedingten Substanzabbau, der bei der Lagerung von zu nassen Hackschnitzeln entsteht, trägt der Holzlieferant. Deshalb sollte dieser bei der Abrechnung nach Wärmemenge auf kurze Lagerzeiten der Hackschnitzel an den Heizwerken drängen. Idealerweise gibt es bei dieser Abrechnungsvariante nur einen Lieferanten für das Heizwerk. Wenn mehrere Zulieferer tätig sind, müssen diese über ihre Lieferungen Buch führen. Der jeweilige Energieinhalt muss dann doch nach Volumen (und Wassergehalt) oder Gewicht und Wassergehalt ermittelt werden. Der Erlös über die Wärmemengenvergütung wird dann im nachhinein proportional aufgeteilt.

4.5.2 Empfehlungen für Lieferverträge

Die Anlieferung von Hackschnitzeln an Heizwerke sollte **vertraglich gesichert** sein. Es wird empfohlen, die zu erstellenden Verträge in jedem Falle von einer autorisierten Person (Rechtsberatungsstelle) prüfen zu lassen. Lieferverträge können sowohl für die Lieferung von Hackschnitzeln (Abrechnung nach Volumen oder Gewicht und Wassergehalt) als auch für die Lieferung von Wärme (Abrechnung nach Wärmemenge) abgeschlossen werden.

Langfristige Lieferverträge sollten die Möglichkeit bieten, Preisänderungen vorzunehmen. Dazu bieten sich **Preisgleitklauseln** auf Basis von allgemein zugänglichen Indexzahlen an. Grundsätzlich sollten die Preisgleitklauseln für die Brennstofflieferung und den späteren Wärmeverkauf ähnlich aufgebaut sein und sich an ähnlichen Indices orientieren.

Als Indices eignen sich u. a. :

- Industrieholzpreise,
- Preise von Sägerestholz und Span-/Faserplatten,
- Energie- und Treibstoffpreise,
- Preise für Maschinen und
- Lohnkosten.

Die im Folgenden beispielhaft dargestellten Indices entstammen den Zeitreihen des **Statistischen Bundesamtes**. Veröffentlicht werden sie in verschiedenen **Fachserien** in schriftlicher und elektronischer Form. Darüber hinaus bietet die **Auskunftsdatenbank GENESIS-Online** des statistischen Bundesamtes (www.destatis.de) Zugriff auf alle im statistischen Informationssystem des Bundes gespeicherten Daten aus der amtlichen Statistik. Wegen der permanenten Aktualisierung auf der Großrechneranlage des Statistischen Bundesamtes sind die Daten stets auf dem neuesten Stand. Der Service stellt online ausgewählte Daten in verschiedenen Dateiformaten zur Verfügung²⁶.

Es ist sinnvoll, die Entwicklung der **Industrieholzpreise** ebenso in Preisgleitklauseln einzubeziehen. Bei Industrieholz und Energieholz handelt es sich um Substitutionsprodukte. Industrieholz kann alternativ zu Hackschnitzeln aufgearbeitet werden, das Ausgangsmaterial für Hackschnitzel ließe sich im Regelfall auch als Industrieholz vermarkten.

²⁶ Die Daten lassen sich aus GENESIS-Online in den Formaten HTML, MS-Excel und CSV exportieren. Ein Gastzugang erlaubt es, einen großen Teil der Statistiken kostenlos zu nutzen. Registrierte Kunden erhalten für eine fixe Pauschale von 50 € im Kalenderjahr unbegrenzten Zugriff auf alle Tabellen.

Das Statistische Bundesamt bietet innerhalb von GENESIS-Online verschiedene „Erzeugerpreisindices forstwirtschaftlicher Produkte aus den Staatsforsten“ an (Tabelle 61231-0001). Enthalten sind dort Indices für Industrieholz „gesamt“ sowie Fichte, Kiefer, Buche und Eiche. In schriftlicher Form werden die Daten in der Fachserie 17, Reihe 1, veröffentlicht.

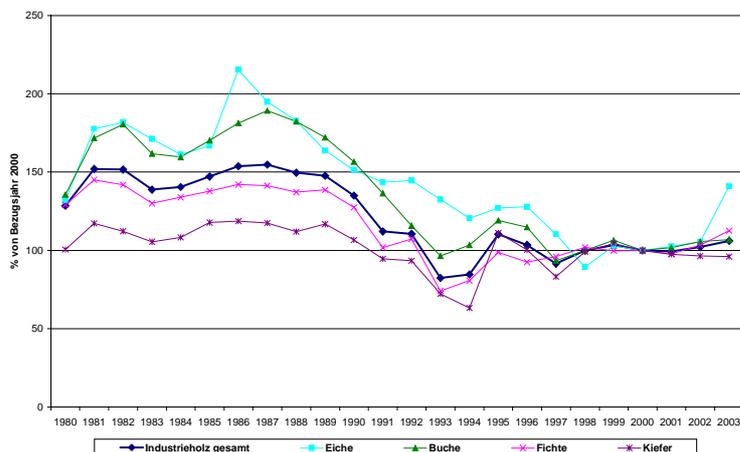


Abbildung 14: Industrieholzpreise Deutschland 1980 bis 2003, Staatsforsten, Bezugsjahr 2000 (STATISTISCHES BUNDESAMT 2004, Fachserie 17, Reihe 1; Nr. 56, 57, 58, 59, 60)

Auch die **Preise für Sägerestholz und Spanplatten** lassen sich einbeziehen. Unter den Indices für Erzeugerpreise gewerblicher Produkte (Fachserie 17, Reihe 2) befinden sich zweckmäßige für „Sägespäne und Sägenebenprodukte, auch zu Pellets, Briketts, Scheiten oder ähnlichen Formen zusammengepresst“ (GP 20104), für Spanplatten (GP 202013) sowie Faserplatten (GP 202014).

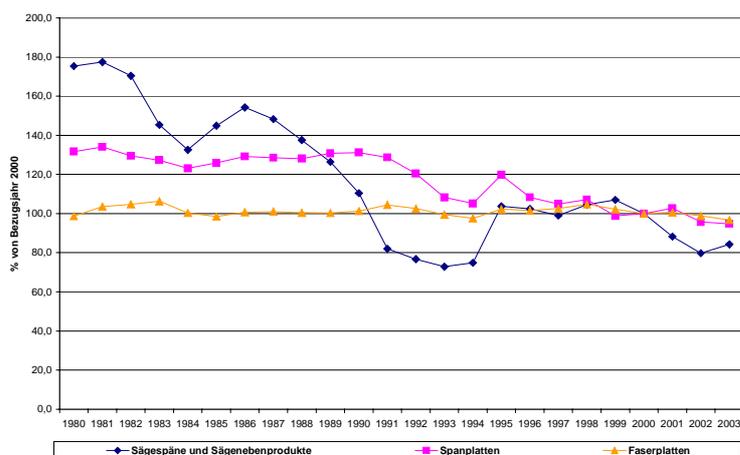


Abbildung 15: Preise für Sägespäne und Sägenebenprodukte, Spanplatten sowie Faserplatten in Deutschland 1980 bis 2003, Bezugsjahr 2000, (STATISTISCHES BUNDESAMT 2004, GENESIS-Online Tabelle 61241-0008)

Insbesondere dann sollte man die Indices für Sägespäne und Sägenebenprodukte oder für Span-/Faserplatten einbeziehen, wenn Sägerestholz bei der Belieferung des Heizwerkes tatsächlich eine Rolle spielt. Sägerestholz kann alternativ energetisch oder stofflich bei der Produktion von Span- oder Faserplatten genutzt werden. Schwankungen am Markt für Sägerestholz lassen sich so bei der Vertragsgestaltung berücksichtigen. Regelmäßige, allgemein zugängliche Auswertungen der Sägerestholzpreise speziell für Bayern existieren derzeit jedoch nicht.

Am häufigsten verwenden Geschäftspartner Indices für **Energie- und Treibstoffpreise** in Lieferverträgen für Holzenergie. Das Statistische Bundesamt bietet unter der Rubrik „Indices für Erzeugerpreise gewerblicher Produkte“ (Fachserie 17, Reihe 2) eine Vielzahl von Indices für Energie- und Treibstoffpreise. Beispielhaft seien folgende Indices herausgegriffen:

- Dieselkraftstoff (GP 23 20 15 500)
- Leichtes Heizöl (GP 23 20 15 700)
- Erdgas (GP 40 2)
- Fernwärme (GP 40 3)

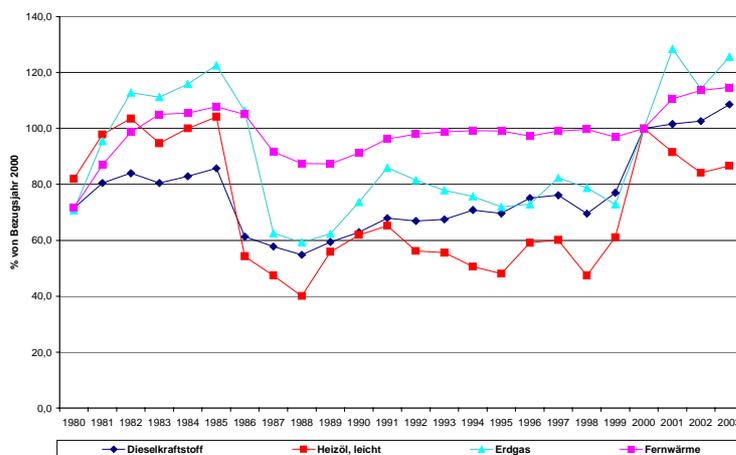


Abbildung 16: Preise für ausgewählte Energie- und Treibstoffpreise in Deutschland 1980 bis 2003, Bezugsjahr 2000 (STATISTISCHES BUNDESAMT 2004, GENESIS-Online Tabelle 61241-0008)

Bei der Produktion und dem Transport von Hackschnitzeln wird Dieselkraftstoff verbraucht. Steigerungen der Treibstoffpreise wirken sich demnach unmittelbar auf die Gesteungskosten der Hackschnitzel aus. Verträge mit langer Laufzeit sollten dies berücksichtigen.

Der Preis für Heizöl wird oft in Preisgleitklauseln herangezogen, da Hackschnitzel Heizöl ersetzen. Grundsätzlich handelt es sich jedoch um Produkte, deren Gestehungskosten in keinem Zusammenhang stehen (C.A.R.M.E.N. e.V. 2003). Bedenklich sind zudem die großen Preisschwankungen, denen Heizöl unterliegt (vgl. Abbildung 16). Für beide Vertragspartner ergeben sich unnötige Nachteile, wenn es darum geht, Einnahmen wie Ausgaben auch nur mittelfristig abzuschätzen oder zu planen. Daher sollte der Hackschnitzelpreis zumindest nicht zum überwiegenden Teil an Heizöl gebunden sein.

Gas- und Fernwärmepreise unterliegen geringeren Preisschwankungen als Heizöl. Insbesondere die Fernwärmepreise verlaufen relativ ausgeglichen und kalkulierbar. Wenn der Wunsch besteht, die Entwicklung der Wärmepreise einzubeziehen, sollten die „Nahwärme“ produzierenden Heizwerke vorrangig auf den vorhandenen Index für Fernwärme zurückgreifen.

Für die **Preise für Maschinen** bietet das Statistische Bundesamt innerhalb der „Indices für Erzeugerpreise gewerblicher Produkte“ (Fachserie 17, Reihe 2) eine Vielzahl von Indices an. Abbildung 17 zeigt beispielhaft die Entwicklung folgender Indices:

- Maschinen (GP 29)
- Maschinen für die Land- und Forstwirtschaft (GP 29 3)
- Brenner für Feuerungen, automatische Feuerungen (GP 29 21 11)
- Holzbearbeitungsmaschinen, Kettensägen (GP 294111910, 294312).

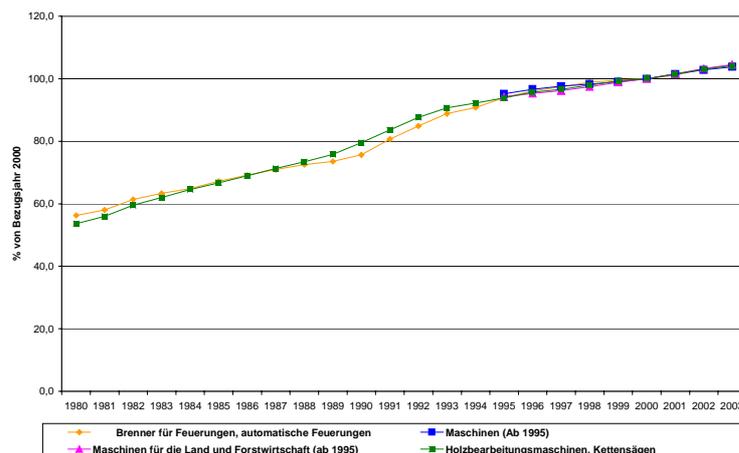


Abbildung 17: Preise für ausgewählte Maschinen in Deutschland 1980 bis 2003, Bezugsjahr 2000 (STATISTISCHES BUNDESAMT 2004, GENESIS-Online Tabellen 61241-0008 und -0010)

Sowohl bei der Hackschnitzelbereitstellung als auch bei der Verfeuerung werden eine Vielzahl von Maschinen eingesetzt. Darum ist es zweckmäßig, auch einen Maschinenindex bei der Vertragsgestaltung zu berücksichtigen. Die ausgewählten Maschinenindices

verlaufen sehr ähnlich und lassen sich der betrieblichen Ausgangslage angepasst, individuell wählen.

Neben den Maschinenkosten bestimmen die Lohnkosten den finanziellen Aufwand bei der Bereitstellung von Hackschnitzeln. Abbildung 18 zeigt die Entwicklung der **Lohnkosten** für folgende, ausgewählte Wirtschaftsbereiche:

- Gesamtwirtschaft (Fachserie 18, Reihe 3.2)
- Land- und Forstwirtschaft, Fischerei (Fachserie 18, Reihe 3.2)
- Holzgewerbe (ohne Herstellung von Möbeln) (GENESIS-Online, Tabelle 62321-0101)
- Energieversorgung (GENESIS-Online, Tabelle 62321-0101)

Die Lohnkosten für „Gesamtwirtschaft“ sowie „Land- und Forstwirtschaft, Fischerei“ sind in der Fachserie 18, Reihe 3.2 originär nur als absolute Jahresverdienste angegeben. Sie wurden für Abbildung 18 zu Indices mit Bezugsjahr 2000 umgerechnet.

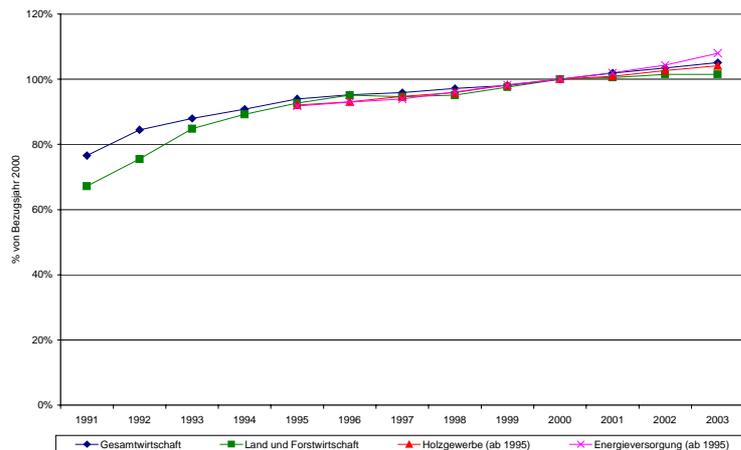


Abbildung 18: Lohnkosten für ausgewählte Wirtschaftsbereiche in Deutschland, Bezugsjahr 2000 (STATISTISCHES BUNDESAMT 2004, Fachserie 18, Reihe 3.2, GENESIS-Online Tabelle 62321-0101)

Der hohe Lohnkostenanteil insbesondere bei der motormanuellen oder teilmechanisierten Bereitstellung von Hackschnitzeln lässt sich über eine entsprechende Gestaltung der Preisgleitklauseln berücksichtigen. Die ausgewählten Indices verlaufen wiederum recht ähnlich und weisen – bezogen auf das Jahr 2000 – allesamt einen kontinuierlichen Anstieg auf.

Vorschlag für eine Preisgleitklausel

Eine Preisgleitklausel für einen Hackschnitzzelliefervertrag könnte in Anhalt an einen Vorschlag von C.A.R.M.E.N. E.V. (2003) wie folgt aufgebaut sein:

Formel:

$$P_{\text{neu}} = P_{\text{alt}} * (a * H_{\text{neu}}/H_{\text{alt}} + b * L_{\text{neu}}/L_{\text{alt}} + c * E_{\text{neu}}/E_{\text{alt}} + d * T_{\text{neu}}/T_{\text{alt}} + e * M_{\text{neu}}/M_{\text{alt}})$$

a, b, c, d, e sind Parameter, die den Einfluss der einzelnen Indices auf den Gesamtindex bestimmen (Wertung), wobei die Summe der Indices 1 sein sollte ($a + b + c + d + e = 1$).

Vorschlag:

$$P_{\text{neu}} = P_{\text{alt}} * (0,2 * H_{\text{neu}}/H_{\text{alt}} + 0,2 * L_{\text{neu}}/L_{\text{alt}} + 0,2 * E_{\text{neu}}/E_{\text{alt}} + d * T_{\text{neu}}/T_{\text{alt}} + 0,2 * M_{\text{neu}}/M_{\text{alt}})$$

P_{neu} neuer Preisindex

P_{alt} alter Preisindex

H_{neu} neuer Preis für Holz (Statistisches Bundesamt, Industrieholzindex „gesamt“, Fachserie 17, Reihe 1, Nr. 56)

H_{alt} alter Preis für Holz

L_{neu} neuer Lohnpreis (Statistisches Bundesamt, Lohnkosten in der Land- und Forstwirtschaft, Fachserie 18, Reihe 3.2)

L_{alt} alter Lohnpreis

E_{neu} neuer Preis für Energie (Statistisches Bundesamt, Index für Fernwärme, Fachserie 17, Reihe 2, GP 40 3)

E_{alt} alter Preis für Energie

T_{neu} neuer Preis für Treibstoff (Statistisches Bundesamt, Index für Dieselkraftstoff, Fachserie 17, Reihe 2, GP 23 20 15 500)

T_{alt} alter Preis für Treibstoff

M_{neu} neuer Preis für Maschinen (Statistisches Bundesamt, Index für Maschinen für die Land- und Forstwirtschaft, Fachserie 17, Reihe 2, GP 29 3)

M_{alt} alter Preis für Maschinen

Abbildung 19 zeigt die Entwicklung der Vergütung bei der vorgeschlagenen Preisgleitklausel. Ausgehend von einem Preis von 0,02 €/kWh im Jahr 1995 werden für jedes Jahr neue Vergütungssätze berechnet.

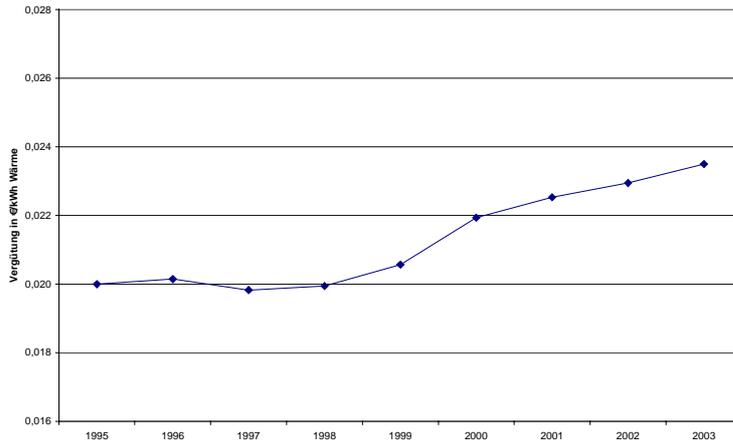


Abbildung 19: Beispiel der Preisentwicklung anhand einer vorgeschlagenen Preisleitklausel, Ausgangsvergütung 1995: 0,02 €/kWh

Danach wäre die Vergütung 1997 zwischenzeitlich abgesunken. Ursache waren die gesunkenen Industrieholz- und Energiepreise. Seit 1997 stiegen die Erlöse stetig an. 2003 lag die Vergütung mit 0,0235 €/kWh dann knapp 18 % höher als im Ausgangsjahr 1995.

5 Methoden

Tabelle 22 gibt einen Überblick über das methodische Instrumentarium, das zur Bearbeitung der Fragestellung und zur Ermittlung der Ergebnisse in Kapitel 6 angewendet wurde. Sie enthält die Zuordnung der Methoden zu den einzelnen Abschnitten des Ergebnisteils.

Tabelle 22: Überblick der angewendeten Methoden

Methoden	Schriftliche Befragung	Modellierung	Fallstudie	Zeitreihenanalyse	Deckungsbeitragskalkulation	Arbeitsstudie	Literaturstudie	Sensitivitätsanalyse	Nutzwertanalyse
Kapitel	5.1	5.2	5.3	5.4	5.5	5.6	5.7	5.8	5.9
6.1 Heizwerksumfrage	x								
6.2 Biomasseentnahme und Nährstoffaustrag		x	x						
6.3 Vergleich der Bereitstellung von Industrie- und Energieholz				x	x				
6.4 Ablaufabschnitte der Bereitstellung von Hackschnitzeln						x	x		
6.5 Abstimmung von Hack- und Transportkapazität		x	x					x	
6.6 Logistikketten zur Bereitstellung von Waldhackschnitzeln frei Heizanlage		x							x
6.7 Vergleich der ausgewählten Logistikketten							x		x
6.8 Entscheidungsfindung zur Auswahl einer Logistikkette									x

Alle Volumina, Massen und Heizwerte von Energieholz wurden innerhalb dieser Arbeit mit den in Kapitel 4.1 angegebenen Faktoren umgerechnet.

5.1 Schriftliche Befragung

Ziel der Befragung war es, für Forstbetriebe relevante Informationen zu den aktuell in Holzheizwerken eingesetzten Mengen sowie zu den Preisen zu erhalten. Dazu wurde eine Vollerhebung (SCHNELL et al. 1995)²⁷ bei den staatlich geförderten Heizwerken in Bayern durchgeführt. Im Frühjahr 2002 wurden 103 Heizwerke schriftlich gebeten, einen Fragebogen auszufüllen.

Dieses Vorgehen war sinnvoll, da die Heizwerksbetreiber zur Beantwortung der Fragen ihre Betriebsunterlagen konsultieren mussten. Dies wäre bei einer telefonischen Befragung kaum möglich gewesen. Die Methode der **schriftlichen Befragung** bietet demnach den Vorteil, dass der Befragte genügend Zeit hat, sich mit der Fragestellung zu beschäftigen und nicht unter Zeitdruck antworten muss. Als Nachteil ist zu werten, dass die Rücklaufquote der Fragebögen häufig nicht befriedigt.

²⁷ Die schriftliche Befragung wird mit der sozialempirischen Nomenklatur von SCHNELL et al. (1995) beschrieben.

Der verwendete **Fragebogen** (siehe Anhang 5) war vollstandardisiert. Er bestand aus 19 meist geschlossenen Fragen²⁸, wovon zwei in Tabellen beantwortet werden sollten. Bei drei der Fragen gab es neben der anzukreuzenden Antwort die Möglichkeit, eigene Kommentare hinzuzufügen. Die sechs Fragen, die offen gestellt wurden, sind nur bedingt als solche zu bezeichnen. Hier wurde zum Beispiel nach dem Standort des Heizwerkes oder dem Preis für Biomasse gefragt. Die Antworten darauf ließen insofern keine freie Meinungsäußerung der Antwortenden zu.

Thematisch befasste sich der Fragebogen zunächst mit technischen Daten der Heizwerke. Der Schwerpunkt lag beim Biomasseeinsatz. Es wurde z. B. hinterfragt, welche Biomassen zu welchen Preisen eingesetzt werden oder wie die Beschaffung der Biomasse abgewickelt wird.

Die Heizwerksbetreiber hatten die Möglichkeit, unterschiedliche Bezugsmaße für Mengen und Energie auszuwählen oder selbst anzugeben. Im Rahmen der Datenbank gestützten Auswertung wurden die Angaben einheitlich mit den in Kapitel 4.1 angegebenen Faktoren umgerechnet. Kapitel 6.1 zeigt die Ergebnisse der Umfrage durchgängig mit dem **Bezugsmaß t atro**, der Tonne Trockenmasse.

5.2 Modellierung

Für alle Modellierungen wurde das Tabellenkalkulationsprogramm Excel verwendet. Die Masken der Modelle wurden mit farblich hervorgehobenen Eingabefeldern für die veränderbaren Parameter bedienerfreundlich gestaltet.

5.2.1 Biomasseentnahme und Nährstoffaustrag

Wesentliche Eingangsgrößen in das Modell zur Abschätzung der Biomasseentnahme und des damit verbundenen Nährstoffaustrags sind die in Kapitel 4.3 dargestellten Grundlagen. Sie basieren auf den Literaturlauswertungen von JACOBSEN et al. (2002) sowie auf den Arbeiten von KREUTZER (1979) und DIETRICH et al. (2002). Aus diesen Angaben wurde eine Auflistung der wichtigsten Nährelemente erstellt, anhand derer sich die Biomasse- und Nährstoffentnahmen in kg/t atro bzw. in kg/ha angeben lassen.

²⁸ Von einer geschlossenen Frage spricht man, wenn dem „Befragten zugleich auch alle möglichen oder zumindest relevanten Antworten – nach Kategorien geordnet – vorgelegt werden“ (ATTESLANDER 1995). Die offene Frage dagegen enthält keine festen Antwortkategorien.

5.2.2 Abstimmung von Hack- und Transportkapazität

Im Folgenden wird der Aufbau eines Kalkulationsmodells für die kostenoptimierte Abstimmung von Hackleistung und Transportkapazität vorgestellt. Gleichzeitig werden für die Parameter des Modells exemplarisch Werte der in Kapitel 5.3.2 beschriebenen Fallstudie²⁹ eingesetzt. Das Modell berücksichtigt die folgenden Parameter.

Hackleistung

Die Hackleistung je Zeiteinheit hängt im Praxisbetrieb im Wesentlichen von der Motorleistung sowie den erforderlichen Umsetz- und Wartezeiten ab. Im Beispiel wurde eine maximale Hackerleistung von 90 Srm/h angenommen, für den Fall, dass keine Umsetz- oder Wartezeiten auftreten. Dies kann in etwa für ein 200 kW starkes Aggregat gelten, das konzentriert abgelegte Fichtenkronen mit Durchmesser am starken Ende von 15 bis 20 cm hackt (SCHUHBAUER, 2004).

Kosten für Hacker und LKW

Die Kosten enthalten in diesem Fall Maschinen- und Personalkosten. Angesetzt wurden im Beispiel 200 € je Stunde für den **Hacker** sowie 60 € je Stunde für den **LKW**. Inbegriffen sind dabei die Kosten für einen Anhänger und zwei Container. Im Beispiel wurde mit zwei Containern gerechnet. Wird nur mit einem Container gearbeitet, sind die LKW-Kosten entsprechend anzupassen.

Containergröße, Füllungsgrad und Containerinhalt

In der Praxis stehen aus anderweitigen Einsatzbereichen sehr unterschiedliche Containergrößen zur Verfügung. Bewährt haben sich für den Hackschnitzeltransport die Größen über 30 m³ Fassungsvermögen. Im Beispiel wurde von Containern ausgegangen, die 40 m³ fassen. Angenommen wurde die Befüllung eines solchen Containers mit 35 Srm. Dem entspricht ein **Füllungsgrad** von 87,5 %. Bei Hackschnitzeln mit hohem Wassergehalt und/oder Baumarten mit hoher Rohdichte überschreiten häufig zwei voll befüllte Container bereits das zulässige Gesamtgewicht.

Wie unter Kapitel 4.1.2 angeführt, kann sich die Befüllung bei der Fahrt verdichten. Wesentlich ist aber die anfängliche Befüllung, da sie das Transportvolumen bestimmt.

²⁹ Die Fallstudie wurde im Bereich des Forstamts Freising durchgeführt. Beliefert wurde ein Heizkraftwerk in Pfaffenhofen an der Ilm (SCHUHBAUER 2004).

Im Beispiel wurde – abgeleitet aus Containergröße und Füllungsgrad – mit einem **Containerinhalt** von 35 Srm gerechnet.

Transportgeschwindigkeit

Vor allem die befahrenen Straßenkategorien bestimmen die für LKW erreichbaren durchschnittlichen Geschwindigkeiten. Folgende Durchschnittswerte für Schwerlastverkehr wurden in Anhalt an eigene Studien und WEISE (2001) angenommen:

Tabelle 23: Durchschnittliche Transportgeschwindigkeiten für Schwerlastverkehr auf unterschiedlichen Straßenkategorien

Straßenkategorie	Transportgeschwindigkeit in km/h
Waldstraße, unbefestigte Wege	10
Orts-/Stadtverkehr	30
Kreisstraße	50
Bundesstraße	60
Autobahn	80

In der Regel werden mehrere "Straßenkategorien" befahren. Je nach ihren Anteilen lässt sich aus Tabelle 23 eine durchschnittliche Fahrgeschwindigkeit ableiten. WEISE (2001) hält aufgrund eigener Untersuchungen für den Transport von landwirtschaftlichen Gütern mit Container-LKW auf Landstraßen ohne Autobahnbenutzung einen Wert von 45 km/h für realistisch.

Für das Beispiel wurde mit einer Geschwindigkeit von 50 km/h³⁰ gerechnet (SCHUBAUER 2004).

Entfernung

Die Transportkosten werden wesentlich durch die Entfernung beeinflusst. Als durchschnittliche, einfache Transportentfernung zur Belieferung der bayerischen Heizwerke wird grob ein Wert von 15 km einfach geschätzt³¹. In der Praxis liegen die Transportwege insbesondere für die größeren Heiz(kraft)werke oft deutlich höher.

Im Beispiel wurde die einfache Transportentfernung mit 15 km angesetzt.

³⁰ Dies entspricht – bezogen auf Tabelle 23 – beispielsweise einem Zeitanteil von je 10 % Waldstraße und Ortschaft, 60 % Kreisstraße und 20 % Autobahn.

³¹ Herleitung siehe Kapitel 5.2.3

Abladezeit/Wartezeit am Heizwerk

Je nach Gegebenheit am Heizwerk entstehen unterschiedlich lange Abladezeiten.

Einflussfaktoren sind:

- Präsenz von Personal zum Einweisen;
- Wartezeiten aufgrund anderer LKW;
- Art der Bestimmung der Liefermenge (Volumen, Gewicht oder Trockenmasse);
- Wartezeiten an der Waage;
- Wartezeiten zur Entnahme von Trockengehaltsproben;
- Ablauf beim Abkippen des Containers auf dem Anhänger;
- Möglichkeit, beide Container z. B. über eine Wippe zugleich abzukippen;
- räumliche Lage und Größe des Lagers;
- Rangiermöglichkeiten am Lager.

Im Beispiel wird eine Ablade-/Wartezeit von 30 Minuten angenommen, die SCHUHBAUER (2004) für ein Heizkraftwerk im Rahmen einer Expertenbefragung feststellte.

5.2.3 Logistikketten für Waldhackschnitzel frei Heizanlage

Ein wesentlicher Bestandteil dieser Arbeit beruht auf der Beschreibung und vergleichenden Auswertung von zehn ausgewählten **Logistikketten für Hackschnitzel frei Heizanlage** in Kapitel 6. Die erforderlichen Daten dazu stammen aus Arbeitsstudien der LWF, der forstlichen Literatur oder speziell hergeleiteten Modellen. Wichtigste Ausgangsgröße für die Berechnungen war die durchschnittliche Leistung für die einzelnen Teilarbeiten der Hackschnitzelbereitstellung.

In Kapitel 6.4 wird im grafischen Vergleich dargestellt, mit welchen Verfahren unterschiedlichster Mechanisierungsstufe und Leistungsfähigkeit die **Teilarbeiten** geleistet werden können. Angegeben werden auch die Funktionen zur Berechnung der Leistung in Abhängigkeit vom BHD. Die Teilarbeitsschritte und zugehörigen Verfahren werden in der Folge in Kapitel 6.6 aufgegriffen und zu Logistikketten kombiniert.

Für die Logistikketten werden aus den zugeordneten Leistungswerten Bereitstellungskosten hergeleitet. Die zugrunde gelegten **Maschinen- und Personalkosten** resultieren teilweise aus eigenen Arbeitsstudien, teilweise aus der Literatur oder aus überschlägigen Kalkulationen. Sie können dem Anhang 1 entnommen werden.

Die Logistikketten weisen unterschiedliche **Mechanisierungsgrade** auf. Ketten, bei denen eine oder mehrere Teilarbeiten nicht mechanisiert ablaufen, werden als teilmechanisiert bezeichnet. Nicht mechanisiert ist ein Arbeitsschritt, wenn mit Handwerkzeugen oder mit handgeführten Maschinen wie der Motorsäge gearbeitet wird (LÖFFLER 1991). Bei vollmechanisierten Logistikketten sind die Teilarbeiten durchgängig mechanisiert.

Tabelle 24 zeigt den Aufbau der zehn ausgewählten Logistikketten. Alle Ketten enden an der Heizanlage („Lieferung frei Heizwerk“).

Tabelle 24: Übersicht zu den Ablaufabschnitten und Leistungsfunktionen mit Quellenangabe für zehn ausgewählte Logistikketten

Ablaufabschnitte	Ausgewählte Logistikketten										Funktionen	Quellen	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10			Leistung in Srm/h GAZ
Fällen													
Motormanuell	x	x										$y = 1,03x - 4,94$	Feller und Riedelberger (2001)
Seillinie "Neustadt"			x	x	x							$y = 2,0375x - 12,25$	Weixler et al. (1999)
Harvester						x						$y = 2,7987x - 20,717$	Feller et al. (1999)
Hackschnitzelharvester							x					$y = 2,3482x - 14,953$	Feller et al. (1998)
Mehrfachfällkopf								x				$y = 1,845x - 10,852$	Weixler und Feller (2001)
Vorliefern/Rücken/Bündeln													
Händisch	x											$y = 3$	Patzak (1984)
Seilschlepper		x										$y = 0,5x$	Dummel und Branz (1986)
Rückewagen			x									$y = 1,0714x + 1,0714$	KWF (1992)
Zangenschlepper				x								$y = 0,8125x + 9,75$	Weixler et al. (1999); KWF (2000)
Forwarder						x		x				$y = 1,2075x + 8,5175$	Lüthy (1997)
Shuttle							x					$y = 20$	Feller et al. (1998)
Rückewagen für Kronen									x			$y = 1,7325x - 9,5424$ *	Krichbaum et al. (2003)
Forwarder für Kronen										x		$y = 3,0871x - 17,079$ *	Krichbaum et al. (2003)
Bündler											x	$y = 19$	Wittkopf (2004)
Hacken													
Handbeschnitt, Rückegasse	x											$y = 9$	Patzak (1984)
Anhängehacker		x	x	x							x	$y = 20,75$	Weixler et al. (1999); KWF (2000)
Aufbauhacker, Rückegasse					x							$y = 2,0806x - 6,2298$	Feller und Riedelberger (2001)
Hacker auf LKW						x	x	x				$y = 2,9331x - 8,1535$	Stampfer (1997)
Transport													
Schlepper mit Hängern	x	x	x									$y = 0,0068x^2 - 0,6066x + 16,27$	Patzak (1984)
LKW mit Hängern				x	x	x	x	x	x	x		$y = 0,0206x^2 - 2,2023x + 81$	Patzak (1984)

* die Leistung (y) bezieht sich hier nicht auf den BHD, sondern auf den unteren Durchmesser der Kronen (x)

Zur besseren Vergleichbarkeit der Ergebnisse wurde in allen Ketten eine **Transportentfernung von 15 km³²** angenommen. Für diese Distanz kommt – je nach Kostenkonstellation – sowohl noch der Transport der Hackschnitzel mit landwirtschaftlichen Hängern (Logistikketten 1 bis 3) als auch bereits der Einsatz von LKW mit Containern in Frage (Logistikketten 4 bis 10).

³² Teilt man die Landesfläche Bayerns (10 Mio. ha) durch die Anzahl der Heizwerke (100) ergibt sich ein Einzugsgebiet je Heizwerk von 1.000 km². Dies entspricht einem Kreis mit Radius von etwa 18 km. Die Hälfte dieser Kreisfläche wäre über einen Radius von 12,5 km zu erreichen. Da die Fahrten in der Praxis von der Luftlinie abweichen, wird über einen Zuschlag von 20 % ein Wert von 15 km angenommen.

Alle Ketten werden in Kapitel 6.6 anhand von **Matrixschemata** nach WARKOTSCH (1975) mit Piktogrammen bildlich dargestellt. Die Matrix ordnet die Teilarbeiten vertikal nach ihrer zeitlichen Abfolge und horizontal nach dem Arbeitsort.

Die Logistikketten 1 bis 8 bilden den vollständigen Ablauf der Bereitstellung vom stehenden Bestand bis zum Heizwerk ab. Für die Logistikketten 9 und 10 zur Gewinnung von Hackschnitzeln aus Kronenrestholz entfällt dagegen die Teilarbeit „Fällen“.

5.3 Fallstudie

5.3.1 Fallstudie Biomasseentnahme und Nährstoffaustrag

Der **Versuchsbestand** war ein 100-jähriger, lichter Fichtenbestand auf der Münchener Schotterebene. Der Entnahmesatz betrug 118 Erntefestmeter Stammholz pro Hektar. Die Aufarbeitung lief motormanuell. Gezopft wurde durchschnittlich bei 14 cm mit Rinde.

Im Anschluss an die Ernte und Entnahme des Stammholzes brachte ein Rückezug die **Resthölzer** an die Waldstraße. Abgesehen von einzelnen faulen oder gebrochenen Stammteilen wurden nur Kronen oder stärkere Bruchteile davon aufgesammelt. Bei der Entastung des Stammholzes abgetrennte Äste oder schwächere Bruchstücke der Kronen wurden nicht gerückt. Diese praxisnahe Anweisung für das Rücken berücksichtigt einerseits zugunsten der Wirtschaftlichkeit das Stück-Masse-Gesetz, andererseits begrenzt sie den Nährstoffentzug. Erzeugt wurden insgesamt 130 Srm Hackschnitzel für ein nahe gelegenes Heizwerk.

Gerückt und zu **Hackschnitzeln** verarbeitet wurden 388 zuvor vermessene³³ Reststücke, darunter 348 Kronen. Damit war das Schaftholzvolumen in fm mit Rinde bekannt. Daraus wurde mit dem Umrechnungsfaktor 2,5 das Schüttvolumen der Hackschnitzel aus dem reinen Schaftholz von 64 Srm hergeleitet. Die Differenz aus gesamtem Hackschnitzelvolumen und diesem Wert ergab 66 Srm aus den anhaftenden, mitgehackten Ästen und Nadeln. Über durchschnittliche Verhältniszahlen der Baumkompartimente (vgl. Kapitel 4.3.1) wurde der Anteil der Äste und Nadeln am Hackgut geschätzt.

³³ Bei den Kronen wurde jeweils die Länge der Krone gemessen und der Durchmesser am unteren Ende der Krone, in der Folge als „Kronenfuß“ bezeichnet (entspricht dem Aufarbeitungszopf des Stammholzes). Anhand einer sektionsweise vermessenen Stichprobe wurde eine durchschnittliche Abholzigkeit der Kronen hergeleitet. Aus Länge, Kronenfuß und Abholzigkeit wurde das Schaftholzvolumen in Festmeter mit Rinde ermittelt.

Der **Nährstoffaustrag** wurde über die in Kapitel 4.3 angegebenen und im Modell (Kapitel 6.2.1) enthaltenen Durchschnittswerte für das Verhältnis der Baumkompartimente und deren Nährstoffgehalte berechnet.

5.3.2 Fallstudie zur Abhängigkeit der Hack- und Transportkosten

Das Kalkulationsmodell zur Abstimmung der Hack- und Transportkapazität beruht auf Daten, die im Rahmen einer Fallstudie im Bereich des Forstamts Freising erhoben wurden (SCHUHBAUER 2004). Beliefert wurde ein Heizkraftwerk im etwa 30 km entfernt gelegenen Pfaffenhofen an der Ilm. An sechs vollen Einsatztagen wurden mit **Arbeitsstudien** Daten zu den Zeitanteilen der Teilarbeiten Hacken und Transport erhoben. Dabei wurde ein Volumen von über 3.000 Srm Fichtenhackschnitzeln abgewickelt.

5.4 Zeitreihenanalyse

Neben der Analyse von Zeitreihen des statistischen Bundesamtes für die Empfehlungen zur Gestaltung langfristiger Lieferverträge (Kapitel 4.5.2), wurden für Vergleiche der Deckungsbeiträge von Industrieholz bzw. Energieholz auch bayerische Holzpreisreihen ausgewertet.

Herangezogen wurde die **Holzpreisstatistik** der Bayerischen Staatsforstverwaltung für die Holzarten Fichte, Kiefer, Buche und Eiche. Um längerfristige Trends zu erkennen, wurden die Jahresstatistiken ab 1980 einbezogen. Soweit sinnvoll möglich, wurde vor allem das nach Gewichtsmaß verkaufte Industrieholz (IG) betrachtet. Der Gewichtsverkauf setzt sich zunehmend als transparentes (Werks)maß im Industrieholzbereich durch. Für Energieholz ist er im Heizwerksbereich ebenfalls weit verbreitet.

Für die **Fichte** wurden ausschließlich die Preise für Industrieholz kurz (IS) herangezogen. Der Verkauf von IS nach Raummaß ist nach wie vor Standard beim Fichtenindustrieholz. Der Verkauf von IL ist eher ungewöhnlich, da bei längeren Sortimenten in der Regel sägefähige Abschnitte enthalten sind. Auch der Verkauf nach Gewicht hat sich bei der Fichte bisher kaum etabliert. Hinter der Sorte IS verbergen sich mehrere Qualitäten (IS N, IS F, IS K), die entsprechend ihren Anteilen berücksichtigt wurden.

Bei der **Kiefer** wurde ab 1990 auf das nach Gewichtsmaß verkaufte Industrieholz (IG) zurückgegriffen. Zuvor wurden nur geringe Mengen nach Gewicht verkauft. Bis 1989 wurde daher nach Raummaß verkauftes Kiefern IS einbezogen. Unter IS verbergen sich wiederum

mehrere Güteklassen (IS N, IS F, IS K). Kiefern-IL floss nicht in die Auswertungen ein, da gerade in der Vergangenheit höhere Anteile sägefähiger Stämme und Stammteile darunter verbucht waren.

Industrieholz sowohl aus **Buche** als auch aus **Eiche** wird heute überwiegend nach Gewicht verkauft. In der Holzpreisstatistik ließ sich aber sinnvoll erst ab 1992 auf Werte für IG zurückgreifen. Deshalb wurden für die Jahre bis 1991 die Werte für Industrieholz lang (IL) umgerechnet. IS-Sortimente wurden nicht einbezogen, da sie bei Buche und Eiche in der Regel nicht der industriellen Verwertung zugeführt, sondern als Brennholz verkauft werden.

5.5 Deckungsbeitragskalkulation

Für vergleichende Kalkulationen zur Wirtschaftlichkeit der Hackschnitzel- oder Industrieholzbereitstellung für den Forstbetrieb sind Abnahmekonditionen und **Preise für Hackschnitzel sowie Industrieholz** nötig. Die Hackschnitzelpreise wurden über die schriftliche Befragung ermittelt, die Industrieholzpreise über eine Auswertung der Holzpreisstatistik der Bayerischen Staatsforstverwaltung.

5.6 Arbeitsstudie

Forstliche Arbeitsstudien werden gemäß REFA (1991) durchgeführt. Dabei werden die Arbeitsabläufe in Ablaufarten und ihre zugehörigen Zeitwerte, die Zeitarten, unterteilt. Die **Gesamtarbeitszeit** (GAZ) setzt sich zusammen aus Reiner Arbeitszeit (RAZ) und Allgemeinen Zeiten (AZ). Die Reine Arbeitszeit umfasst alle planmäßigen, der Erfüllung der Arbeitsaufgabe dienenden Zeiten (LÖFFLER 1992). Die Allgemeinen Zeiten beinhalten alle mit der Erfüllung der Arbeitsaufgabe nicht unmittelbar in Verbindung stehenden Abläufe. Tabelle 25 zeigt die Aufteilung der Zeitarten.

Tabelle 25: Aufteilung der Zeitarten nach Löffler (1992)

Gesamte Arbeitszeit (GAZ)				
Reine Arbeitszeit (RAZ)	Allgemeine Zeiten (AZ)			
	Rüstzeit	Sachliche Verteilzeit	Erholzeit	Persönlich bedingte Verteilzeit

5.7 Literaturstudie

Zurückgegriffen wurde auf vorhandene Literatur in den Bibliotheken der LWF und des Lehrstuhls für Forstliche Arbeitswissenschaft und Angewandte Informatik. Aus Vorarbeiten

seit mehreren Jahrzehnten am Lehrstuhl (LÖFFLER, PATZAK) und seit 1992 an der LWF lagen bereits mehrere einschlägige Publikationen vor. Daneben wurden forst- und holzwirtschaftliche Fachzeitschriften herangezogen. Intensiv ausgewertet wurden außerdem einige Publikationen des Kuratoriums für Wald und Forstwirtschaft. Viele Quellen wurden mit dem „Schneeballsystem“ über die Literaturangaben einschlägiger Publikationen eruiert. Daneben unterstützten Internetrecherchen über die Suchmaschine „google“ die Literaturliteraturfindung.

5.7.1 Ablaufabschnitte bei der Bereitstellung von Waldhackschnitzeln

Wenn aus der zitierten Literatur Werte zur Gesamten Arbeitszeit (GAZ) verfügbar waren, wurden diese herangezogen. Lagen dagegen nur Angaben zur Reinen Arbeitszeit (RAZ) vor, wurde sie mit einem pauschalen **Aufschlag für Allgemeine Zeiten** von 20 % versehen. Diese Größenordnung ist ein Erfahrungswert aus vielen Holzernteuntersuchungen und kann auch für die hier vorgestellten Logistikketten als plausibel angenommen werden (vgl. FELLER et al. 1999; WEIXLER et al. 1999; PAUSCH 2002).

Um Leistungen anzugeben, müssen **Bezugsmengen** eingeführt werden. Als Bezugsmaße werden im Rahmen dieser Arbeit verschiedene Volumen-, Gewichts- und Energiemaße verwendet. Die Umrechnungszahlen sind in Kapitel 4.1 genannt. Literaturangaben zu Leistungswerten wurden, soweit nicht bereits in dieser Form vorliegend, in Schüttraummeter je GAZ in Abhängigkeit vom BHD umgerechnet. Waren in den zugrunde liegenden Studien die Leistungen auf die Stückmasse bezogen, so wurde – analog zu WITTKOPF et al. (2003) – der BHD-Wert zur jeweiligen Stückmasse nach dem im Anhang 3 aufgeführten Schema ermittelt.

Die **Leistungswerte in Abhängigkeit vom BHD** wurden in linearen Funktionen dargestellt (Kapitel 6.4). Der überwiegende Teil der Daten aus der Literatur lag bereits in Form von linearen Funktionen vor. Teilweise wurden neue lineare Beziehungen hergeleitet, teilweise wurden quadratische oder komplexere Beziehungen mit Ausgleichsgeraden vereinfacht.

Für den engen BHD-Bereich zwischen 10 und 20 cm erscheint dieses Vorgehen zulässig. Die Bestimmtheitsmaße der linearen Beziehungen spiegeln wider, dass das Stück-Masse-Gesetz in diesem Bereich noch akzeptabel über lineare Funktionen abgebildet werden kann. Zudem liefern Leistungsangaben aus der Verknüpfung unterschiedlicher Arbeitsstudien, wie in dieser Arbeit vorgenommen, niemals exakte, sondern nur **orientierende Leistungswerte**.

Für die **Leistungswerte in Abhängigkeit von der Entfernung** beim Hackschnitzeltransport war es dagegen erforderlich, mit quadratischen Gleichungen zu arbeiten. Lineare Gleichungen sind hier ungeeignet, da sie Schnittpunkte mit x- und y-Achse aufweisen und daher die tatsächlichen, asymptotischen Leistungsverläufe falsch abbilden.

5.7.2 Vergleich der ausgewählten Logistikketten

Die ausgewählten Logistikketten wurden nach Leistung und Kosten sowie nach Energieverbrauch verglichen. Für die Berechnung der Energiebilanz wurde auf Literaturdaten zurückgegriffen. Zunächst wurde der Energieaufwand ermittelt und anschließend der im Holz enthaltenen Energie gegenübergestellt.

Zur Herleitung des **Energieverbrauchs** wurde im ersten Schritt der Kraftstoffverbrauch der Maschinen bei der Hackschnitzelbereitstellung frei Heizwerk betrachtet. Der Energieverbrauch bei der Herstellung der eingesetzten Maschinen oder beim Recycling aus dem Betrieb genommener Maschinen wurden nicht berücksichtigt. Studien haben ergeben, dass dieser Energieaufwand bei Großmaschinen gegenüber dem Energieverbrauch während der Einsatzzeit kaum ins Gewicht fällt (KWF 2000; KNECHTLE 1997³⁴).

Die in Kapitel 3 bzw. 4 angegebenen Leistungswerte je Maschinenarbeitsstunde (MAS) wurden mit **Verbrauchsangaben** nach HAKKILA (1989), LÖFFLER (1991), WEISE (2001), PAUSCH (2002) und WITTKOPF (2004) hochgerechnet. Tabelle 26 zeigt die angenommenen Werte für die einzelnen Maschinen und Logistikketten³⁵. Im Anhang 2 findet sich eine Übersicht der jeweils zugrunde liegenden Funktionen und Quellen.

³⁴ Der Energieaufwand bei der Herstellung macht bei den von KNECHTLE (1997) untersuchten Forstmaschinen (Harvester, Forwarder, Skidder) nur 2,1 % bis 3,4 % am Gesamtenergieverbrauch aus (Motorsäge 0,36 %). Bezieht man den Energieverbrauch, der bei der Gewinnung der Rohmaterialien (z. B. Stahl, Gummi) der Forstmaschinen anfällt, zusätzlich mit ein, liegt die „graue Energie“ zwischen ca. 12 % und 20 % bei den Forstmaschinen und bei 2,2 % bei der Motorsäge.

³⁵ Die Logistikketten werden in den Kapiteln 5.2.3 und 6.6 ausführlich beschrieben.

Tabelle 26: Kraftstoffverbrauch und CO₂-Emissionen je Maschinenarbeitsstunde

Teilarbeit	Maschine	Verfahren	Motorleistung	Verbrauch
		Nummer	kW	l/MAS
Fällen				
	Motorsäge	1, 2, 3, 4, 5	2,5	0,9
	Harvester	6, 8	70	11,0
Vorliefern/Rücken/Bündeln				
	Schlepper mit Rückewagen	3	70	6,3
	Seilschlepper	2, 3, 4, 5	50	4,5
	Zangenschlepper	4	90	8,1
	Forwarder	6, 7, 8	55	5,4
	Bündler auf LKW	10	353	11,3
Hacken				
	Schlepper mit Anbauhacker	1	50	9,0
	Schlepper mit Anhängenhacker	2, 3, 4	70	20,8
	Aufbauhacker auf Forwarder	5	95	26,3
	Hackschnitzelharvester	7	130	33,6
	Aufbauhacker auf LKW	6, 8, 10	235	35,0
Transport				
	Schlepper mit 2 Hängern	1, 2, 3	75	20,0
	LKW mit 2 Containern	4 bis 10	290	70,0

Ein Liter Diesel enthält 10 kWh Energie und emittiert bei seiner Verbrennung 2,7 kg CO₂ je Liter (FRAUENHOFER ISI 2001). Für Motorsägenarbeiten verbrauchtes Benzin wurde seinem Energieinhalt von 9 kWh/l entsprechend auf **Dieseläquivalent** umgerechnet.

Im zweiten Schritt wurde der Energieinput auf die im angelieferten Holz enthaltene Energie bezogen. Die Grundlagen für die Herleitung der Energieinhalte des Holzes sind in Kapitel 4.1 angegeben. Die Ergebnisse lassen sich als „**Bereitstellungsenergie**“ von Hackschnitzeln interpretieren.

5.8 Sensitivitätsanalyse

Mit Sensitivitätsanalysen wird überprüft, wie empfindlich Ergebnisgrößen auf Änderungen ihrer Einflussgrößen reagieren.

Um die Gesamtkosten bei der Bereitstellung von Hackschnitzeln zu optimieren, sollte die teuerste Maschine, der Hacker, möglichst voll ausgelastet sein. Hackerkosten und Transportkosten hängen aber eng zusammen. Bei der Steuerung dieser beiden Teilarbeiten muss die Transportentfernung berücksichtigt werden, um die Gesamtkosten zu optimieren. Anhand eines Kalkulationsmodells und einer Sensitivitätsanalyse wird dies verdeutlicht.

5.9 Nutzwertanalyse

Für die Entscheidung, ob überhaupt Hackschnitzel bereitgestellt werden und wenn ja, mit welchen Verfahren, müssen eine Vielzahl von technischen, ökologischen und sozio-ökonomischen **Zielsetzungen eines Forstbetriebs** berücksichtigt werden. Die zwischen den einzelnen Zielen bestehenden Beziehungen können komplementärer, konkurrierender oder indifferenter Art sein (KROTH et al. 1976). Zwei Ziele sind komplementär, wenn mit dem Grad der Erfüllung des einen Zieles auch der Grad der Erfüllung des anderen Zieles steigt, konkurrierend wenn er fällt. Indifferent verhalten sie sich, wenn die Erfüllung eines Zieles keinen Einfluss auf die Erreichung eines anderen ausübt.

In der Regel liegen bei Entscheidungsprozessen zu Alternativen gemischte Zielbeziehungen vor. Zur Lösung solcher Zielkonflikte bietet es sich an, auf das Instrument der Nutzwertanalyse zurückzugreifen. Damit lassen sich Alternativen umfassend vergleichen und nachvollziehbare Entscheidungen treffen.

Die **Definition der Nutzwertanalyse** nach ZANGEMEISTER (1976) lautet:

„Nutzwertanalyse ist die Analyse einer Menge komplexer Handlungsalternativen mit dem Zweck, die Elemente dieser Menge entsprechend den Präferenzen des Entscheidungsträgers bezüglich eines multifunktionalen Zielsystems zu ordnen. Die Abbildung dieser Ordnung erfolgt durch die Angabe der Nutzwerte (Gesamtwerte) der Alternativen“.

Innerhalb dieser Arbeit wurde eine EDV-gestützte Nutzwertanalyse durchgeführt³⁶. Zum Einsatz kam aufgrund der guten grafischen Auswertungsmöglichkeiten die **Software CELSIEVAL** (CELSI AG, 2003).

Folgende Schritte sind für eine Nutzwertanalyse mit CELSIEVAL notwendig:

1. Entscheidungskriterien festlegen, ordnen und gewichten,
2. Bewertungstyp und Bewertungsmaßstab für die Kriterien festlegen,
3. Varianten eingeben und nach den Kriterien bewerten,
4. Nutzwerte der Varianten berechnen und gegenüberstellen.

³⁶ Nutzwertanalysen können mit selbst erstellten Tabellenkalkulationen durchgeführt werden. Mehr Komfort und integrierte grafische Auswertungen bieten Programme wie yooscore (Shareware unter www.yooscore.de) oder CelsiEval (Demo unter www.celsi.ch).

Zunächst wurden die **Entscheidungskriterien** festgelegt. Tabelle 27 listet acht exemplarisch ausgewählte Kriterien für die Hierarchiestufe 1 auf. Vorwiegend handelt es sich um allgemein gehaltene Überbegriffe, deren messbare Kriterien erst in der zweiten Hierarchiestufe erscheinen. Die Gewichtung (Spalte G) innerhalb der ersten Hierarchieebene erfolgte durch paarweisen Vergleich (P), die zweite Ebene wurde vereinfacht gewichtet (V). Aus der Kombination der Gewichtung der beiden Hierarchiestufen ergibt sich das absolute Gewicht der einzelnen Kriterien (Spalte %).

Tabelle 27: Definition und Gewichtung der Entscheidungskriterien

Kriterium	1	2	3	4					G	%
1. Wirtschaftlichkeit	16,79								P	16,79
1.1. Bereitstellungskosten		60,00							V	10,07
1.2. Potentieller Hackguterlös		40,00							V	6,72
2. Hackschnitzelqualität	14,23								P	14,23
2.1. Grünanteil		33,33							V	4,74
2.2. Erzielbarer Wassergehalt		66,67							V	9,49
3. Ergonomie	12,04								P	12,04
3.1. Arbeitsschwere		66,67							V	8,03
3.2. Unfallgefährdung		33,33							V	4,01
4. Organisationsaufwand	12,41								P	12,41
4.1. Störungsempfindlichkeit		33,33							V	4,14
4.2. Maschinenverfügbarkeit		33,33							V	4,14
4.3. Kombinationsmöglichkeit mit Holzerte		33,33							V	4,14
5. Pfleglichkeit	13,14								P	13,14
5.1. Befahrungsschäden		33,33							V	4,38
5.2. Schäden am verbleibenden Bestand		66,67							V	8,76
6. Nährstoffaustrag	13,50								P	13,50
7. Energieverbrauch	6,20								P	6,20
8. Waldschutzaspekt	11,68								P	11,68
8.1. Risiko eines Borkenkäferbefalls		50,00							V	5,84
8.2. Aktive Borkenkäferbekämpfung		50,00							V	5,84

Die **Auswahl der Beurteilungskriterien** soll einer vergleichenden Beurteilung von Logistikketten zur Hackschnitzelbereitstellung dienen. Sie kann im Rahmen dieser Arbeit nur beispielhaft³⁷ erfolgen und muss im Einzelfall nach Ausgangslage und Zielsetzung angepasst werden. Kriterienwahl, Gewichtung und Bewertung gelten stets nur für eine spezielle Entscheidungssituation. Nachfolgend werden kurz Erläuterungen zu den hier ausgewählten Kriterien gegeben. Sie sollen den Blick auf entscheidungsrelevante Aspekte lenken.

³⁷ Unterstellt wurde ein – für Bayern typischer – naturnah bewirtschafteter, fichtenreicher Forstbetrieb auf gut nährstoffversorgten Standorten.

Das Kriterium **Wirtschaftlichkeit** wird anhand der Gesichtspunkte Bereitstellungskosten und potentieller Hackguterlös beurteilt. Die **Bereitstellungskosten** sollten, verglichen mit den aus der Literatur bekannten Werten, möglichst niedrig liegen. Entscheidend ist aber auch, welche Abnehmer mit der Logistikkette beliefert werden sollen und wie hoch der **potentielle Hackguterlös** dort liegt. In jedem Fall muss geprüft werden, ob es rentabler ist, die Logistikkette mit den geringsten Bereitstellungskosten auszuwählen, oder mit etwas Mehraufwand die speziellen Anforderungen eines Heizwerkes bestmöglich zu erfüllen. Mit einem potentiell höheren Hackguterlös kann möglicherweise dann insgesamt der bessere Deckungsbeitrag erzielt werden.

Die **Hackschnitzelqualität** ist entscheidend, ob eine Heizanlage überhaupt beliefert werden kann. Wichtig ist dabei, welche Höhe der **Grünanteil** einnimmt. Bei Logistikketten, bei denen weder entastet noch gezopft wird, liegt er besonders hoch. Das Material besitzt so nur eine erheblich eingeschränkte Lagerfähigkeit. Bei der Bereitstellung solchen Materials sollte also eine schnelle Verbrennung gewährleistet sein. Insbesondere bei kleineren Anlagen kann auch der **Wassergehalt** des Holzes Probleme bei der Verbrennung verursachen. Logistikketten, die eine gewisse Vortrocknung des Hackholzes erlauben, ermöglichen es, ein breiteres Spektrum an Heizanlagen zu beliefern und sind daher positiv zu werten.

Das Kriterium **Ergonomie** umfasst die beiden Gesichtspunkte Arbeitsschwere und Unfallgefährdung. Die **Arbeitsschwere** muss insbesondere bei manueller Arbeit die teilweise hohen physischen Belastungen berücksichtigen. Bei hochmechanisierten Verfahren, die, möglicherweise bei erheblicher Einwirkung von Lärm und Vibrationen, laufend hohe Konzentration erfordern, tritt demgegenüber eher die psychische Belastung in den Vordergrund. Die **Unfallgefährdung** ist in der Regel bei den manuellen und motormanuellen Teilarbeiten deutlich höher als bei den hochmechanisierten Schritten.³⁸

Der Planungs- und **Organisationsaufwand** einer Logistikkette gibt häufig den Ausschlag für den Einsatz. Dabei muss umso sorgfältiger geplant werden, je höher die **Störungsempfindlichkeit** liegt. Besonders empfindlich sind Logistikketten, bei denen Teilarbeiten gekoppelt ablaufen müssen. Auch bei optimaler Planung lassen sich systembedingte Wartezeiten häufig nicht vermeiden. Ein weiteres wichtiges Kriterium bei der Bereitstellung von Hackschnitzeln ist daneben die **Maschinenverfügbarkeit**. Teilweise existieren Maschinen nur in Form von Prototypen. Andere dagegen sind weit verbreitet. Dies erlaubt es Forstbetrieben, etwa durch Ausschreibung innerhalb größerer Bieterkreise,

³⁸ Langzeitvergleiche der motormanuellen mit der mechanisierten Holzernte ergaben eine Reduktion der Unfälle von 90 % (OHRNER 2000).

bessere Konditionen auszuhandeln. Positiv muss zusätzlich eine möglichst gute **Kombinierbarkeit mit der Holzernte** bewertet werden. Wenn sich die Ernteverfahren oder die Maschinen aus der Stammholzbereitstellung einsetzen lassen, ergeben sich Synergieeffekte beispielsweise durch geringere Umsetzkosten und eine höhere zeitliche Auslastung.

Je nach bodenökologischer und waldbaulicher Ausgangslage eines Bestandes kann auch der potentielle **Nährstoffaustrag** bei der Hackschnitzelgewinnung eine wichtige Rolle bei der Entscheidungsfindung spielen. Bewertet werden muss, in welchem Umfang bei den Logistikketten die besonders nährstoffhaltigen Kompartimente Äste und Nadeln dem Ökosystem entnommen werden.

Der **Energieverbrauch** bei der Bereitstellung von Hackschnitzeln nimmt eine wichtige Rolle in der energiepolitischen Diskussion ein. In der Öffentlichkeit ist häufig viel zu wenig bekannt, dass Holz gegenüber den fossilen Konkurrenten auch hier entscheidende Vorteile aufweist. Daneben kann der Energieverbrauch bei weiter steigenden Treibstoffpreisen ein wichtiger Kostenfaktor werden. Schon jetzt macht der Kraftstoffverbrauch etwa ein Viertel der Bereitstellungskosten aus.

Weiterhin wird der **Waldschutzaspekt** aufgegriffen. In Zeiten des schleichenden Klimawandels und der damit verbundenen erhöhten Anfälligkeit unserer Wälder gegenüber Kalamitäten muss bekannt sein, ob und mit welchem **Risiko eines Borkenkäferbefalls** eine Logistikkette zur Bereitstellung von Hackschnitzeln verbunden sein kann. Negativ wirkt es sich dabei etwa aus, wenn das Holz verfahrensbedingt nur im Bestand oder an der Rückegasse liegend vortrocknen kann. Entscheidend für die aktuelle Verbreitung bestimmter Logistikketten ist darüber hinaus die Möglichkeit, eine **aktive Borkenkäferbekämpfung** mit ihnen durchzuführen. Zumindest in Zeiten von Massenvermehrungen wird in Bayern ein Großteil der produzierten Hackschnitzel aus Kronen befallener und abgestorbener Fichten stammen.

Die Gewichtung der Kriterien ist bereits der erste bewertende Schritt im Entscheidungsprozess. Die Kriterien der obersten Hierarchie wurden mit einem tabellarischen **Paarvergleich** gewichtet (Tabelle 28). Jedes Hauptkriterium wurde allen anderen Hauptkriterien gegenübergestellt und mit Punkten bewertet.

Tabelle 28: Gewichtung der Hauptkriterien im Paarvergleich

Vergleichen Sie...	1. Wirtschaftlichkeit	2. Hackschnitzelqualität	3. Ergonomie	4. Organisationsaufwand	5. Pfléglichkeit	6. Nährstoffaustrag	7. Energieverbrauch	8. Waldschutzaspekt
1. Wirtschaftlichkeit		5	7	8	7	7	9	7
2. Hackschnitzelqualität	5		6	5	5	6	8	6
3. Ergonomie	3	4		5	5	4	7	5
4. Organisationsaufwand	2	5	5		5	4	7	6
5. Pfléglichkeit	3	5	5	5		6	7	5
6. Nährstoffaustrag	3	4	6	6	4		8	6
7. Energieverbrauch	1	2	3	3	3	2		3
8. Waldschutzaspekt	3	4	4	4	5	4	7	

Zur Auswahl stehen Zahlenwerte von 1 bis 9. Die Gewichtung in Tabelle 28 kann so aus Sicht des Autors für naturnah bewirtschaftete, fichtenreiche Forstbetriebe auf gut mit Nährstoffen versorgten Standorten angenommen werden.

Jede Abfrage taucht in der Matrix zweimal auf, lediglich mit umgekehrter Fragerichtung. Pro Abfragepaar sollte die Summe der Punkte 10 betragen, andernfalls müssen die Einschätzungen nochmals überdacht werden. Abbildung 20 zeigt beispielhaft für die Kriterien Wirtschaftlichkeit und Hackschnitzelqualität das innerhalb von CELSIEVAL angebotene Auswahlmenü für den paarweisen Vergleich.

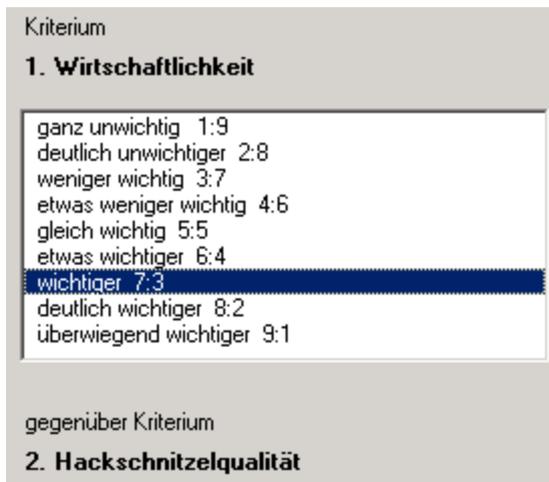


Abbildung 20: Auswahlmöglichkeiten innerhalb des Paarvergleichs der Hauptkriterien

Im zweiten Schritt werden den Kriterien **Bewertungstypen und Bewertungsmaßstäbe** zugeordnet. Mit ihnen wird bestimmt, bis zu welchem Grad ein Kriterium als optimal erfüllt betrachtet werden kann. Der **Erfüllungsgrad** reicht dabei grundsätzlich von 0 bis 10. Als Bewertungstypen wurden für die beiden Kriterien Bereitstellungskosten und Energieverbrauch lineare Skalen verwendet, für alle anderen Kriterien selbst definierte Auswahllisten (Tabelle 29).

Der Bewertungstyp und der Bewertungsmaßstab müssen für alle Kriterien definiert werden, die nicht mehr in Unterkriterien unterteilt sind. Für die Kriterien mit Unterkriterien errechnet CELSIEVAL die Bewertung aus den Angaben zu den Unterkriterien.

Tabelle 29: Typ und Maßstab der Bewertung für die Einzelkriterien

Kriterium	Typ der Bewertung	Maßstab der Bewertung	Punkte
1 Wirtschaftlichkeit	-	-	-
1.1 Bereitstellungskosten	Lineare Skala	$\leq 8 \text{ €/Srm} = 10, \geq 18 \text{ €/Srm} = 0$ Punkte	0 bis 10
1.2 Potentieller Hackguterlös	Auswahlliste	Über 12 €/Srm = 10, über 10 €/Srm = 5, unter 8 €/Srm 0 Punkte	0, 5 oder 10
2 Hackschnitzelqualität	-	-	-
2.1 Grünanteil	Auswahlliste	Gering = 10, eher gering = 8, mittel = 5, eher hoch = 2, hoch = 0 Punkte	0, 2, 5, 8 oder 10
2.2 Erzielbarer Wassergehalt	Auswahlliste	WG < 30 % = 10, WG 30-40 % = 5, WG >40 % = 0 Punkte	0, 5 oder 10
3 Ergonomie	-	-	-
3.1 Arbeitsschwere	Auswahlliste	Günstig = 10, eher günstig = 8, mittel = 5, eher ungünstig = 2, ungünstig = 0 Punkte	0, 2, 5, 8 oder 10
3.2 Unfallgefährdung	Auswahlliste	Niedrig = 10, eher niedrig = 8, mittel = 5, eher hoch = 2, hoch = 0 Punkte	0, 2, 5, 8 oder 10
4 Organisationsaufwand	-	-	-
4.1 Störungsempfindlichkeit	Auswahlliste	Niedrig = 10, eher niedrig = 8, mittel = 5, eher hoch = 2, hoch = 0 Punkte	0, 2, 5, 8 oder 10
4.2 Maschinenverfügbarkeit	Auswahlliste	Günstig = 10, eher günstig = 8, mittel = 5, eher ungünstig = 2, ungünstig = 0 Punkte	0, 2, 5, 8 oder 10
4.3 Kombinationsmöglichkeit mit Holzernte	Auswahlliste	Gut = 10, eher gut = 8, mittel = 5, eher schlecht = 2, schlecht = 0 Punkte	0, 2, 5, 8 oder 10
5 Pflughlichkeit	-	-	-
5.1 Befahrungsschäden	Auswahlliste	Gering = 10, eher gering = 8, mittel = 5, eher hoch = 2, hoch = 0 Punkte	0, 2, 5, 8 oder 10
5.2 Schäden am verbleibenden Bestand	Auswahlliste	Gering = 10, eher gering = 8, mittel = 5, eher hoch = 2, hoch = 0 Punkte	0, 2, 5, 8 oder 10
6 Nährstoffaustrag	Auswahlliste	Gering = 10, eher gering = 8, mittel = 5, eher hoch = 2, hoch = 0 Punkte	0, 2, 5, 8 oder 10
7 Energieverbrauch	Lineare Skala	$\leq 2 \text{ Liter Dieseläquivalent/Srm} = 10$ Punkte, $\geq 4 \text{ l/Srm} = 0$ Punkte	0 bis 10
8 Waldschutzaspekt	-	-	-
8.1 Risiko eines Borkenkäferbefalls	Auswahlliste	Niedrig = 10, eher niedrig = 8, mittel = 5, eher hoch = 2, hoch = 0 Punkte	0, 2, 5, 8 oder 10
8.2 Aktive Borkenkäferbekämpfung	Auswahlliste	Gut geeignet = 10, geeignet = 5, eher nicht geeignet = 0	0, 5 oder 10

Anschließend wurden die Bewertungen für die Verfahrensvarianten in eine Erfassungsmaske eingegeben. Für jedes Verfahren wurde zu jedem Entscheidungskriterium anhand von Bewertungstyp und -maßstab ein Erfüllungsgrad ermittelt.

CELSIEVAL berechnet dann aus allen Eingaben den jeweiligen **Nutzwert** der Varianten. Der Nutzwert gibt den Gesamtnutzen einer Variante an. Er liegt zwischen 0 und der maximal erreichbaren Zahl von 100 Punkten.

Die Nutzwerte werden verglichen und in eine Reihung gebracht. Änderungen von Kriterienliste, Kriteriengewichtung, Bewertungstypen und -maßstäben können mit CELSIEVAL einfach vorgenommen werden. Die Auswirkungen solcher Änderungen auf die Nutzwerte der Verfahren lassen sich schnell ablesen.

Abschließend wurde mit CELSIEVAL ein **Stärke-Schwächen-Diagramm** erstellt (Abbildung 58, Seite 148). Es zeigt im Gesamtüberblick alle Kriterien und ihre Gewichtung sowie zugeordnet die Einwertung aller betrachteten Varianten.

6 Ergebnisse und Interpretation

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse dargestellt und interpretiert. In Kapitel 7 folgt eine Diskussion zur Methodik, den übergeordneten Punkten Technologie, Ökologie und Sozioökonomie sowie zur Nutzwertanalyse.

6.1 Heizwerksumfrage

Dargestellt und interpretiert werden die Umfragebeteiligung, die eingesetzten Mengen an Biomasse sowie die erhobenen Hackschnitzelpreise.

6.1.1 Beteiligung

Insgesamt beteiligten sich 53 Heizwerke an der Umfrage. Dies entspricht einer Rücklaufquote von 52 %. Die **Beteiligung** war damit **überdurchschnittlich hoch**. Die Rücklaufquote bei Marktumfragen liegt im Allgemeinen nur zwischen 20 und 30 % (BEREKOVEN et al. 1991; HAMMANN und ERICHSON 1990; BÖHLER 1992). Der hohe Rücklauf gründet sich zum einen auf wiederholte telefonische Nachfragen bei den Heizwerksbetreibern, zum anderen spiegelt sich hier das Eigeninteresse an der Thematik und den konkreten Auswertungen auf Seiten der Betreiber wider.

Abbildung 1 stellt das Verhältnis zwischen den bis 2002 geförderten Heizwerken und den an der Umfrage beteiligten Heizwerken dar. Über die verschiedenen Größenklassen hinweg antworteten einheitlich etwa die Hälfte der Befragten. Von den beteiligten Heizwerken waren mehrere erst seit kurzem in Betrieb. Diese Betriebe konnten noch keine gesicherten Angaben zu den eingesetzten Mengen und den Preisen der Biomassen abgeben.

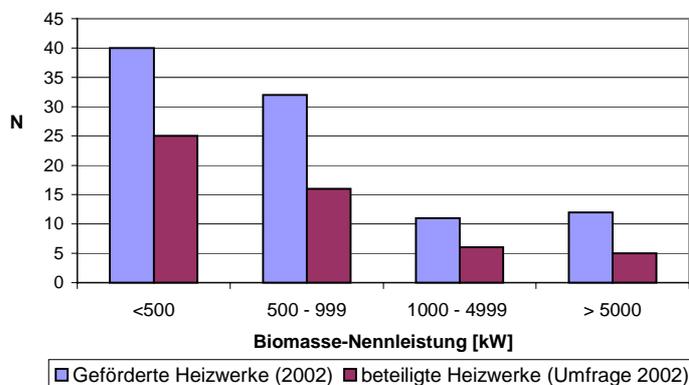


Abbildung 21: Umfrage-Beteiligung nach Größenklassen der Biomasse-Nennleistung

Abbildung 22 zeigt die Verteilung des Rücklaufs auf die Regierungsbezirke. Aus Oberbayern antworteten insgesamt 16 Heizwerke, aus Niederbayern lagen dagegen nur zwei Rückmeldungen vor.

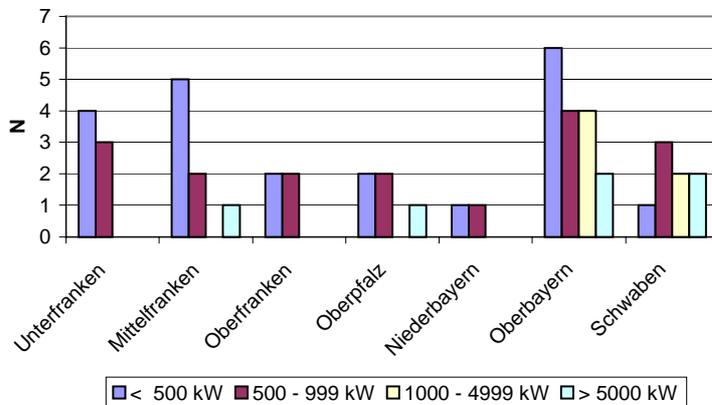


Abbildung 22: Verteilung der an der Umfrage beteiligten Heizwerke nach Größenklassen und Regierungsbezirken

6.1.2 Eingesetzte Mengen

Die 52 ausgewerteten Heizwerke verbrauchten 2001 insgesamt 94.285 t atro Biomasse. Davon wurden zu 66 % Waldhackschnitzel eingesetzt (Abbildung 23). Dies entspricht etwa einer Menge von 62.000 t atro. Hochgerechnet auf die Grundgesamtheit wurden etwa 187.000 t atro Biomasse, davon 125.000 t atro Waldhackschnitzel verbrannt. In elf Fällen wurden die Heizwerke ausschließlich mit Waldhackschnitzeln versorgt.

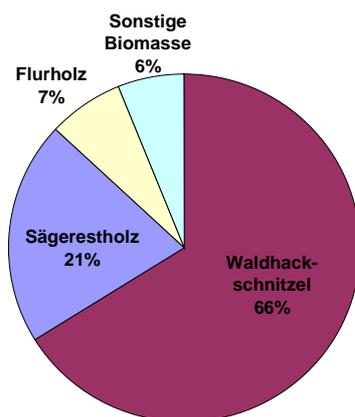


Abbildung 23: Anteile der eingesetzten Biomasse

DEINES et al. (2001) werteten den Brennstoffeinsatz der Holzheizwerke in Baden-Württemberg aus. Grundlage war eine Anwenderdatenbank mit Daten von 111 über das dortige Landesprogramm „Holzenergie 2000“ geförderten Anlagen. Der Anteil der Waldhackschnitzel am Brennstoffmix lag mit 60 % in vergleichbarer Höhe.

Neben den Waldhackschnitzeln deckten die bayerischen Heizwerke den Biomassebedarf hauptsächlich mit Sägerestholz (21 %). Flurholz und Sonstige Biomasse erreichten nur 7 bzw. 6 % Anteil. Unter der Kategorie Sonstige Biomasse wurden Rinde, unbehandeltes Altholz, Rapsöl und Getreide angeführt.

Der Anteil der eingesetzten Biomasse hängt ab von der jeweiligen Größe der Heizwerke. Während in den Heizwerken unter 500 kW Leistung die Waldhackschnitzel annähernd drei Viertel der gesamten Biomasse einnahmen, reduzierte sich dieser Anteil ab einer Heizwerksgröße von 1.000 kW auf etwa die Hälfte. Die Anteile der eingesetzten Brennstoffe sind in nachfolgender Abbildung geordnet nach Heizwerksgröße dargestellt.

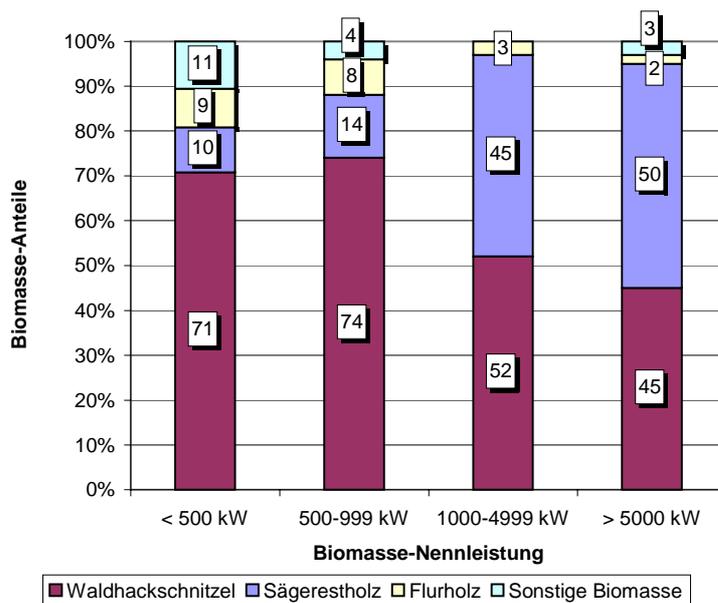


Abbildung 24: Anteile der eingesetzten Biomasse bei verschiedenen Heizwerksgrößen

Im Vergleich zu einer Studie von 1998 (WEIXLER et al. 1999) zeigte sich bei Heizwerken mit einer Biomasse-Nennleistung von 500 bis 999 kW eine Zunahme des Waldhackschnitzelanteils um 10 %. Dagegen nahm bei den Heizwerken von 1.000 bis 4.999 kW dieser Anteil um etwa die gleiche Größenordnung zugunsten von Sägerestholz ab.

Die Waldhackschnitzel setzten sich nach Baumarten wie in Abbildung 25 gezeigt zusammen.

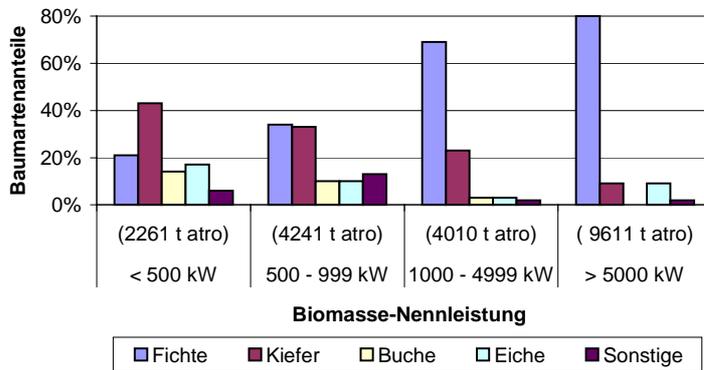


Abbildung 25: Anteile der eingesetzten Waldhackschnitzel nach Baumarten in Abhängigkeit von der Heizwerksgröße (in Klammern die gesamte in den beteiligten Heizwerken eingesetzte Menge an Waldhackschnitzeln)

Während die Waldhackschnitzel bei den Heizwerken unter 999 kW noch zu über einem Viertel aus Laubholz bestanden, schwand dessen Anteil ab 1.000 kW auf kaum 10 % der eingesetzten Menge. Mit zunehmender Heizwerksleistung stieg besonders der Fichtenanteil signifikant an. Die **regionale Verteilung** der an der Umfrage beteiligten Heizwerke begründet dies. Die Heizwerke über 1.000 kW liegen überwiegend in Oberbayern und Schwaben (Abbildung 22). Der Fichtenanteil ist in diesen Regionen sehr hoch. In den fränkischen Regierungsbezirken und der Oberpfalz stockt auf vielen Standorten die Kiefer. In diesen Regionen existieren überwiegend kleinere Heizwerke unter 1.000 kW. Diese Konstellation spiegelt sich wider in dem hohen Anteil an Kiefern-Hackschnitzel in den Heizwerken unter 1.000 kW.

Abbildung 26 zeigt den Jahresbedarf der untersuchten bayerischen Biomasse-Heizwerke an Hackschnitzeln in Abhängigkeit von der Biomasse-Nennwärmeleistung. Das hohe Bestimmtheitsmaß der Regressionsrechnung weist auf einen deutlichen Zusammenhang hin ($R^2 = 0,86$). Es verbleibt nur eine geringe Reststreuung.

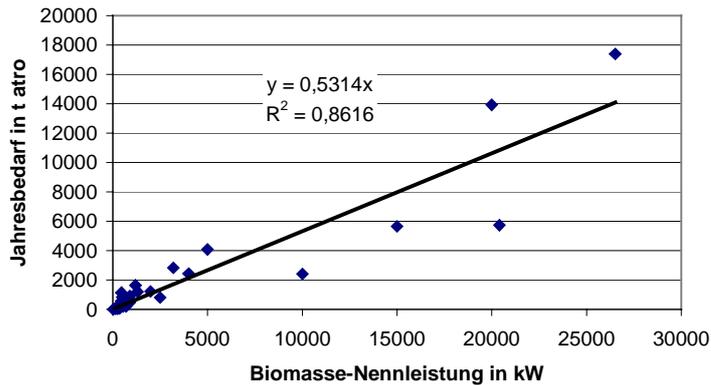


Abbildung 26: Der Jahresbedarf an Hackschnitzeln der untersuchten Heizwerke in t atro in Abhängigkeit von der Biomasse-Nennwärmeleistung

Mithilfe der angegebenen Formel lässt sich der jährliche Biomassebedarf abgeschätzen. Als grobe Annäherung kann gelten: **Nennwärmeleistung in kW geteilt durch zwei ergibt den Jahresbedarf in t atro.**

6.1.3 Preise für Hackschnitzel

Aus Gründen der besseren Vergleichbarkeit werden die Ergebnisse der Umfrage in €/t atro angegeben. Die Preise für Hackschnitzel schwanken erheblich. In der Folge werden sie nach den Einflussgrößen „Heizwerksgröße“, „Art der Vertragsbindung“ und „Lieferant“ näher betrachtet.

6.1.3.1 Nach Heizwerksgröße

Die Preisnennungen für **Waldhackschnitzel** blieben bei Heizwerksgrößen unter 5.000 kW konstant höher als 60 €/t atro. Bei größeren Anlagen sank der Wert fast um die Hälfte ab (Abbildung 27). Verstärkt trat dieser Trend auch beim Flurholz auf. Ebenso in abgeschwächter Form zeichnet er sich bei Sägerestholz ab. Hier gilt es aber zu berücksichtigen, dass bis zu einer Heizwerkgröße von 1.000 kW der Sägerestholzanteil unter 14 % lag. Die Preisangaben bis 1.000 kW Heizwerkgröße bezogen sich daher nur auf eine relativ geringe Menge Sägerestholz. Die Preise für Sonstige Biomasse sind nicht in Abbildung 27 aufgeführt, da nur vier Heizwerke Werte dafür lieferten. Sie schwankten zwischen 8 und 80 €/t atro, unabhängig von der Heizwerksgröße.

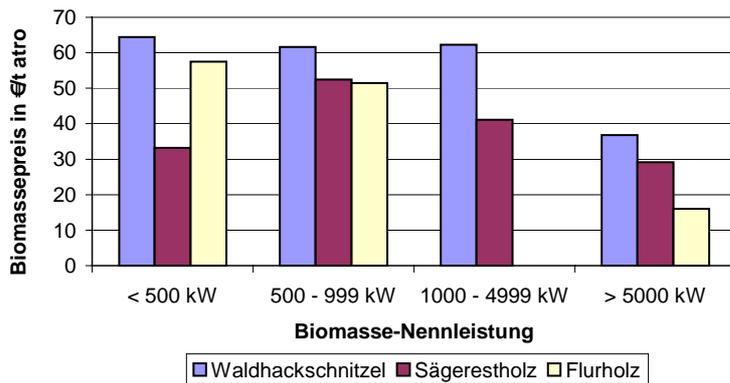


Abbildung 27: Aktuelle Preise für Biomasse in Abhängigkeit von der Heizwerksgröße

Im Rahmen der Umfrage nannten die Heizwerke über alle Größenordnungen hinweg Preise für Waldhackschnitzel in einem Rahmen zwischen 18 und 112 €/t atro. Für Sägerestholz wurden zwischen 20 und 63 €/t atro bezahlt. Aufgrund dieser enormen Spannen bei den beiden hauptsächlich eingesetzten Brennstoffen werden deren Preise zunächst nach den Heizwerksgrößen verglichen.

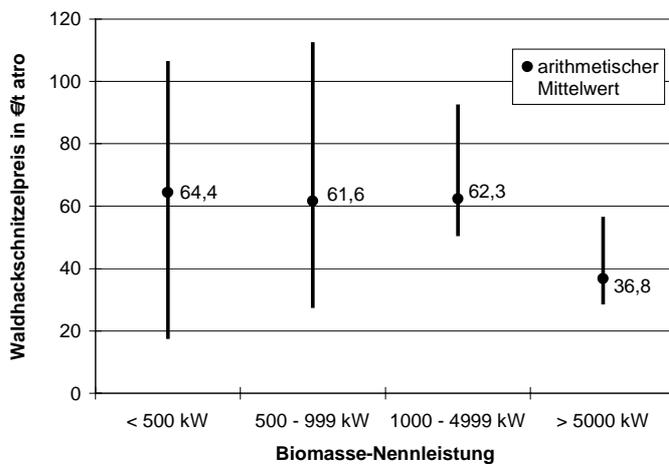


Abbildung 28: Streubreite der Waldhackschnitzelpreise in Abhängigkeit von der Heizwerksgröße

Bei den Heizwerken unter 1.000 kW schwanken die Preise erheblich um einen arithmetischen Mittelwert von 60 bis 65 €/t atro. Diese Schwankungen nehmen mit zunehmender Heizwerksgröße ab. Der Preis für Waldhackschnitzel in Heizwerken über 5.000 kW bewegt sich nur noch um etwa 5 €/t atro nach unten um den Mittelwert.

6.1.3.2 Nach Vertragsbindung

Gemäß der Förderauflage des Bayerischen Staatsministeriums für Landwirtschaft und Forsten für Heizwerke in Bayern müssen über zwölf Jahre hinweg 25 %³⁹ der eingesetzten Brennstoffe direkt aus der Forst- oder Landwirtschaft stammen. Um diese Mengen abzusichern, schließen die Betreiber der Heizwerke häufig Verträge ab über die Belieferung mit Waldhackschnitzeln. Neben diesen vertraglich gebundenen verwenden viele Heizwerke auch zusätzliche Mengen an Hackschnitzeln. Die Preise unterscheiden sich dabei zum Teil erheblich. Die unterschiedlichen Preisniveaus für vertraglich gebundene und nicht gebundene Hackschnitzellieferungen sind in Abbildung 29 aufgeführt.

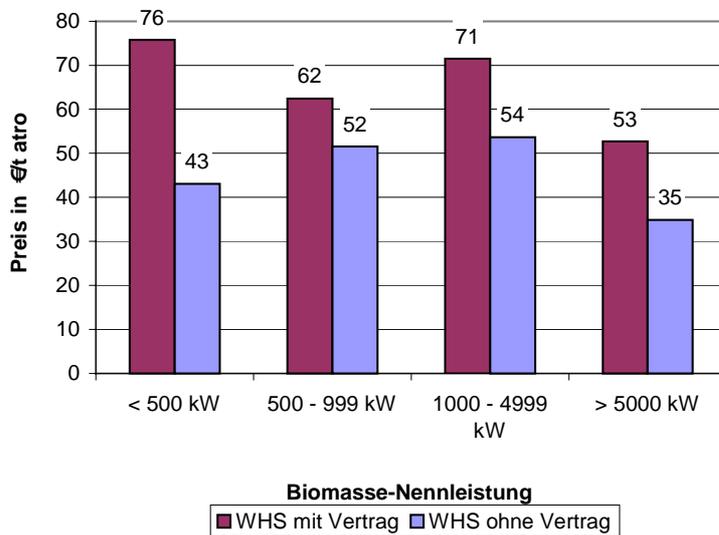


Abbildung 29: Preise für vertraglich gebundene und vertraglich nicht gebundene Lieferungen von Waldhackschnitzeln (WHS) in Abhängigkeit von der Heizwerksgröße

Die höchsten Preise mit durchschnittlich 76 €/t atro wurden in Heizwerken unter 500 kW für vertraglich gebundene, die niedrigsten Preise in Heizwerken über 5.000 kW für Hackschnitzel ohne Vertrag bezahlt. Bei Heizwerken unter 5.000 kW kann der Preis für vertraglich abgesicherte Mengen mit durchschnittlich 70 €/t atro angegeben werden. Über alle Heizwerksgruppen hinweg ergibt sich ein Mittelwert von etwa 65 €/t atro. Vertraglich nicht gebundene Hackschnitzel erzielen bei Heizwerken unter 5.000 kW im Mittel 50 €, über alle Heizwerksgruppen 46 €.

³⁹ Vor dem Jahr 2000 lag der Anteil noch bei 50%.

Alle Heizwerksgruppen bezahlten für vertraglich gebundene Waldhackschnitzel mehr als für freie Mengen. Das Preisniveau lag dabei zwischen 17 % (500 bis 999 kW) und 43 % (< 500 kW) höher (Tabelle 30). Überschlägig erzielten Forstbetriebe demnach um ein Drittel höhere Preise, wenn mit Heizwerken geschlossene Verträge vorlagen.

Tabelle 30: Preisdifferenz zwischen vertraglich gebundenen und vertraglich nicht gebundenen Waldhackschnitzeln (WHS) in Abhängigkeit von der Heizwerksgröße (MW = Mittelwert)

Heizwerksgruppe	< 500 kW			500 - 999 kW			1.000 - 4.999 kW			> 5.000 kW		
Preise [€/t atro]	Min	Max	MW	Min	Max	MW	Min	Max	MW	Min	Max	MW
vertraglich gebundene WHS	49	105	76	32	102	62	51	92	71	46	57	53
vertraglich nicht gebundene WHS	41	45	43	18	80	52	54	54	54	23	46	35
Differenz [%]			43 %			17 %			25 %			34 %

Vertragliche Bindungen existierten der Hälfte der Heizwerke. Ihre gesamte Waldhackschnitzelmenge vertraglich gebunden haben 30 % der Heizwerke. Je kleiner das Heizwerk ist, desto häufiger werden Waldhackschnitzel vertraglich abgesichert angeliefert (Abbildung 30). Eine Ausnahme bildeten die Werke über 5.000 kW, bei denen jedes zweite Werk einen Vertrag vorweisen konnte. Dennoch wird bei diesen Werken mengenmäßig nur ein kleiner Teil der Waldhackschnitzelaufgabe über vertraglich gesicherte Hackschnitzel gedeckt.

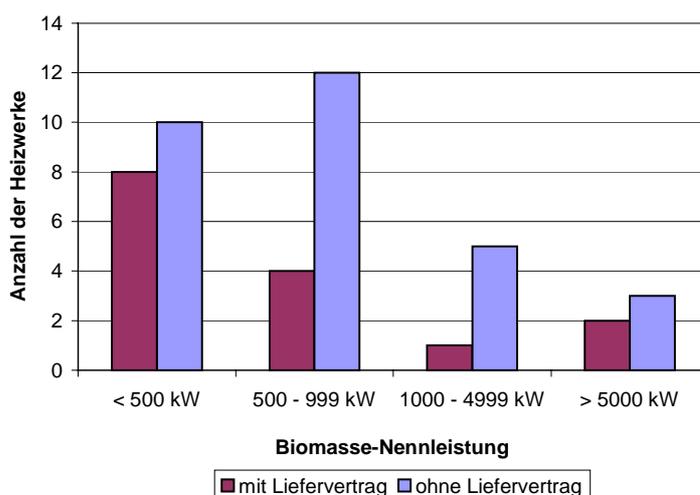


Abbildung 30: Anzahl der Heizwerke mit und ohne Lieferverträge für Waldhackschnitzel in Abhängigkeit von der Heizwerksgröße

Die Laufzeit der Lieferverträge schwankt zwischen einem und zwölf Jahren. Besonders bei Forstunternehmen sind die Laufzeiten kurz, maximal zwei Jahre. Dagegen weisen Lieferverträge mit Forstbetriebsgemeinschaften und privaten Waldbesitzern deutlich längere Laufzeiten auf.

Die Preisfestlegung für vertraglich gebundene Waldhackschnitzel erfolgt bei zwölf Heizwerken über einen langfristig fixierten Preis. 14 Heizwerke rechnen die Waldhackschnitzel über auszuhandelnde Monats-, Quartals- oder Jahrespreise ab. Die übrigen Heizwerke verwenden zur Preisfestlegung Preisgleitklauseln. Diese beziehen sich auf verschiedene Indices (Tabelle 31).

Tabelle 31: Verwendete Indices für Preisanpassungsklauseln

Index		Biomasse-Nennleistung			
		< 500 kW	500 - 999 kW	1000 - 4999 kW	> 5000 kW
Heizöl	Anzahl	5	3	1	1
	Anteil	20 - 100 %	40 - 100 %	40%	25%
Gas	Anzahl		1		
	Anteil				
Fernwärme	Anzahl		1		
	Anteil		100%		
Spreißeis-Schwarten	Anzahl		1	1	
	Anteil		60%		
Sonstige	Anzahl	3	3	2	1
	Anteil				

Der überwiegende Teil der Heizwerke, die mit Gleitklauseln arbeiten, verwendet Heizöl als Index. Die Gewichtung schwankt zwischen 20 und 100 %. Als Quelle für die Indices für Heizöl, Gas, Fernwärme und Spreißeis-Schwarten wurde ausnahmslos das Statistische Bundesamt genannt. Unter „Sonstige“ wurden ein eigens gebildeter Holzpreisindex, der Manteltarifvertrag, der Kommunale Arbeitgeberindex (Löhne und Gehälter) sowie der Strompreis genannt.

Auch unabhängig von festen Lieferverträgen haben Heizwerksbetreiber aber feste Vereinbarungen mit Lieferanten getroffen. Diese sehen vor, dass teilweise über die reine Brennstoffbereitstellung hinaus zusätzliche Aufgaben übernommen werden müssen. Abbildung 31 zeigt die verschiedenen Aufgabenbereiche.

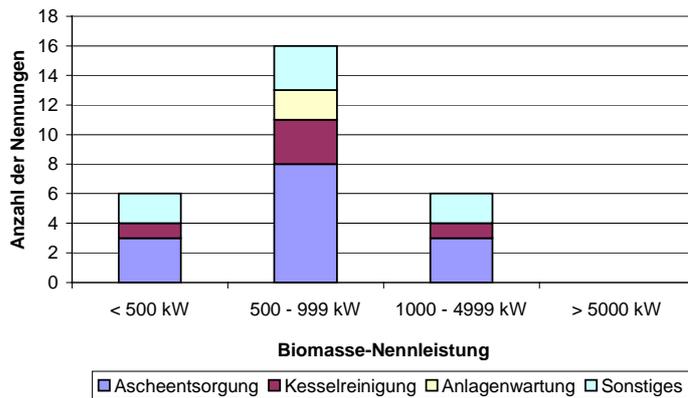


Abbildung 31: Zusätzliche Aufgaben der Biomasselieferanten in Abhängigkeit von der Biomasse-Nennleistung

Innerhalb der Heizwerksgruppen übernahmen die Lieferanten hauptsächlich für die Heizwerke zwischen 500 und 999 kW zusätzliche Aufgaben. Neben der Ascheentsorgung zählten zu diesen die Kesselreinigung und die Anlagenwartung. Unter „Sonstiges“ wurden Punkte wie Organisation der just-in-time-Belieferung, Überwachung der Anlieferung, Befüllen der Brennstoffsilos oder Befüllen des Schubbodens genannt. Ab einer Heizwerksgröße von 5.000 kW werden keine zusätzlichen Aufgaben mehr erledigt. Darin liegt vermutlich eine der Ursachen für die dort niedrigeren, durchschnittlich erzielbaren Hackschnitzelerlöse.

Die Preise für Waldhackschnitzel schwanken sowohl innerhalb der Variante mit vertraglicher Absicherung als auch bei Anlieferung ohne Liefervertrag deutlich. Im Folgenden wird die Art des Lieferanten als weiterer Einflussfaktor untersucht.

6.1.3.3 Nach Lieferant

Die Preise wurden auch hinsichtlich der Herkunft der Waldhackschnitzel untersucht. Dazu wurden für die verschiedenen Heizwerksgrößen die Preisangaben nach den unterschiedlichen Anbietern miteinander verglichen (Tabelle 32 und Tabelle 33).

Waldhackschnitzel werden von unterschiedlichen Anbietern geliefert:

Tabelle 32: Anbieter für Waldhackschnitzel

Waldhackschnitzel

1. eigene Produktion
2. Waldbesitzervereinigungen (WBV)
3. Privatwaldbesitzer
4. Holzhandel
5. Sonstige Anbieter

Zu beachten ist, dass nicht für alle Preissparten von mehreren Heizwerken Angaben getroffen wurden. Die Angaben beruhen teilweise auf nur einer einzigen Preisnennung. So bezahlte bei den Heizwerken unter 500 kW nur ein sonstiger Anbieter mit 73,5 €/t atro einen vergleichsweise hoher Preis. Dagegen setzte bei den Heizwerken von 500 bis 999 kW ein Holzhandelsunternehmen einen sehr niedrigen Preis von 28 €/t atro an. Die Werte sind daher mit einer gewissen Vorsicht zu betrachten und eher als Anhalt zu verstehen. Unabhängig davon liefert die vorliegende Untersuchung die Informationen zu den 2001 in Bayern gezahlten Biomassepreisen.

Aufgegliedert nach den einzelnen Anbietern stellt sich die Preissituation in Abhängigkeit von der Heizwerksgröße wie folgt dar:

Tabelle 33: Preise für Waldhackschnitzel in Abhängigkeit von Heizwerksgröße und Anbieter

Heizwerksgröße	< 500 kW			500 - 999 kW			1000 - 4999 kW			> 5000 kW		
	€/t atro			€/t atro			€/t atro			€/t atro		
Lieferant	Max	Min	MW	Max	Min	MW	Max	Min	MW	Max	Min	MW
eigene Produktion	63	18	40	69	69	69						
WBV	106	61	86	80	32	61	92	51	74	56	39	47
Privatwaldbesitzer	69	54	61	112	55	77	70	54	62	41	29	35
Handelsunternehmen	105	41	61	28	28	28	51	51	51	35	35	35
Sonstige	74	74	74	102	37	73				29	29	29
Gesamtergebnis	106	18	64	112	28	62	92	51	62	56	29	37

Die höchsten Waldhackschnitzelpreise erzielten im Bereich bis 500 kW die Waldbesitzervereinigungen (WBV) und der Holzhandel. Ein relativ ausgeglichenes Niveau erreichten die Preise für Hackschnitzel von Privatwaldbesitzern. Das Energieholz aus eigener Produktion setzten die Befragten dagegen auf deutlich niedrigerem Niveau an. Bei Heizwerken zwischen 500 und 999 kW bewegten sich die Preise zwischen 60 und 70 €/t atro außer beim Holzhandel. Letzterer markierte hier mit 28 €/t atro eine Tiefstmarke. Preise für Waldhackschnitzel von Privatwaldbesitzern und Sonstigen Anbietern erreichten in Einzelfällen auch Werte über 100 €/t atro.

Im Gegensatz dazu wird das Preisniveau bei Heizwerken von 1.000 bis 4.999 kW deutlich ausgeglichener. Die höchsten Preise für Waldhackschnitzel werden wieder für Hackschnitzel von Waldbesitzervereinigungen bezahlt. Sie liegen niedriger als bei den kleineren Anlagen, allerdings sinkt der Preis bei keinem Anbieter unter 50 €/t atro.

Bei den Heizwerken über 5.000 kW weisen die Preise nur noch eine sehr geringe Schwankung zwischen 30 und 40 €/t atro auf. Dies deutet darauf hin, dass sich für die Waldhackschnitzel bei Abgabe an Heiz(kraft)werke dieser Größenordnung bereits ein überregionaler Marktpreis gebildet hat.

6.2 Biomasseentnahme und Nährstoffaustrag

Die Biomasseentnahme und der damit verbundene Nährstoffaustrag wird anhand in der Literatur veröffentlichter Untersuchungen dargestellt, für Abschätzungen ein einfaches Kalkulationsmodell erstellt. Der erwartete Biomasse- und Nährstoffaustrag bei der Kronen- und Restholznutzung wurde anschließend mittels dieser Größen am Beispiel einer konkreten Hiebsmaßnahme errechnet. Zusätzlich werden Faustwerte für Kalkulationen ausgehend vom Bestand sowie vom Einzelbaum abgeleitet.

6.2.1 Berechnungsmodell

Im Modell werden im ersten Schritt für die ausgewählte Baumart die Anteile der Kompartimente Derbholz mit Rinde, Äste und Nadeln über das Alter der Bäume hergeleitet (Abbildung 32). Altersangaben von 20 bis 140 Jahre werden akzeptiert. Zur Wahl stehen die Baumarten Fichte, Kiefer, Buche, Eiche und Pappel. Für Eiche und Pappel wurden mangels eigener Funktionen diejenige für Buche zur Berechnung der vom Alter abhängigen Kompartimentaufteilung übernommen.

Danach werden die Entnahmeprozente für Derbholz, Äste und Nadeln/Blätter eingegeben. Zur Abschätzung, wie viel Derbholz bei bestimmten Aufarbeitungszöpfen im Bestand verbleibt, helfen die Massenkorrekturfaktoren nach KRAMER und AKÇA (1995) im Anhang 7. Bei der Aufarbeitung des Stammholzes bleibt immer ein Teil des Derbholzes in Form des Wurzelstocks und anderer Schnittverluste zurück. KRAMER und AKÇA (1995, S. 228) geben überschlägig einen Ernteverlust von 8 % für Nadelholz und 10 % für Laubholz an. Das Entnahmeprozent für Derbholz mit Rinde kann daher kaum den Wert 100 % erreichen.

Das Entnahmeprozent für Äste und Nadeln wird im Anhalt an KREUTZER (1979) bei einer Vollbaumnutzung nach einer motormanuellen Fällung mit 50 % angesetzt. Bei einer Nutzung

allein der Kronen geht der Autors davon aus, das überschlägig ein Drittel der Äste und Nadeln entnommen werden (vgl. Kapitel 6.2.2).

Berechnungsmodell für Biomasseentnahme und Nährstoffaustrag					
(Auswahl- bzw. Eingabefelder sind grün, Ergebnisfelder gelb hinterlegt)					
Baumart	Fichte	Alter	80		
Anteile der Baumkompartimente		Entnommene Biomasse			
Derbholz	80%	Derbholz	68%		
Äste	13%	Äste	4%		
Nadeln	7%	Nadeln	2%		
Summe	100%	Summe	75%		
Wieviel Prozent der Baumkompartimente werden entnommen?					
	Derbholz	85%			
	Äste	33%			
	Nadeln	33%			
Möglicher Nährstoffaustrag in kg je t atro der Erntestämme					
	N	P	K	Ca	Mg
	2,55	0,29	1,31	1,97	0,27
Tatsächlicher Biomasseaustrag in kg sowie in % des möglichen Austrags					
	N	P	K	Ca	Mg
	1,35	0,16	0,75	1,24	0,16
	53%	54%	58%	63%	61%
Im Bestand bleiben			Entnommen werden		
	25%	Biomasse	75%		
	42%	Nährstoffe	58%		

Abbildung 32: Tabellenblatt des Berechnungsmodells für Biomasseentnahme und Nährstoffaustrag

Bei einer Vollbaumnutzung mit dem Mehrfachfällkopf kann beispielsweise geschätzt und eingegeben werden, dass 90 % des Derbholzes, 90 % der Äste und 80 % der Nadeln entnommen werden. Für die motormanuelle Nutzung von Stammholz mit anschließender Entnahme der Kronen kann beispielsweise angenommen werden, dass 85 % des Derbholzes sowie jeweils ein Drittel der Äste und Nadeln entnommen werden (Abbildung 32).

Im letzten Schritt fließen die durchschnittlichen Nährstoffgehalte der Baumkompartimente ein. Berechnet werden der theoretisch mögliche Nährstoffaustrag je t atro der Erntestämme für die Nährelemente N, P, K, Ca und Mg. Gegenübergestellt werden der tatsächlich erwartete Austrag und sein Anteil am theoretisch möglichen.

Aus den Anteilen des erwarteten Austrags am maximal möglichen der einzelnen Nährstoffe wird abgeleitet, wie viel Prozent der Nährstoffe insgesamt in der im Bestand verbleibenden Biomasse enthalten sind.

Die jeweilige geschätzte Biomasseentnahme und der damit verbundene Nährstoffaustrag kann für bestimmte Logistikketten dem maximal möglichen einer „vollständigen“ Nutzung gegenübergestellt werden. Der abgeleitete Wert eignet sich als Kennzahl für die Logistikketten zur Pfleglichkeit in Bezug auf den Nährstoffhaushalt.

6.2.2 Praxisbeispiel

Im Zuge eines Endnutzungshiebes am Forstamt München wurde neben dem Stammholz aus Waldschutzgründen auch Kronen- und Restholz entnommen. In dem 100-jährigen Fichtenbestand wurden insgesamt 271 fm Stammholz auf 2,3 ha geerntet. Dies entspricht einer Entnahmemenge von 118 fm/ha. Nach dem Rücken des aufgearbeiteten Stammholzes wurde das Kronen- und Restmaterial aus dem Bestand gebracht und anschließend gehackt. Auf der gesamten Fläche fielen insgesamt 130 Srm an, entsprechend 57 Srm/ha.

Um die Biomasseentnahme und den damit verbundenen Nährstoffaustrag dieser Hiebsmaßnahme zu quantifizieren, wurde die theoretisch anfallende gesamte Biomasse errechnet und mit der tatsächlich entnommenen Biomasse verglichen. Die theoretische Gesamtbiomasse wurde über das Verhältnis der Baumkompartimente hergeleitet. JACOBSEN et al. (2002) geben für 100-jährige Fichtenbestände eine Aufteilung von 84 % Derbholz mit Rinde, 11 % Äste und 5 % Nadeln an (Tabelle 34). Exakt die gleiche Aufteilung ermittelten DIETRICH et al. (2002) für einen 85-jährigen Fichtenbestand auf einem vergleichbaren Standort ebenfalls auf der Münchener Schotterebene an.

Das geerntete Derbholz errechnete sich aus dem gemessenen Stammholz und der Summe des Derbholzes aus Kronenschäften und Restholz. Zum Restholz wurden Bruchstücke, rotfaule Stücke, etc. über Derbholzgrenze gezählt. Die Stammholzangaben aus dem Holzaufnahmebuch lagen in Erntefestmeter ohne Rinde vor. Sie wurden in Anhalt an KRAMER und AKÇA (1995, S. 228) für die tatsächliche Entnahme auf geerntetes Holz mit Rinde umgerechnet⁴⁰. Dabei ergaben sich die in Tabelle 34 sowie Tabelle 35 angeführten Werte für Stammholz.

⁴⁰ Für Fichte, Endnutzung, wird der Gesamtanzugsfaktor zur Umrechnung von Vorratsfestmeter mit Rinde auf geerntete Festmeter ohne Rinde mit 0,85 angegeben. Der Ernteverlust zwischen Vorratsfestmeter mit Rinde und

Tabelle 34: Theoretisch mögliche Biomasse-Entnahme im Beispiel „München“

Baumkompartimente		Biomasse	Stammholz		Hackschnitzel	
Aufgliederung	Anteile	[t atro/ha]	[t atro/ha]	[fm/ha]	[t atro/ha]	[Srm/ha]
Derbholz	84 %	57,5	57,5	152	4,9	33
Stammholz*	77 %	52,6	52,6	139		
Kronenschaft- und Restholz*	7 %	4,9	4,9*	13*	4,9*	33*
Äste	11 %	7,4			7,4	49
Nadeln	5 %	3,2			3,2	21
Summe	100 %	68,1	57,5	152	15,5	103

*Kronenschaft- und Restholz kann sowohl als Stammholz als auch in Form von Hackschnitzeln entnommen werden.

Theoretisch wären bei komplettem Hacken des Kronen- und Restholzes zusammen mit Ästen und Nadeln ein Hackschnitzelanfall von 15,5 t atro/ha oder 103 Srm/ha zu erwarten gewesen⁴¹.

Die tatsächliche Biomasseentnahme im Versuchsbestand „München“ ist in Tabelle 35 angegeben. Mit 58 t atro wurden 86 % der maximal möglichen Biomasse der Erntebäume entnommen. Die tatsächliche Ausbeute an Hackschnitzeln belief sich auf 8,6 t atro/ha bzw. 57 Srm/ha. Das waren 55 % des theoretischen Potentials von 103 Srm für Hackschnitzel. Davon bestanden 11 fm oder umgerechnet 27 Srm/ha aus Kronen- und Restholz⁴². Die restlichen 30 Srm/ha stammten aus Ast- und Nadelbiomasse. Entsprechend ihrem Verhältnis von 70:30 (11 % zu 5 %, vgl. Tabelle 34) ergab sich eine Aufteilung von 21 Srm aus Ästen und 9 Srm aus Nadeln.

geerntetem Festmeter mit Rinde entspricht dabei annähernd 6 %. Den Rindenabzug für das Derbholz geben KRAMER und AKÇA (1995) mit 10 % an.

⁴¹ $((\text{Kronenschaft- und Restholz (4,9 t atro/ha)} + \text{Äste (7,4 t atro/ha)} + \text{Nadeln (3,2 t atro/ha)}) / 0,379 \text{ t atro/fm}) * 2,5 \text{ Srm/fm} = 103 \text{ Srm/ha}$

⁴² Es hat sich gezeigt, dass das theoretische Kronenvolumen (11,25 fm/ha) um 25 % über dem tatsächlich genutzten Kronenvolumen (9 fm/ha) lag. Dies erklärt sich mit dem hohen Anteil gebrochener Kronen, deren obere Bruchstücke nur teilweise aufgesammelt wurden. Das sonstige Restholz (2 fm/ha) wurde vollständig entnommen.

Tabelle 35: Tatsächliche Biomasse-Entnahme im Beispiel „München“

Baumkompartimente		Biomasse	Stammholz		Hackschnitzel	
Aufgliederung	Anteile	[t atro/ha]	[t atro/ha]	[fm/ha]	[t atro/ha]	[Srm/ha]
Derbholz	92 %	53,9	49,7	131	4,2	27
Stammholz	85 %	49,7	49,7	131		
Kronenschaft- und Restholz*	7 %	4,2	-*	-*	4,2*	27*
Äste	5 %	3,1			3,1	21
Nadeln	2 %	1,3			1,3	9
Summe	100 %	58,3	49,7	131	8,6	57

*Das Kronenschaft- und Restholz wurde gehackt.

Die Biomasseentnahme lag beim Derbholz bei 94 % des maximal möglichen Wertes. Dagegen lag die Entnahme bei den nährstoffreichen Ästen und Nadeln knapp 60 % unter dem theoretischen Höchstwert. Die Hackschnitzel setzten sich zu 48 % aus Derbholz, 36 % aus Astholz und 16 % aus Nadeln zusammen.

Eine stichprobenartige Überprüfung der Hackschnitzelproben aus dem Trockenschrank ergab einen Nadelanteil von 11 bis 15 % und bestätigt die hergeleiteten Größenordnungen. Auch der etwas geringere Nadelanteil ist schlüssig. Die pauschale Herleitung des Nadelanteils über das Verhältnis der Kompartimente Äste und Nadeln berücksichtigt nicht, dass vermutlich beim Fällen und Rücken überproportional viele Nadeln abgeschlagen werden.

Die knapp 10 t atro im Bestand zurückbleibenden Baumteile machten etwa 14 % der gesamten Biomasse der Erntebäume aus (Tabelle 36). Anteilsmäßig überwog die Biomasse aus Ästen mit 44 %, gefolgt von 37 % Derbholz . Die Nadeln trugen annähernd ein Fünftel bei.

Tabelle 36: Im Bestand verbleibende Biomasse im Beispiel „München“

Baumkompartimente		Biomasse	Stammholz		Hackschnitzel	
Aufgliederung	Anteile	[t atro/ha]	[t atro/ha]	[fm/ha]	[t atro/ha]	[Srm/ha]
Derbholz	37 %	3,7	3,7	10	0,7	6
Stammholz	30.%	3,0	3,0	8		
Kronenschaft- und Restholz*	7.%	0,7	0,7*	2*	0,7*	6*
Äste	44 %	4,3			4,3	28
Nadeln	19 %	1,9			1,9	12
Summe	100 %	9,9	3,7	10	6,9	46

*Das im Bestand verbleibende Kronenschaft- und Restholz ließe sich sowohl als Stammholz aushalten als auch hacken.

Der Hauptgrund für die – im Verhältnis zum gehackten Holz – höheren Anteile der Äste und Nadeln am verbleibenden Restholz liegt in der praktischen Durchführung des Erntebetriebs. Bei der Datenaufnahme zeigte sich, dass infolge des Fällens und Rückens bei etwa 50 % der Kronen das Teilstück bereits, vom stärkeren Ende her gesehen, vor der Derbholzgrenze von 7 cm mit Rinde abgebrochen war. Dieser Trend zeigte sich auch bei den Untersuchungen der LWF an gehackten Fichtenkronen (KRICHBAUM et al. 2003).

Die abgebrochenen, dünnen Teilstücke wurden nicht aus dem Bestand gerückt. Der Anteil des Schaftholzes unter 7 cm beträgt weniger als 10 % des gesamten Schaftholzvolumens der Kronen und würde den erhöhten Aufwand (Stück-Masse-Gesetz) nicht rechtfertigen. Zudem ging von den Kronenresten kein Waldschutzrisiko aus, zumindest hinsichtlich des Befalls durch Buchdrucker⁴³.

Für den vorliegenden Fall bedeutet dies, dass trotz der Entnahme des Kronenmaterials keine Vollbaumnutzung⁴⁴ im Sinne einer vollständigen Nutzung der gesamten oberirdischen Biomasse stattgefunden hat. Der Durchmesser der oberen Bruchstellen der Kronen lag nur bei 50 % der Kronen unter der Derbholzgrenze. Von einem Großteil der Kronen bleiben demnach sowohl etwas Schaftholz als auch die daran sitzenden Äste und Nadeln im Bestand zurück.

Gerade die Äste und Nadeln speichern einen überproportional hohen Anteil an Nährstoffen. Da das gesamte Ast- und Nadelmaterial, das bei der Stammholznutzung angefallen war, im Bestand belassen wurde und zudem 50 % der Kronen vor der Derbholzgrenze abgebrochen waren, verblieben im vorliegenden Fall etwa 60 % des Ast- und Nadelanteils im Bestand. Dieses Ergebnis verhält sich in dieser Größenordnung schlüssig zu den Angaben von KREUTZER (1979). Er ging davon aus, dass beim Fällen und Rücken von Vollbäumen bis zu 50 % des Ast- und Nadelmaterials abbrechen und im Bestand liegen bleiben.

Der im Versuchsbestand „München“ entstandene Nährstoffaustrag wird im Anhalt an die Daten von JACOBSEN et al. (2002) (Kap. 4.3) sowohl für die theoretisch mögliche als auch für die tatsächliche Nutzung angegeben.

⁴³ Bei erhöhter Kupferstecherdichte sollte möglichst auch dieses Material entnommen oder vor Ort brutuntauglich gemacht werden (LOBINGER 2004).

⁴⁴ Als Vollbaum wird die gesamte oberirdische Biomasse ohne den Wurzelstock bezeichnet; der Ganzbaum schließt diesen mit ein (LÖFFLER 1991).

Tabelle 37: Theoretisch möglicher und tatsächlicher Nährstoffaustrag am Beispiel „München“

Beispiel München		Biomasse	N		P		K		Ca		Mg	
Baumart: Fichte		[t/ha]	[kg/t atro]	[kg/ha]	[kg/t atro]	[kg/ha]	[kg/t atro]	[kg/ha]	[kg/t atro]	[kg/ha]	[kg/t atro]	[kg/ha]
Theoretisch möglicher Nährstoffaustrag	Derbholz m.R.	57,5	1,2	70	0,2	9	0,8	44	1,4	81	0,18	10
	Äste (< 7 cm)	7,4	5,2	39	0,7	5	2,4	18	3,3	25	0,53	4
	Nadeln/Blätter	3,2	13,4	43	1,3	4	5,7	18	6,0	19	0,79	3
	Summe	68		151,9		17,7		80,3		125,2		16,8
Tatsächlicher Nährstoffaustrag	Derbholz m.R.	53,9	1,2	65,7	0,2	8,1	0,8	41,5	1,4	75,9	0,18	9,7
	Äste (< 7 cm)	3,1	5,2	16,4	0,7	2,0	2,4	7,5	3,3	10,4	0,53	1,7
	Nadeln/Blätter	1,3	13,4	18,0	1,3	1,8	5,7	7,7	6,0	8,1	0,79	1,1
	Summe	58,3		100,1		11,9		56,6		94,5		12,4
Anteil des tatsächlichen Austrags		86%		66%		67%		71%		75%		74%

Der tatsächliche Austrag der Nährelemente weicht deutlich von dem theoretisch möglichen ab. Die Unterschiede treten besonders in den nährstoffreicheren Nadeln und Ästen hervor. So wurden nur 42 % der im Rahmen der Hiebsmaßnahme anfallenden Nadel- und Astmasse entnommen, dagegen aber 94 % des Derbholzes. Der Nährstoffaustrag verhält sich dementsprechend. 58 % der in den Ästen und Nadeln jeweils enthaltenen Nährstoffe blieben im Bestand, beim Derbholz nur 6 %.

Aufgrund des hohen Anteils des Derbholzes reichte der tatsächliche Austrag über alle Baumkompartimente hinweg dennoch für die einzelnen Nährelemente von 66 % (Stickstoff) bis zu 75 % (Calcium) des theoretisch möglichen Wertes. Der Mittelwert des Anteils des tatsächlichen Nährstoffaustrags am maximal möglichen liegt über die beschriebenen Nährelemente hinweg bei 72 %.

In den verbleibenden 14 % der Biomasse sind demnach 28 % der Nährstoffe enthalten. Abbildung 33 fasst die Ergebnisse aus der Fallstudie am Forstamt München noch einmal zusammen.

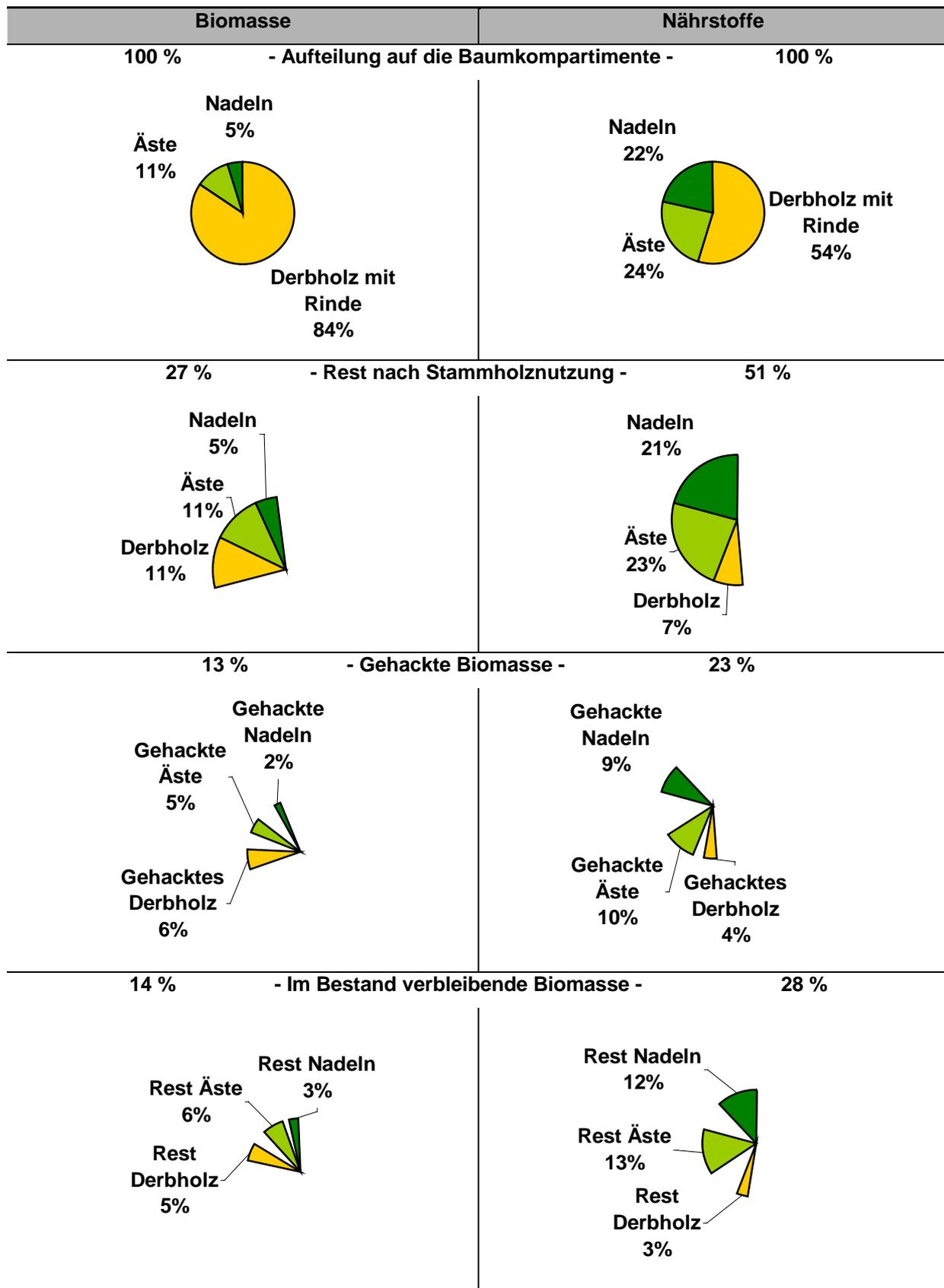


Abbildung 33: Gegenüberstellung des Biomasse- und Nährstoffaustrags bei der Hackschnitzelgewinnung aus Fichtenkronen; Nährstoffaustrag angegeben als Durchschnittswert für die Elemente N, P, K, Ca und Mg

Mit dem **Stammholz** wurden demnach 73 % der gesamten Biomasse der Erntebäume entnommen. Im Bestand zurück blieben die anderen 27 %, gebildet aus den kompletten 11 % Ästen bzw. 5 % Nadeln und 11 % in Form des restlichen Derbholzes mit Rinde. Letzteres setzte sich zusammen aus den Ernteverlusten des Stammholzes, dem Kronenschaftholz und dem sonstigem Restholz.

Mit der **Entnahme von Restholz zur Hackschnitzelgewinnung** wurde etwa die Hälfte der nach der Stammholznutzung noch im Bestand verbliebenen Biomasse entzogen. Das gehackte Holz entsprach grob einem Sechstel der gesamten Biomasse der Erntebäume. Es setzte sich zusammen zur Hälfte aus Derbholz, zu etwa zwei Sechstel aus Ästen und bis zu einem Sechstel aus Nadeln.

Die letztendlich im Bestand **verbliebene Biomasse** betrug ebenfalls 14 % der gesamten Biomasse der Erntestämme und entsprach damit wiederum der Hälfte des nach der Stammholznutzung verbliebenen Restholzes. Sie beinhaltete etwa zwei Drittel der Äste und Nadeln der Erntebäume. Insbesondere bei den Nadeln dürfte der tatsächlich verbleibende Anteil aber höher als bei den Ästen liegen. Beim Fällen und Rücken brechen im Vergleich zu den Ästen wohl überproportional mehr Nadeln ab und verbleiben im Bestand.

Mit dem **Stammholz** wurden trotz Entnahme von mehr als zwei Drittel der Biomasse nur etwa die Hälfte der Nährstoffe entzogen.

Das **gehackte Restholz** machte knapp ein Viertel des Nährstoffgehaltes der gefällten Stämme aus. Jeweils etwas über ein Drittel des in den Ästen und Nadeln enthaltenen Nährstoffvorrats wurde bei der Hackschnitzelgewinnung ausgetragen.

Die im Bestand **verbleibende Biomasse** enthielt überproportional viele Nährstoffe. In diesem Sechstel der Biomasse sind aufgrund des hohen Anteils der nährstoffreichen Äste und Nadeln etwas mehr als ein Viertel der Nährstoffe der geernteten Stämme vorhanden.

6.2.3 Mehrausbeute und Mengenabschätzung

In der Folge werden zwei Wege beschrrieben, um mögliche Mehrausbeuten zu ermitteln und Faustzahlen abzuleiten. Zum einen werden aus dem beschriebenen Modell über die Baumkompartimente altersabhängige Mehrausbeuten hergeleitet und beispielhaft in Ertragstafeln integriert. Zum anderen werden Schätzfaktoren für die Mehrausbeute bei der Nutzung von Fichtenkronen angegeben.

Mehrausbeute aus den Anteilen der Baumkompartimente

Für die folgenden Angaben zu Mehrausbeuten bezogen auf das Derbholz mit Rinde werden drei Größen angegeben. Die **theoretisch mögliche Mehrausbeute** ist ein Maximalwert und entspricht der kompletten Entnahme der Äste und Nadeln.

Als zweite Variante dient eine **Vollbaumnutzung** nach motormanueller Ernte. Im Anhalt an KREUTZER (1979) wird unterstellt, dass 50 % der Äste und Nadeln entnommen werden.

Stammholz und Kronen werden in der letzten Variante betrachtet. Analog zum Praxisbeispiel München bleiben zum einen die beim Entasten des Stammholzes anfallenden Äste und Nadeln im Bestand, zum anderen lassen sich die Kronen in der Praxis nicht komplett nutzen. Insgesamt erscheint eine Entnahme von 33 % der Ast- und Nadelmasse als realitätsnahe Größenordnung.

Nicht gesondert berücksichtigt wird in der Folge, dass Laubholz in der Regel ohne Laub geerntet wird. Die Anteile an Blattbiomasse betragen nur zwischen 1 und 2 % der Gesamtbiomasse von Laubholz. Ob mit oder ohne Laub genutzt wird, macht sich bei der Berechnung der Mehrausbeute in Bezug auf das Derbholz nur unwesentlich bemerkbar. Eine mögliche Mehrausbeute über die Blätter wird daher vernachlässigt.

Welche Größenordnungen die drei Varianten durchschnittlich bei Fichte, Kiefer, Buche, Eiche und Pappel annehmen, zeigt Tabelle 38.

Tabelle 38: Maximal mögliche Mehrausbeute, Mehrausbeute bei Vollbaumnutzung sowie bei Nutzung von Stammholz und Kronen jeweils bezogen auf Derbholz mit Rinde für ausgewählte Baumarten

Baumart	Fichte	Kiefer	Buche	Eiche	Pappel	Mittelwert
Anteil Derbholz	80%	81%	80%	78%	81%	80%
Anteil Äste und Nadeln	20%	19%	20%	22%	19%	20%
Theoretische Mehrausbeute	25%	24%	25%	28%	24%	25%
Vollbaumnutzung (50 %)	13%	12%	13%	14%	12%	13%
Stammholz und Kronen (33%)	8%	8%	8%	9%	8%	8%

Bei einer kompletten Nutzung des Ast- und Nadelmaterials aller angegebenen Baumarten könnten zwischen 24 und 28 % mehr Biomasse aus dem Bestand entzogen werden als bei der herkömmlichen Derbholznutzung mit Rinde. Dagegen liegt die zusätzlich verfügbare Biomasse bei der beschriebenen Vollbaumnutzung im Mittel bei 13 %. Bei der Nutzung von Kronen beträgt die Mehrausbeute durchschnittlich 8 % gegenüber der Derbholzmasse. Insgesamt betrachtet werden statt einer möglichen Mehrausbeute von einem Viertel in der Praxis bei Vollbaum- oder Kronennutzung nur etwa ein Zehntel bis ein Achtel erreicht.

Die Angaben in Tabelle 38 spiegeln durchschnittliche Verhältnisse wider. Da die Anteile der Baumkompartimente mit dem Alter variieren, sind in jüngeren Beständen erheblich höhere Mehrausbeuten gegenüber der reinen Derbholznutzung möglich. In älteren Beständen liegen die Nutzungsmöglichkeiten dagegen niedriger. Tabelle 39 zeigt die Mehrausbeuten in Abhängigkeit vom Alter.

Tabelle 39: Mehrausbeuten für Fichte bezogen auf das Kompartiment Derbholz mit Rinde in Abhängigkeit vom Alter

Fichte	Alter	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140
Anteil Derbholz		55%	63%	68%	72%	75%	78%	80%	83%	84%	86%	88%	89%	90%
Anteil Äste und Nadeln		45%	37%	32%	28%	25%	22%	20%	17%	16%	14%	12%	11%	10%
Theoretische Mehrausbeute		80%	59%	47%	39%	33%	28%	24%	21%	18%	16%	14%	12%	10%
Vollbaumnutzung (50 %)		40%	30%	24%	19%	16%	14%	12%	11%	9%	8%	7%	6%	5%
Stammholz und Kronen (33%)		27%	20%	16%	13%	11%	9%	8%	7%	6%	5%	5%	4%	3%

Kiefer	Alter	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140
Anteil Derbholz		67%	72%	75%	78%	80%	82%	83%	85%	86%	87%	88%	89%	90%
Anteil Äste und Nadeln		33%	28%	25%	22%	20%	18%	17%	15%	14%	13%	12%	11%	10%
Theoretische Mehrausbeute		49%	39%	33%	29%	25%	22%	20%	18%	16%	15%	13%	12%	11%
Vollbaumnutzung (50 %)		25%	20%	17%	14%	13%	11%	10%	9%	8%	7%	7%	6%	6%
Stammholz und Kronen(33%)		16%	13%	11%	10%	8%	7%	7%	6%	5%	5%	4%	4%	4%

Buche/Eiche	Alter	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140
Anteil Derbholz		70%	71%	72%	74%	75%	76%	78%	79%	80%	82%	83%	84%	85%
Anteil Äste		30%	29%	28%	26%	25%	24%	22%	21%	20%	18%	17%	16%	15%
Theoretische Mehrausbeute		44%	41%	38%	36%	33%	31%	29%	27%	25%	23%	21%	19%	17%
Vollbaumnutzung (50 %)		22%	20%	19%	18%	17%	16%	14%	13%	12%	11%	10%	9%	9%
Stammholz und Kronen(33%)		15%	14%	13%	12%	11%	10%	10%	9%	8%	8%	7%	6%	6%

So erreicht die theoretisch mögliche Mehrausbeute bei 20-jährigen Fichten aufgrund des hohen Anteils an Ästen und Nadeln von 45 % einen Wert von 80 %. Bei 80 Jahren sinkt die maximal mögliche Mehrausbeute aber schnell auf etwa ein Viertel ab. Diese Angaben bestätigen DIETRICH et al. (2002). Auf unterschiedlichen Standorten in Ebersberg und Flossenbürg erhoben sie in 85-jährigen Fichtenbeständen anhand von Einzelbäumen jeweils theoretische Mehrausbeuten von 15 % bis 26 % bei vollständiger Nutzung der oberirdischen Biomasse.

Kombiniert man die Werte aus Tabelle 39 mit Angaben aus Ertragstabellen, lassen sich konkrete Mengenabschätzungen ableiten. Tabelle 40 enthält ein Beispiel für Fichte.

Tabelle 40: Ertragstafel für Mehrausbeuten bezogen auf verschiedene intensive Nutzungsverfahren für Fichte

Baumart: Fichte; Ertragstafel: Assmann/Franz, Oberhöhenbonität 36; Umtriebszeit: 100 Jahre

Nutzungsart	JP			JD			AD			VJ		
	0 - 20			20 - 40			40 - 60			60 - 100		
Altersspanne												
Bezugsmaß	Vfm/ha	Srm/ha	t atro/ha	Vfm/ha	Srm/ha	t atro/ha	Vfm/ha	Srm/ha	t atro/ha	Vfm/ha	Srm/ha	t atro/ha
Stammholzvorrat zur Mitte des Zeitabschnitts	35	88	13	221	553	84	365	913	138	603	1508	229
Biomassevorrat des gesamten Bestandes zur Mitte des Zeitabschnitts (Vollbaum)	-	159	60	-	891	338	-	1285	487	-	1884	714
Entnahme (Stammholz) während des gesamten Zeitraums der Nutzungsart	16	40	6	128	320	49	156	390	59	603	1508	229
Anzahl der Eingriffe je Nutzungsart	2			2			2			4		
Durchschnittlicher Entnahmesatz je Eingriff bei Stammholznutzung	8	20	3,0	64	160	24	78	195	30	150	375	57
Theoretischer zusätzlicher Biomasseanfall (Äste und Nadeln) je Eingriff	-	16	2,5	-	98	15	-	80	12	-	94	14
Zusätzlicher Anfall bei motormanueller Vollbaumnutzung je Eingriff (Variante 50%)	-	6	0,9	-	38	6	-	33	5	-	42	6
Zusätzlicher Biomasseanfall bei Nutzung der Kronen je Eingriff (Variante 33%)	-	4	0,5	-	23	4	-	21	3	-	27	4

Laut Tabelle 40 sind beispielsweise bei einem Eingriff während der Verjüngungsnutzung mit einem Entnahmesatz von 150 Vorratsfestmetern, bei dem nach der Stammholznutzung noch Kronen gehackt werden, 27 Srm Hackschnitzel aus Ästen und Nadeln zu erwarten. Dies deckt sich mit den Erfahrungen aus der Fallstudie „München“ (Kapitel 6.2.3). Bei einer Entnahme von 152 Vorratsfestmetern fielen 30 Srm Hackschnitzel aus Ästen und Nadeln an.

Weitere Ertragstabellen für Mehrausbeuten (Kiefer, Buche und Eiche) enthält Anhang 8.

Mehrausbeute und Mengenabschätzung bei der Nutzung von Fichtenkronen

Aus der Vielzahl der in der Fallstudie „München“ (Kapitel 6.2.3) vermessenen Kronen konnten Anhaltswerte hergeleitet werden.

Aus dem theoretisch möglichen und dem tatsächlichen Anfall von Kronenschaftholz wurde eine Funktion hergeleitet (Abbildung 34). Das Bestimmtheitsmaß erreicht mit annähernd 80 % einen befriedigend hohen Wert. Mit dieser Funktion kann der in der Praxis verwertbare Schaftholzanteil in Abhängigkeit vom Kronenfuß geschätzt werden. Dieser wiederum wurde mit dem durchschnittlichen, im Praxistest München ermittelten Umrechnungsfaktor von 5,89 von fm Schaftholz mit Rinde auf Schüttraummeter hochgerechnet.

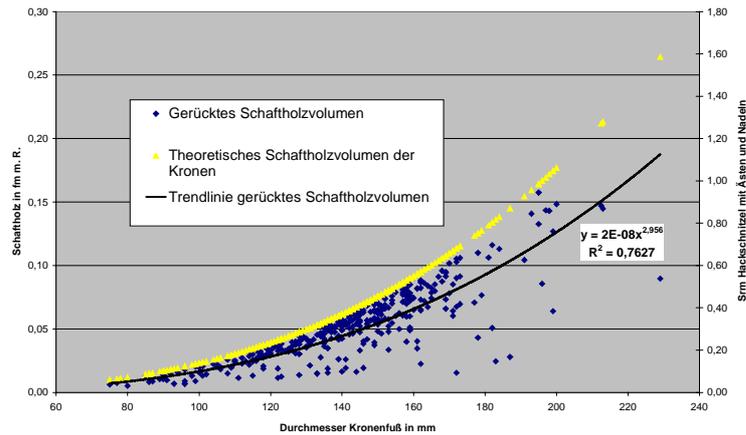


Abbildung 34: Theoretisches und tatsächlich gerücktes Schaftholzvolumen der Kronen in Abhängigkeit vom Durchmesser des Kronenfußes für Fichte

Tabelle 41 gibt Praxiswerte für die aus Kronen mit Aufarbeitungszöpfen von 10 bis 20 cm erzielbaren Schüttraummeter bzw. t atro Hackschnitzel an.

Tabelle 41: Tatsächlicher Anfall an Hackschnitzeln je Krone in Abhängigkeit vom Durchmesser des Kronenfußes für Fichte

Kronenfuß cm	Hackschnitzel	
	Srm	t atro
10	0,10	0,015
11	0,13	0,019
12	0,16	0,025
13	0,21	0,032
14	0,26	0,039
15	0,32	0,048
16	0,39	0,058
17	0,46	0,070
18	0,55	0,083
19	0,64	0,097
20	0,75	0,113

Der Anfall an Hackschnitzeln je Krone bewegt sich bei Aufarbeitungszöpfen des Stammholzes bzw. Kronenfüßen zwischen 10 und 20 cm von 0,1 Srm bis zu 0,75 Srm.

Die Angaben aus Tabelle 41 lassen sich für überschlägige Kalkulationen des möglichen Energieholzanfalls in Fichten-Verjüngungsnutzungen heranziehen. Werden beispielsweise bis Zopf 15 cm Standardlängen ausgehalten, beträgt der durchschnittliche Anfall 0,32 Srm Hackschnitzel je Krone. Werden 100 Stämme entnommen, kann demnach ein Anfall von 32 Srm Hackschnitzeln aus Kronenmaterial angenommen werden.

6.3 Vergleich der Bereitstellung von Industrieholz und Energieholz

Für einen Vergleich, ob es wirtschaftlicher ist, Energieholz für Heizwerke bereitzustellen oder Industrieholz für die Papier-/Zellstoffindustrie bzw. die Span-/Faserplattenindustrie, muss der jeweilige Aufwand dem möglichen Erlös gegenübergestellt werden. Zu berücksichtigen ist eine mögliche Mehrausbeute beim Energieholz.

6.3.1 Industrieholzpreise

Ein Preiseinbruch im Jahr 1990 prägt über alle betrachteten Baumarten hinweg die Entwicklung der Industrieholzpreise in Bayern bis 2002 (Abbildung 35). Auslöser war das Überangebot auf dem Holzmarkt, verursacht wiederum von den Stürmen Vivian und Wiebke. Die Preise nach 1990 sanken um 25 bis 50 % gegenüber 1989 und der Zeit davor.

Der Industrieholzpreis der **Fichte** liegt insgesamt deutlich höher als bei den anderen Baumarten. Während er bis 1989 konstant mehr als 100 €/t atro erreichte, im Mittel 113 €/t atro, lässt sich für die Jahre 1990 bis 2002 ein um 32 % reduzierter Wert von 78 €/t atro feststellen.

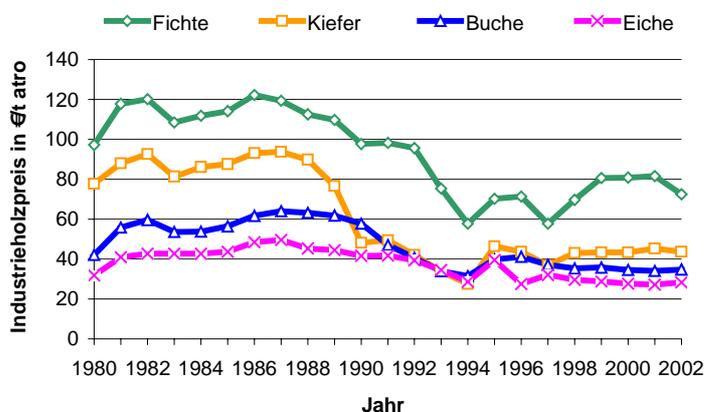


Abbildung 35: Industrieholzpreise für Fichte, Kiefer, Buche und Eiche, Quelle: Holzpreisstatistik der Bayerischen Staatsforstverwaltung 1980 bis 2002

Die **Kiefer** erlebte den stärksten Preiseinbruch. Ihr Wert halbierte sich von 87 €/t atro (Durchschnittswert 1980 bis 1989) auf 42 €/t atro nach 1990.

Bei der **Buche** nahm der Wert wie bei der Fichte etwa um ein Drittel ab. Während bis 1989 im Durchschnitt 57 €/t atro Erlöst wurden, waren es seit 1990 nur noch 39 €/t atro.

Bei der **Eiche** fiel der Rückgang mit 24 % am geringsten aus. Vom allerdings geringem Niveau von 43 €/t atro ausgehend, sank der Preis ab 1990 auf 33 €/t atro.

6.3.2 Deckungsbeiträge

Ob Waldbesitzer aus der Bereitstellung von Hackschnitzeln einen positiven Deckungsbeitrag ziehen und, wenn ja, in welcher Höhe, hängt von den Bereitstellungskosten und den möglichen Erlösen bei den Heizwerken ab.

Grundsätzlich sollten Forstbetriebe zunächst überprüfen, ob die Bereitstellung von Industrieholz oder die Alternative Hackschnitzelgewinnung rentabler ist. Dies kann mit Hilfe der folgenden Gleichung geschehen (vgl. WAGNER und WITTKOPF 2000):

Deckungsbeitrag Hackschnitzel = Deckungsbeitrag Industrieholz

$$[p(HS) - k(HS)] \times m(HS) = [p(IH) - k(IH)] \times m(IH) \quad \text{Gleichung [1]}$$

Gleichung [2] definiert den Begriff „Mehrausbeute“:

$$1 + ma = \frac{m(HS)}{m(IH)} \quad \text{Gleichung [2]}$$

$p(HS)$ = Erlös für Hackschnitzel in €/t atro bzw. in €/fm

$p(IH)$ = Erlös für Industrieholz in €/t atro bzw. in €/fm

$k(HS / IH)$ = Kosten der Produktion von Hackschnitzeln/Industrieholz in €/t atro bzw. in €/fm

$m(HS / IH)$ = Erntemenge der Hackschnitzel/des Industrieholzes in t atro bzw. in fm

ma = Mehrausbeute bei der Produktion von Hackschnitzeln im Verhältnis zur Aushaltung von Industrieholz

Kombiniert man Gleichung [1] und [2] und löst nach $p(HS)$ auf, so erhält man den Substitutionswert:

$$p(HS) = \frac{p(IH) - k(IH)}{1 + ma} + k(HS) = \text{Substitutionswert}$$

Bei Hackschnitzelerlösen, die den errechneten Wert $p(HS)$ übersteigen, ist es wirtschaftlicher, Hackschnitzel anstelle von Industrieholz zu produzieren.

-

Durch Umstellen der Formel können auch andere Fragestellungen berechnet werden.

- Wie hoch sollte der Industrieholzpreis sein für die Wahl der Variante Bereitstellung von Industrieholz?
- Was darf die Hackschnitzelgewinnung kosten?
- Wie hoch müsste die Mehrausbeute bei der Hackschnitzelgewinnung sein?

Die entsprechenden Formeln sind im Anhang 11 angegeben.

Grundsätzlich kommen drei Konstellationen in Betracht, wenn sich Forstbetriebe zwischen der Bereitstellung von Waldhackschnitzeln zur thermischen Verwertung oder von Industrieholz zu entscheiden haben.

Fall 1

Der Deckungsbeitrag für die Produktion von Hackschnitzeln liegt über den ganzen BHD-Bereich niedriger als bei der Alternative, der Aushaltung von Industrieholz (Abbildung 36).

Die energetische Verwertung ist für den Forstbetrieb aus wirtschaftlicher Sicht uninteressant.

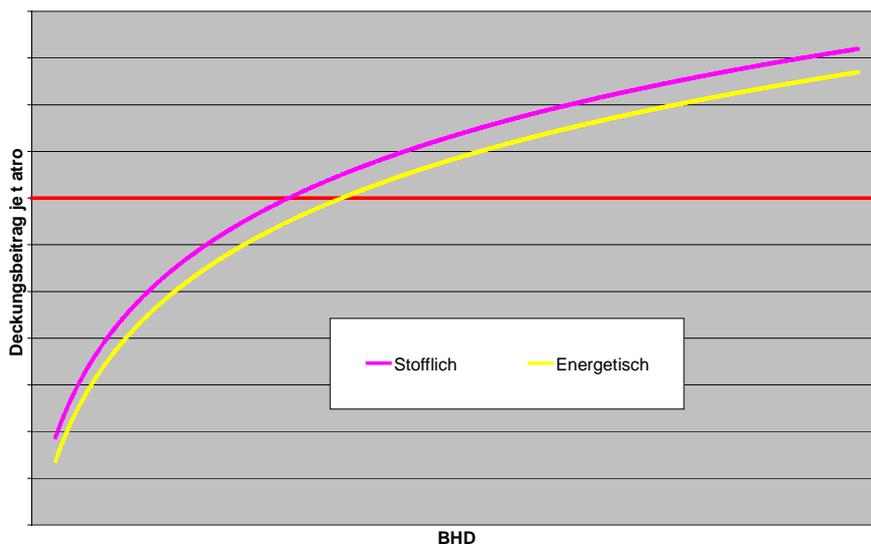


Abbildung 36: Schematische Darstellung der Deckungsbeiträge in Abhängigkeit vom BHD des ausscheidenden Bestandes für Fall 1

Tabelle 42 zeigt ein konkretes Beispiel für Fall 1.

Tabelle 42: Beispiel der Deckungsbeiträge (DB) in €/t atro bei vollmechanisierter Bereitstellung von Industrieholz frei Waldstraße im Vergleich zur Bereitstellung von Hackschnitzeln frei Werk mit der Logistikkette „Zangenschlepper“ für Fichte

BHD	Industrieholz			Waldhackschnitzel				Differenz der DB	
	Kosten	Erlös	DB	Kosten	Erlös	DB	DB+MA	ohne MA	mit MA
10	141	78	-63	123	65	-58	-87	5	-24
11	108	78	-30	109	65	-44	-66	-14	-36
12	88	78	-10	99	65	-34	-51	-24	-41
13	76	78	2	92	65	-27	-40	-29	-43
14	67	78	11	87	65	-22	-32	-33	-44
15	60	78	18	82	65	-17	-26	-35	-44
16	54	80	26	79	65	-14	-21	-39	-46
17	50	82	32	76	65	-11	-16	-43	-48
18	46	84	38	73	65	-8	-12	-46	-50
19	43	86	43	71	65	-6	-9	-49	-52
20	41	88	47	69	65	-4	-6	-52	-54

Annahmen

Industrieholz mit Fällen/Rücken; Waldhackschnitzel mit Fällen/Rücken/Hacken/Transport (15 km)

Kosten: vgl. Kapitel 5.4 und 5.6 (Umrechnung von Srm auf t atro mit Faktor 6,6)

Erlöse: Industrieholz 78 €/t atro (vgl. Kapitel 5.3.1), ab BHD 15 - 20 mit 5-50% Anteil an sägefähigen Standardlängen (Mehrerlös 20 €/t atro)

Waldhackschnitzel 65 €/t atro (vgl. Kapitel 5.1)

Deckungsbeitrag (DB): Differenz aus Erlös und Kosten

Mehrausbeute (MA): 50 % bezogen auf Industrieholz

Fall 2

Bei schwächeren BHD ist es wirtschaftlicher, Hackschnitzel bereitzustellen als Industrieholz auszuhalten. Die negativen Deckungsbeiträge, die Verluste, sind bis zum Schnittpunkt der Kurven geringer als beim Industrieholz (Abbildung 37). Ein positiver Deckungsbeitrag wird bei der Energieholzvariante erst in einem BHD-Bereich erreicht, bei dem die stoffliche Variante bereits deutlich höhere Deckungsbeiträge abwirft.

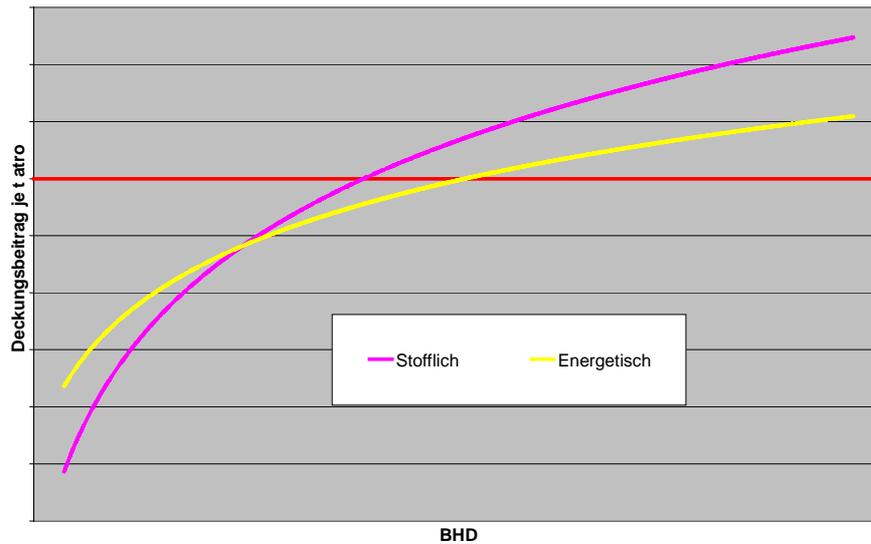


Abbildung 37: Schematische Darstellung der Deckungsbeiträge in Abhängigkeit vom BHD des ausscheidenden Bestandes für Fall 2

Tabelle 43 zeigt ein Beispiel für Fall 2.

Tabelle 43: Beispiel der Deckungsbeiträge in €/t atro bei vollmechanisierter Bereitstellung von Industrieholz frei Waldstraße im Vergleich zur Bereitstellung von Hackschnitzeln frei Werk mit der Logistikkette „Zangenschlepper“ für Kiefer

BHD	Industrieholz			Waldhackschnitzel				Differenz der DB	
	Kosten	Erlös	DB IG	Kosten	Erlös	DB	DB MA	ohne MA	mit MA
10	124	42	-82	108	65	-43	-64	39	17
11	95	42	-53	96	65	-31	-46	22	7
12	78	42	-36	87	65	-22	-33	14	3
13	67	42	-25	81	65	-16	-24	9	1
14	59	42	-17	76	65	-11	-17	6	0
15	53	44,5	-8	72	65	-7	-11	1	-3
16	48	47	-1	69	65	-4	-6	-3	-6
17	44	52	8	67	65	-2	-2	-10	-11
18	41	57	16	64	65	1	1	-16	-15
19	38	62	24	63	65	2	4	-22	-20
20	36	67	31	61	65	4	6	-27	-25

Annahmen

Industrieholz mit Fällen/Rücken; Waldhackschnitzel mit Fällen/Rücken/Hacken/Transport (15 km)

Kosten: vgl. Kapitel 5.4 und 5.6 (Umrechnung von Srm auf t atro mit Faktor 5,8)

Erlöse: Industrieholz 42 €/t atro (vgl. Kapitel 5.3.1), ab BHD 15 - 20 mit 5-50% Anteil an sägefähigen Standardlängen (Mehrerlös 50 €/t atro)

Waldhackschnitzel 65 €/t atro (vgl. Kapitel 5.1)

Deckungsbeitrag (DB): Differenz aus Erlös und Kosten

Mehrausbeute (MA): 50 % bezogen auf Industrieholz

Fall 3

Im Fall 3 ist es im schwächeren BHD Bereich wirtschaftlicher Hackschnitzel bereitzustellen. Zudem wird der Deckungsbeitrag schon bei schwächeren BHD positiv als bei der Industrieholzaushaltung (Abbildung 38). Bei stärkeren BHD wird es aber rentabler, die stoffliche Sortimente auszuhalten.

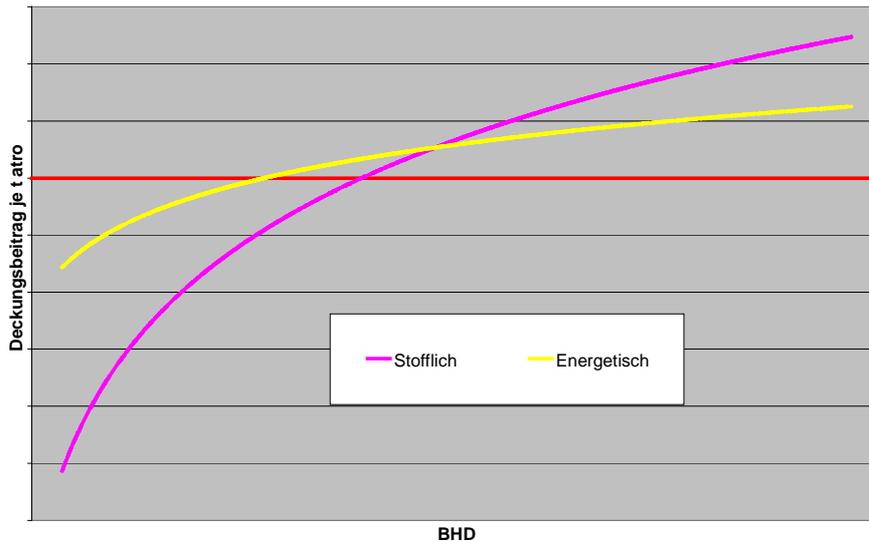


Abbildung 38: Schematische Darstellung der Deckungsbeiträge in Abhängigkeit vom BHD des ausscheidenden Bestandes für Fall 3

Tabelle 44 gibt ein Beispiel für Fall 3 an.

Tabelle 44: Beispiel der Deckungsbeiträge in €t atro bei vollmechanisierter Bereitstellung von Industrieholz frei Waldstraße im Vergleich zur Bereitstellung von Hackschnitzeln frei Werk mit der Logistikkette „Zangenschlepper“ für Buche

BHD	Industrieholz			Waldhackschnitzel				Differenz der DB	
	Kosten	Erlös	DB IG	Kosten	Erlös	DB	DB+MA	ohne MA	mit MA
10	96	39	-57	83	64	-19	-29	37	27
11	73	39	-34	74	64	-10	-15	24	19
12	60	39	-21	67	64	-3	-5	18	16
13	51	39	-12	62	64	2	2	14	15
14	45	39	-6	59	64	5	8	11	14
15	41	41	0	56	64	8	12	8	12
16	37	43	6	53	64	11	16	4	10
17	34	47	13	51	64	13	19	-1	6
18	31	51	20	50	64	14	21	-5	2
19	29	55	26	48	64	16	24	-10	-2
20	28	59	31	47	64	17	25	-14	-6

Annahmen

Industrieholz mit Fällen/Rücken; Waldhackschnitzel mit Fällen/Rücken/Hacken/Transport (15 km)

Kosten: vgl. Kapitel 5.4 und 5.6 (Umrechnung von Srm auf t atro mit Faktor 4,5)

Erlöse: Industrieholz 39 €/t atro (vgl. Kapitel 5.3.1), ab BHD 15 - 20 mit 5-50% Anteil an sägefähigen Standardlängen (Mehrerlös 40 €/t atro)

Waldhackschnitzel 65 €/t atro (vgl. Kapitel 5.1)

Deckungsbeitrag (DB): Differenz aus Erlös und Kosten

Mehrausbeute (MA): 50 % bezogen auf Industrieholz

In den Fällen 2 und 3 erlaubt es die Hackschnitzelproduktion zumindest das Minus abzumildern, das in schwächeren BHD-Bereichen bei der Pflege ohne Ertrag oder der Aushaltung von Industrieholz entsteht.

Häufig versuchen Forstbetriebe allerdings, nicht kostendeckende Maßnahmen generell zu unterlassen. Damit werden aber langfristig Einbußen bei der Qualität und Stabilität der Bestände in Kauf genommen.

6.4 Ablaufabschnitte der Bereitstellung von Hackschnitzeln

In der Folge wurden angelehnt an WITTKOPF et al. (2003) die wichtigsten Teilarbeiten der Bereitstellung von Hackschnitzel für Heizwerke erläutert und Leistungswerte zusammengestellt. Diese fließen in die unter Kapitel 6.6 exemplarisch zusammengestellten Logistikketten ein.

6.4.1 Fällen/Aufarbeiten

Die Leistungswerte der in Abbildung 39 beschriebenen Verfahren zum Fällen von Holz sind nur bedingt miteinander vergleichbar, da sie jeweils unterschiedliche Teilarbeiten enthalten.

Das **motormanuelle Verfahren** nach FELLER und RIEDELBERGER (2001) beschränkt sich auf das Fällen und Zopfen.

Bei der **Seillinie**, einem Zweimannverfahren, beinhalten die Leistungsangaben schon zusätzlich das Vorliefern von gezopfsten Stämmen an die Rückegasse (WEIXLER, 1999).

Beim **Harvester** nach FELLER et al. (1999) werden entastete Hölzer an der Rückegasse abgelegt.

Der **Mehrfachfällkopf**, geführt von einem Harvester, vermag nur Vollbäume an der Rückegasse abzulegen (WEIXLER und FELLER, 2001). Beachtet werden muss, dass für die

Leistung des Harvesters mit Mehrfachfällkopf nur eine orientierende Arbeitsstudie im Hochwald vorliegt. Im Versuchseinsatz im Hochwald konnte der Harvester mit Mehrfachfällkopf die gesammelten Bäume nicht zügig abzulegen. Sie verfangen sich in den Kronen des verbleibenden Bestandes und konnten erst durch zeitaufwändige Manöver zu Fall gebracht werden. Bei großzügigeren Platzverhältnissen, etwa bei der Ernte von Kurzumtriebswäldern, können deutlich höhere Leistungen erwartet werden (SOMMER und BURGER 2003). Die Arbeitsweise des Mehrfachfällkopf wird ausführlicher beschrieben im Kapitel 7.2.3, das sich neuen Entwicklungen der Forsttechnik im Energieholzbereich widmet.

Bei den Leistungsangaben zum **Hackschnitzel-Harvester** (FELLER et al. 1998) sind dagegen die Teilarbeiten Fällen, Vorliefern, Aufarbeiten und Hacken enthalten.

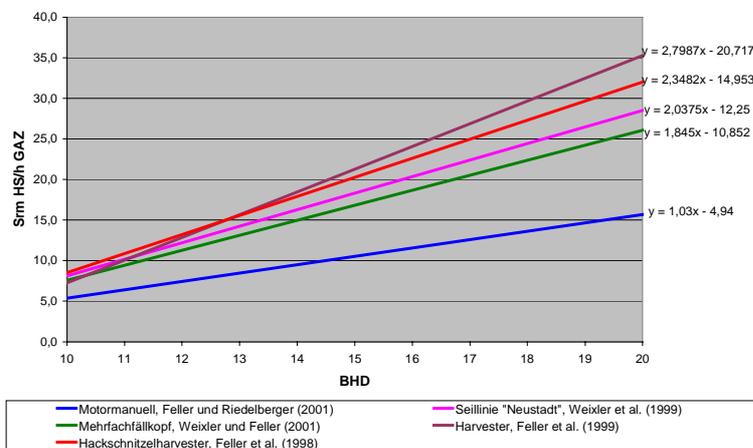


Abbildung 39: Leistung beim Fällen in Abhängigkeit vom BHD

Grundsätzlich gilt, dass mit zunehmendem Mechanisierungsgrad die Leistung beim Fällen zunimmt. Weiterhin hängt die Leistung stark vom BHD ab. Über alle Verfahren hinweg liegt die Leistung bei BHD 20 cm knapp dreimal so hoch wie bei BHD 10 cm.

6.4.2 Vorliefern/Rücken

Die Leistung beim Rücken liegt bei BHD 20 cm zwischen 50 % und 100 % höher als bei BHD 10 cm (Abbildung 40).

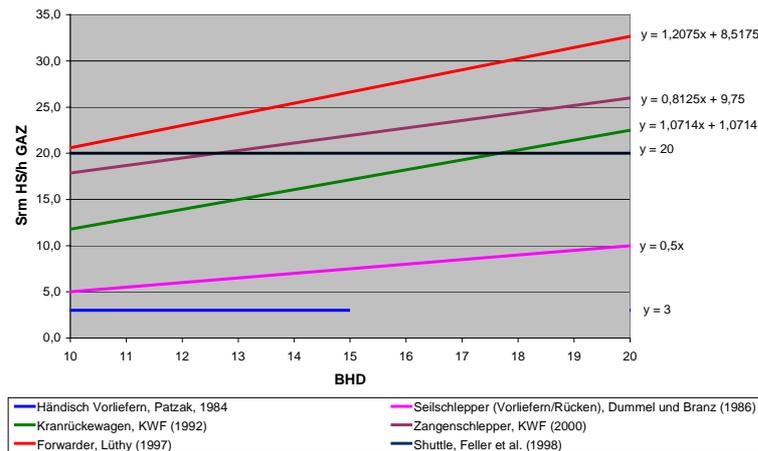


Abbildung 40: Leistung beim Vorliefern/Rücken in Abhängigkeit vom BHD

PATZAK 1984 ermittelte Leistungswerte in Kombination mit dem Hacken auf der Rückegasse mit einem handbeschickten Hacker. Das **Vorliefern per Hand** ist eine körperlich stark belastende Arbeit, deren Grenze hier mit BHD 15 cm angenommen wird. Eine eindeutige BHD-Abhängigkeit besteht vermutlich nicht, da die Baumteile so abgelängt werden, dass sie noch verzogen werden können. Im Kleinprivatwald wird häufig noch händisch vorgeliefert, insbesondere um Hiebsreste einem drohenden Borkenkäferbefall zu entziehen. Bei kleineren Hiebsmengen lässt sich das Vorliefern per Hand durchaus vertreten.

Die Leistungswerte für den **Seilschlepper** (DUMMEL und BRANZ, 1986) liegen relativ niedrig. Die Lastbildungsmöglichkeit je Fahrt ist beim Hackholz gering. Beachtet werden muss aber, dass die Angaben bereits das Vorliefern beinhalten. Gerade weitere Rückegassenabstände erfordern häufig das Vorliefern mit dem Seil. Grundsätzlich sind aber beim Rücken von Hackholz Alternativen mit tragender Arbeitsweise leistungsfähiger.

Weit verbreitet sind beispielsweise **Rückewagen**. Sie zeigen bei geringen Maschinenkosten beachtliche Rückeleistungen (KWF, 1992).

Die Leistungswerte für den **Zangenschlepper** (KWF 2000) ermittelten WEIXLER et al. (1999) für einen mittleren BHD des ausscheidenden Bestandes von BHD 16 cm. Der Einsatz setzt eine ausreichende Konzentration von Hackholz in Reichweite der Zange voraus. Dies wird durch eine entsprechende Fällordnung sowie das Vorliefern eines Seilschleppers beim Fällen innerhalb eines Seillinien-Verfahrens geleistet.

Forwarder entwickeln sich aufgrund der Zunahme der Kurzholzaushaltung und der engeren Anlage von Rückegassen zunehmend zur Standardrückemaschine. Für die Leistungswerte wurde auf ein Modell von LÜTHY (1997) zurückgegriffen⁴⁵.

Wenn auf der Rückegasse gehackt wird kann es sinnvoll sein ein **Shuttle** zum Rücken der Hackschnitzel einzusetzen. In der Regel handelt es sich um einen Forwarder mit einem Bunker, der die Schnitzel auf der Rückegasse übernimmt und in Wechselcontainer an der Waldstraße oder einem Lagerplatz überkippen kann. Die Leistungsangaben von Feller et al. 1998 beruhen auf einem Einsatz in Kombination mit einem Hackschnitzel-Harvester.

Nicht enthalten in Abbildung 40 sind die Leistungswerte für das Rücken von Kronen, da ein Bezug auf den BHD nicht möglich ist. Für das **Rücken von Fichtenkronen** ermittelten KRICHBAUM et al. (2003) Leistungswerte bezogen auf den Durchmesser am Kronenfuß. Beim **Rückewagen** lag die Leistung zwischen 8 Srm/h GAZ für Kronenfuß 10 cm und 25 Srm/h GAZ für Kronenfuß 20 cm. Ein **Forwarder** erreichte in diesem Durchmesserbereich eine Leistung von 14 bis 45 Srm/h GAZ.

6.4.3 Bündeln

Bündelmaschinen werden auf Forwarder, Dumper oder LKW montiert. Sie verdichten Astwerk und Kronen, vorzugsweise aus Endnutzungen, zu zylindrischen Bündeln. Forwarder rücken die Bündel wie normale Stammabschnitte an die Waldstraße. Dort können sie gehackt werden oder aber mit einem Kurzholz-LKW zum Heizwerk gebracht und dort stationär zerkleinert werden. In Kapitel 7.2.3 werden die Einsatzmöglichkeiten dieser neuen Forsttechnik im Energieholzbereich diskutiert.

Innerhalb einer orientierenden Arbeitsstudie konnte WITTKOPF (2004) in Ebersberg die Leistung eines auf LKW montierten Bündlers beobachten (Abbildung 41).

⁴⁵ Als Eingangsgrößen wurden ein Rückegassenabstand von 30 m, eine durchschnittliche Rückeentfernung von 200 m, drei Sortimenten sowie ein Hiebssatz 60 Erntefestmeter o. R./ha gewählt.



Abbildung 41: Bündelmaschine Fiberpack beim Einsatz in Ebersberg

Aus konzentriert an der Waldstraße abgelegten Fichtenkronen wurden durchschnittlich zwölf Bündel je h GAZ produziert. Ein Bündel ergab etwa 1,6 Srm Hackschnitzel. Damit lag die Leistung bei 20 Srm Hackschnitzel je h GAZ. Eine Abhängigkeit der Leistung zum mittleren Durchmesser der Kronen konnte nicht festgestellt werden.

6.4.4 Hacken

Alle Angaben zu den **Hackleistungen** in Srm/h GAZ beziehen sich nicht auf die theoretisch mögliche Leistung der Aggregate sondern gelten **für durchschnittliche Hackerauslastungen**. Die reine Hackerlaufzeit liegt in der Praxis meist nur bei 60 % (WEIXLER et al. 1999, KRICHBAUM et al. 2003, SCHUHBAUER 2004). Bei mangelhafter Abstimmung der möglichen Leistung beim Hacken auf der Waldstraße und der Transportkapazität (vgl. Kapitel 6.5.1) sind auch deutlich niedrigere Auslastungen an der Tagesordnung. Etwa 40 % der gesamten Arbeitszeit entfallen derzeit auf Umsetzzeiten des Hackers und Wartezeiten auf die Transportfahrzeuge bzw. die Container.

Wie die Ergebnisse von SCHUHBAUER (2004) belegen sind nur unter optimalen Bedingungen, die meist eine aufwändige Organisation bedingen und unter Inkaufnahme von Wartezeiten der Transportmittel Werte von 80 % Hackerlaufzeit und mehr erreichbar. Somit wird die Hackleistung in der Praxis neben der Motorleistung ganz erheblich von der Qualität der **Organisation der Abfuhrlogistik** geprägt.

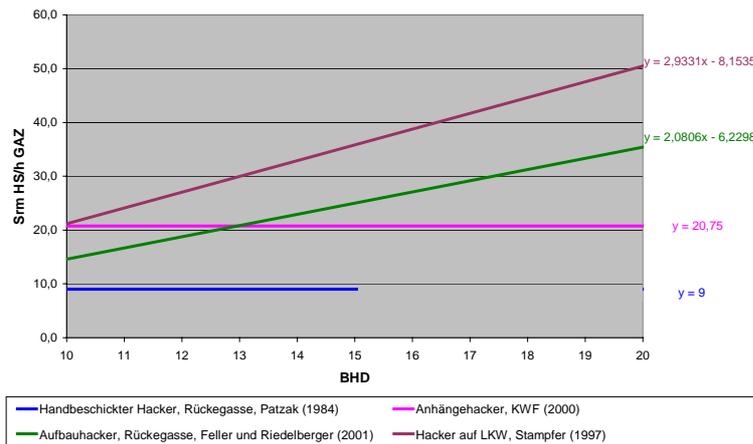


Abbildung 42: Leistung beim Hacken in Abhängigkeit vom BHD

Die Werte von PATZAK (1984) gelten nur für den BHD-Bereich bis 15 cm. Angesichts der Arbeitsschwere sowie der besonders hohen Unfallgefährdung bei der Zufuhr aufgrund unkontrolliert ausschlagender Stammteile sollten **handbeschickte Hacker** nicht mehr im Wald eingesetzt werden. Durch die Arbeit in unmittelbarer Nähe der Einzugsöffnung besteht zudem grundsätzlich die Gefahr von falsch ausgeworfenen Hackschnitzel oder – im schlimmeren Fall – von abgebrochenen Metallteilen (Hackmessern) getroffen zu werden. Es stehen mittlerweile zumindest in Bayern ausreichend mit Kran beschickte Hacker zur Verfügung (WITTKOPF und NEUGEBAUER 2004)⁴⁶.

Die Angaben für den **Anhängehacker** der mittleren Leistungsklasse (KWF 2000) beruhen auf der Studie von WEIXLER et al. (1999). Sie konnten beim Hacken von Kieferstämmen, ebenso wie beim Hacken von Buchen-Industrieholz keine statistisch absicherbare Abhängigkeit der Hackerleistung vom BHD des Hackholzes feststellen. Aufgrund des gleichzeitigen Greifens und Zuführens von mehreren Bäumen mit niedrigen BHD sowie des permanenten und sich überlappenden Beschickens des Hackers wurde der Einfluss des Stückmassesgesetzes weitgehend aufgehoben.

Bei dem von der LWF im Rahmen einer Arbeitsstudie untersuchten **Timberchipper** handelt es sich um einen Mobilhacker auf Basis eines Forwarders mit einem drehbar gelagertem Hackaggregat. Im Unterschied zu herkömmlichen Maschinen kann das Aggregat um 170° gedreht werden. Die Maschine kann beiderseits der Rückegasse greifen und befährt daher jede Gasse nur einmal in eine Richtung (FELLER und RIEDELBERGER 2000). Hier konnte eine

⁴⁶ Einer Umfrage vom Frühjahr 2004 zufolge verfügen die bayerischen Hackerunternehmen über mindestens 123 kranbeschickte Hacker. Der durchschnittliche Umkreis, in dem die Unternehmen die Hacker einsetzen würden, beträgt 67,4 km. Würde man 123 solche Arbeitsgebiete nebeneinander legen, so könnte Bayern fast dreimal abgedeckt werden.

Abhängigkeit der Leistung vom BHD nachgewiesen werden, da zumeist einzelne Bäume zugeführt wurden und kaum Überlappungen bei der Zufuhr vorkamen.

STAMPFER (1997) leitete für einen **Hacker auf LKW** mit eigenem Antrieb eine deutliche Abhängigkeit der Leistung vom BHD her. Seinen Angaben nach liegt die Leistung bei BHD 20 cm um 150 % höher als bei BHD 10 cm. Bei sehr leistungsfähigen Hackern erscheint die recht deutliche BHD-Abhängigkeit plausibel, insbesondere wenn die Kranzufuhr nicht ausreichend schnell erfolgen kann, um den Hacker voll auszulasten oder mangels konzentriertem Anfall auch schwächere Stämme einzeln zugeführt werden müssen.

6.4.5 Transport

Der Transport sollte bei Kalkulationen zur Hackschnitzelbereitstellung berücksichtigt werden, da sich die Preise für Hackschnitzel in der Regel frei Heizwerk verstehen.

Für die Logistikketten in Kapitel 6.6 werden die Angaben von PATZAK (1984) für den Transport mit Schlepper bzw. Container-LKW herangezogen.

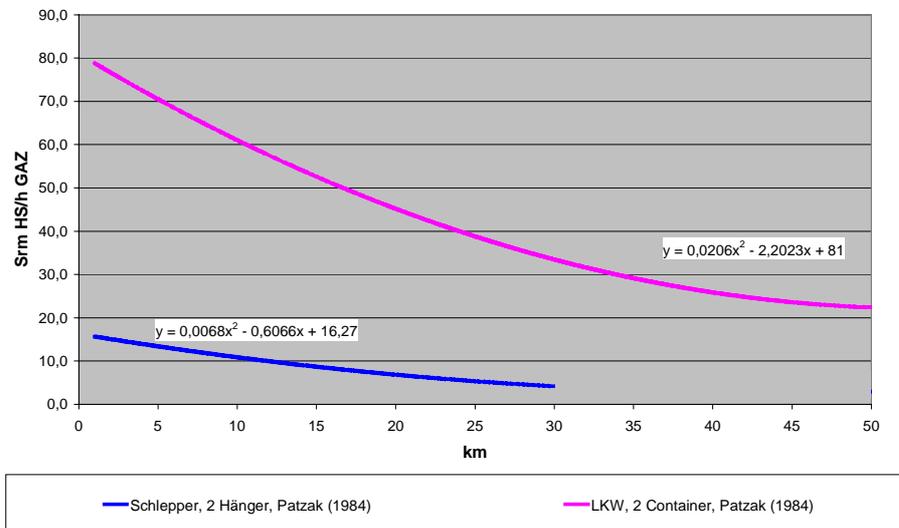


Abbildung 43: Leistung beim Hackschnitzeltransport in Abhängigkeit von der Transportentfernung

Grundsätzlich besteht die Möglichkeit,

- mit landwirtschaftlichen Schleppern und Anhängern zu transportieren (häufig insbesondere im Privatwald und bei kleineren Heizanlagen),
- mit Container LKW zu fahren (Regelfall bei Heizwerken über 500 kW Leistung) oder
- spezielle Schubboden-LKW einzusetzen (häufig im Sägerestholzbereich, für Waldeinsätze eher ungeeignet).

Der Einsatz von landwirtschaftlichem Equipment lohnt in der Regel bei

- geringen Mengen
- geringen Entfernungen
- gewollter Auslastung eigener Maschinenkapazität sowie
- freier (betriebs)eigener Arbeitskapazität.

Wichtig ist es, die Transportlogistik auf die erzielbare Hackerleistung abzustimmen, um unnötige Stillstandszeiten sowohl auf Seiten des Hackers als auch bei den Transportfahrzeugen zu vermeiden.

6.5 Abstimmung von Hack- und Transportkapazität

Im Regelfall verursacht der Hacker die höchsten Maschinenkosten je Einsatzstunde. Die teuerste Maschine sollte in der Regel die „**Schlüsselmaschine**“ sein, auf die eine Logistikkette abgestimmt wird. Bei der Hackschnitzelbereitstellung frei Heizwerk kann allerdings – in Abhängigkeit von der Transportentfernung – , die Summe der Maschinenkosten der Transportfahrzeuge, die zur Auslastung des Hackers benötigt werden, die Kosten des Hackers übersteigen. Aus wirtschaftlicher Sicht muss daher Hackerleistung und Transportkapazität so gestaltet werden, das eine Optimierung der Gesamtkosten beim Hacken und Transportieren von Hackgut erfolgt. Dies setzt eine sorgfältige Planung und entsprechendes Wissen voraus.

6.5.1 Modellrechnung

Tabelle 45 zeigt zusammengefasst die Eingangsdaten für die Modellrechnung.

Tabelle 45: Eingangsdaten für die Abstimmung von Hack- und Transportleistung

	Eingabe	Einheit
Hackerleistung	90	Srm/h
Hackerkosten	200	€/h
LKW-Kosten	50	€/h
Container je LKW	2	Stück
Containergröße	40	m ³
Füllungsgrad	87,5	%
Containerinhalt	35	Srm
Transportgeschwindigkeit	50	km/h
Einfache Entfernung	15	km
Abladezeit/Wartezeit	0,5	h

Die Formeln zur Berechnung der folgenden Ergebnisse finden sich im Anhang 4.

Zunächst wurde der Mindestzeitbedarf für einen LKW-Zyklus⁴⁷ errechnet. Daraus folgen die maximale Transportleistung eines LKW und die rechnerische Zahl der zeitgleich benötigten LKW (Tabelle 46).

Tabelle 46: Zwischenergebnis der Abstimmung von Hack- und Transportleistung

Mindest-Zeitbedarf/LKW-Zyklus	1,9	h/Zyklus
Max. Leistung je LKW	37	Srm/h
Zeitgleich benötigte LKW	2,4	Stück

Um den Hacker mit der gegebenen Leistung voll auszulasten, müssten rechnerisch 2,4 LKW gleichzeitig im Einsatz sein. Hier stellt sich die Frage, ob es sinnvoller ist, zwei oder doch drei LKW einzusetzen.

Im folgenden Schritt wird nun berechnet, ob es – bezogen auf die Gesamtkosten je Srm frei Heizwerk – günstiger ist die Hackkosten zu minimieren und drei LKW vorzuhalten oder die Transportkosten zu minimieren und nur zwei LKW einzusetzen.

⁴⁷ Ein LKW-Zyklus entspricht der Zeit zwischen zwei Ankünften eines LKW am Hacker (Beginn des Befüllvorgangs)

Tabelle 47: Ergebnis der Abstimmung von Hack- und Transportkosten

	Benötigte LKW	
	Aufgerundet	Abgerundet
Benötigte LKW gerundet	3 Stück	2 Stück
Dauer LKW-Zyklus	2,3 h	1,9 h
Wartezeit Hacker	0 h je h für Hacker	0,16 h je h für Hacker
LKW	0,46 h je Zyklus	0 h je Zyklus
Tatsächliche Leistung je LKW	30 Srm/h	37 Srm/h
Tatsächliche Leistung Hacker	90 Srm/h	60 Srm/h
Kosten Hacken	2,22 €/Srm	2,68 €/Srm
Kosten Transport	1,67 €/Srm	1,34 €/Srm
Gesamtkosten je Srm	3,89 €/Srm	4,02 €/Srm

Für das vorliegende Beispiel kann als Ergebnis der Abstimmung festgehalten werden, dass es günstiger ist, Wartezeiten der LKW und damit erhöhte Transportkosten in Kauf zu nehmen. Zwar kostet der Transport beim Einsatz von zwei LKW nur 1,34 €/Srm, dennoch gleichen die günstigeren Hackkosten beim Einsatz von drei LKW die höheren Transportkosten von 1,67 €/Srm mehr als aus. So sind die Kosten für Hacken und Transport bei der Variante mit drei LKW in der Summe mit 3,89 €/Srm um 0,13 €/Srm oder 3 % niedriger.

Beim Einsatz von drei LKW verlängert sich die Zyklusdauer auf 2,33 h (Tabelle 48). Je LKW und Zyklus fallen 0,46 h Wartezeit im Wald an.

Tabelle 48: Aufschlüsselung der Dauer eines LKW-Zyklus im Beispiel

Benötigte LKW	LKW-aufgerundet: 3	LKW-abgerundet: 2
Wartezeit Wald	0,46 h	0,00 h
Ladezeit	0,78 h	0,78 h
Fahrtzeit	0,60 h	0,60 h
Wartezeit Werk	0,50 h	0,50 h
Zyklusdauer	2,33 h	1,88 h

Abbildung 44 zeigt die jeweilige zeitliche Gliederung des LKW-Zyklus in Gegenüberstellung zur Auslastung des Hackers.

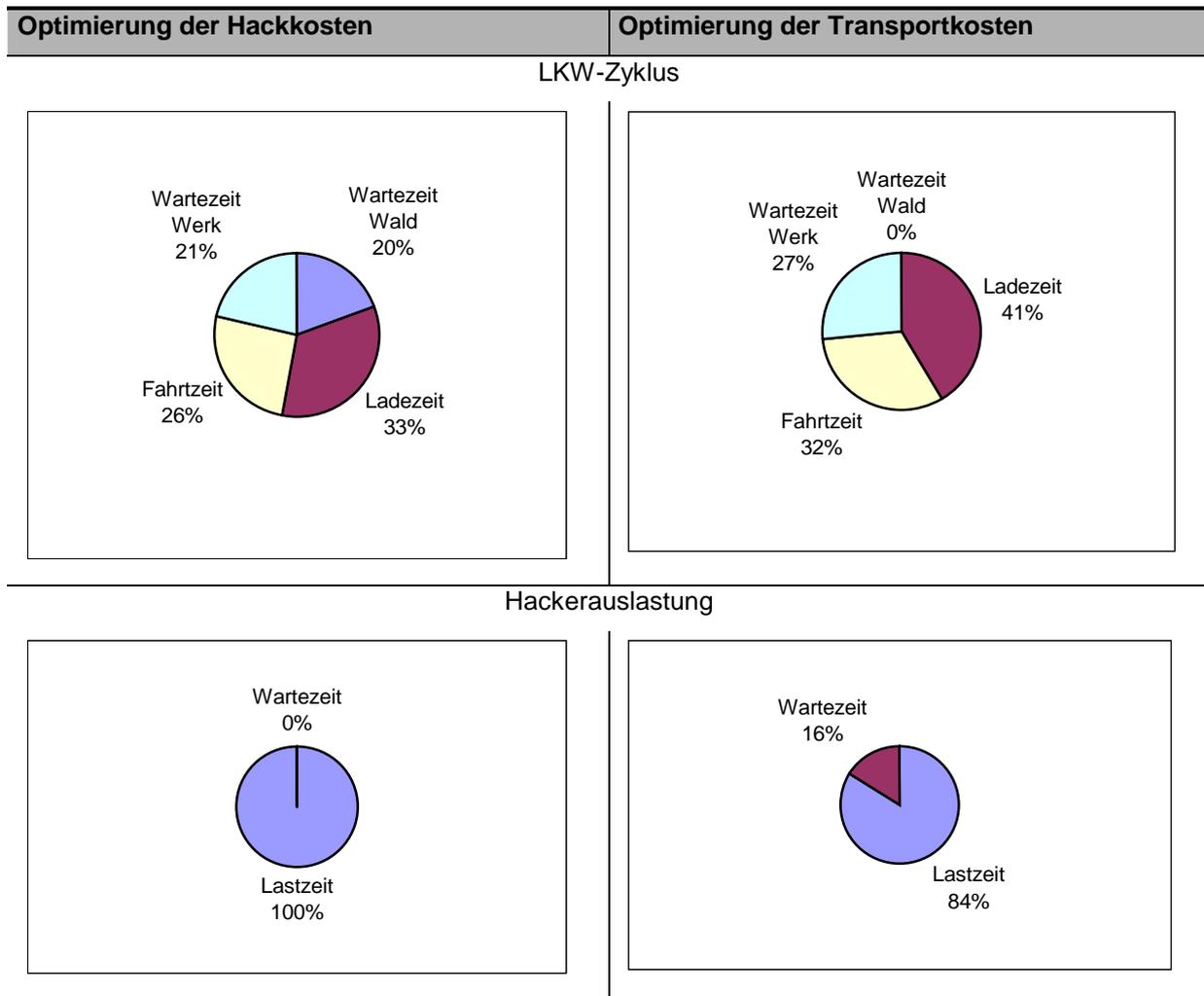


Abbildung 44: LKW-Zyklus und Hackerauslastung bei Abstimmung nach Hackkosten und Transportkosten für ein Beispiel

6.5.2 Sensitivitätsanalyse

Folgend wird eine Sensitivitätsanalyse der Gesamtkosten für Hacken und Transport je Srm frei Heizwerk in Abhängigkeit von der Transportentfernung vorgenommen. Dazu wurden mit dem Modell unter Beibehaltung der sonstigen Eingangsgrößen (*ceteris paribus*) Transportentfernungen von 1 bis 200 km untersucht.

Unter den in Kapitel 6.4.5 angegebenen Werten für die wesentlichen Einflussgrößen zeigt sich die in Abbildung 45 gezeigte Abhängigkeit der Gesamtkosten von der Optimierung der Hack- und Transportkosten.

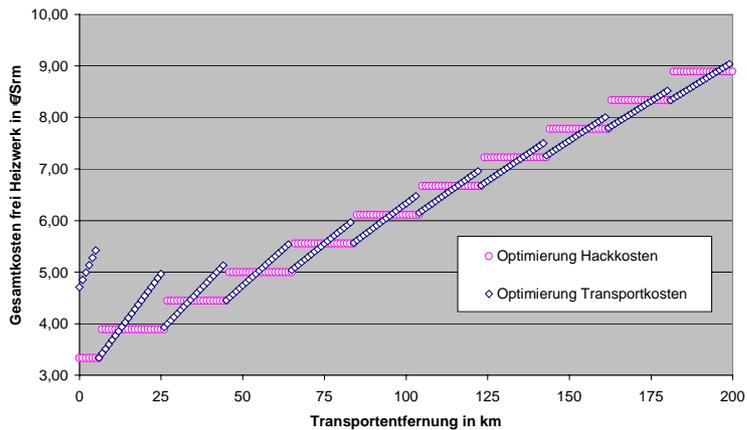


Abbildung 45: Kosten frei Heizwerk in Abhängigkeit von Entfernung und Optimierungsart

Die (geringstmöglichen) Gesamtkosten steigen stufenartig mit der Transportentfernung an. Der waagrechte Teil einer Stufe entsteht, wenn ausreichend LKW in Betrieb sind und keine Wartezeiten des Hackers entstehen (Optimierung Hackkosten). Der Anstieg beginnt jeweils dann, wenn zur Optimierung der Hackkosten ein weiterer LKW nötig wäre, im Hinblick auf die Gesamtkosten aber auf diesen LKW verzichtet werden kann (Optimierung Transportkosten). Erst wenn – bei steigender Entfernung – die Gesamtkosten bei der Optimierung der Transportkosten die bei der Optimierung nach Hackkosten wieder übersteigen, ist es wirtschaftlicher einen zusätzlichen LKW einzusetzen und nach Hackkosten optimiert weiterzuarbeiten.

Mit zunehmender Transportentfernung werden die (geringstmöglichen) Gesamtkosten immer stärker vom Kurvenverlauf der Optimierung nach Transportkosten geprägt.

Die Anzahl der zeitgleich benötigten LKW kann mit Hilfe des Kalkulationsmodells schnell ermittelt werden. Für die Entscheidung ist wichtig, auf welche ganzen Zahlen jeweils in Abhängigkeit von der Transportentfernung gerundet werden muss, unter der Prämisse der Optimierung der Gesamtkosten.

Abbildung 46 zeigt wie viele LKW in Abhängigkeit von der Transportentfernung benötigt werden, wenn nach Gesamtkosten Hacken und Transport optimiert wird. So sollten grundsätzlich mindestens zwei LKW eingesetzt werden. Ab 14 km Transportentfernung sind es drei, ab 35 km vier, ab 56 km fünf, ab 77 km sechs, ab 97 km sieben LKW und so fort.

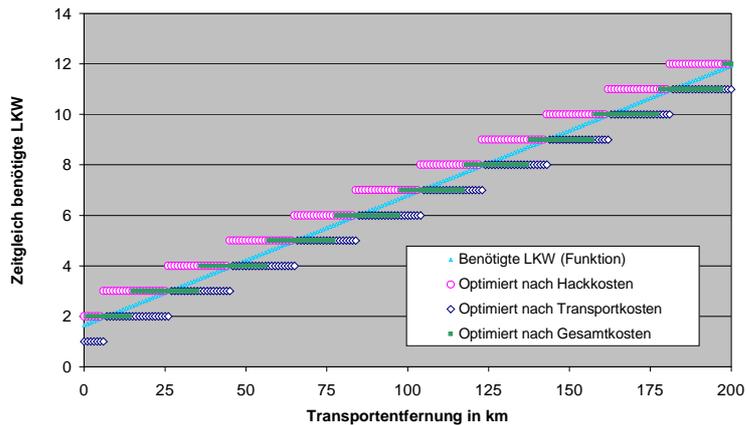


Abbildung 46: Zeitgleich benötigte LKW nach optimierten Gesamtkosten

Abbildung 46 verdeutlicht nochmals grafisch, dass sich bei steigender Transportentfernung die Optimierung der Gesamtkosten immer stärker mit der Optimierung nach Transportkosten deckt.

6.6 Logistikketten zur Bereitstellung von Waldhackschnitzeln frei Heizanlage

In der Folge werden zehn Logistikketten beispielhaft dargestellt. Anspruch war es, sich deutlich voneinander unterscheidende Varianten auszuweisen, deren Vergleich interessante Aspekte erwarten lässt. Alle Ketten lassen sich grundsätzlich variieren. Die Auswahl erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit.

Aufgegriffen werden jeweils die Kategorien Maschinenausrüstung, Ablaufabschnitte, Leistung und Kosten sowie Beurteilung. Als Lohnkosten wurden für die ersten drei niedriger mechanisierten Logistikketten Maschinenringsätze unterstellt, bei den anderen höher mechanisierten ein Satz für Forstunternehmer.

Der Ansatz unterschiedlicher Lohnkosten bei den Logistikketten mag auf den ersten Blick die spätere Vergleichbarkeit erschweren. Dennoch ist es realitätsnah, so vorzugehen.

Forstbetrieben steht es offen, Forstunternehmer einzusetzen oder in niedriger mechanisierten Verfahren mit Maschinenringkräften zu arbeiten. Bei niedrigem Mechanisierungsgrad eignen sich Maschinenringsätze auch für Vergleichskalkulationen zwischen der Selbstvermarktung des Hiebsanfalls oder der Vergabe an Selbstwerber.

6.6.1 Teilmechanisiert – „Kleinprivatwald“

Bäuerliche Waldbesitzer beschicken im eigenen Wald oder als Selbstwerber bei anderen Waldbesitzern häufig die Hacker noch händisch. Mit dem Hackgut versorgen sie die eigene Heizung. In der Regel werden Anbauhacker ausgeliehen, die einfach zu bedienen sind und vergleichsweise kostengünstig arbeiten.

Maschinenausrüstung

Die Logistikkette „Kleinprivatwald“ eignet sich für Waldbesitzer, die eigene Arbeitskraft und vorhandene Maschinen einbringen wollen. Sie stellt eine Alternative bei geringem Materialanfall im Kleinprivatwald dar.

Tabelle: 49 Maschinenausrüstung Logistikkette „Kleinprivatwald“



Persönliche Schutzausrüstung, Motorsäge, Fällheber, Packzangen, Schlepper, Anbauhacker, zwei Anhänger für Hackschnitzeltransport

Ablaufabschnitte

Im gelösten Zweimannverfahren wird mit der Motorsäge gefällt und von Hand vorgeliefert. Anschließend arbeitet ein Anbauhacker auf der Rückegasse, der händisch beschickt wird. Ein nachgezogener landwirtschaftlicher Wagen fängt die Hackschnitzel auf. Die Hackschnitzel werden nach dem Hacken und Rücken mit zwei landwirtschaftlichen Anhängern zur Heizanlage transportiert.

Arbeitsort	Bestand	Rückegasse	Waldstraße	Heizanlage
Ablaufabschnitt				
Fällen				
Vorliefern				
Hacken, Rücken				
Transport				

Abbildung 47: Ablaufabschnitte Logistikkette „Kleinprivatwald“

Leistung und Kosten

Der eindeutige betriebswirtschaftliche Nachteil dieser Logistikkette liegt im händischen Vorliefern, das zeitaufwändig und lohnkostenintensiv ist. In der Praxis spielt dieser Aspekt jedoch häufig für die persönliche Entscheidung der Waldbauern eine untergeordnete Rolle, etwa weil sie in Eigenregie arbeiten und nur kalkulatorische Lohnkosten anfallen. Auch bei geringem Hiebsanfall kann das händische Vorliefern für den Einzelfall eine wirtschaftlich sinnvolle Alternative darstellen. Die Kalkulation (Tabelle 50) stützt sich auf eine Entlohnung der Arbeitskräfte zum Maschinenringsatz.

Tabelle 50: Leistung und Kosten der Logistikkette „Kleinprivatwald“

Logistikkette 1 "Kleinprivatwald"	BHD 10		BHD 15		BHD 20*	
	Leistung Srm/h	Kosten €/Srm	Leistung Srm/h	Kosten €/Srm	Leistung Srm/h	Kosten €/Srm
Fällen	5,4	3,1	10,5	1,6	-	-
Vorliefern	3	3,3	3	3,3	-	-
Hacken, Rücken	9,0	5,0	9,0	5,0	-	-
Transport	8,7	4,6	8,7	4,6	-	-
Gesamt	1,3	16,0	1,5	14,5	-	-

*Angaben bei diesem Verfahren aus ergonomischen Gründen nur bis BHD 15 cm sinnvoll

Beurteilung

Das Holz hat bei dieser Logistikkette nicht die Möglichkeit, vor dem Hackvorgang an der Waldstraße abzutrocknen. Gerade in kleineren Hackschnitzelheizungen muss jedoch trockenes Holz verbrannt werden. Bei der Lagerung zum Trocknen ist wegen der hohen Wassergehalte mit starkem Pilzwachstum und entsprechend erheblichen Substanz- und Heizwertverlusten zu rechnen. Das Hackholz trocknet im Bestand nach dem Fällen und

Vorliefern wegen des Bestandesschattens nur verzögert ab. Gleichzeitig birgt dieses Vorgehen die Gefahr eines Borkenkäferbefalls.

Aus ergonomischer Sicht gilt das händische Vorliefern als sehr nachteilig, weil es die Arbeitskräfte physisch stark belastet. Die Logistikkette „Kleinprivatwald“ sollte sich auf Bestände unter BHD 15 cm beschränken. Zugleich sollte eine Vorlieferentfernung von 15 m nicht überschritten werden. Für den Motorsägenführer und den Vorlieferer besteht jedoch die Möglichkeit, sich in ihrer Tätigkeit abzuwechseln (Jobrotation).

Bei der händischen Beschickung des Hackers treten wiederum hohe körperliche Belastungen auf. Zudem ist die Unfallgefährdung hoch (Kapitel 6.4.4). Wo immer möglich, sollten Hacker mit Kran eingesetzt werden.

Das Hacken auf der Rückegasse mit einem Anbauhacker und angehängtem Wagen erfordert ein einfaches Gelände, gute Erschließung und relativ breite Rückegassen. Wenn diese Voraussetzungen erfüllt sind, hält sich der Organisationsaufwand der Logistikkette in Grenzen. Fast alle im Wald anfallenden Teilarbeiten können auch zeitlich getrennt voneinander erledigt werden. Lediglich Hacken und Transport werden in einem kombinierten Arbeitsgang durchgeführt.

Tabelle 51: Beurteilung der Logistikkette „Kleinprivatwald“ für Fichte

Kriterium	Einwertung	Punkte
1 Wirtschaftlichkeit	-	-
1.1 Bereitstellungskosten	14,50 €	4
1.2 Potentieller Hackguterlös	über 8 €/Srm	5
2 Hackschnitzelqualität	-	-
2.1 Grünanteil	mittel	5
2.2 Erzielbarer Wassergehalt	WG >40 %	0
3 Ergonomie	-	-
3.1 Arbeitsschwere	ungünstig	0
3.2 Unfallgefährdung	hoch	0
4 Organisationsaufwand	-	-
4.1 Störungsempfindlichkeit	eher niedrig	8
4.2 Maschinenverfügbarkeit	günstig	10
4.3 Kombinationsmöglichkeit mit Holzernte	mittel	5
5 Pflglichkeit	-	-
5.1 Befahrungsschäden	mittel	5
5.2 Schäden am verbleibenden Bestand	eher gering	8
6 Nährstoffaustrag	mittel	5
7 Energieverbrauch	3,4 Liter je Srm	3
8 Waldschutzaspekt	-	-
8.1 Risiko eines Borkenkäferbefalls	eher hoch	2
8.2 Aktive Borkenkäferbekämpfung	geeignet	5

6.6.2 Teilmechanisiert – „Seilschlepper“

Dieser Logistikkette kommt aufgrund der weiten Verbreitung von Seilschleppern nach wie vor erhebliche Bedeutung zu.

Maschinenausrüstung

Die Logistikkette eignet sich für Waldbesitzer, die eigene Arbeitskraft und Maschinen (Seilschlepper) einbringen wollen.

Tabelle 52: Maschinenausrüstung Logistikkette „Seilschlepper“



Persönliche Schutzausrüstung, Motorsäge, Schlepper mit Funkseilwinde, Schlepper mit Anhängenhacker, Anhänger für Hackschnitzeltransport

Ablaufabschnitte

Das Fällen erfolgt mit der Motorsäge im Seillinienverfahren (kombiniertes Zwei-Mannverfahren). Anschließend wird ohne Transportbruch mit dem Seilschlepper vorgeliefert und bis zur Waldstraße gerückt (gekoppeltes Verfahren). Dort wird das Hackholz zur Trocknung gepoltert. Das Hacken übernimmt zeitlich versetzt ein Anhängenhacker an der Waldstraße. Er bläst die Hackschnitzel in landwirtschaftliche Anhänger. Unmittelbar nach dem Hackvorgang transportiert ein Schlepper die befüllten Anhänger zum Verbraucher.

Arbeitsort	Bestand	Rückegasse	Waldstraße	Heizanlage
Ablaufabschnitt				
Fällen, Aufarbeiten				
Vorliefern, Rücken				
Hacken				
Transport				

Abbildung 48: Ablaufabschnitte Logistikkette „Seilschlepper“

Leistung und Kosten

Tabelle 53 basiert auf einer Kalkulation des Lohnes zum Maschinenringsatz.

Tabelle 53: Leistung und Kosten der Logistikkette "Seilschlepper"

Logistikkette 2 "Seilschlepper"	BHD 10		BHD 15		BHD 20	
	Leistung Srm/h	Kosten €/Srm	Leistung Srm/h	Kosten €/Srm	Leistung Srm/h	Kosten €/Srm
Fällen	5,4	3,1	10,5	1,6	15,7	1,0
Vorliefern, Rücken	5	7,0	7,5	4,7	10	3,5
Hacken	20,8	3,4	20,8	3,4	20,8	3,4
Transport	8,7	4,6	8,7	4,6	8,7	4,6
Gesamt	1,8	18,0	2,6	14,2	3,1	12,5

Beurteilung

Beim Rücken muss der Fahrer die Kabine zur Lastbildung und zum Poltern häufig verlassen. Zudem strengt es körperlich an, das Seil im Bestand ausziehen.

Der Organisationsaufwand ist dagegen günstig zu beurteilen. Die Teilarbeitsschritte Fällen sowie Vorliefern und Rücken erfolgen entkoppelt vom Hacken. Nur Hacken und Transport müssen aufeinander abgestimmt werden. Positiv wirkt sich die gute Kombinationsmöglichkeit zur Rundholzernte aus. Da Stammholz, zumindest lang ausgehaltenes, überwiegend von Seilschleppern gerückt wird, muss grundsätzlich, um die Logistikkette „Seilschlepper“ anzuhängen, keine weitere Rückemaschine den Hiebsort anfahren.

Rindenverletzungen drohen immer dann, wenn Langholz vom Bestand zur Rückegasse sowie von der Rückegasse auf die Waldstraße eingeschwenkt wird. Das Rücken mit dem Seilschlepper kann bei sorgloser Durchführung den verbleibenden Bestand erheblich schädigen.

Tabelle 54: Beurteilung der Logistikkette „Seilschlepper“ für Fichte

Kriterium	Einwertung	Punkte
1 Wirtschaftlichkeit	-	-
1.1 Bereitstellungskosten	14,20 €	4
1.2 Potentieller Hackguterlös	über 8 €/Srm	5
2 Hackschnitzelqualität	-	-
2.1 Grünanteil	mittel	5
2.2 Erzielbarer Wassergehalt	WG 30-40 %	5
3 Ergonomie	-	-
3.1 Arbeitsschwere	eher ungünstig	2
3.2 Unfallgefährdung	mittel	5
4 Organisationsaufwand	-	-
4.1 Störungsempfindlichkeit	niedrig	10
4.2 Maschinenverfügbarkeit	günstig	10
4.3 Kombinationsmöglichkeit mit Holzernte	gut	10
5 Pflughlichkeit	-	-
5.1 Befahrungsschäden	eher hoch	2
5.2 Schäden am verbleibenden Bestand	eher hoch	2
6 Nährstoffaustrag	mittel	5
7 Energieverbrauch	4 Liter je Srm	0
8 Waldschutzaspekt	-	-
8.1 Risiko eines Borkenkäferbefalls	mittel	5
8.2 Aktive Borkenkäferbekämpfung	geeignet	5

6.6.3 Teilmechanisiert – „Rückewagen“

Die Verbreitung von Rückewagen nimmt stark zu, da in der Holzernte verstärkt auf Kurzholzverfahren gesetzt wird.

Maschinenausrüstung

Die Logistikkette „Rückewagen“ bietet sich besonders an, wenn spezielle auch außerhalb des Waldes gelegene Lagerplätze für Hackholz existieren oder unmittelbar an nahe gelegenen Heizanlagen gelagert und gehackt werden kann.

Tabelle 55: Maschinenausrüstung Logistikkette "Rückewagen"



Persönliche Schutzausrüstung, Motorsäge, Schlepper mit Funkseilwinde, Kranrückewagen, Schlepper mit Anhängehacker, Anhänger für Hackschnitzeltransport

Ablaufabschnitte

Fällen und Vorliefern erfolgen teilmechanisiert mit Motorsäge und Seilschlepper im Seillinienverfahren. Der Kranführer nimmt das vorgelieferte Holz an der Rückegasse auf und legt es auf den Rückewagen.

Arbeitsort Ablaufabschnitt	Bestand	Rückegasse	Waldstraße (Lagerplatz)	Heizanlage
Fällen, Vorliefern, Aufarbeiten				
Rücken, (Transport)				
Hacken				
(Transport)				

Abbildung 49: Ablaufabschnitte Logistikkette „Rückewagen“

Mit dem Rückewagen wird das Hackholz zur Waldstraße gebracht und zu einem Lagerplatz gefahren. Nach dem Abtrocknen des Holzes bläst ein Anhängenhacker die Schnitzel auf einen Anhänger zum weiteren Transport.

Alternativ kann das Hackholz direkt zum Heizwerk gerückt werden, wenn das Werk nahe liegt und direkt in den Hackschnitzelbunker gehackt werden kann. Der Hackschnitzeltransport mit Schlepper und Hänger entfällt bei dieser Variante.

Leistung und Kosten

Die Lohnkosten in Tabelle 56 sind mit Maschinenringsätzen kalkuliert.

Tabelle 56: Leistung und Kosten der Logistikkette "Rückewagen"

Logistikkette 3 "Rückewagen"	BHD 10		BHD 15		BHD 20	
	Leistung Srm/h	Kosten €/Srm	Leistung Srm/h	Kosten €/Srm	Leistung Srm/h	Kosten €/Srm
Fällen, Vorliefern	8,1	6,3	18,3	2,8	28,5	1,8
Rücken	11,8	5,5	17,1	3,8	22,5	2,9
Hacken	20,8	3,4	20,8	3,4	20,8	3,4
Transport	8,7	4,6	8,7	4,6	8,7	4,6
Gesamt	3,9	15,2	6,2	10,0	7,8	8,1

Beurteilung

Das gelöste, vom Seilschlepper unterstützte Zweimannverfahren beim Fällen und Vorliefern bietet die Möglichkeit, sich bei der schweren Motorsägenarbeit abzuwechseln. Das vom Kran unterstützte Arbeiten mit dem Rückewagen beurteilen Ergonomen ebenfalls günstig.

Die Arbeitsschritte laufen weitgehend entkoppelt ab, die Logistikkette reagiert wenig empfindlich auf Störungen. Sehr positiv wirkt sich beim Rückewagen die hohe Maschinenverfügbarkeit innerhalb von Forstbetrieben und bei Unternehmern aus. Hervorzuheben ist daneben die gute Kombinationsmöglichkeit mit der Rundholzernte, insbesondere bei Kurzholzverfahren.

Eine saubere Hiebsordnung mit geringen Schäden beim Fällen und Vorliefern ermöglicht das windenunterstützte Zufallbringen. Der Rückewagen kann bei eingespielter Kranführung sehr bestandesschonend arbeiten.

Tabelle 57: Beurteilung der Logistikkette „Rückewagen“ für Fichte

Kriterium	Einwertung	Punkte
1 Wirtschaftlichkeit	-	-
1.1 Bereitstellungskosten	10 €	8
1.2 Potentieller Hackguterlös	über 8 €/Srm	5
2 Hackschnitzelqualität	-	-
2.1 Grünanteil	mittel	5
2.2 Erzielbarer Wassergehalt	WG <30 %	10
3 Ergonomie	-	-
3.1 Arbeitsschwere	eher günstig	8
3.2 Unfallgefährdung	mittel	5
4 Organisationsaufwand	-	-
4.1 Störungsempfindlichkeit	niedrig	10
4.2 Maschinenverfügbarkeit	günstig	10
4.3 Kombinationsmöglichkeit mit Holzernte	gut	10
5 Pflughigkeit	-	-
5.1 Befahrungsschäden	eher gering	8
5.2 Schäden am verbleibenden Bestand	eher gering	8
6 Nährstoffaustrag	mittel	
7 Energieverbrauch	2,7 Liter je Srm	6
8 Waldschutzaspekt	-	-
8.1 Risiko eines Borkenkäferbefalls	eher niedrig	8
8.2 Aktive Borkenkäferbekämpfung	geeignet	5

6.6.4 Teilmechanisiert – „Zangenschlepper“

Ein Zangenschlepper leistet, wenn das Holz bereits vorgeliefert wurde oder von der Rückegasse aus greifbar liegt, deutlich mehr als ein Seilschlepper. In der Regel steht er nur Forstunternehmern zur Verfügung. Sie setzen ihn meist mit Seilschleppern kombiniert ein, die außer Greifweite liegende Stämme vorliefern.

Maschinenausrüstung

Die Logistikkette „Zangenschlepper“ eignet sich für große Hiebsflächen sowie zur Bereitstellung von Hackschnitzeln im größeren Umfang.

Tabelle 58: Maschinenausrüstung Logistikkette „Zangenschlepper“



Persönliche Schutzausrüstung, Motorsäge, Fällheber, Schlepper mit Funkseilwinde, Zangenschlepper, Schlepper mit Anhängehacker, LKW mit Wechselcontainer

Ablaufabschnitte

Das Hackholz wird in zwei getrennten Arbeitsschritten bereitgestellt. Zunächst rückt ein Zangenschlepper aus der **Zangenzone** (= Rückegasse und angrenzende Bestandesteile innerhalb der Reichweite der Rückezange) das im Zweimannverfahren gefällte Holz.

Erst danach wird auf der Restfläche (**Seilzone**) weitergearbeitet. Hier wird im Seillinienv erfahren gefällt und das Hackholz mittels Seilschlepper an der Rückegasse vorkonzentriert. Zur Waldstraße rückt wiederum der Zangenschlepper.

Nach einer Trockenphase des Hackholzes nimmt ein Anhängehacker die Arbeit auf. Er bläst die Hackschnitzel direkt in Wechselcontainer. Die Hackschnitzel werden mit LKW zum Heizwerk transportiert. Alternativ kann auch ein landwirtschaftliches Gespann den Transport übernehmen. WEIXLER et al. (1999) beschreiben beide Varianten der Logistikkette ausführlich.

Arbeitsort Ablaufabschnitt	Bestand - "Zangenzone"	Rückegasse	Waldstraße	Heisanlage
Fällen, Aufarbeiten				
Rücken				
	Bestand "Seilzone"	Rückegasse	Waldstraße	Heisanlage
Fällen, Aufarbeiten, Vorliefern				
Rücken				
Hacken				
Transport				

Abbildung 50: Ablaufabschnitte Logistikkette „Zangenschlepper“

Leistung und Kosten

Bei der Logistikkette „Zangenschlepper“ liegt als Lohn der Unternehmersatz zugrunde.

Tabelle 59: Leistung und Kosten der Logistikkette "Zangenschlepper"

Logistikkette 4 "Zangenschlepper"	BHD 10		BHD 15		BHD 20	
	Leistung Srm/h	Kosten €/Srm	Leistung Srm/h	Kosten €/Srm	Leistung Srm/h	Kosten €/Srm
Fällen, Vorliefern	8,1	10,0	18,3	4,4	28,5	2,9
Rücken	17,9	3,1	21,9	2,5	26,0	2,1
Hacken	20,8	4,1	20,8	4,1	20,8	4,1
Transport	52,6	1,4	52,6	1,4	52,6	1,4
Gesamt	4,1	18,6	6,0	12,5	7,1	10,5

Beurteilung

Für die Seilzone wirkt sich das Zweimann-Seillinienverfahren positiv aus

(Windunterstützung, geringere Unfallgefährdung, Möglichkeit der Jobrotation).

Ergonomisch nachteilig macht sich das Ausziehen des Seils über das in der Zangenzone

liegende Reisig hinweg bemerkbar. Das Rücken mit dem Zangenschlepper ist als

ergonomisch eher günstig zu beurteilen, da die Kabine zur Lastbildung und zum Poltern nicht

verlassen werden muss. Allerdings sollte der Fahrer die rein sitzende Tätigkeit gelegentlich unterbrechen um seine Bandscheiben zu entlasten.

Der hohe Mechanisierungsgrad und die Aufteilung des Bestandes in Zangen- und Seilzone bedingen erhöhte Anforderungen an die Arbeitsorganisation. Die Einsätze von Seil- und Zangenschlepper müssen aufeinander abgestimmt werden.

Wenn in der Seilzone windenunterstützt gefällt wird, kann die Fällordnung exakt eingehalten werden. Die verbleibenden Stämme werden allenfalls in geringem Umfang beschädigt. Beim Festlegen der Seillinien muss auf den verbleibenden Bestand in der Zangenzone besonders geachtet werden, da hier die Entnahmebäume bereits geerntet sind. Mit dem Zangenschlepper lassen sich Schäden an Gassen-Randbäumen aufgrund des gut steuerbaren Einschwenkens der Stämme auf die Rückegasse verringern.

Tabelle 60: Beurteilung der Logistikkette „Zangenschlepper“ für Fichte

Kriterium	Einwertung	Punkte
1 Wirtschaftlichkeit	-	-
1.1 Bereitstellungskosten	12,5 €	6
1.2 Potentieller Hackguterlös	über 8 €/Srm	5
2 Hackschnitzelqualität	-	-
2.1 Grünanteil	mittel	5
2.2 Erzielbarer Wassergehalt	WG <30 %	10
3 Ergonomie	-	-
3.1 Arbeitsschwere	eher günstig	8
3.2 Unfallgefährdung	mittel	5
4 Organisationsaufwand	-	-
4.1 Störungsempfindlichkeit	mittel	5
4.2 Maschinenverfügbarkeit	mittel	5
4.3 Kombinationsmöglichkeit mit Holzernte	eher gut	8
5 Pflglichkeit	-	-
5.1 Befahrungsschäden	eher hoch	2
5.2 Schäden am verbleibenden Bestand	mittel	5
6 Nährstoffaustrag	mittel	5
7 Energieverbrauch	2,1 Liter je Srm	9
8 Waldschutzaspekt	-	-
8.1 Risiko eines Borkenkäferbefalls	eher niedrig	8
8.2 Aktive Borkenkäferbekämpfung	geeignet	5

6.6.5 Teilmechanisiert – „Hacken auf der Rückegasse“

Geländegängige Hacker sind kostenintensive Spezialmaschinen. Nur wenige Forstunternehmen halten sie vor.

Maschinenausrüstung

Die Logistikkette „Hacken auf der Rückegasse“ eignet sich allenfalls für große Hiebsflächen.

Tabelle 61: Maschinenausrüstung Logistikkette „Hacken auf der Rückegasse“



Persönliche Schutzausrüstung, Fällheber, Motorsäge, Schlepper mit Funkseilwinde, Aufbauhacker auf Forwarder, LKW mit Wechselcontainer

Ablaufabschnitte

Gefällt und vorgeliefert wird teilmechanisiert im Zweimannverfahren per Motorsäge und Schlepper mit Funkseilwinde (Seillinienverfahren). Ein kranbeschickter Aufbauhacker mit eigenem Hackschnitzel-Bunker arbeitet auf der Rückegasse. Dieses Gespann rückt die Hackschnitzel auch zur Waldstraße. Dort kippt der Maschinenführer den Bunker in auf den Boden abgesetzte Wechselcontainer aus. Ein LKW transportiert die befüllten Wechselcontainer zum Verbraucher.

Arbeitsort	Bestand	Rückegasse	Waldstraße	Heizanlage
Ablaufabschnitt				
Fällen, Aufarbeiten, Vorliefern				
Hacken, Rücken				
Transport				

Abbildung 51: Ablaufabschnitte Logistikkette „Hacken auf der Rückegasse“

Leistung und Kosten

Für die Leistung und Kosten der Logistikkette „Hacken auf der Rückegasse“ (Tabelle 62) gilt der Lohnansatz für Forstunternehmer.

Tabelle 62: Leistung und Kosten der Logistikkette "Hacken auf der Rückegasse"

Logistikkette 5 "Hacken auf der Rückegasse"	BHD 10		BHD 15		BHD 20	
	Leistung	Kosten	Leistung	Kosten	Leistung	Kosten
	Srm/h	€/Srm	Srm/h	€/Srm	Srm/h	€/Srm
Fällen, Vorliefern	8,1	10,0	18,3	4,4	28,5	2,9
Rücken, Hacken	14,6	14,8	25,0	8,6	35,4	6,1
Transport	52,6	1,4	52,6	1,4	52,6	1,4
Gesamt	4,7	26,2	8,8	14,5	12,1	10,4

Beurteilung

Negativ schlägt zu Buche, dass große Mengen Hackschnitzel mit hohen Wassergehalten anfallen. Diese Material nimmt nur eine eingeschränkte Zahl von Heiz(kraft)werken mit niedrigen Anforderungen an die Brennstoffqualität auf.

Den Aufbauhacker auf der engen Rückegasse zu manövrieren und zu beschicken erfordert ständige Aufmerksamkeit und stellt auf Dauer eine hohe mentale Belastung dar. Auch die Vibrationen und die Lärmentwicklung des Hackers sind negativ zu werten.

Das Hacken und Rücken mit dem Aufbauhacker kann losgelöst von der vorangegangenen Bereitstellung des Hackholzes an der Rückegasse stattfinden. Hacken, Rücken und Schütten der Hackschnitzel in passend bereitgestellte Container sind aneinander gekoppelt. Für den Einsatz auf der Rückegasse geeignete Hacker sind Spezialmaschinen und verursachen entsprechend hohe Systemkosten. Der LKW-Transport muss deshalb unbedingt mit der Laufzeit der Hackmaschine abgestimmt sein, um unproduktive Zeiten des Systems zu vermeiden.

Bei sachgerechtem Ablauf der Logistikkette entstehen nur geringe Schäden am verbleibenden Bestand. Allerdings sind dazu ausreichend breite Rückegassen erforderlich. Probleme bereitet aber – insbesondere auf empfindlichen Böden – das hohe Gewicht des Trägerfahrzeugs mit dem Aufbauhacker von 28 t (FELLER und RIEDLBERGER 2001).

Das Hackholz im Bestand zu trocknen ist uneffektiv und zudem aus Waldschutzgründen nicht empfehlenswert.

Tabelle 63: Beurteilung der Logistikkette „Hacken auf der Rückegasse“

Kriterium	Einwertung	Punkte
1 Wirtschaftlichkeit	-	-
1.1 Bereitstellungskosten	14,5 €	4
1.2 Potentieller Hackguterlös	unter 8 €/Srm	0
2 Hackschnitzelqualität	-	-
2.1 Grünanteil	mittel	5
2.2 Erzielbarer Wassergehalt	WG > 40 %	0
3 Ergonomie	-	-
3.1 Arbeitsschwere	mittel	5
3.2 Unfallgefährdung	mittel	5
4 Organisationsaufwand	-	-
4.1 Störungsempfindlichkeit	hoch	0
4.2 Maschinenverfügbarkeit	eher ungünstig	2
4.3 Kombinationsmöglichkeit mit Holzernte	eher schlecht	2
5 Pflughlichkeit	-	-
5.1 Befahrungsschäden	eher hoch	2
5.2 Schäden am verbleibenden Bestand	eher gering	8
6 Nährstoffaustrag	mittel	5
7 Energieverbrauch	3,1 Liter je Srm	4
8 Waldschutzaspekt	-	-
8.1 Risiko eines Borkenkäferbefalls	eher niedrig	8
8.2 Aktive Borkenkäferbekämpfung	geeignet	5

6.6.6 Vollmechanisiert – „Harvester“

Die Holzernte mit dem Harvester kann mittlerweile als ein Standardverfahren in allen Waldbesitzarten und -größen gelten. Technisch und organisatorisch bereitet es keine Probleme, Hackholz als zusätzliches Sortiment auszuhalten.

Maschinenausrüstung

Der hohe Mechanisierungsgrad der Logistikkette führt zu beträchtlichen Systemkosten. Sie sind nur bei entsprechend umfangreichen Hiebsmaßnahmen zu rechtfertigen. Als Richtwert kann ein Mindestanfall von 1.000 Erntefestmetern gelten (FPP 1998).

Tabelle 64: Maschinenausrüstung Logistikkette „Harvester“



Harvester, Forwarder, Hacker auf LKW, LKW mit Wechselcontainer

Ablaufabschnitte

Gefällt, aufgearbeitet und vorgeliefert wird bei dieser Bereitstellungsline vollmechanisiert mit einem Kranharvester. Das Hackholz liegt danach vorkonzentriert an der Rückegasse. Vom Harvestereinsatz entkoppelt rückt ein Forwarder das Hackholz zur Waldstraße und konzentriert es an geeigneter Stelle auf großen Haufen.

.....Arbeitsort	Bestand	Rückegasse	Waldstraße	Heizanlage
Ablaufabschnitt				
Fällen, Aufarbeiten, Vorliefern				
Rücken				
Hacken				
Transport				

Abbildung 52: Ablaufabschnitte Logistikkette „Harvester“

Nach Abschluss des Rückens und einer Trockenphase kann ein Großhacker an der Waldstraße die Arbeit aufnehmen. Ein mit Wechselcontainern ausgestatteter LKW nimmt die Hackschnitzel auf und transportiert sie zum Verbraucher.

Leistung und Kosten

Als Lohnkosten der Logistikkette „Harvester“ in Tabelle 65 gelten diejenigen für Forstunternehmer.

Tabelle 65: Leistung und Kosten der Logistikkette "Harvester"

Logistikkette 6 "Harvester"	BHD 10		BHD 15		BHD 20	
	Leistung Srm/h	Kosten €/Srm	Leistung Srm/h	Kosten €/Srm	Leistung Srm/h	Kosten €/Srm
Fällen, Vorliefern	7,3	17,2	21,3	5,9	35,3	3,5
Rücken	20,6	4,1	26,6	3,2	32,7	2,6
Hacken	22,5	5,1	35,0	3,3	51,8	2,2
Transport	52,6	1,4	52,6	1,4	52,6	1,4
Gesamt	4,0	27,9	7,6	13,8	10,3	9,8

Beurteilung

Arbeitsschwere und Unfallgefährdung der Logistikkette „Harvester“ sind günstig.

Die Logistikkette erlaubt es, die drei Produktionsabschnitte Fällen, Rücken und Hacken zeitlich voneinander loszulösen. Daraus folgt ein ein relativ geringer zusätzlicher Organisationsaufwand. Erst nachdem das Holz ausreichend abgetrocknet ist, wird gehackt. Hacken und Transport benötigen dagegen mehr Abstimmung.

Der Harvestereinsatz erlaubt es fast immer, ein Koppel-Sortiment „Energieholz“ auszuhalten. Gewählt wird Holz, das aus Gründen der Qualität, Dimension oder Baumart nicht in die Hauptsortimente (z. B. Standardlängen oder Papierholz) passt. Dieses Sortiment kann alternativ auch an Unternehmer oder Endverbraucher zur Scheitholzproduktion abgegeben werden.

Die vollmechanisierte Holzernte mit Harvester und Forwarder verursacht im Regelfall die geringsten Schäden am verbleibenden Bestand (PAUSCH 2002). Die Bäume werden gerichtet zu Fall gebracht, gearbeitet wird ausschließlich von der Rückegasse aus. Schäden am verbleibenden Bestand werden so weitgehend vermeiden

Da Harvester üblicherweise alle gefällten Stämme an der Rückegasse konzentrieren, bleibt in der Regel kein Holz im Bestand. Darüber hinaus ist die Logistikkette „Harvester“ prädestiniert, bei Kalamitäten schnell und großflächig aufzuarbeiten.

Tabelle 66: Beurteilung der Logistikkette „Harvester“ für Fichte

Kriterium	Einwertung	Punkte
1 Wirtschaftlichkeit	-	-
1.1 Bereitstellungskosten	13,8 €	4
1.2 Potentieller Hackguterlös	über 12 €/Srm	10
2 Hackschnitzelqualität	-	-
2.1 Grünanteil	gering	10
2.2 Erzielbarer Wassergehalt	WG < 30 %	10
3 Ergonomie	-	-
3.1 Arbeitsschwere	günstig	10
3.2 Unfallgefährdung	niedrig	10
4 Organisationsaufwand	-	-
4.1 Störungsempfindlichkeit	eher niedrig	8
4.2 Maschinenverfügbarkeit	eher günstig	8
4.3 Kombinationsmöglichkeit mit Holzernte	gut	10
5 Pflglichkeit	-	-
5.1 Befahrungsschäden	mittel	5
5.2 Schäden am verbleibenden Bestand	gering	10
6 Nährstoffaustrag	gering	10
7 Energieverbrauch	3,1 Liter je Srm	4
8 Waldschutzaspekt	-	-
8.1 Risiko eines Borkenkäferbefalls	niedrig	10
8.2 Aktive Borkenkäferbekämpfung	geeignet	5

6.6.7 Vollmechanisiert – „Hackschnitzel-Harvester“

Der Hackschnitzel-Harvester ist eine Kombination aus Harvester und Hacker. Er wurde nur in wenigen Exemplaren hergestellt und konnte sich bisher nicht am Markt etablieren.

Maschinenausrüstung

Tabelle 67: Maschinenausrüstung Logistikkette „Hackschnitzel-Harvester“



Hackschnitzel-Harvester mit Bunker, Forwarder mit Transportaufbau für Hackschnitzel (Shuttle), LKW mit Wechselcontainer

Der hohe Mechanisierungsgrad der Logistikkette birgt hohe Systemkosten. Nur bei entsprechend umfangreichen Holzernmaßnahmen ist überhaupt an den Einsatz eines Hackschnitzel-Harvesters zu denken. FELLER et al. (1998) nennen eine Mindestfläche von 30 bis 40 ha.

Ablaufabschnitte

Gefällt, aufgearbeitet und vorgeliefert wird bei dieser Kette vollmechanisiert mit einem Hackschnitzel-Harvester. Dieser hackt das Holz auf der Rückegasse und bläst es in einen aufgesattelten Bunker. Gerückt wird mit einem speziellen Transportfahrzeug (Shuttle). Es nimmt die Hackschnitzel noch auf der Rückegasse vom Hacker-Bunker auf und rückt sie zur Waldstraße. Dort werden die Hackschnitzel in bereitgestellte Container gekippt. LKW transportieren die Wechselcontainer an die Heizanlage.

Arbeitsort	Bestand	Rückegasse	Waldstraße	Heizanlage
Ablaufabschnitt				
Fällen, Aufarbeiten, Vorliefern, Hacken				
Rücken				
Transport				

Abbildung 53: Ablaufabschnitte Logistikkette „Hackschnitzel-Harvester“

Leistung und Kosten

Tabelle 68 berücksichtigt bei den Kosten Löhne zum Unternehmersatz.

Tabelle 68: Leistung und Kosten der Logistikkette „Hackschnitzel-Harvester“

Logistikkette 7 "Hackschnitzel- harvester"	BHD 10		BHD 15		BHD 20	
	Leistung Srm/h	Kosten €/Srm	Leistung Srm/h	Kosten €/Srm	Leistung Srm/h	Kosten €/Srm
Fällen, Hacken	8,5	19,5	20,5	8,0	31,4	5,3
Rücken	20,0	5,0	20,0	5,0	20,0	5,0
Transport	52,6	1,4	52,6	1,4	52,6	1,4
Gesamt	5,3	25,9	8,5	14,5	9,9	11,7

Beurteilung

Zu einer negativen Wertung führt der hohe Wassergehalt des waldfrisch gehackten Holzes. Nur große Heiz(kraft)werke mit in der Regel entsprechend niedrigen Preisen nehmen dieses Material ab.

Die gegenseitige Abhängigkeit von Hackschnitzel-Harvester und Shuttle im Arbeitsablauf stellt hohe Anforderungen an den Organisationsaufwand. Die Harvesterleistung bestimmt die Leistung des Gesamtsystems. Generell und gerade auch bei sinkender Ruckeentfernung muss mit hohen Anteilen an unproduktiven Standzeiten des Shuttles gerechnet werden. Dies verteuert die gesamte Hiebsmaßnahme.

Sowohl der Fahrer des Harvesters als auch der des Shuttles arbeiten in einer klimatisierten, gegen Lärm und Vibrationen gedämmten Sicherheitskabine. Dennoch ist die Belastung des Harvesterfahrers mit Lärm wegen der Nähe zum Hackaggregat vergleichsweise hoch.

Der für diese Logistikkette erforderliche Abstand der Rückegassen von 20 m bedingt eine hohe Befahrungsintensität (bezogen auf die Gesamtfläche). Zudem erzeugt der bereits unbeladen etwa 17 t schwere Hackschnitzel-Harvester einen hohen Bodendruck (FELLER et al. 1998). Eine beim Entasten vor der Maschine entstehende Reisigmatte erhöht die technische Befahrbarkeit der Rückegasse und trägt zum Bodenschutz bei. Deren positive Wirkung wird jedoch eingeschränkt, wenn der Einbau „tragender“ Teile unterbleibt, etwa bei der Nutzung des gesamten Schaftholzes.

Der verbleibende Bestand wird beim Aufarbeiten und Rücken pfleglich behandelt (FELLER et al. 1998). Positiv wirkt sich aus, dass kaum bruttaugliches Material im Bestand verbleibt. Auch zu Hiebsmaßnahmen bei Borkenkäferbefall eignet sich der Hackschnitzel-Harvester, weil er alles befallene Restholz hacken kann.

Tabelle 69: Beurteilung der Logistikkette „Hackschnitzel-Harvester“ für Fichte

Kriterium	Einwertung	Punkte
1 Wirtschaftlichkeit	-	-
1.1 Bereitstellungskosten	14,5 €	4
1.2 Potentieller Hackguterlös	unter 8 €/Srm	0
2 Hackschnitzelqualität	-	-
2.1 Grünanteil	gering	10
2.2 Erzielbarer Wassergehalt	WG > 40 %	0
3 Ergonomie	-	-
3.1 Arbeitsschwere	mittel	5
3.2 Unfallgefährdung	eher niedrig	8
4 Organisationsaufwand	-	-
4.1 Störungsempfindlichkeit	hoch	0
4.2 Maschinenverfügbarkeit	ungünstig	0
4.3 Kombinationsmöglichkeit mit Holzernte	mittel	5
5 Pflughaltung	-	-
5.1 Befahrungsschäden	hoch	0
5.2 Schäden am verbleibenden Bestand	eher gering	2
6 Nährstoffaustrag	gering	10
7 Energieverbrauch	3,4 Liter je Srm	3
8 Waldschutzaspekt	-	-
8.1 Risiko eines Borkenkäferbefalls	niedrig	10
8.2 Aktive Borkenkäferbekämpfung	geeignet	5

6.6.8 Vollmechanisiert – „Mehrfachfällkopf“

Der Mehrfachfällkopf ist ein Harvesteraggregat speziell für schwächere Stämme. Er wird bisher in der forstlichen Praxis in Deutschland nur versuchsweise eingesetzt.

Maschinenausrüstung

Der hohe Mechanisierungsgrad der Logistikkette erfordert entsprechende Hiebsflächen.

Tabelle 70: Maschinenausrüstung Logistikkette „Mehrfachfällkopf“



Harvester mit Mehrfachfällkopf, Forwarder, Großhacker, LKW mit Wechselcontainer

Ablaufabschnitte

Ein Harvester mit Mehrfachfällkopf greift von der Rückegasse aus in den Bestand. Entlang einer Kranlinie trennt er Vollbäume ab und sammelt sie mit seinem Aggregat.

Arbeitsort	Bestand	Rückegasse	Waldstraße	Heizanlage
Ablaufabschnitt				
Fällen, Vorliefern,				
Rücken				
Hacken				
Transport				

Abbildung 54: Ablaufabschnitte Logistikkette „Mehrfachfällkopf“

Wenn der Sammelkopf voll ist oder alle Entnahmebäume entlang der Kranlinie geerntet sind, legt er die Stämme konzentriert an der Rückegasse ab. Anschließend rückt ein Forwarder die Vollbäume zur Waldstraße. Dort kann das Hackholz abtrocknen. An das Hacken mit einem Großhacker schließt sich unmittelbar der Ferntransport mit Container-LKW an.

Leistung und Kosten

Die Kosten in Tabelle 71 beruhen auf Lohnsätzen für Forstunternehmer.

Tabelle 71: Leistung und Kosten der Logistikkette "Mehrfachfällkopf"

Logistikkette 8 "Mehrfachfällkopf"	BHD 10		BHD 15		BHD 20	
	Leistung Srm/h	Kosten €/Srm	Leistung Srm/h	Kosten €/Srm	Leistung Srm/h	Kosten €/Srm
Fällen, Vorliefern	7,6	15,8	16,8	7,1	26,0	4,6
Rücken	20,6	4,1	26,6	3,2	32,7	2,6
Hacken	22,5	5,1	35,0	3,3	51,8	2,2
Transport	52,6	1,4	52,6	1,4	52,6	1,4
Gesamt	4,1	26,5	6,9	15,0	9,3	10,9

Beurteilung

Die Logistikkette „Mehrfachfällkopf“ ist ergonomisch günstig zu werten.

Die drei Produktionsabschnitte Fällen, Rücken und Hacken laufen zeitlich voneinander losgelöst ab. Dies erlaubt einen relativ geringen Organisationsaufwand. Der Mehrfachfällkopf eignet sich allerdings insbesondere in dicht stehenden Beständen nur bedingt zur Durchforstung. Erheblich produktiver arbeitet er bei der Ernte von Kurzumtriebswäldern. Sie bieten bei geeigneter, schwacher Baumdimension einen hohen Massenanteil je Flächeneinheit. Zudem ermöglichen sie aufgrund der Kahlhiebssituation ein einfaches Zufallbringen der gesammelten Stämmchen.

Nachteile bringt die schlechte Kombinationsfähigkeit zur „konventionellen Rundholzernte“ mit sich. Es ist nicht möglich, höherwertiges Stammholz auszuhalten, da der Mehrfachfällkopf das Hackholz weder entasten noch zopfen kann. Damit nähert sich aber auch die Biomasseentnahme bzw. der Nährstoffaustrag dem theoretischen Höchstwert einer kompletten Vollbaumnutzung an. Mit dem Mehrfachfällkopf sollte daher – wenn überhaupt – nur auf Böden mit guter Nährstoffversorgung geerntet werden.

Tabelle 72: Beurteilung der Logistikkette „Mehrfachfällkopf“ für Fichte

Kriterium	Einwertung	Punkte
1 Wirtschaftlichkeit	-	-
1.1 Bereitstellungskosten	15 €	3
1.2 Potentieller Hackguterlös	unter 8 €/Srm	0
2 Hackschnitzelqualität	-	-
2.1 Grünanteil	hoch	0
2.2 Erzielbarer Wassergehalt	WG > 40 %	0
3 Ergonomie	-	-
3.1 Arbeitsschwere	eher niedrig	8
3.2 Unfallgefährdung	eher niedrig	8
4 Organisationsaufwand	-	-
4.1 Störungsempfindlichkeit	mittel	5
4.2 Maschinenverfügbarkeit	ungünstig	0
4.3 Kombinationsmöglichkeit mit Holzernte	schlecht	0
5 Pflughlichkeit	-	-
5.1 Befahrungsschäden	eher gering	8
5.2 Schäden am verbleibenden Bestand	mittel	5
6 Nährstoffaustrag	hoch	0
7 Energieverbrauch	3,2 Liter je Srm	4
8 Waldschutzaspekt	-	-
8.1 Risiko eines Borkenkäferbefalls	niedrig	10
8.2 Aktive Borkenkäferbekämpfung	geeignet	5

6.6.9 Vollmechanisiert – „Kronenholz – Rückewagen“

Diese Logistikkette erfuhr in den letzten Jahren eine enorme Verbreitung. Waldbesitzer entziehen damit nach Erntemaßnahmen in Fichtenbeständen Borkenkäfern den potentiellen Brutraum. Der Gefahr von Massenvermehrungen wird vorgebeugt.

Maschinenausrüstung

Die Logistikkette „Kronenholz – Rückewagen“ eignet sich sowohl für kleine als auch für große Hiebsflächen. Auf größeren Hiebsflächen können anstelle der Kombination Schlepper und Rückewagen auch Forwarder die Kronen rücken.

Tabelle 73: Maschinenausrüstung Logistikkette „Kronenholz – Rückewagen“



Rückewagen, Großhacker, LKW mit Wechselcontainer

Ablaufabschnitte

Nach dem Rücken des Stammholzes werden die Kronen mit einem Rückewagen aufgesammelt. Insbesondere wenn Kurzholz gerückt wird, ist es von Vorteil, einen Teil der Kronen schon mit dem Stammholz zur Waldstraße zu rücken. Hier trocknen sie noch etwas ab und können – noch nicht befallen – auch als „Fangbäume“ fungieren.

Arbeitsort Ablaufabschnitt	Bestand	Rückegasse	Waldstraße	Heizanlage
Rücken				
Hacken				
Transport				

Abbildung 55: Ablaufabschnitte der Logistikkette „Kronenholz – Rückewagen“

Spätestens wenn Borkenkäfer auszufliegen drohen, muss aber gehackt werden. Alternativ kann man die Kronen in ausreichender, etwa 500 m weiter Entfernung außerhalb des Waldes lagern und den Ausflug der Käfer in Kauf nehmen.

An das Hacken schließt sich unmittelbar der Transport der Hackschnitzel zur Heizanlage an.

Leistung und Kosten

Tabelle 74 zeigt die Leistung und Kosten der Logistikkette „Kronenholz – Rückewagen“ in Abhängigkeit vom Durchmesser des Kronenfußes. Für die Kalkulation der Kosten wurde der Lohnansatz für Forstunternehmer herangezogen.

Tabelle 74: Leistung und Kosten der Logistikkette "Kronenholz – Rückewagen"

Logistikkette 9 "Kronenholz - Rückewagen"	Kronenfuß 10		Kronenfuß 15		Kronenfuß 20	
	Leistung Srm/h	Kosten €/Srm	Leistung Srm/h	Kosten €/Srm	Leistung Srm/h	Kosten €/Srm
Rücken	7,8	10,3	16,4	4,9	25,1	3,2
Hacken	35,0	3,3	35,0	3,3	35,0	3,3
Transport	52,6	1,4	52,6	1,4	52,6	1,4
Gesamt	5,7	15,0	9,2	9,6	11,4	7,9

Beurteilung

Je höher der Wassergehalt und der Grünanteil der Kronen liegen, eine desto niedrigere Anforderung sollte das abnehmende Heizwerk an die Brennstoffqualität stellen. Da das Material aufgrund des erhöhten Grünanteils grundsätzlich schlecht zu lagern ist, sind ganzjährig betriebene Heizkraftwerke mit hohem Mengenbedarf und schnellem Durchsatz die idealen Abnehmer für Hackschnitzel aus Kronen.

Die Logistikkette „Kronenholz – Rückewagen“ kann als ergonomisch günstig gelten.

Insbesondere in fichtenreichen Revieren bietet sich diese Logistikkette nachgelagert zur Rundholzernte an. Zum einen leistet sie eine wirksame Vorsorge gegen den Borkenkäferbefall, zum anderen kann die häufig defizitäre Aufarbeitung stark astiger Kronen unterbleiben. Außerdem kann es erforderlich sein, die Hiebsfläche von den Kronen der geernteten Bäume zu befreien, um wertvoller Vorauszverjüngung zu sichern oder Kunstverjüngung einzubringen.

Auch bei laufenden Borkenkäferkalamitäten bietet sich diese Logistikkette an.

Borkenkäfernester können schneller aufgearbeitet werden, wenn auf das zeitaufwändige Aufarbeiten von Kronen verzichtet wird. Wertvolle Arbeitskapazität bleibt verfügbar. Zudem

wurde das Holz häufig schon durch Verfärbung entwertet und lässt nur niedrige Holzerlöse erwarten.

Tabelle 75: Beurteilung der Logistikkette „Kronenholz – Rückewagen“

Kriterium	Einwertung	Punkte
1 Wirtschaftlichkeit	-	-
1.1 Bereitstellungskosten	9,6 €	8
1.2 Potentieller Hackguterlös	unter 8 €/Srm	0
2 Hackschnitzelqualität	-	-
2.1 Grünanteil	hoch	0
2.2 Erzielbarer Wassergehalt	WG > 40 %	0
3 Ergonomie	-	-
3.1 Arbeitsschwere	eher niedrig	8
3.2 Unfallgefährdung	eher niedrig	8
4 Organisationsaufwand	-	-
4.1 Störungsempfindlichkeit	eher niedrig	8
4.2 Maschinenverfügbarkeit	günstig	10
4.3 Kombinationsmöglichkeit mit Holzernte	gut	10
5 Pfleglichkeit	-	-
5.1 Befahrungsschäden	eher gering	8
5.2 Schäden am verbleibenden Bestand	eher gering	8
6 Nährstoffaustrag	eher hoch	2
7 Energieverbrauch	2,7 Liter je Srm	6
8 Waldschutzaspekt	-	-
8.1 Risiko eines Borkenkäferbefalls	eher niedrig	8
8.2 Aktive Borkenkäferbekämpfung	gut geeignet	10

6.6.10 Vollmechanisiert – „Kronenholz – Bündler“

Bündelmaschinen sind bisher fast ausschließlich in Skandinavien im Einsatz. Die Produzenten versuchen aber, die Maschinen auch in Mitteleuropa zu etablieren.

Maschinenausrüstung

Der Holzanfall muss den Einsatz von Forwarder und Bündelaggregat rechtfertigen.

Tabelle 76: Maschinenausrüstung Logistikkette „Kronenholz – Bündler“



Forwarder, Bündelaggregat auf LKW, Hacker, LKW mit Wechselcontainer

Ablaufabschnitte

Zunächst sammelt ein Forwarder die Kronen von der Rückegasse aus auf und konzentriert sie an der Waldstraße. Dort nimmt der Bündler seine Arbeit auf. Die fertigen Bündel legt der Maschinenführer auf Polter. Ein Hacker mit entsprechend großer Einzugsöffnung hackt und befüllt Container, die ein LKW zum Werk transportiert.

Arbeitsort Ablaufabschnitt	Bestand	Rückegasse	Waldstraße	Heizanlage
Rücken				
Bündeln				
Hacken				
Transport				

Abbildung 56: Ablaufabschnitte Logistikkette „Kronenholz – Bündler“

Die Variante, mit dem Bündler auf der Rückegasse zu arbeiten, erscheint unter den mitteleuropäischen Verhältnissen nicht sinnvoll, da Kronen und sonstiger Schlagabraum in deutlich niedrigerer Konzentration als unter skandinavischen Bedingungen anfallen. Weiter

ist es denkbar, die Bündel mit Kurzholz-LKW an Heizwerke oder zentrale Lagerplätze zu fahren. Dies wäre aber mit einem erheblichen Risiko verbunden, denn es lässt sich kaum verhindern, dass sich während der Fahrt Holzstücke aus den Bündeln lösen und eventuell folgende Verkehrsteilnehmer erheblich gefährden.

Leistung und Kosten

Für die Logistikkette gelten die Lohnkosten für Forstunternehmer.

Tabelle 77: Leistung und Kosten der Logistikkette „Kronenholz – Bündler“

Logistikkette 10 "Kronenholz - Bündler"	Kronenfuß 10		Kronenfuß 15		Kronenfuß 20	
	Leistung Srm/h	Kosten €/Srm	Leistung Srm/h	Kosten €/Srm	Leistung Srm/h	Kosten €/Srm
Rücken	13,8	6,2	29,2	2,9	44,7	1,9
Bündeln	20,0	10,3	20,0	10,3	20,0	10,3
Hacken	35,0	3,3	35,0	3,3	35,0	3,3
Transport	52,6	1,4	52,6	1,4	52,6	1,4
Gesamt	5,9	21,1	7,6	17,9	8,3	16,9

Beurteilung

Die Hackschnitzel weisen einen hohen Grünanteil auf und sind daher nur beschränkt lagerfähig. Der Wassergehalt lässt sich aber senken, wenn die Bündel vor dem Hacken gelagert werden.

Ergonomisch ist die Logistikkette günstig. Die Belastung mit Lärm und Vibrationen beim Bündeln wirkt sich weniger belastend aus als beim Hacken (WITTKOPF 2004).

Die Logistikkette reagiert nicht empfindlich auf Störungen, da entkoppelt von den anderen Teilarbeiten gebündelt wird. Daher lässt sich das Bündeln auch gut in die konventionelle Holzernte zu integrieren. Dass die Bündelmaschine das Hackholz bereits optimal für den Hacker konzentriert, schlägt positiv zu Buche. Die Produktivität beim Hacken steigt.

Als eher unwahrscheinlich schätzen Experten die Hoffnung ein, dass die Bündel beim Lagern vom Befall durch Borkenkäfer grundsätzlich verschont bleiben. Deshalb müssen die Bündel in ausreichender Entfernung etwa 500 m außerhalb des Waldes gelagert werden oder rechtzeitig vor einem eventuellen Ausflug gehackt werden.

Grundsätzlich eignet sich die Logistikkette zur Kronennutzung, sowohl um das Risiko eines Borkenkäferbefalls zu minimieren als auch um zur Borkenkäferbekämpfung bei laufenden Kalamitäten beizutragen.

Tabelle 78: Beurteilung der Logistikkette „Kronenholz – Bündler“

Kriterium	Einwertung	Punkte
1 Wirtschaftlichkeit	-	-
1.1 Bereitstellungskosten	17,9 €	0
1.2 Potentieller Hackguterlös	unter 8 €/Srm	0
2 Hackschnitzelqualität	-	-
2.1 Grünanteil	hoch	0
2.2 Erzielbarer Wassergehalt	WG > 40 %	0
3 Ergonomie	-	-
3.1 Arbeitsschwere	eher niedrig	8
3.2 Unfallgefährdung	eher niedrig	8
4 Organisationsaufwand	-	-
4.1 Störungsempfindlichkeit	eher niedrig	8
4.2 Maschinenverfügbarkeit	ungünstig	2
4.3 Kombinationsmöglichkeit mit Holzernte	gut	10
5 Pflughlichkeit	-	-
5.1 Befahrungsschäden	eher gering	8
5.2 Schäden am verbleibenden Bestand	eher gering	8
6 Nährstoffaustrag	eher hoch	2
7 Energieverbrauch	3,1 Liter je Srm	4
8 Waldschutzaspekt	-	-
8.1 Risiko eines Borkenkäferbefalls	eher niedrig	8
8.2 Aktive Borkenkäferbekämpfung	geeignet	5

6.7 Vergleich der ausgewählten Logistikketten

In der Folge werden die zehn ausgewählten Logistikketten nach Leistung und Kosten sowie nach ihrem Energieverbrauch verglichen.

6.7.1 Leistung und Kosten

Die **Bereitstellungskosten** für Waldhackschnitzel frei Heizwerk bei den Logistikketten für Schwachholz im BHD-Bereich von 15 cm liegen zwischen 9,6 € („Rückewagen“) und 15 € („Mehrfachfällkopf“). Das Mittel liegt bei 13,6 €/Srm. Die Kosten für Hackschnitzel aus Kronenholz lagen bei 9,6 € („Kronenholz – Rückewagen“), im Sonderfall des Bündlers bei 17,9 €, jeweils bezogen auf Kronen mit einem unteren Durchmesser von 15 cm (Tabelle 79).

Tabelle 79: Kenndaten der ausgewählten Logistikketten für BHD 15 cm

Logistikkette	Kosten/Srm System- System-Lohnkosten-			
		leistung	kosten	anteil
Nr. Bezeichnung	[€/Srm]	[Srm/h]	[€/h]	[%]
1 "Kleinprivatwald"	14,5	1,5	22	45
2 "Seilschlepper"	14,2	2,6	36	28
3 "Rückewagen"	10,0	6,2	62	28
4 "Zangenschlepper"	12,5	6,0	75	44
5 "Aufbauhacker"	14,5	8,8	127	29
6 "Harvester"	13,8	7,6	104	33
7 "Hackschnitzel-Harvester"	14,5	8,5	123	20
8 "Mehrfachfällkopf"	15,0	6,9	104	34
9 "Kronenholz - Rückewagen"	9,6	9,2	88	28
10 "Kronenholz - Bündler"	17,9	7,6	136	18

Als **Systemleistung** wird der Quotient aus der gesamten Produktionsmenge und der Summe der produktiven Stunden aller Teilarbeiten bezeichnet. Die Systemleistung der Logistikketten schwankt von 1,5 („Kleinprivatwald“) bis 9,2 („Kronenholz - Rückewagen“), dem sechsfachen Wert.

Die **Systemkosten**, gebildet aus dem Quotienten von Gesamtkosten und angefallenen Arbeitsstunden innerhalb der Logistikketten, bewegen sich zwischen 22 und dem sechsfachen Wert 136 €/h. Entsprechend breit ist das Anforderungsprofil an die Größe der Einsatzflächen und die Qualität der Arbeitsorganisation. Teilweise lassen sich aber auch bei gründlicher Organisation Standzeiten nicht vermeiden, so dass der Einsatz von Logistikketten mit hohen Systemkosten auch erhebliche finanzielle Risiken birgt.

Forstbetriebe und Unternehmer sollten grundsätzlich abwägen, ob im Zweifel nicht ein niedriger mechanisiertes Verfahren vorzuziehen ist.

Entsprechend den Systemkosten bewegt sich in etwa der **Lohnkostenanteil**. Während im "Kleinprivatwald" die Lohnkosten fast noch die Hälfte der Kosten ausmachen, sinkt der Anteil beim Hackschnitzel-Harvester und der Bündelmaschine auf 20 bzw. 18 % ab.

6.7.2 Energieverbrauch

Der **Verbrauch an Dieseläquivalent** schwankt von 2,7 bis 4,0 Litern je Schüttraummeter frei Heizwerk. Im Mittel liegt er bei 3 Litern. Die vollmechanisierten Verfahren verbrauchen in der Tendenz eher weniger Energie je Produktionseinheit als die teilmechanisierten. Der grundsätzlich höhere Treibstoffbedarf je Zeiteinheit wird also durch höhere Leistungen überkompensiert. Der Energieverbrauch bei der Logistikkette „Seilschlepper“ liegt auffällig hoch. Verursacht wird er von der geringen Lastbildungsmöglichkeit beim Vorliefern und Rücken von Hackholz.

Tabelle 80: Kraftstoffverbrauch, Energieaufwand und CO₂-Emission je Schüttraummeter Hackschnitzel der ausgewählten Logistikketten

Verfahren	Verbrauch	Energie- Aufwand	Emission
Nr. Bezeichnung	Liter je Srm	kWh je Srm	kg CO ₂ /Srm
1 "Kleinprivatwald"	3,4	33,8	9,1
2 "Seilschlepper"	4,0	39,8	10,7
3 "Rückewagen"	2,7	27,2	7,3
4 "Zangenschlepper"	2,1	21,4	5,8
5 "Aufbauhacker"	3,1	30,6	8,3
6 "Harvester"	3,1	30,6	8,3
7 "Hackschnitzelharvester"	3,4	33,6	9,1
8 "Mehrfachfällkopf"	3,2	31,9	8,6
9 "Kronenholz - Rückewagen"	2,7	27,1	7,3
10 "Kronenholz - Bündler"	3,1	30,8	8,3

Der **Energieaufwand je Srm** Hackschnitzel frei Heizwerk schwankt demnach von 21,4 bis 39,8 kWh, im Mittel beträgt er etwa 30 kWh. Bezogen auf den Energieinhalt entspricht dies zwischen 3 % bei Buche und Eiche, den Baumarten mit höherer Dichte, und etwa 4 % bei Fichte oder Pappel.

Aus dem Treibstoffverbrauch wird die **Emission** von Kohlendioxid abgeleitet. Sie erreicht über alle Logistikketten hinweg einen Wert von etwa 8 kg/Srm. Mit Inkaufnahme einer solchen Emission beispielsweise bei der Bereitstellung von einem Srm Hackschnitzel aus

Fichte für ein Heizwerk unterbleibt, bei der Substitution von Heizöl, etwa das 23fache an Emissionen, bei Ergas das 17fache⁴⁸. Noch nicht berücksichtigt sind dabei die Emissionen, die bei Gewinnung und Transport von Heizöl und Erdgas entstehen.

6.8 Entscheidungsfindung zur Auswahl einer Logistikkette

Sowohl für die grundsätzliche Entscheidung eines Forstbetriebs, Hackschnitzel bereitzustellen, müssen verschiedene Aspekte untereinander abgewogen werden, als auch für die in der Folge anstehenden Entscheidungen in welchen Beständen welche Sortimente mit welcher Logistikketten gewonnen werden sollen.

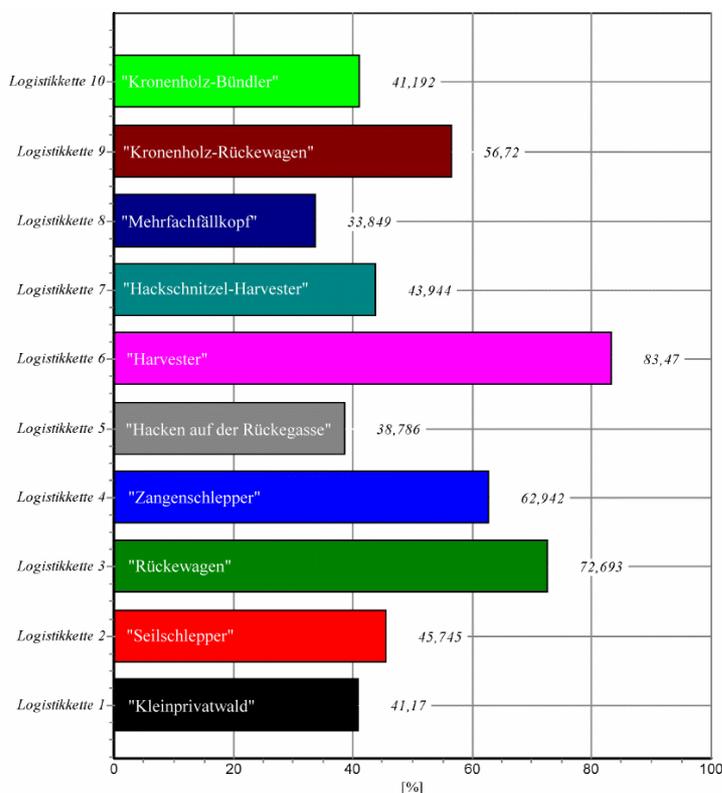


Abbildung 57: Diagramm der Nutzwerte der betrachteten Logistikketten (erstellt mit CELSIEVAL)

Abbildung 57 zeigt die Nutzwerte der Logistikketten, die im Rahmen dieser Arbeit betrachtet wurden. Der Ermittlung liegt das unter Kapitel 5.9 beschriebene Schema zugrunde. Den höchsten Nutzwert für den Musterbetrieb weist demnach die Logistikkette sechs, „Harvester“, mit über 80 % auf. Es folgen die Logistikketten drei und vier. Innerhalb

⁴⁸ Der Berechnung liegen zugrunde ein Energieinhalt der Hackschnitzel von 750 kWh/Srm (Fichte), CO₂-Emissionen von 2,7 kg/l und 2,0 kg/m³ für Heizöl bzw. Erdgas sowie Jahresnutzungsgrade bei der Verbrennung von 80 % für Hackschnitzel bzw. 90 % für Heizöl und Erdgas.

der Logistikketten neun und zehn für Kronenholz weist die Variante „Rückewagen“ einen höheren Nutzwert auf als „Bündler“.

Abschließend folgt als Gesamtübersicht ein Stärken-Schwächen-Profil der betrachteten Logistikketten. Alle Angaben gelten selbstverständlich nur unter den genannten Annahmen zu Ausgangslage und betrieblicher Zielsetzung. Eine Übertragung auf andere Konstellationen ist nicht ohne weiteres möglich.

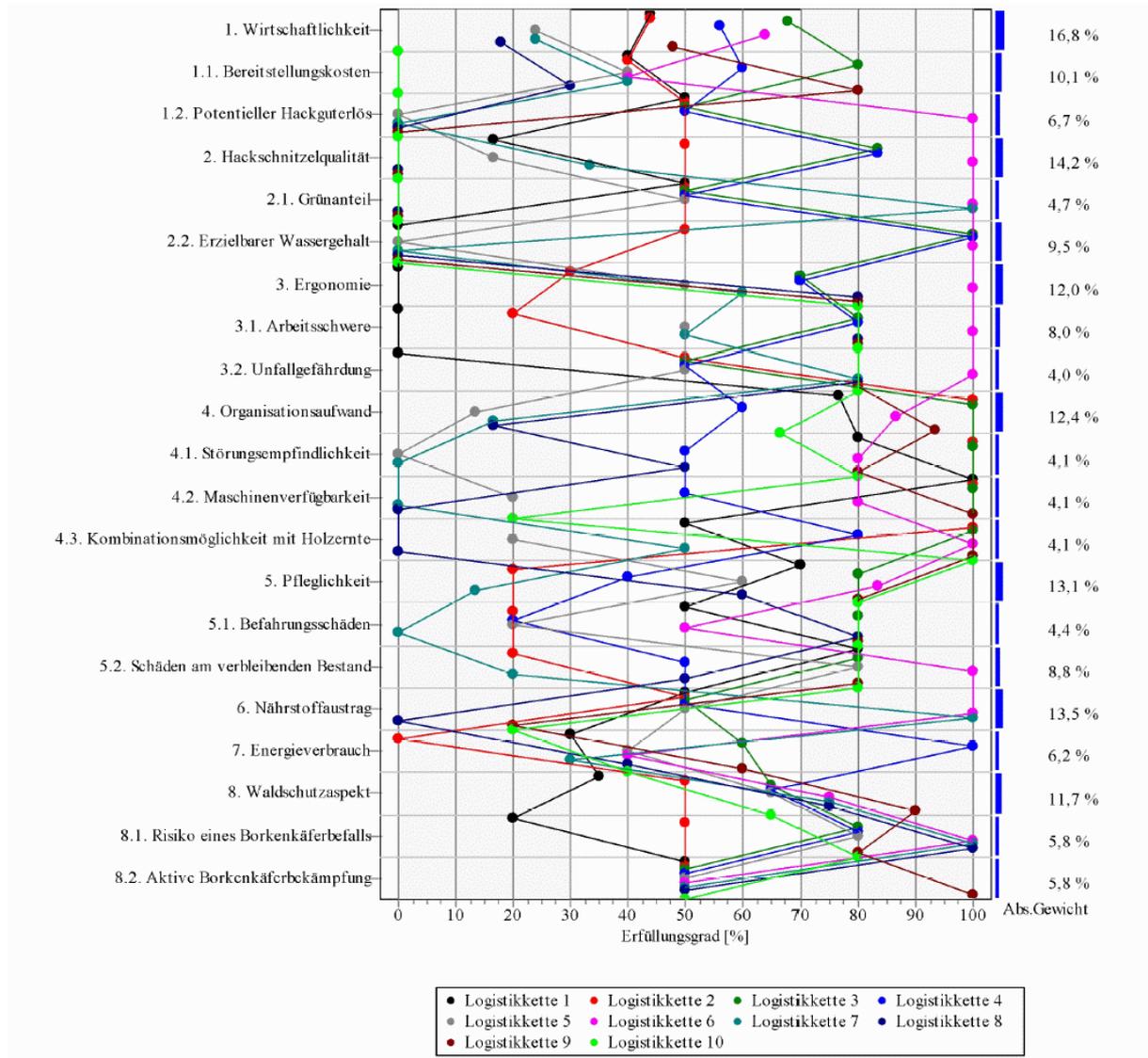


Abbildung 58: Stärken-Schwächen-Profil der betrachteten Logistikketten (erstellt mit CELSIEVAL)

7 Diskussion

Die Diskussion greift zunächst die methodischen Ansätze der Arbeit auf und orientiert sich dann übergreifend am „Dreiklang“ aus Technologie, Ökologie und Sozioökonomie (vgl. MOSANDL und FELBERMEIER 2003). Abschließend wird die Nutzwertanalyse diskutiert.

7.1 Methoden

Die **Schriftliche Befragung der Heizwerke** stützt sich auf ein hohes Rücklaufprozent von 52. Dennoch ist eine Hochrechnung auf ganz Bayern problematisch. Insbesondere die stromproduzierenden Heizkraftwerke verbrauchen sehr viel Energieholz. Entsprechend können ihre Angaben die Durchschnittswerte, wenn nach Mengen gewichtet wird, stark beeinflussen. Um genauere Aussagen für bestimmte zu beliefernde Heizwerksgrößen zu ermöglichen, wurden Größenkategorien bei der Auswertung gebildet. An der Hackschnitzellieferung interessierte Forstbetriebe ordnen ihre potentiellen Abnehmer über die Klassen zu und leiten so Preisrahmen aus den Ergebnissen dieser Arbeit ab.

Bei den Grundlagen und dem **Modell** zur Berechnung der **Biomasseentnahme und des Nährstoffaustrags** wurde mit Durchschnittswerten bei den Nährelementgehalten gerechnet. Nicht berücksichtigt ist, dass die Konzentration der Nährelemente in den Baumteilen auch vom Alter abhängig ansteigen oder abfallen kann. JACOBSEN et al. (2002, S. 22 und 48) geben beispielsweise für Fichte und Kiefer eine mit dem Alter abnehmende Konzentration von P, Ca und Mg im Kompartiment Derbholz an. Bei der Buche dagegen steigt dort der Gehalt an P mit dem Alter an. Allerdings konnten für die verschiedenen Baumarten nur lückenhaft Beziehungen hergeleitet werden. Zudem liegen die Bestimmtheitsmaße generell niedrig. Von einer Übernahme der vorhandenen Regressionen zum Bestandesalter wurde deshalb in der vorliegenden Arbeit abgesehen.

Beim Herleiten der **Biomasseentnahme** stützen sich die Aussagen nur auf eine Studie. Hierbei wurden Praxismessungen mit pauschalen Aufteilungen der Baumkompartimente nach JACOBSEN et al. (2002) ergänzt, die nicht unbedingt auf die tatsächlichen Verhältnisse passen. DIETRICH et al. (2002) kamen aber auf vergleichbarem Standort (Waldklimastation Ebersberg) zu einer vergleichbaren Aufteilung der Kompartimente.

Alle **Umrechnungen** von Festmaß auf Schüttvolumen erfolgten mit dem Faktor 2,5. Es ist aber nicht erwiesen, ob dieser Faktor konstant bleibt, wenn – wie bei den Hackschnitzeln aus Kronenholz – ein hoher Anteil an Feinmaterial enthalten ist. Plausibel ist aber die Annahme,

dass sich die Möglichkeit der engeren Einlagerung einzelner Nadeln und die geringere Lagerdichte kleinerer, noch benadelter Zweige ausgleichen. Ein Indiz dafür sind die ähnlichen Schüttdichten, die, egal ob nadelreiches oder -armes Material gehackt wurde, bei der Fichte zwischen 150 und 200 kg Trockenmasse je Srm liegen (vgl. Kapitel 4.1.2).

Auch die Kalkulation des **Nährstoffaustrags** stützt sich auf Auswertungen von JACOBSEN et al. (2002). Die Durchschnittswerte kommen den von DIETRICH et al. (2002) ermittelten nahe.

Es ist kritisch, verschiedene Ergebnisse von **Arbeitsstudien** zu verallgemeinern, miteinander zu vergleichen und zur Modellbildung miteinander zu kombinieren. Insbesondere dann, wenn verschiedene Methoden bei der Erhebung von Bezugsmengen angewandt wurden. Hinterfragt werden muss auch, inwieweit die Ergebnisse von Arbeitsstudien tatsächlich die in der Praxis erzielbaren Leistungswerte widerspiegeln. Beispielsweise weist PAUSCH (2002) deutlich niedrigere Leistungen für Harvester aus als die in dieser Arbeit angenommenen. Seine 20 bis 30 % niedrigeren Zahlen stammen nicht aus Arbeitsstudien, sondern sind das Ergebnis einer umfangreichen Auswertung von Leistungsaufschrieben von Forstunternehmern.

Gerade bei älteren Arbeitsstudien aus der Literatur war teilweise bei den **Leistungsangaben** nicht klar, wie die Aufteilung auf reine oder gesamte Arbeitszeit durchgeführt wurde. Dennoch führt die vorgenommene Kombination von Leistungszahlen aus verschiedenen Quellen zu Aussagen, die sich als **Anhaltswerte** eignen. Punktgenaue Vorhersagen zu geplanten Hiebsmaßnahmen sind mit den einfachen Berechnungen aber nicht möglich. Zahlreiche Einflussgrößen wie Rückeentfernung, Erschließungssituation oder Bestockungsgrad wurden nicht berücksichtigt. Ebenso wurde der technische Fortschritt nicht ausgeglichen, wenn Ergebnisse älterer Arbeitsstudien aus der Literatur aufgegriffen wurden.

Der Kraftstoffverbrauch und daraus hergeleitet der **Energieverbrauch** kann ebenfalls nur als grobe Abschätzung dienen. Alle Verbrauchswerte beruhen auf Literaturangaben, und selbst innerhalb dieser Literaturstudien wurden die Zahlen zumeist für die Stammholzernte erhoben und mussten erst auf Schüttraummeter Hackschnitzel umgerechnet werden. Dennoch ist die Größenordnung insgesamt verlässlich, da nicht auf Einzelergebnisse aus der Literatur zurückgegriffen wurde, sondern auf Angaben, die wiederum aus einer Vielzahl von Arbeitsstudien hergeleitet wurden oder sich bereits in der Praxis als Faustzahlen etabliert haben, wie der Dieserverbrauch je Schüttraummeter Hackschnitzel.

Grundsätzlich ist bei der **Modellierung** der Logistikketten zu beachten, dass es sich um abstrahierte Modelle handelt. Die spezifische Personal- und Maschinenkostenstruktur einzelner Unternehmen kann erheblich abweichen. Bei den Personalkosten reicht die Spanne vom ungelerten Arbeiter aus einem „Billiglohnland“ bis hin zu betriebseigenen, qualifizierten und langjährig beschäftigten Fachpersonal. Maschinenkosten variieren in Abhängigkeit von der jeweiligen Auslastung. Insbesondere bei den höher mechanisierten Verfahren wirken sich unterschiedliche Maschinenkosten stärker auf die Gesamtkosten aus als die Personalkosten.

7.2 Technologie

7.2.1 Auswahl der Logistikketten

Die ausgewählten Logistikketten decken ein weites Spektrum in den Bereichen Mechanisierungsgrad und Organisationsaufwand ab. Sie erlauben den Einsatz betriebseigener Arbeiter bis hin zur Varianten mit vollmechanisierter Energieholzbereitstellung durch spezialisierte Unternehmen.

Nach wie vor wird mit etwa 96 % die weit überwiegende Menge an Hackschnitzel mit teilmechanisierten Verfahren bereitgestellt (HARTIG 2001). Dies liegt daran, dass gerade im kleineren Privat- und Kommunalwald überproportional häufig Hackschnitzel produziert werden. Die Erfahrung aus der Gewinnung für die eigene Hackschnitzelheizung erleichtert häufig die Entscheidung, wenn es darum geht, die Belieferung neu entstehender Heizwerke zu übernehmen.

Sorgfältige Einsatzplanung ist unverzichtbar, um kostengünstig Hackschnitzel bereitzustellen. Auch eine besitzübergreifende Planung bis hin zu einem regional abgestimmten Konzept mit Sammelpätzen und Terminabsprachen beim Hacken und Transportieren erscheint erstrebenswert.

7.2.2 Einfluss des Mechanisierungsgrades

Im Vergleich zur vollmechanisierten Holzernte stellt sich die motormanuelle Arbeit bei der Hackholzbereitstellung konkurrenzfähiger dar als bei der Aufarbeitung von Industrieholz oder sägefähigem Stammholz, da häufig auf den Arbeitsschritt Aufarbeiten verzichtet wird. Allein Fällen, Zufallbringen und ein eventueller Zopfschnitt müssen beispielsweise der Leistung und den Kosten eines Harvesters gegenübergestellt werden. In der Regel können zudem die

Lohnkosten von motormanuell arbeitenden Kräften niedriger angesetzt werden (Maschinenringsatz) als die eines hauptberuflichen Forstmaschinenführers.

Vorteile bietet es, mit der Ernte- und Rücketechnik zu arbeiten, mit der auch das Stammholz geerntet wird, bzw. bei der Auswahl der Forstmaschinen zur Stammholzernte deren Eignung zur Energieholzbereitstellung im Auge zu behalten.

Insbesondere im Energieholzbereich erweist sich die Vollmechanisierung nicht per se als die kostengünstigste Variante. Hier werden häufig dezentral anfallende Resthölzer verarbeitet, deren geringe Konzentrationsmöglichkeit den Einsatz von Logistik mit hohen Systemkosten nicht rechtfertigt. Oft ist ein Sammeln des verstreuten Anfalls wichtiger als eine hohe Leistung bei der Bereitstellung des Hackholzes bis zur Waldstraße.

Bei der Variante, auf der Rückegasse zu hacken, lässt sich zwar das Rücken teilweise auf das Vorliefern beschränken. Allerdings muss die Einsparung von Rückekosten den Mehrkosten einer Spezialmaschine, die in der Lage ist, auf der Rückegasse zu hacken, gegenübergestellt werden. In der Regel rechnet es sich nicht, dass diese Maschine die aufgrund des verminderten Konzentrationsgrades des Hackholzes bereits gegenüber einem Hacker an der Waldstraße eine deutlich verringerte Leistung aufweist, zusätzlich Hackschnitzel rückt und damit weitere unproduktive (Hacker-)Zeiten in Kauf nimmt. Alternativ kann ein Hackschnitzel-Shuttle eingesetzt werden, das die Füllung eines Hackerbunkers übernehmen kann.

Weitere Variationen beispielsweise mit Übergabe an Wechselanhänger landwirtschaftlicher Schleppern an der Waldstraße sind denkbar. Das Ergebnis lautet, dass ein teurer Spezialhacker wahlweise kombiniert mit einer weiteren Spezialmaschine oder mit Standschleppern mit Anhängern aufgrund der geringen Auslastung bzw. Leistung teurer arbeiten als zwei Standardmaschinen. Tragschlepper und weit verbreitete, für den Einsatz an der Waldstraße oder Lagerplätzen geeignete Hacker, erlauben es jeweils entkoppelt und bei guter Auslastung zu arbeiten.

7.2.3 Neue Forsttechnik

Weiterentwicklung und Detailverbesserung finden laufend im Bereich der Hackertechnik statt. Auch für das Rücken des teilweise sperrigen Hackholzes werden beispielsweise Rungenkörbe modifiziert. Als echte Neuentwicklungen zu nennen sind dagegen der für schwache Baumdimensionen geeignete Mehrfachfällkopf sowie die Bündelmaschinen für Restholz.

Mehrfachfällkopf

Der Mehrfachfällkopf (Abbildung 59) kann mehrere Bäume in einer Kranlinie abtrennen und gebündelt ablegen. Ein hydraulisch betriebenes Messer führt den Trennschnitt. Zwei unabhängig voneinander steuerbare Greifzangen am Fällkopf „bündeln“ die Stämme.

Nachdem der erste Stamm vom Stock abgetrennt wurde, wird er stehend, von beiden Greifzangen umklammert, an den nächsten Entnahmebaum bewegt. Zunächst öffnet eine Greifzange und umklammert beide Stämme, anschließend öffnet und umklammert die zweite Greifzange. Dann trennt das Messer den zweiten Stamm vom Stock ab. Je nach Stärke der Bäume kann der Vorgang mehrfach wiederholt werden, ehe das Bündel abgelegt wird. Der Fällkopf weist keine Vorschubwalzen auf⁴⁹. Das Aggregat kann das Hackholz deshalb weder entasten noch zopfen. Es ist nicht möglich, Stammholz auszuhalten. Der Mehrfachfällkopf produziert ausschließlich Vollbäume.

Im Rahmen einer orientierenden Arbeitsstudie beobachteten FELLER und WEIXLER (2001) einen Harvester mit Mehrfachfällkopf in einem Erstdurchforstungsbestand mit führender Kiefer. Der BHD des ausscheidenden Bestands lag bei 8 cm, das durchschnittliche Erntevolumen bei 0,027 Vorratsfestmetern Derbholz je Bäumchen. Innerhalb der Studie hatten die stärksten Bäume einen BHD von 17 cm und konnten problemlos vom Stock getrennt werden. Der maximale Trenndurchmesser nach Herstellerangaben liegt bei 20 cm.

Stärkere Stämme über BHD 13 cm konnten schlecht gesammelt werden. Sie neigten dazu, nach dem Öffnen des unteren Greifers blumenstraußartig auseinander zu fallen (FELLER und WEIXLER, 2001). Schwierig war es zudem für den Maschinenführer, die Bäume in dem

⁴⁹ GINGAS (2004) berichtet von Versuchseinsätzen eines Mehrfachfällkopfes mit Vorschubwalzen, Entastungsmessern und integrierter Längenvermessung. Seinen Angaben nach lassen sich die Entastungsqualität und das Längenmaß mit der Aufarbeitung konventioneller Fällköpfe vergleichen. Nicht möglich ist dagegen bisher die Volumenermittlung der Stämme. Die beobachtete Leistung lag im Bereich von 10 bis 20 cm BHD um durchschnittlich 21 bis 38 % höher als bei Einzelstammverfahren. Die Versuche fanden allerdings unter Kahlhiebsbedingungen statt. Wie stark sich eine höhere Zahl verbleibender Stämme in Durchforstungen auf die Leistung auswirkt, ist bisher nicht ermittelt (GINGAS 2004).

gedrängt stehenden Bestand zu manipulieren. Da dem Mehrfachfällkopf Vorschubwalzen fehlen, war es nicht wie bei konventionellen Harvesteraggregaten möglich, die Bäume durch Vor- und Zurückschieben im Aggregat leichter zu Fall zu bringen. Das Ablegen an der Rückegasse war deshalb sehr zeitintensiv.



Abbildung 59: Mehrfachfällkopf



Abbildung 60: Harvester mit Mehrfachfällkopf bei der Ernte eines Energiewaldes

Die reinen Fällkosten, ohne Rücken, Hacken und Transport der Hackschnitzel zum Heizwerk, lagen in der Studie bereits über 10 €/je Srm Hackgut. FELLER und WEIXLER (2001) kommen zu dem Schluss, dass mit dem Mehrfachfällkopf in Durchforstungsbeständen noch keine wirtschaftlich befriedigende Hackguternte möglich ist. Sie stellen in den Raum, dass die Leistung des Mehrfachfällkopfes bei Kahlschlägen, beispielsweise wenn Energiewälder geerntet werden, deutlich höher liegen könnte.

BURGER und SOMMER (2003) beernteten einen Energiewald mit einem vergleichbaren Mehrfachfällkopf. Abbildung 60 zeigt den eingesetzten Harvester bei der Ernte. Die Kosten lagen bei 9 bis 10 €/Srm Hackgut bzw. bei 69 €/t atro frei Energiewald. In den Kosten sind das Fällen, Rücken und Hacken enthalten. Der Hackschnitzeltransport muss noch zu den Gesamtkosten frei Heizwerk ergänzt werden. Mit anderen voll- sowie teilmechanisierten Ernteverfahren konnten BURGER und SOMMER (2003) auf Energiewaldflächen günstigere Erntekosten erreichen.

Der beschriebene Mehrfachfällkopf bietet die ergonomischen Vorteile vollmechanisierter Verfahren. Er ist wirtschaftlich aber nicht ausreichend konkurrenzfähig.

Bündelmaschine

Das feste Packmaß soll die Witterungsempfindlichkeit der Bündel vermindern, damit die Zersetzung langsamer verläuft als dies bei losen Restholzhaufen der Fall wäre. Dennoch ist aufgrund der hohen Grünanteile mit Besiedlung durch Pilze und folglich Verlusten an Trockensubstanz zu rechnen.

Probleme bereitet in jedem Falle ein Transport der Bündel auf öffentlichen Straßen mit Kurzholz-LKW. Es kann systembedingt nicht ausgeschlossen werden, dass sich auch größere Holzteile während des Transportes lockern und herabfallen. Nachfolgende Verkehrsteilnehmer wären massiv gefährdet. Denkbar wäre der Transport mit Wechselcontainern. Wegen der Sperrigkeit der Bündel würde das je Fahrt bewegte Volumen aber niedriger liegen als beim Transport von Hackschnitzeln.

Für einen wirtschaftlichen Einsatz sollten großflächige, massierte Hiebsanfänge (Kahlhiebe) zur Verfügung stehen. Das trifft unter den waldbaulichen Verhältnissen in Mitteleuropa kaum zu. Zudem stehen den Heizwerken Brennstoffe minderer Qualität (hoher Grünanteil) als Landschaftspflegematerial häufig noch kostenlos oder zu den reinen Transportkosten zur Verfügung. Nach den bisherigen Erfahrungen in Skandinavien benötigt eine Bündelmaschine zur Auslastung den laufenden Einsatz von drei bis vier Harvestern, damit überhaupt entsprechend viel Schlagabraum anfällt. Rund ein Drittel der potentiellen Bündelmasse verbleibt dort zur Erhaltung des standörtlichen Wuchspotentials als Nährstoffquelle auf der Fläche (WITTKOPF et al. 2003).

Generell ist der Austrag von Nährstoffen beim Einsatz der Bündler kritisch zu sehen. Beim Anfall großer Schadholzmengen, z. B. bei flächigen Windwürfen, könnte sich ihr Einsatz bei drohendem Borkenkäferbefall als zweckmäßig erweisen. Sie könnten potentielles Brutraummaterial schnell von der Fläche räumen und eine zeitlich entzerrte, spätere Verwertung in Heizkraftwerken sichern. Bisher liegen für Mitteleuropa kaum Erfahrungswerte zu diesen Maschinen vor.



Abbildung 61: Fiberpac auf Forwarder montiert



Abbildung 62: Fiberpac auf LKW montiert

Der Bündler **Fiberpac** (Abbildung 61 und Abbildung 62) presst Astmaterial zu einem Endlosbündel. Das Pressmaterial wird mit einem Kran mit zwei Rollen zugeführt, die kontinuierlich Material einziehen. Eine integrierte Kappsäge schneidet einzelne Rollen in der jeweils gewünschten Länge ab. Diese werden vierfach mit Schnüren zusammengebunden (THORNER 1999). Am Ende stößt die Maschine die fertigen Bündel aus und legt sie ab. Ein Forwarder sammelt sie auf und bildet Polter an der LKW-befahrbaren Waldstraße.

Während des Betriebs steht das Aggregat quer zur Fahrtrichtung des Forwarders und erfordert deshalb entsprechend viel Platz. Ein Einsatz auf Rückegassen in hiesigen Durchforstungsbeständen wäre daher kaum möglich.

Die Maschine erzeugt nach Herstellerangaben 15 bis 20 Bündel pro Maschinenarbeitsstunde. Die Einzelrolle hat dabei im frischen Zustand bei einer Gesamtlänge von z. B. 3 m und einem Durchmesser von ca. 70 cm ein Gewicht von rund 500 kg (UUKOWSKI 2001).

Der **WOOD PAC** (Abbildung 63) unterscheidet sich vom FIBERPAC deutlich bezüglich der Bauweise des Bündelaggregates. Es formt keine Endlosrolle aus, sondern presst in einem von acht Rollen umgebenen Aggregatinnenraum Bündel mit fixer Länge. Nährstoffreiches Feinmaterial kann dabei nach unten durchfallen und im Wald verbleiben. Gebunden wird ebenfalls mit vier Schnüren (WORLD WOOD PAC AB 2000). Bei dieser Maschine wird die Bündlereinheit in Längsrichtung auf den Forwarder montiert. Sie wäre daher auch auf der Rückegasse einsetzbar. Mittlerweile vertreibt die Firma Valmet den WOOD PAC (VALMET 2002).



Abbildung 63: Bündelaggregat Wood Pac auf Forwarder

Aus Fichtenschlagabraum mit einem Wassergehalt von 45 bis 50 % presste die Maschine Bündel mit einer durchschnittlichen Masse von 460 kg. Die höchste dabei erreichte Arbeitsproduktivität lag bei 15 Bündeln/MAS. Der eingesetzte Forwarder trug im Test 15 bis 20 Bündel. Der für den Ferntransport bestimmte LKW konnte bis zu 80 Bündel fassen. Dabei war es möglich, gleichzeitig neben den Bündeln auch Rundholz zu laden (SKOG FORSK 1998). Solche Transportleistungen lassen sich allerdings in Deutschland aufgrund der Beschränkungen für das Gesamtgewicht von LKW nicht realisieren.

7.3 Ökologie

Verschiedene Aspekte müssen abgewogen werden um die Frage zu beantworten, ob die Energieholznutzung aus ökologischer Sicht zweckmäßig ist. Einerseits bringt der **Austrag von Nährstoffen** aus dem natürlichen Kreislauf negative Folgen mit sich. Andererseits wirkt die zusätzliche **Substitution fossiler Energien** durch nachwachsende Biomasse positiv auf die CO₂-Bilanz und bremst den Klimawandel.

7.3.1 Nährstoffhaushalt

Der Austrag von Nährelementen ist grundsätzlich negativ zu bewerten. Im Anhalt an das **Gesetz vom Minimum** nach LIEBIG begrenzt immer der Nährstoff das Pflanzenwachstum, der sich gerade im Minimum befindet. Dieser Nährstoff wird natürlich auch durch die verstärkte Entnahme von Biomasse entnommen, das Minimum also verstärkt.

Als Ausnahme kann mittlerweile das Nährelement Stickstoff gelten. Angesichts der hohen Stickstoffeinträge aus der Atmosphäre und des hohen Anteils der bereits mit Stickstoff gesättigten Waldböden lässt sich der mit der Restholznutzung verbundene, überdurchschnittlich hohe **Stickstoffentzug** auch positiv werten. Die Gefahr von Nitratauswaschungen in das Grundwasser wird dadurch aktiv vermindert.

Nicht gerechtfertigt ist es, die beschriebene zusätzliche Nutzung von Kronen und Restholz als „moderne **Streunutzung**⁵⁰“ zu bezeichnen. Der Vorwurf trifft nicht, da keine Streu direkt vom Boden entnommen wird. Nur der Streufall fällt geringer aus: bei Ernte von 10 % des aufstockenden Bestandes fallen in der Folge etwa 10 % weniger Streu zu Boden.

Untersuchungen zum Nährstoffentzug aus dem Bestand durch forstwirtschaftliche Nutzung kalkulieren häufig mit der Gesamtwuchsleistung des Bestandes und einer im Extremfall vollständigen Nutzung der gesamten oberirdischen Biomasse. Bereits KREUTZER (1979) ging aber davon aus, dass selbst bei einer gezielten **Vollbaumnutzung** etwa 50 % der Nadel- und Astmasse im Bestand verbleiben. Im Zuge des motormanuellen Fällens und Vorlieferns bricht dieser Anteil ab und fällt zu Boden. Diese Größenordnung konnte auch im Rahmen der hier durchgeführten Aufnahmen bestätigt werden.

Nicht zulässig ist es aber, die Ergebnisse der Fallstudie ohne weiteres auf vollmechanisierte Verfahren zu übertragen. Bei kontrollierter Zufallbringung und Aufarbeitung durch **Harvester**

⁵⁰ Streunutzung ist die jährliche oder periodische Entnahme der Bodenvegetation, des Bodenhumus und von Teilen des humosen Oberbodens (REHFUESS 1990, S. 140).

werden verfahrensbedingt weniger Kronen gebrochen und weniger Äste und Nadeln aus dem Kronenbereich abgeschlagen.

Die Nährstoffgehalte der einzelnen Baumkompartimente stammen aus der Studie „Gehalte chemischer Elemente in Baumkompartimenten“ von JACOBSEN et al. (2002). Anders als bei der Untersuchung von KREUTZER (1979) wurden darin auch Daten aus Jungbeständen und Standorten mit schlechter Nährstoffversorgung verwendet. Die Daten eignen sich somit eher, die **Nährstoffsituation** auf den unterschiedlichen Standorten in Bayern zu repräsentieren. Der Nährstoffaustrag lässt sich mit Hilfe des im Ergebnisteil beschriebenen Modells für verschiedene Baumarten und Alter angeben. Als Eingangsgröße dient die Biomasseentnahme in t atro/ha. Sie kann mit den in diesem Kompendium angegebenen Umrechnungszahlen hergeleitet werden.

Zur Bewertung des Austrags an Nährstoffen sind auch die Bodenvorräte zu betrachten. Die **Nährelementvorräte von Waldböden** erhoben unter anderen KREUTZER (1979) und ULRICH (1972). KREUTZER unterscheidet beim Nährstoffvorrat zwischen armen und reichen Standorten (vgl. Tabelle 81).

Tabelle 81: Nährstoffvorräte auf unterschiedlichen Standorten (KREUTZER, 1979)

Nährstoff	arme Standorte	reiche Standorte
	Vorrat [kg/ha]	
N	2.000 - 3.000	6.000 - 15.000
P	200 - 300	1.000 - 2.000
K	200 - 400	600 - 2000
Ca	200 - 500	> 600
Mg	50 - 150	> 400

Im Anhalt an die Waldbodeninventur in Bayern gibt HABEREDER (1997) den Nährelementvorrat im Wurzelraum für verschiedene geologische Ausgangssubstrate an.

Tabelle 82: Nährstoffvorrat für verschiedene geologische Ausgangsgesteine in Bayern

Nährstoff	Granit	Gneis	Kreide	Tertiär	Löß
	[kg/ha]	[kg/ha]	[kg/ha]	[kg/ha]	[kg/ha]
Kalium	160	200	230	250	310
Calcium	640	790	1.910	4.020	3.640
Magnesium	120	180	470	490	650

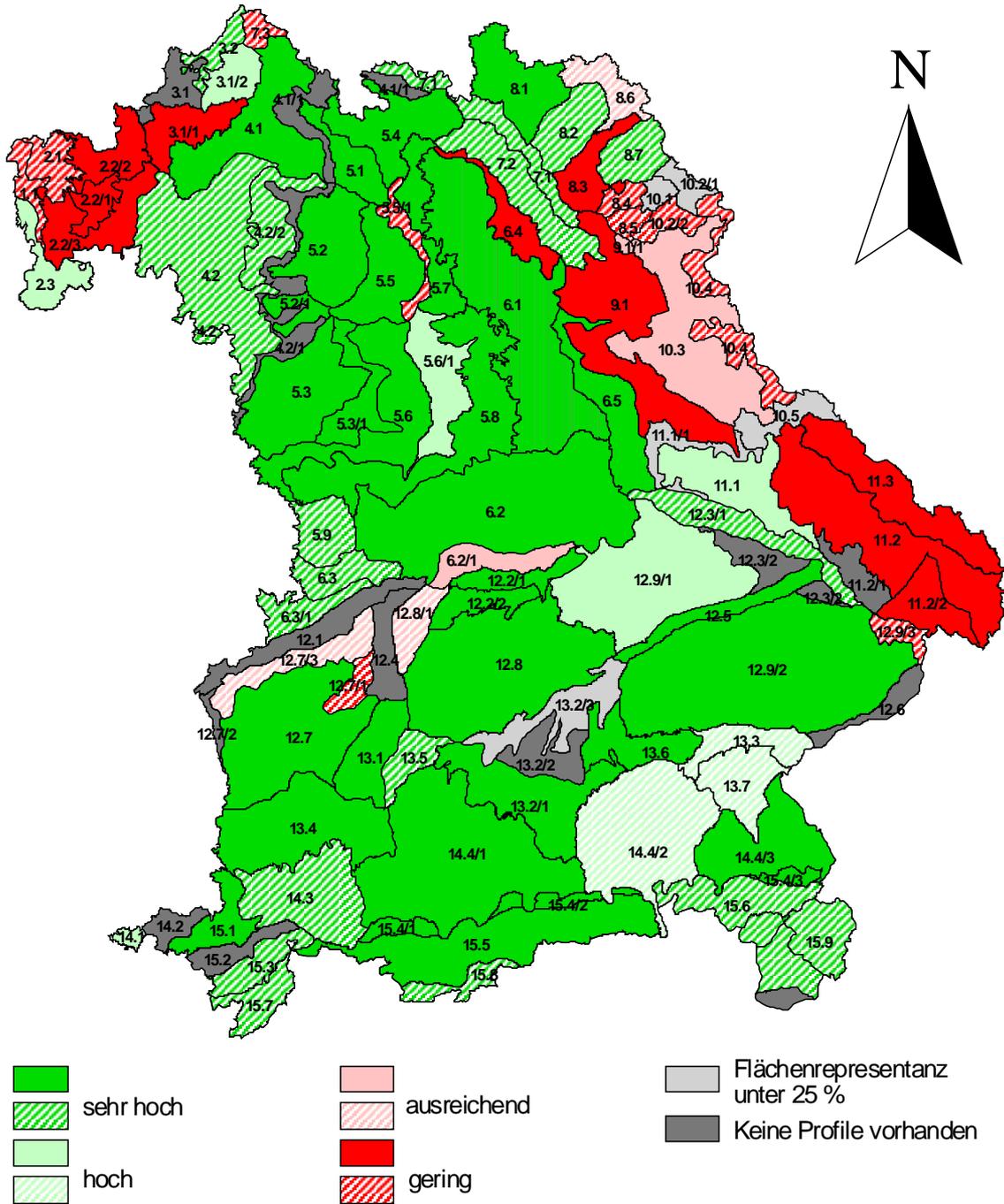
Basierend auf seinen Daten stellte HABEREDER (1997) fest, dass eine Vollbaumnutzung den zwei- bis dreifachen Nährstoffaustrag im Vergleich zur Derbholznutzung bedeutet. Bei wiederholter Anwendung kann diese Nutzung zu einer massiven **Standortschwächung** führen. Dagegen verursacht die reine Derbholznutzung grundsätzlich einen deutlich geringeren Austrag.

Allerdings weist HABEREDER (1997) darauf hin, dass bereits ein konzentriertes Ablegen des Ast-, Reisig- und Nadelmaterials auf den Rückegassen **Nährstoffe aus den Zwischenfeldern** entzieht. Dieser Austrag beläuft sich bei einem 20-jährigen Durchforstungsintervall durchschnittlich bei Kalium auf 29 bis 56 %, bei Calcium auf 1 bis 7 % und bei Magnesium auf 2 bis 8 % des in zehn Jahren aus dem Boden mobilisierbaren Nährelementvorrats.

Wie bereits oben dargestellt, sind durchschnittlich 80 % der Nährstoffe der oberirdischen Biomasse eines Baumes in den Ästen und Nadeln bzw. Blättern gespeichert. Die mit der Nutzung dieser Baumkompartimente erzielbare **Mehrausbeute an Biomasse** liegt theoretisch bei etwa 25 %. Wegen der bei den üblichen Ernteverfahren auftretenden Verluste können für die Praxis 10 % als realistisches Potential gelten. Nach Abwägung des hohen Nährstoffaustrags bei gleichzeitig relativ niedriger Mehrausbeute an Biomasse bzw. Energie ist es daher im Sinne einer nachhaltigen Waldbewirtschaftung anzuraten, dieses Material im Regelfall im Bestand zu belassen.

Die Daten von NIEDERBERGER (2003) erlauben es, nicht nur für das geologische Ausgangssubstrat sondern für jedes **Wuchsgebiet** in Bayern Aussagen zum Nährelementvorrat des Standorts zu treffen (Abbildung 64).

Im Anhalt an die Einteilung der Standorte nach ihren Nährstoffvorräten in sehr hoch, hoch, ausreichend und gering (NIEDERBERGER 2003) leiten BAUDISCH et al. (2004) die in Tabelle 83 angegebenen Empfehlungen für das Vorgehen in der forstlichen Praxis ab.



Ausgefüllte Flächen: über 75% der Flächen Teilwuchsbezirkes werden durch die Profile repräsentiert
 Schraffierte Flächen: zwischen 25% und 75% der Flächen des Teilwuchsbezirkes werden durch die Profile repräsentiert

Abbildung 64: Austauschbare Vorräte an Mb-Kationen (Ca, Mg und K) bis in 30 cm Bodentiefe (NIEDERNBERGER 2003)

Tabelle 83: Möglichkeiten für forstliche Nutzung von Kronen- und Restholz bei unterschiedlichen Nährstoffvorräten im Boden

Nährstoffvorräte an Mb-Kationen	Konzentration von Kronen- und Restholz auf der Rückegasse	Nutzung von Kronen- und Restholz	Vollbaumnutzung
sehr hoch	vertretbar	vertretbar	nicht vertretbar
hoch	vertretbar	vertretbar	nicht vertretbar
ausreichend	eingeschränkt vertretbar*	eingeschränkt vertretbar*	nicht vertretbar
gering	nicht vertretbar*	nicht vertretbar*	nicht vertretbar

* Wenn Borkenkäferbefall droht, ist auf Standorten mit ausreichender Nährstoffversorgung aus Forstschutzgründen eine Nutzung eingeschränkt vertretbar.

Kronen- und Restholz energetisch zu verwerten, lässt sich auf vielen Standorten in Bayern vertreten. Bei den Standorten mit nur ausreichenden Nährstoffvorräten lässt sich die Nutzung von Kronen- und Restholz dagegen nur eingeschränkt vertreten. Das Kronen- und Restholzmaterial sollte soweit wie möglich im Bestand verbleiben, um einer **Degradation des Standortes** entgegenzuwirken. Eine Ausnahme dieser Einschränkung besteht bei drohender Borkenkäfergefahr, die ein Entfernen des fängischen Materials aus dem Bestand erfordert.

Auf Standorten mit geringen Nährstoffvorräten bereitet bereits die **Konzentration von Kronenmaterial auf der Rückegasse** Probleme hinsichtlich der Nährstoffversorgung des Bestandes. Kronen- und Restholz sollte auf diesen Standorten nur ohne Äste bzw. Feinreisig und Nadeln/Blätter entnommen werden. Bei einer drohenden Borkenkäfervermehrung auf Standorten mit geringer Nährstoffversorgung sollte der Hacker - so weit technisch möglich - auf der Rückegasse arbeiten und die Hackschnitzel in den Bestand zurück werfen.

Umstritten ist die **Ascherückführung** in den Wald. Einerseits lässt sich mit der Rückführung der Kreislauf der Nährstoffe schließen. Dabei sollte im Sinne einer nachhaltigen Wirtschaft die Ausbringungsmenge je Umtriebszeit die entnommene Menge je Umtriebszeit jedoch nicht übersteigen. Andererseits würden die negativen Folgen einer Aschenausbringung für den Nährstoffhaushalt der Waldböden häufig überwiegen, vor allem da sie aus technischen und wirtschaftlichen Gründen in relativ konzentrierter Form erfolgen würde (ZOLLNER et al. 1997). Asche muss folglich wie Dünger behandelt werden, vor der Ausbringung sollte eine Diagnose des einzelnen Bestands erfolgen.

Nach v. WILPERT (2002) sollten die Holzaschen nur auf stark versauerten Standorten ausgebracht werden, die für eine **Bodenschutzkalkung** in Frage kommen. Die Asche kann dem Kalk beigemischt werden. Ihr Anteil sollte 30 % aber nicht übersteigen.

7.3.2 Energiebilanz

Die beste **Energiebilanz** hat Holz, wenn es zunächst stofflich verwertet wird (Abbildung 65).

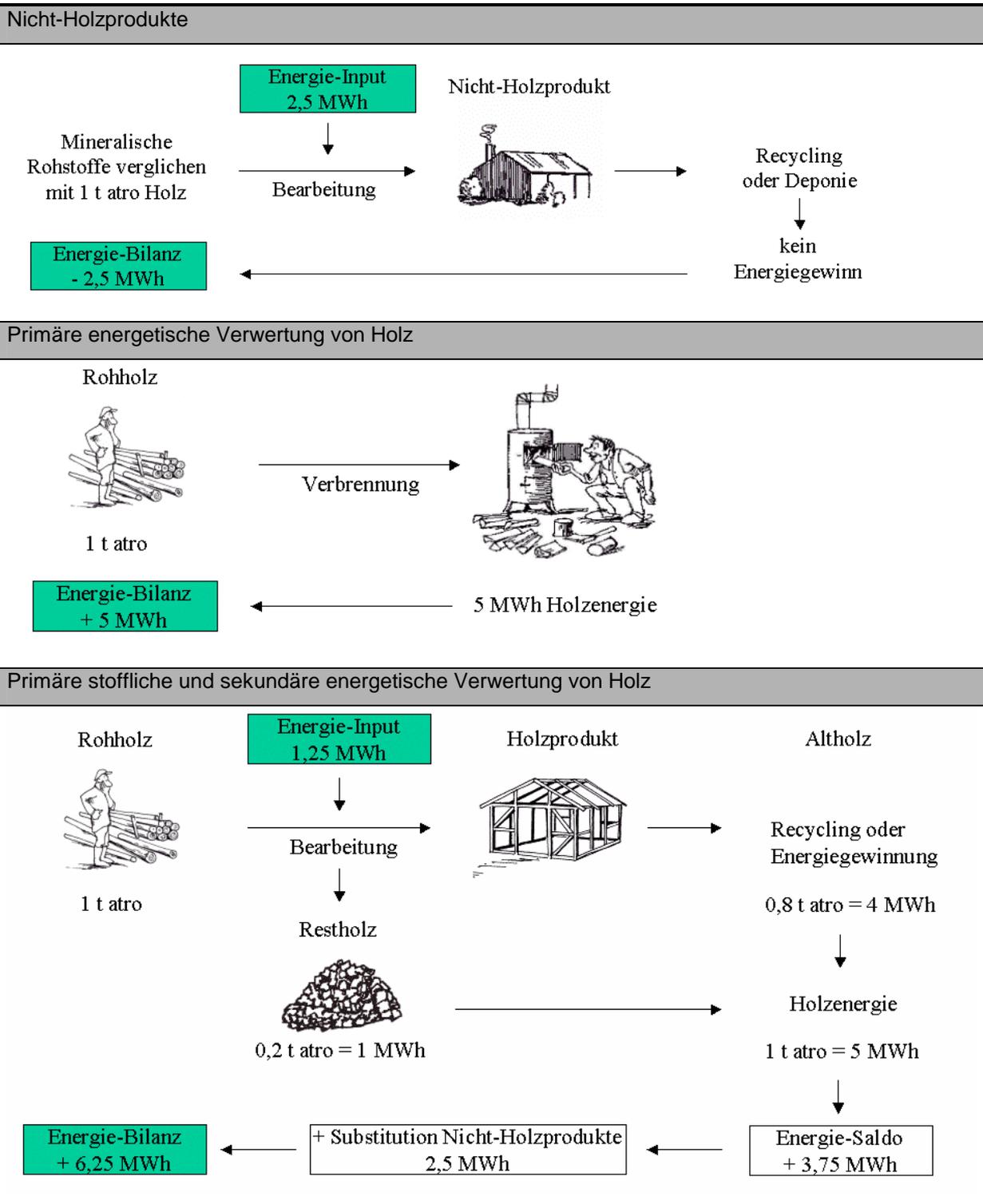


Abbildung 65: Schematische Darstellung der Energiebilanz von Nicht-Holzprodukten und der primären Nutzung von Holz als Energieträger verglichen mit der primären stofflichen Nutzung mit anschließender sekundärer energetischer Verwertung von Holz (nach FRÜHWALD 2001, modifiziert).

Stofflich genutztes Holz substituiert andere, nur mit höherem Energieaufwand herstellbare Produkte und spart, wenn es anschließend energetisch verwertet wird, zusätzlich fossile Energieträger ein.

Idealerweise sollte demnach Energieholz zuvor stofflich genutzt werden. Aber nicht alle Sortimenten der Forstbetriebe eignen sich dafür. Zudem droht gerade im Bereich der stofflichen Verwertung von Schwachholz in Deutschland wegen der zunehmenden **Globalisierung der Holzwerkstoffindustrie** mittelfristig ein Nachfragerückgang.

Im Bereich der international konkurrenzfähigen **Papier- und Zellstoffindustrie** werden teilweise außerordentlich weite Transportwege in Kauf genommen, um die erforderlichen Mengen sicherzustellen. Eine Ursache dafür ist die Professionalisierung bei Lieferzusagen und Mengenbereitstellung, an der sich viele, gerade kleinere Waldbesitzer aufgrund ihrer strukturellen Nachteile nicht beteiligen können oder wollen. Gerade Zusammenschlüsse von Waldbesitzern werden sich voraussichtlich verstärkt für die **regionale Verwertung** ihres Schwachholzes in Heiz(kraft)werken engagieren.

Die **Bereitstellungsenergie** für Rücken, Hacken und Transport der Hackschnitzel über 30 km beträgt nach den Ergebnissen dieser Studie etwa Hackschnitzel 3 bis 4 % der im Holz enthaltenen Energie. WEGENER et al. (1997) geben für die Bereitstellung von schwachem Rundholz an die Waldstraße mit einem Aufwand von 2,3 bis 4,2 % der darin gespeicherten Energie ähnliche Werte an⁵¹. Die Bereitstellungsenergie von Öl und Gas beträgt dagegen etwa 10 % (BMU 2003).

Holz setzt beim natürlichen Zersetzungsprozess dieselbe Menge an gespeichertem Kohlenstoff frei wie bei der energetischen Nutzung. Bei der energetischen Verwertung von Kronen- und Stammmaterial wird nur die in der Biomasse gespeicherte CO₂-Menge freigesetzt. Die energetische Verwertung von Holz oder Kronenmaterial darf daher als CO₂-neutral bezeichnet werden. Zusätzlich werden die Emissionen anderer, fossiler Energieträger vermieden⁵². Bei der energetischen Verwertung von Kronen und Stammteilen ist deshalb die **Kohlenstoffbilanz deutlich günstiger als das Verrotten** lassen im Bestand.

⁵¹ Für den Transport des Rundholzes vom Wald zum Sägewerk werden zusätzlich bei 50 km Entfernung 1,2 % und bei 300 km 7 % des Energieinhaltes verbraucht (WEGENER et al. 1997).

⁵² Ein Container mit Fichtenhackschnitzel (35 Srm) enthält ein Heizöläquivalent von ca. 2.500 Litern Heizöl. Das entspricht etwa dem Jahresbedarf eines durchschnittlichen Einfamilienhauses in Deutschland. Bei der Verbrennung des Heizöls würden 6.750 kg CO₂ frei. Ein Kilogramm CO₂ nimmt ein Volumen von 0,546 m³ ein (bei 20°C und 1013 mB Luftdruck). Die „CO₂-Wolke“ nähme demnach ein Volumen von ca. 3.700 m³ Volumen ein (Volumen von 100 Containern).

Damit kann die thermische Verwertung von Holz durchaus als aktiver, „eigennütziger“ **Beitrag der Forstwirtschaft zum Klimaschutz** verstanden werden.

7.4 Sozioökonomie

7.4.1 Marktpreise für Energieholz

Als Hauptursache für die große Schwankungsbreite der Preise für Waldhackschnitzel dürfte die noch **fehlende Markttransparenz** angenommen werden. Anerkannte Preisindices für Energiehackschnitzel existieren bezeichnender Weise nicht. Beeinflusst wird die Preisbildung auch durch Auflagen, die den Einsatz eines gewissen Anteils an Waldhackschnitzeln in geförderten Heizwerken vorschreiben. Sie schränken ein freies Agieren von Heizwerksbetreibern auf dem Energieholzmarkt ein.

Weitere Faktoren sind das unterschiedliche **Verhandlungsgeschick** der Vertragspartner sowie vorhandene oder nicht vorhandene Ausweichmöglichkeiten auf andere Lieferanten bzw. Abnehmer. Die Wahl geeigneter Preisgleitklauseln innerhalb von langjährigen Lieferverträgen ist wichtig. Falls die Hackschnitzelanbieter die Betreibergesellschaft des Heiz(kraft)werkes bilden oder ihr angehören, lassen sich eventuell zu versteuernde Überschüsse über die Auszahlung hoher Holzpreise vermeiden. So wird gezielt die Hackschnitzelproduktion finanziell unterstützt.

Beeinflussend auf die Preise für Waldhackschnitzel wirkt daneben die **Entwicklung der Energiepreise**. Bei einigen Heizwerken mit bereits vor einigen Jahren abgeschlossenen Lieferverträgen mit starker Kopplung an Energiepreise, werden in der Regel bereits deutlich höhere Vergütungen ausbezahlt als zu Beginn der Vertragslieferungen oder bei neu in Betrieb gehenden Heizwerken. Die Wahl geeigneter **Preisgleitklauseln** innerhalb von langjährigen Lieferverträgen ist dementsprechend wichtig.

Kleinere Heizwerke unter 500 kW Leistung mit Verbrennungstechnik ohne Vorschubroste verlangen teilweise von den Lieferanten, eine **Lagerhaltung** von Hackschnitzeln vorzunehmen. Dies erhöht die Bereitstellungskosten um einen zusätzlichen Manipulationsschritt sowie um die Abschreibungen der Lagereinrichtung. Diese faktisch vorhandenen Mehrkosten der Hackschnitzellieferanten können als Erklärung für das relativ hohe Erlösniveau bei kleinen Anlagen gelten.

Der Einfluss großer Heiz(kraft)werke über 5 MW Leistung auf das **Preisniveau** wirkt zunächst aus Sicht der Waldbesitzer negativ. Dennoch nehmen diese Werke große Mengen Hackschnitzel vom Markt. Waldbesitzer können dort in der Regel ganzjährig anliefern, die Qualitätsanforderungen sind gering. Diese Werke sind daher zu Zeiten von Käferkalamitäten als Partner der Forstwirtschaft anzusehen. Sie erlauben es, Waldschutz mit weitgehender Kostendeckung oder sogar bereits geringen Gewinnen zu betreiben. Langfristig wird sich die mit der Zunahme solcher Werke verbundene höhere Mengennachfrage auch in höheren Preisen niederschlagen.

Eine Empfehlung an Waldbesitzer kann sicherlich lauten, selbst Heizanlagen als **Inhaber** zu betreiben und Wärme zu verkaufen oder zumindest als **Teilhaber** solcher Anlagen aufzutreten. Solange noch ein Überangebot an Hackschnitzeln vorliegt, kann so die Differenz aufgefangen werden zwischen „Billigmengen“ und den aber tatsächlich bereits möglichen Vergütungen, die von der allgemeinen Energiepreisentwicklung abhängen. Investoren außerhalb der Forstwirtschaft werden dagegen stets die Anlagenrendite auch über kostengünstige Brennstoffpreise zu steigern versuchen.

Sollte eine Beteiligung seitens der Waldbesitzer nicht möglich sein, empfiehlt es sich **langfristige Lieferverträge mit Preisgleitklauseln** mit den Betreibern abzuschließen. In der Regel haben die Betreiber von Heiz(kraft)werken Interesse daran, zumindest einen Teil ihres Mengenbedarfs vertraglich abzusichern und sind bereit solche Mengen erhöht zu vergüten.

7.4.2 Sonstige positive Auswirkungen auf den Forstbetrieb

Forstbetriebe, die Hackschnitzel bereitstellen, erzielen neben dem reinen Verkaufserlös weitere, teils schwer monetär quantifizierbare Nebennutzen.

Gerade bei stärkeren Eingriffen in vorratsreiche Fichtenbestände ist es oft unumgänglich zur Saat, zur Durchführung eines Voranbaus mit Tanne- oder Laubholz oder zur Sicherung vorhandener Naturverjüngung Hiebsreste von der Fläche zu räumen. Die Kosten für eine **Schlagräumung** geraten je nach Intensität schnell in eine Größenordnung von 500 bis weit über 1.000 €/ha. Kostengünstige Verfahren zum Rücken und Hacken von Restholz und der Absatz des gehackten Restholzes versprechen dagegen wirtschaftliche Vorteile.

Dies gilt auch für den **Waldschutz**. Bei der Holzernte fallen regelmäßig schwer oder nicht vermarktbar Sortimente an (Kronenmaterial, Faul- oder Bruchstücke). Da die Hiebssätze unter anderem aufgrund des vermehrten Holzzuwachses in den letzten Jahren anstiegen,

nahmen in gleichem Maße auch diese bisher unverwertbaren Mengen zu. Durch die Entnahme des Kronenmaterials wird die Gefahr vor allem einer Borkenkäfervermehrung vermindert. Darüber hinaus besteht die Möglichkeit, fängisches Kronenmaterial solange im Wald zu lagern, bis sich Borkenkäfer eingebohrt haben. Bevor die Altkäfer wieder ausfliegen, muss das Material aber zuverlässig gehackt oder außerhalb des Waldes verbracht werden.

Wenn das Kronenmaterial entfernt wird, wird zusätzlich die **Waldbrandgefahr** vermindert. Es verbleibt weniger leicht brennbares Material im Bestand. Dies ist besonders in großstadtnahen Forstbetrieben von Bedeutung. Verzichtet werden kann bei Abnahmemöglichkeiten für Hackschnitzel auch auf das häufig praktizierte Verbrennen von Fichtenkronen im Wald zur Borkenkäferbekämpfung. Gerade bei trockener (Sommer)-Witterung geraten regelmäßig Feuer außer Kontrolle und entfachen schadensträchtige Waldbrände.

7.5 Entscheidungsfindung

Die Auswahl der Entscheidungskriterien und deren Gewichtung konnte im Rahmen dieser Arbeit nur exemplarisch erfolgen. Aus Sicht des Autors wurden sie für durchschnittliche standörtliche Verhältnisse in Bayern unter der Prämisse einer gewinnorientierten, aber nicht gewinnoptimierten Arbeitsweise, gutachtlich angesetzt.

Je nach Ausgangslage und Zielsetzung des Forstbetriebs wird die Liste der Kriterien und insbesondere Ihre Gewichtung anders aussehen. So werden auf Gewinnoptimierung orientierte Betriebe auf ertragskräftigen Standorten beispielsweise der Wirtschaftlichkeit ein höheres Gewicht verleihen und Aspekte wie Nährstoffaustrag oder Energiebilanz geringer bewerten. Für Betriebe auf ärmeren Standorten könnte dagegen der Aspekt des Nährstoffaustrags deutlich wichtiger sein.

Forstbetriebe haben daneben die unterschiedlichen Ansprüche der Kunden nach Qualität und Quantität zu berücksichtigen. Wenn nur Nachfrage nach hochwertigen Schnitzeln besteht, scheiden Verfahren, die hohe Wassergehalte und Grünanteile implizieren, von vornherein aus. Sie sollten sinnvollerweise dann auch nicht in eine Nutzwertanalyse einbezogen werden.

In diesem Sinne sind die Ergebnisse der vorliegenden Nutzwertanalyse also keinesfalls allgemein übertragbar. Nichtsdestotrotz geben die vorliegenden Ergebnisse wertvolle Hinweise und Anregungen, wenn über das „ob“ und „wie“ der Bereitstellung von

Hackschnitzeln entschieden wird. Die Auflistung der Bewertungskategorien zeigt ohne Anspruch auf Vollständigkeit die Vielfalt der Möglichkeiten auf. Die für die Bewertung herangezogenen Kriterien und Größen fassen die umfangreichen bereits vorliegenden Informationen in einem System zusammen.

Grundsätzlich wird unterstellt, dass für Holzerntemaßnahmen eine Bewertung ausschließlich nach betriebswirtschaftlichen Kennzahlen als Entscheidungsgrundlage nicht mehr ausreicht. Alle für den betreffenden Forstbetrieb relevanten Zielkriterien müssen bedeutungsgemäß erfasst werden (WARKOTSCH, 1977). Als methodisches Hilfsmittel dazu eignet sich die Nutzwertanalyse. Nutzwertanalysen lassen sich heute mittels Tabellenkalkulationen bei geringem zeitlichen Aufwand durchführen. Das im Rahmen dieser Arbeit getestete Programm bewährte sich dabei.

8 Zusammenfassung

Ziel der Arbeit war es, **Kalkulations- und Entscheidungsgrundlagen** für an der Energieholzbereitstellung interessierte Forstbetriebe zu entwickeln und darzustellen.

Als Hypothese stand im Zentrum der Arbeit: **Forstbetriebe können unter den erhobenen Bedingungen mit Gewinn Energieholz frei Heizwerk bereitstellen.** Dies kann in der Gesamtschau der Ergebnisse bejaht werden, wenngleich vor allem die Hackschnitzelpreise der Heiz(kraft)werke deutlich schwanken und daher die Erlöse in vielen Fällen die Bereitstellungskosten der untersuchten Logistikketten nicht decken.

Allein über das **Potential der Holzbrennstoffe** ließen sich in Bayern über 10 % des Energiebedarfs decken; aktuell sind es erst 2,5 %. Ein Drittel der Energie wird zu Heizzwecken verbraucht. Scheitholz, Pellets und Hackschnitzel sind Kostenführer auf dem Wachstumsmarkt „Regenerative Wärme“. Angesichts der Verknappung und der steigenden Preise der fossilen Energieträger sind die Aussichten auf steigende Energieholzpreise gut.

Die **Heizwerksumfrage** ergab, dass die geförderten bayerischen Heizwerke zu zwei Dritteln Waldhackschnitzel verbrennen und zu einem Drittel „Billigmacher“ wie Sägerestholz (21 %), Flurholz (6 %) und sonstige Biomasse (6 %). Die Preisangaben für Waldhackschnitzel schwankten erheblich zwischen 18 und 112 €/t atro. Die Höhe der Vergütung wird im wesentlichen davon beeinflusst, ob Waldbesitzer am Heizwerk beteiligt sind oder nicht. Heizwerke bis 5 MW Leistung bezahlten im Durchschnitt 60 bis 65 €/t atro, der Durchschnittserlös bei größeren Heiz(kraft)werken lag bei nur 38 €/t atro. Vertraglich abgesicherte Mengen erzielten deutlich mehr als „Spotmengen“, die häufig nicht einmal die Preise für Sägerestholz erreichten.

Zehn Logistikketten frei Heizwerk wurden ausgewählt und näher betrachtet, acht davon für Schwachholz, zwei für Kronenrestholz nach der (Stark-)Holzernte. Die Logistikketten unterscheiden sich bei den Systemkosten und der Leistung um den Faktor sechs, der Lohnkostenanteil schwankt zwischen 15 und 40 %. Neue spezielle Forsttechnik wie Hackschnitzel-Harvester, Mehrfachfällkopf oder Bündelaggregate für Restholz brachten keine Kostenvorteile gegenüber der bereits breit verfügbaren Logistik aus der Stamm- und Industrieholzernte. Leistungsfähige, teilmechanisierte Logistikketten mit weniger spezialisierten Maschinen und entsprechend höherer Auslastung lassen sich in der Praxis häufig mit Maschinenringsätzen kalkulieren. Sie können sich daher im Vergleich mit vollmechanisierten Verfahren, kalkuliert mit Unternehmersätzen, durchaus behaupten.

Die kalkulierten **Bereitstellungskosten** für die ausgewählten Logistikketten schwanken zwischen 9,6 und 17,6 €/Srm Hackschnitzel. Für BHD 15 cm reichten die Werte der für Schwachholz geeigneten Ketten (Fällen inbegriffen) von 9,6 bis 15 €/Srm. Bezogen auf Fichte entspricht dies etwa 63 bis 99 €/t atro frei Werk. Für gehackte Fichtenkronen ergab sich ein Wert von 9 Srm oder 60 €/t atro. Unterstellt wurde ein Transport der Hackschnitzel frei Heizwerk über eine Entfernung von 15 km.

Die untersuchten Ketten benötigten bei einer Transportentfernung von 15 km zwischen zwei und vier Liter Dieseläquivalent je Srm Hackschnitzel von der Ernte bis zum Heizwerk. Der energieintensivste Schritt ist der Transport, gefolgt von Hacken, Rücken und Fällen. Die **Energiebilanz** als Verhältnis der zur Bereitstellung aufgewendeten Energie mit der im Holz enthaltenen Energie fällt sehr positiv aus. Buche und Eiche mit nur 3 % liegen dabei vor Fichte und Pappel mit etwa 4 %.

Zahlreiche Studien zu Baumkompartimenten und ihren Nährstoffgehalten liegen vor, mit Hilfe derer sich die theoretisch mögliche **Biomasseentnahme** und der damit verbundene **Austrag von Nährstoffen** berechnen lassen. Mit der vorliegenden Arbeit sollte unter Nutzung dieser Studienergebnisse ermittelt werden, wie viel Biomasse und Nährstoffe entzogen werden, wenn Forstbetriebe beispielsweise über die Stammholznutzung hinaus noch Resthölzer hacken.

Als Ergebnis der **Fallstudie** am Forstamt München können überschlägig folgende **Relationen** festgehalten werden: Mit Stammholznutzung und anschließender Gewinnung von Hackschnitzeln aus den Fichtenkronen werden fünf Sechstel der Biomasse der Erntebäume entnommen. Dabei werden etwa zwei Drittel ihrer Nährstoffe ausgetragen. Bei gewöhnlicher Stammholznutzung wird nur etwas mehr als ein Drittel der Nährstoffe entzogen. Dank der überproportionalen Beteiligung der Nadeln und Äste verbleiben im nicht entnommenen Sechstel der Biomasse ein Drittel der Nährstoffe. Somit ist das Verfahren bezüglich des Nährstoffaustrags kritisch zu sehen, darf aber nicht pauschal mit einer Vollbaumnutzung gleichgesetzt werden.

Gleichwohl sollte es sich wegen des ungewollten Austrags von Nährstoffen auf die **Bekämpfung von Borkenkäferkalamitäten** beschränken und nicht zum Regelverfahren bei der Holzernte in der Fichte werden. Insbesondere in Beständen mit bereits vorhandenen Mangelerscheinungen ist möglichst auf der Rückegasse zu hacken und auf eine Entnahme der Hackschnitzel zu verzichten.

Bei der Entscheidung ob und mit welcher Logistikkette ein Forstbetrieb Hackschnitzel bereitstellt, sind verschiedenste Aspekte zu berücksichtigen. Wenn sich Eingangsgrößen ändern (anderer Bestand, anderer Abnehmer, neue Waldschutzsituation), muss neu entschieden werden. Das Instrument der **Nutzwertanalyse** eignet sich, um begründete, vergleichbare und später nachvollziehbare Entscheidungen zu treffen. Am Computer lässt sich die Analyse schnell durchführen. Ein entsprechendes Programm wird im Rahmen der Arbeit vorgestellt und beispielhaft benutzt.

Vor allem im Hinblick auf die absehbar steigende Bedeutung der thermischen Verwertung von Holz lohnt es sich für Forstbetriebe frühzeitig individuell optimierte Logistikketten zur Hackschnitzelbereitstellung aufbauen und sich möglichst selbst als Betreiber oder Gesellschafter neu entstehender Energieanlagen zu engagieren.

9 Summary

The study aimed to develop and present a **basis for making calculations and decisions** for forest enterprises interested in producing fuel wood.

The following hypothesis lay at the centre of the study: **forest enterprises can produce fuel wood ex heating plant profitably under the investigated conditions**. Looking at the results as a whole, this can be affirmed, even though especially the prices heating plants pay for wood chips do vacillate considerably, and revenues in many cases therefore do not cover the production costs of the logistic chains investigated.

The **fuel wood potential** alone would cover over 10 % of energy requirements in Bavaria; currently just 2.5 % of energy requirements are covered in this way. A third of the energy is used for heating purposes. Firewood in the form of logs, pellets and wood chips are cost leaders on the growing “regenerative heat” market. Given the rising scarcity and prices of fossil fuels, fuel wood prices are likely to rise.

A **survey of heating plants** showed that the subsidised Bavarian heating plants burn two thirds forest wood chips and one third “low-cost products”, such as leftovers from sawmills (21%), timber from trees growing outside the forest (6%) and other biomass (6%). The prices given for forest wood chips varied considerably between 18 and 112 €/t (absolutely dry). Revenue is heavily influenced by whether forest owners have stakes in the heating plant. Heating plants with an output of up to 5MW paid on average 60 to 65 €/t (absolutely dry); average revenue for larger heating (power) plants was just 38 €/t (absolutely dry). Quantities agreed by contract made considerably more than “ad hoc” transactions, which often did not even make the prices of sawmill leftovers.

Ten logistic chains ex thermal power station were selected and examined more closely, eight of them being for small timber, two for crown leftovers after the harvesting of (heavy) timber. The logistics chains differ in terms of system costs and output by a factor of six, and the proportion of wage costs varies between 15 and 40 %. New special forest technology such as woodchip harvesters, harvesters with multi-tree felling heads, or bundling aggregates for slash did not offer any cost advantages over the already widely available logistics systems for harvesting trunk wood or industrial timber. The costs of efficient, partially mechanised logistics chains with less specialist machinery and therefore higher utilization can in practice often be calculated using machine pool rates. They therefore

compare favourably with the costs of fully mechanised processes, calculated using business rates.

The calculated **supplying costs** for the selected logistic chains vary between 9.6 and 17.6 €/m³ (loose) wood chips. For a BHD of 15 cm, the values calculated for logistic chains suitable for small wood (including felling) ranged between 9.6 and 15 €/m³ (loose). Applied to spruce, this means approx. 63 to 99 €/t (absolutely dry) ex plant. For chipped spruce crowns, values of 9 m³ (loose) or 60 €/t (absolutely dry) were calculated. A transport distance of 15 km was assumed for the woodchips ex heating plant.

Given a transport distance of 15 km, the chains investigated needed between two and four litres of diesel equivalent per cubic metre (loose) of woodchips for the entire process from harvest to heating plant. The transport is the most energy-intensive stage in the process, followed by chipping, skidding and felling. The energy balance in terms of the relation of the energy used in supplying to the energy contained in the wood is very positive. Beech and oak at just 3 % are ahead of spruce and poplar at approx. 4 %.

Many studies of tree parts and their nutritional contents are available, with the help of which the theoretically possible **biomass extraction** and the linked **removal of nutrients** can be calculated. Using the results of these studies, this thesis was to show how much biomass and nutrients are extracted when, for example, forest enterprises chip slash wood in addition to harvesting trunk wood.

The results of the **case study** at the Munich forest office (Forstamt München) allow the following rough **relations** to be established: given utilization of trunk wood and subsequent production of wood chips from spruce crowns, five sixths of the biomass of the harvested trees is extracted. Approximately two thirds of the nutrients are removed. With normal exploitation of trunk wood, only a little more than one third of the nutrients are extracted. As a disproportional amount of nutrients are contained in the needles and branches, a third of the nutrients remains in the unused sixth of the biomass. The process should thus be regarded critically because of the removal of nutrients, although it must not be equated wholesale with the utilization of whole trees.

Because of the undesirable removal of nutrients, the chipping of crowns should be limited to **the fight against the bark beetle** and not become the usual process for harvesting spruce. Especially in stands already showing nutrient deficiencies, wood chips should not be used. Chipping should take place as far as possible on the skid road and the wood chips should be re-distributed in the stand.

In deciding whether a forest enterprise should produce wood chips and which process it should use, many things should be taken into consideration. If variables change (another forest stand, other customers, a change in the situation regarding forest protection), new decisions will have to be made. The **utility analysis** tool is a suitable instrument for making well-founded, comparable decisions which can be reconstrued later. The analysis can be carried out quickly with the computer. A relevant program is presented as part of the study and used with examples.

Especially given the foreseeable increase in the thermal utilization of wood, forest enterprises should see that they set up individually optimised logistic chains as early as possible for producing wood chips, and also become involved as far as possible themselves as operators or shareholders in new energy plants.

10 Verzeichnisse

10.1 Literatur

- ATTESLANDER, P. (1995): Methoden der empirischen Sozialforschung. 8. Auflage. Berlin New York, Walter de Gruyter. 418 S.
- BAUDISCH, C.; WITTKOPF, S.; KRICHBAUM, C.; OHRNER, G. (2004): Waldhackschnitzel – Energieträger mit Zukunft. Holzzentralblatt Nr. 46, S. 609-610
- BMU (2003): Nutzung von Biomasse in Kommunen – Ein Leitfaden. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (Hrsg.), Berlin
- BEREKOVEN, L.; ECKERT, W.; ELLENRIEDER, P. (1991): Marktforschung: Methodische Grundlagen und praktische Anwendung. 5. Auflage. Verlag Gabler, Wiesbaden
- BÖHLER, H. (1992): Marktforschung. 2. Auflage. Stuttgart, Kohlhammer.
- BRÖKELAND, R. (2003): Handbuch zum Planungsprogramm Horteb. Universität Hannover. Gartenbautechnische Informationen, Heft 51, 2. Auflage
- BSTMLF (2002): Waldbauliches Förderprogramm 1995. Bayerisches Staatsministerium für Landwirtschaft und Forsten, Faltblatt, aktualisierte Auflage 2002.
- BSTMLF (2004a): Bayerischer Agrarbericht 2004. Bayerisches Staatsministerium für Landwirtschaft und Forsten, 213 S.
- BSTMLF (2004b): Merkblatt zum Anbau nachwachsender Rohstoffe auf konjunkturell stillgelegten Flächen und von Energiepflanzen auf nicht stillgelegten Flächen 2004. Bayerisches Staatsministerium für Landwirtschaft und Forsten, 4 S.
- BUNDESREGIERUNG (1995): Gesetz zur Gleichstellung stillgelegter und landwirtschaftlich genutzter Flächen vom 10. Juli 1995. Bundesgesetzblatt, Teil 1, S. 910
- BURGER, F.; SOMMER, S. (2003): Von der Pappel bis zu Hackschnitzel – Moderne Erntetechnik für Energiewälder. LWFaktuell Nr. 39, S. 4-6
- C.A.R.M.E.N. E.V. (2003): Vorschlag für einen Brennstoffliefervertrag. Unveröffentlichtes Vertragsmuster für von C.A.R.M.E.N. e.V. betreute Heizwerke
- C.A.R.M.E.N. E.V. (2003): Preisentwicklung bei Holzpellets. <http://www.carmen-ev.de>
- CELSI AG (2003): Software CelsiEval Version 1.3 „Die optimale Entscheidung“. Handbuch zur Software
- CEN (2003): Feste Biobrennstoffe – Terminologie, Definitionen und Beschreibungen. Vornorm CEN/TS 14588:2003“. Technisches Komitee CEN/TC 335 „Feste Biobrennstoffe“; Europäisches Komitee für Normung, Brüssel

- DAUBER, E.; GAMPE, S.; KREUTZER, K.; LUGER, F.; ZENKE, B.; GLATZ, E. (1979): Potential pflanzlicher Reststoffe zur Rohstoffgewinnung. Teil 1: Waldabfälle. Forschungsbericht T 79-95. Bundesministerium für Forschung und Technologie, Bonn. 488 S.
- DEINES, T.; HUSLIK, H.; FROMMHERZ, J. (2001): Anwenderdatenbank für Holz-Heizwerke in Baden-Württemberg. Tagungsband 10. Symposium Energie aus Biomasse 2001. OTTI-Kolleg, Regensburg. S. 71-77
- DEUTSCHES VERKEHRSFORUM (2001): Wettbewerbsbedingungen im Straßengüterverkehr der EU. Positionspapier des Lenkungskreises Straßenverkehr im Deutschen Verkehrsforum. www.verkehrsforum.de
- DIETER, M.; ENGLERT, H.; KLEIN, M. (2001): Abschätzung des Rohholzpotentials für die energetische Nutzung in der Bundesrepublik Deutschland. Bundesforschungsanstalt für Forst- und Holzwirtschaft Hamburg. Arbeitsbericht des Instituts für Ökonomie 2001/11, 45 S.
- DIETRICH, H.-P.; RASPE, S.; PREUHLER, T. (2002): Inventur von Biomasse und Nährstoffvorräten in Waldbeständen. Forstliche Forschungsberichte München, Band 186, 201 S.
- DIETZ, P. (1975): Dichte und Rindengehalt von Industrieholz. Holz als Roh- und Werkstoff 33, S. 135-141
- DIN 52 182 (1976): Prüfung von Holz – Bestimmung der Rohdichte. Deutsches Institut für Normung (Hrsg.), Beuth Verlag, Berlin
- DIN 68 100 (1984): Toleranzsystem für Holzbe- und verarbeitung. Deutsches Institut für Normung (Hrsg.), Beuth Verlag, Berlin.
- DIN 4076 (1985): Benennungen und Kurzzeichen auf dem Holzgebiet. Holzarten Teil 1. Deutsches Institut für Normung (Hrsg.), Beuth Verlag, Berlin
- DIN 68 364 (2001): Kennwerte von Holzarten. Deutsches Institut für Normung (Hrsg.), Beuth Verlag, Berlin
- DREINER, K.; FRÜHWALD, A.; KÜPPERS, J.-G.; SCHEWINLE, J.; THOROE, C. (1994): Holz als umweltfreundlicher Energieträger: Eine Nutzen-Kosten-Untersuchung. Schriftenreihe des Bundesministeriums für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten, Reihe A, Heft 432, Landwirtschaftsverlag Münster, 192 S.
- DUMMEL, K.; BRANZ, H. (1986): Holzernteverfahren – Vergleichende Erhebung und Beurteilung der Holzernteverfahren in der Forstwirtschaft in der Bundesrepublik Deutschland. Schriftenreihe des Bundesministeriums für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten. Reihe A, Heft 333, Landwirtschaftsverlag Münster

- FEICHT, E. (2001): „Gesundheitliche Probleme bei der Lagerung und Handhabung von Hackschnitzeln“. Materialien der LWF, Band 3
- FEICHT, E.; WITTKOPF, S.; OHRNER, G.; MÜHLEN ZUR, A.; NOWAK, D. (2002): „Gefährdungen durch Holz-Hackschnitzel analysiert“. Holzzentralblatt, Nr. 39/40, S. 500
- FELLER, S.; REMLER, N.; WEIXLER, H. (1998): Vollmechanisierte Waldhackschnitzelbereitstellung – Ergebnisse einer Studie am Hackschnitzel-Harvester. Berichte aus der LWF Nr. 16, Freising
- FELLER, S.; WEIXLER, H.; HAMBERGER, J. (1999): Neuson 11002 HV – Raupenharvester der Kompaktklasse. Forst und Technik Nr. 6, S. 10-13
- FELLER, S.; RIEDLBERGER, M. (2001): Hackschnitzelbereitstellung mit dem Timberchipper. Forst und Technik Nr. 4, S. 4-8
- FISCHER, J. (2003): Neues vom Pelletmarkt. Tagungsband 11. C.A.R.M.E.N.-Symposium. C.A.R.M.E.N. e.V., Straubing, S. 95-109
- FISCHER, J., PILZ, B. (2004): Aktuelle Entwicklung des deutschen Pelletmarkts. Proceedings European Pellets Conference 2004, Wels, S. 19-30
- FISCHER, P. (1991): Untersuchungen zur Messung von Schichtholz und zur Entwicklung leistungsfähiger Schichtholzmessverfahren. Dissertation an der Fakultät für Bau-, Wasser-, und Forstwesen der technischen Universität Dresden
- FISCHER, U. (1995): Holzpotentiale für die energetische Nutzung. Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg, Freiburg, 19 S.
- FORBRIG, A. (2000): Konzeption und Anwendung eines Informationssystems über Forstmaschinen auf Grundlage von Maschinenbuchführung, Leistungsnachweisen und technischen Daten. Dissertation Technische Universität München, Bericht Nr. 29/2000 des Kuratoriums für Waldarbeit und Forsttechnik, Groß-Umstadt
- FPP (KOOPERATIONSABKOMMEN FORST-PLATTE-PAPIER) (1998): Holzernte in der Durchforstung - Harvester, Forwarder. Kooperationsabkommen Forst-Platte-Papier. Wien, 120 S.
- FRAUENHOFER ISI (2001): Excel-Tool für die Berechnung von CO₂-Emissionen aus stationärer Verbrennung. Fraunhofer Institut Systemtechnik und Innovationsforschung. <http://www.isi.fhg.de/u/tools/excel-tool-vollversion.xls>
- FRÜHWALD, A. (2001): Die Rolle von Forst und Holz in der CO₂-Diskussion. Vortrag beim Symposium Holz Innovativ, Rosenheim
- GINGRAS, J.-F. (2004): Early Studies of Multi-Tree-Handling in Eastern Canada. International Journal of Forest Engineering, Vol. 15, No. 2, S. 18-22

- HABEREDER, R. (1997): Auswirkungen maschineller Durchforstungstechnik (Harvester) auf den Nährelementvorrat im Boden; Forst und Holz Nr. 2, 52. Jahrgang
- HAKKILA, P. (1989): Utilization of Residual Forest Biomass. Springer Verlag Berlin, 568 S.
- HAMMANN, P.; ERICHSON, B. (1990): Marktforschung. 2. Auflage. UTB Verlag Gustav Fischer, Stuttgart
- HARTMANN, H.; STREHLER, A. (1995): Die Stellung der Biomasse im Vergleich zu anderen erneuerbaren Energieträgern aus ökologischer, ökonomischer und technischer Sicht. Schriftenreihe „Nachwachsende Rohstoffe“, Band 3. Münster: Landwirtschaftsverlag. 425 S.
- HARTMANN, H.; MADEKER, U. (1997): Der Handel mit biogenen Festbrennstoffen – Anbieter, Absatzmengen, Qualitäten, Service, Preise. Landtechnik-Bericht Nr. 28, Landtechnik Weihenstephan, Freising
- HARTMANN, H.; BÖHM, T.; MAIER, L. (2000): Naturbelassene biogene Festbrennstoffe – umweltrelevante Eigenschaften und Einflussmöglichkeiten. Reihe „Materialien“, Nr. 154. Bayerisches Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen (Hrsg.), München
- HARTIG (2000): Bereitstellung von Waldhackschnitzeln – Aktuelle Verfahren, staatliche Förderung. Diplomarbeit Georg-August-Universität Göttingen
- HARTIG (2001): Aktuelle Daten zur Bereitstellung von Waldhackschnitzeln in Bayern. Situationsanalyse im Auftrag der Bayerischen LWF, durchgeführt vom Institut für Forstliche Arbeitswissenschaft und Verfahrenstechnologie der Georg-August-Universität Göttingen
- HASCHKE, P. (1998): Forstliche Energieholzpotentiale in Deutschland und Aspekte ihrer zukünftigen Nutzung. Holzzentralblatt 53, S. 801-806
- HRUBESCH, P. (1996): Holzverbrauch in den Haushalten Deutschlands. Gutachten des Deutschen Institutes für Wirtschaftsforschung. Berlin. 68 S.
- HRUBESCH, P. (1996): Holzverbrauch in den Haushalten Deutschlands. Gutachten des Deutschen Institutes für Wirtschaftsforschung. Berlin. 68 S.
- JACOBSEN, C.; RADEMACHER, P.; MEESENBURG, H.; MEIWES, K.-J. (2002): Gehalte chemischer Elemente in Baumkompartimenten. Literaturstudie und Datensammlung. Niedersächsische Forstliche Versuchsanstalt Göttingen
- KALTSCHMITT, M.; HARTMANN, H. (2001): Energie aus Biomasse. Grundlagen, Techniken und Verfahren. Springer Verlag, Berlin

- KNECHTLE, N. (1997): Materialprofile von Holzerntesystemen – Analyse ausgewählter Beispiele als Grundlage für ein forsttechnisches Ökoinventar. Diplomarbeit am Department für Wald- und Holzforschung, ETH Zürich
- KNIGGE, W.; SCHULZ, H. (1966): Grundriss der Forstbenutzung. Parey Verlag, Berlin
- KOLLMANN, F. (1982): Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe. Band 1, 2. Auflage, Springer Verlag, Berlin
- KRAMER, H.; AKÇA, A. (1995): Leitfaden zur Waldmeßlehre. Sauerländer`s Verlag, Frankfurt a. Main, 266 S.
- KREUTZER, K. (1979): Ökologische Fragen zur Vollbaumnutzung, Forstwissenschaftliches Centralblatt, Jg. 98, Heft 6, S. 298-308
- KRICHBAUM, C.; WITTKOPF, S.; BAUDISCH, C. (2003): Kalkulationshilfen zur Energieholzbereitstellung für Waldbesitzer. Unveröffentlichter Abschlussbericht zum Projekt V 55 des Kuratoriums für Forstliche Forschung, Freising
- KROTH, W.; LÖFFLER, H.; TIMINGER, J. (1976): Zur Analyse forstbetrieblicher Zielsysteme und Methodik der Entscheidung. Forstwissenschaftliches Centralblatt Nr. 95, S. 20-44
- KWF (1992): Tagungsführer zur 11. KWF-Tagung 1992 in Koblenz. Kuratorium für Waldarbeit und Forsttechnik, Groß-Umstadt
- KWF (2000): Tagungsführer zur 13. KWF-Tagung 2000 in Celle. Kuratorium für Waldarbeit und Forsttechnik, Groß-Umstadt
- LEUCHTWEIS, C. (2001): Rück- und Ausblick zu den Förderprogrammen für Energie aus Biomasse. In: Symposium Energieholz. Berichte aus der LWF Nr. 30, Freising
- LOBINGER, G. (2004): Praktische Hinweise zum Waldschutz – Borkenkäfer, ein gefragtes Thema. LWFaktuell Nr. 43, S. 38-39
- LÖFFLER, H. (1991): Forstliche Verfahrenstechnik (Holzernte). 2. Auflage. Lehrstuhl für Forstliche Arbeitswissenschaft und Angewandte Informatik. München. 527 S.
- LÖFFLER, H. (1992): Arbeitswissenschaft für Studierende der Forstwissenschaft. Manuskript zu den Lehrveranstaltungen. 3. Auflage. Lehrstuhl für Forstliche Arbeitswissenschaft und Angewandte Informatik, München
- LWF (2002): Bereitstellung von Waldhackschnitzeln. Merkblatt der Bayerischen Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft Nr. 10, 4 S.
- LWF (2002): Hackschnitzel richtig lagern! Merkblatt der Bayerischen Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft Nr. 11, 2 S.
- LWF (2003): Der Energieinhalt von Holz und seine Bewertung. Merkblatt der Bayerischen Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft Nr. 12, 4 S.

- MALL, M. (2003): Verfahren zur Bereitstellung von Scheitholz. Diplomarbeit am Lehrstuhl für Forstliche Arbeitswissenschaft und Angewandte Informatik. 123 S.
- MANTAU, U.; WEIMAR, H. (2003): Standorte der Holzwirtschaft: Aufkommens- und Vermarktungsstruktur von Altholz. Universität Hamburg, Zentrum Holzwirtschaft. Arbeitsbereich Ökonomie der Forst- und Holzwirtschaft. 18 S.
- MANTAU, U.; SÖRGEL, C. (2004): Standorte der Holzwirtschaft: Holzwerkstoffindustrie, Holzschliff- und Zellstoffindustrie, Sägeindustrie. Universität Hamburg, Zentrum Holzwirtschaft. Arbeitsbereich Ökonomie der Forst- und Holzwirtschaft. 54 S.
- MILOTA, L. (2004): Schriftliche Mitteilung zum Bruttojahresverdienst 2003 der Beschäftigten im Wirtschaftssektor „Säge-, Hobel- und Holzimprägnierwerke“ in Österreich. Statistik Austria, Wien
- MOSANDL, R.; FELBERMEIER, B. (2003): Der Neue Dreiklang im Waldbau: Ökologie, Technologie und Sozioökonomie. Forst und Holz 58 (6), 139-142
- NEUGEBAUER, G.; WITTKOPF, S. (2004): Käfern Brutraum entziehen – in Bayern existiert ein flächendeckendes Netz an Hackerunternehmern. Bayerisches Landwirtschaftliches Wochenblatt, Nr. 22/2004, München, S. 54
- NIEDERBERGER, J. (2003): Entwurf zur Neubearbeitung der Düngerrichtlinie für Bayern, Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft, unveröffentlicht
- NURMI, J. (2000): Characteristics and storage of whole-tree biomass for energy. Finnish Forest Research Institute, Research Papers Nr. 758
- NÜSSLEIN, S. (1996): Einschätzung des potentiellen Rohholzaufkommens in Bayern. Berichte der Bayerischen Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft, Nr. 7, Freising, 52 S.
- OHRNER, G. (2000): Der Siegeszug der Harvester. LWFaktuell Nr. 26, S. 5-7
- ÖNORM M 7132 (1986): Energiewirtschaftliche Nutzung von Holz als Brennstoff. Begriffsbestimmungen und brennstofftechnologische Merkmale. Österreichisches Normungsinstitut, Wien
- PATZAK, W. (1981): Untersuchungen zum Transport von Biomasse vom Wald zu einem zentralen Lagerplatz für die Verhältnisse in Emmelshausen. Unveröffentlichtes Manuskript am Lehrstuhl für Forstliche Arbeitswissenschaft und Verfahrenstechnik der Ludwig-Maximilians-Universität München
- PATZAK, W. (1984): Bereitstellung forstlicher Biomasse aus Erstdurchforstung in Fichten- und Kiefernbeständen. Forschungsbericht (C 0 76) Bereitstellung forstlicher Biomasse für das Bundesministerium für Forschung und Technologie Teil I und II, München

- PAUSCH, R. (2002): Ein System-Ansatz zur Untersuchung von Zusammenhängen zwischen Waldstruktur, Arbeitsvolumina und Kosten der technischen und biologischen Produktion in Forstrevieren ost- und nordbayerischer Mittelgebirge. Dissertation Technische Universität München, 225 S.
- PERSCHL, H; BECK, R.; OHRNER, G. (2002): Welche Holzmengen kommen aus dem Kleinprivatwald Bayerns? LWFaktuell Nr. 36, S. 7-9
- REFA (1991): Anleitung für forstliche Arbeitsstudien, Datenermittlung und Arbeitsgestaltung. 3. Auflage. Herausgeber: REFA-Fachausschuss Forstwirtschaft und Kuratorium für Waldarbeit und Forsttechnik
- REHFUESS, K. E. (1990): Waldböden: Entwicklung, Eigenschaften und Nutzung. Pareys Studententexte Nr. 29, 2. Auflage. Verlag Paul Parey, Hamburg und Berlin. 294 S.
- RIMMELSPACHER, B. (2004): Schriftliche Mitteilung zur Mikrozensus-Zusatzerhebung 2002 zu den bewohnten Wohneinheiten nach verwendeter Energieart. Bayerisches Landesamt für Statistik, München
- RÖSCH, CH. (1996): Vergleich stofflicher und energetischer Wege zur Verwertung von Bio- und Grünabfällen - unter besonderer Berücksichtigung der Verhältnisse in Baden-Württemberg. Wissenschaftliche Berichte des Forschungszentrums Karlsruhe, FZKA 5857, Karlsruhe. 269 S.
- SCHNELL, R.; HILL, P; ESSER, E. (1995): Methoden der empirischen Sozialforschung. 5. Auflage. München, Wien: Oldenburg Verlag, 506 S.
- SCHUHBAUER, J. (2004): Untersuchungen zur Versorgungslogistik mit Waldhackschnitzeln des Biomasseheizkraftwerks Pfaffenhofen. Diplomarbeit am Lehrstuhl für Forstliche Arbeitswissenschaft und Angewandte Informatik, 83 S.
- SCHWARZMEIER, M. (2000): Erhebung der oberirdischen Biomassevorräte von Fichtenbeständen (*Picea abies* (L.) Karst) im Bereich der Waldklimastationen Ebersberg und Flossenbürg. Diplomarbeit am Fachbereich Forstwirtschaft der Fachhochschule Weihenstephan, Freising
- SELL, J; SCHNELL, G. (1988): Der Heizwert von Holz und seine Einflussfaktoren. Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (EMPA), Schweiz, Report Nr. 115/18
- SKOG FORSK (1998): Composite residue logs – a new concept in bioenergy fuel. Skog Forsk News Nr. 2
- SPINELLI, R.; HARTSOUGH, B. (2001): A survey of Italian chipping operations. Contributi Scientifico-Practici Nr. 92, Florenz. 112 S.

- STAMPFER, E.; STAMPFER, K.; TRZESNIEWSKI, A. (1997): Rationalisierung der Bereitstellung von Hackgut. Schriftenreihe der Forschung im Verbund, Band 29. Österreichische Elektrizitätswirtschafts-Aktiengesellschaft, Wien
- STATISTISCHES BUNDESAMT (2004): Diverse Fachserien sowie Auswertungen über das Informationssystem GENESIS-Online. Wiesbaden, www.destatis.de
- STMLF (2003): Gesamtkonzept Nachwachsende Rohstoffe vom 28.04.2003. Bayerisches Staatsministerium für Landwirtschaft und Forsten, München
- STMWVT (2003): Energiebilanz Bayern. Daten, Fakten, Tabellen. Bayerisches Staatsministerium für Wirtschaft, Verkehr und Technologie, München
- TECSON (2004): Preisentwicklung beim Heizöl. Preis für 3.000 Liter Heizöl EL. <http://www.tecson.de/pheizoel.htm>
- THEK, G. (2001): Produktionskosten von Holzpellets gegliedert nach Prozessschritten und unter Berücksichtigung österreichischer Randbedingungen. Tagungsband 2. Europäisches Expertenforum. Salzburg, 2001
- THORNER (1999): Bündelmaschine für Hiebsreste. Forst und Technik Nr. 12, S. 48
- UUKOSKI (2001): Fiberpac bündelt Bioenergie für Kraftwerke – Der Fiberpac 370 im Einsatz in Finnland. Timberjack News Nr. 1
- VALMET (2002): Valmet WoodPac bündelt Reisig und Äste zu Holzbrennstoff. Partek Forest International Magazin „Just Forest“ Nr. 2
- VEB (Hrsg.) (1990): Lexikon der Holztechnik. 4. Auflage, VEB Fachbuchverlag, Leipzig.
- WAGNER, K.; WITTKOPF, S. (2000): Der Energieholzmarkt Bayern. Berichte aus der LWF Nr. 26, Freising
- WARKOTSCH, W. (1975): Darstellung und Analyse von Systemen und Verfahren der Holzernte. Allgemeine Forstzeitschrift 41
- WARKOTSCH, W. (1977): Entscheidungshilfen zur Planung von Holzerntemaßnahmen, dargestellt am Beispiel des bäuerlichen Kleinprivatwaldes im Landkreis Rosenheim. Forstliche Forschungsberichte Nr. 33, München
- WAZULA, H. (2004): Statistische Erfassungen des Bayerischen Kaminkehrerhandwerks. Vortragsunterlagen für den Arbeitskreis Holzfeuerungen vom 22.06.2004 am Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe, Straubing
- WEGENER, G.; ZIMMER, B.; FRÜHWALD, A.; SCHARAI-RAD, M. (1997): Ökobilanzen Holz – Fakten lesen, verstehen und Handeln. Informationsdienst Holz. Deutsche Gesellschaft für Holzforschung e.V. München, 24 S.

- WEINGARTMANN, H. (1992): Hackgutrocknung. Österreichisches Kuratorium für Landtechnik, Institut für Landtechnik und Energiewirtschaft. Universität für Bodenkultur, Landtechnische Schriftenreihe, Heft 178, Wien, 81 S.
- WEISE, G. (2001): LKW- und Containereinsatz. KTBL-Workshop „Landwirtschaftliche Transporte“ Berlin. Veröffentlichung der Beiträge im Internet (www.ktbl.de)
- WEIXLER, H.; FELLER, S.; GÖLDNER, A.; KRAUSENBOECK, B.; REMLER, N.; V. WEBENAU, B.; (1999): Teilmechanisierte Bereitstellung, Lagerung und Logistik von Waldhackschnitzeln. Berichte aus der LWF Nr. 21, Freising
- WEIXLER, H., FELLER, S. (2001): Hackguternte mit einem Mehrfachfällkopf. Ergebnisse eines Versuchseinsatzes. Interner Abschlussbericht, unveröffentlicht
- V. WILPERT, K. (2002): Eckpunkte und wissenschaftliche Begründung eines Holzasche-Kreislaufkonzepts. Holzasche-Ausbringung im Wald, ein Kreislaufkonzept. Berichte Freiburger Forstliche Forschung, Heft 43
- WITTKOPF, S. (2000): Schnitzel trocken in´s Trockene bringen! Top agrar extra, S. 68-69
- WITTKOPF, S.; FEICHT, E.; OHRNER, G. (2002): Holzschnitzel pilz- und sporenfrei lagern! LWFaktuell Nr. 33, S. 35-37
- WITTKOPF, S.; HÖMER, U.; FELLER, S. (2003): Bereitstellungsverfahren für Hackschnitzel. Leistungen, Kosten, Rahmenbedingungen. Berichte aus der LWF Nr. 38, Freising
- WITTKOPF, S.; KRICHBAUM, C.; BAUDISCH, C. (2003): Hackschnitzel aus Fichtenkronen-Energieholznutzung und Waldschutz im Einklang. LWFaktuell Nr. 39, S.7-10
- WITTKOPF, S. (2004): Bündeln von Fichtenkronen mit einem Fiberpack auf LKW. Ergebnisse eines Versuchseinsatzes. Interner Abschlussbericht, unveröffentlicht
- WITTKOPF, S.; NEUGEBAUER, G. (2004): Käfern Brutraum entziehen – In Bayern existiert ein flächendeckendes Netz an Hackerunternehmen. Bayerisches Landwirtschaftliches Wochenblatt, Nr. 22, S. 54
- WORLD WOOD PAC AB (2000): Infoschrift zur Bündelmaschine Wood Pac. Vetlanda, Schweden
- ZANGEMEISTER, C. (1976): Nutzwertanalyse in der Systemtechnik. 4. Auflage. Wittmannsche Buchhandlung, München
- ZOLLNER, A.; REMLER, N.; DIETRICH, H.-P. (1997): Eigenschaften von Holzaschen und Möglichkeiten der Wiederverwertung im Wald. Berichte aus der LWF Nr. 14, 45 S.

10.2 Abbildungen

Abbildung 1: Exemplarische Darstellung von Einflussgrößen bei der Bereitstellung von Energieholz.....	4
Abbildung 2: Aufbau der Arbeit	5
Abbildung 3: Durchschnittliche Zusammensetzung der Pelletproduktionskosten mit und ohne Trocknung der Holzspäne nach THEK (2001)	11
Abbildung 4: Karte der geförderten Heizwerke mit Waldhackschnitzelaufgabe in Bayern (Stand 31.12.2003)	15
Abbildung 5: Entwicklung der Preise für Industrieholz, Fernwärme, Heizöl und Gas; Bezugsjahr 1995; (STATISTISCHES BUNDESAMT 2004, Fachserie 17, Reihen 1 und 2) ..	17
Abbildung 6: Zusammenhang von Wassergehalt und Holzfeuchte	19
Abbildung 7: Auflockerungsfaktor vom Festmaß des Hackholzes, gemessen ohne Rinde (fm o. R.), zu Schüttvolumen Hackschnitzel (Srm)	20
Abbildung 8: Häufigkeitskurven für die Darrdichte bzw. Rohwichte (r_0) nach TRENDELENBURG (aus KOLLMANN 1982)	21
Abbildung 9: Zusammenhang von Rohdichte und Trockenmasse bei Fichte bezogen auf g/cm^3 (Volumen beim jeweiligen Wassergehalt bestimmt) sowie Raumdichte und Trockenmasse in kg/m^3 (mit einmaliger Volumenbestimmung im Fasersättigungsbereich).....	25
Abbildung 10: Vereinfachter Zusammenhang zwischen Holzquellen, Be- und Verarbeitung, stofflicher und energetischer Nutzung von Holz	32
Abbildung 11: Anteile der Baumkompartimente in Abhängigkeit vom Alter für Fichte.....	37
Abbildung 12: Hackholzlagerplatz außerhalb des Waldes bei Greußenheim	40
Abbildung 13: Energieinhalt je Schüttraummeter in Abhängigkeit vom Wassergehalt für Fichte und Buche	42
Abbildung 14: Industrieholzpreise Deutschland 1980 bis 2003, Staatsforsten, Bezugsjahr 2000 (STATISTISCHES BUNDESAMT 2004, Fachserie 17, Reihe 1; Nr. 56, 57, 58, 59, 60)	47
Abbildung 15: Preise für Sägespäne und Sägenebenprodukte, Spanplatten sowie Faserplatten in Deutschland 1980 bis 2003, Bezugsjahr 2000, (STATISTISCHES BUNDESAMT 2004, GENESIS-Online Tabelle 61241-0008).....	47
Abbildung 16: Preise für ausgewählte Energie- und Treibstoffpreise in Deutschland 1980 bis 2003, Bezugsjahr 2000 (STATISTISCHES BUNDESAMT 2004, GENESIS-Online Tabelle 61241-0008)	48
Abbildung 17: Preise für ausgewählte Maschinen in Deutschland 1980 bis 2003, Bezugsjahr 2000 (STATISTISCHES BUNDESAMT 2004, GENESIS-Online Tabellen 61241-0008 und -0010)	49
Abbildung 18: Lohnkosten für ausgewählte Wirtschaftsbereiche in Deutschland, Bezugsjahr 2000 (STATISTISCHES BUNDESAMT 2004, Fachserie 18, Reihe 3.2, GENESIS-Online Tabelle 62321-0101).....	50
Abbildung 19: Beispiel der Preisentwicklung anhand einer vorgeschlagenen Preisgleitklausel, Ausgangsvergütung 1995: 0,02 €/kWh	52

Abbildung 20: Auswahlmöglichkeiten innerhalb des Paarvergleichs der Hauptkriterien	69
Abbildung 21: Umfrage-Beteiligung nach Größenklassen der Biomasse-Nennleistung.....	72
Abbildung 22: Verteilung der an der Umfrage beteiligten Heizwerke nach Größenklassen und Regierungsbezirken	73
Abbildung 23: Anteile der eingesetzten Biomasse	73
Abbildung 24: Anteile der eingesetzten Biomasse bei verschiedenen Heizwerksgrößen	74
Abbildung 25: Anteile der eingesetzten Waldhackschnitzel nach Baumarten in Abhängigkeit von der Heizwerksgröße (in Klammern die gesamte in den beteiligten Heizwerken eingesetzte Menge an Waldhackschnitzeln)	75
Abbildung 26: Der Jahresbedarf an Hackschnitzeln der untersuchten Heizwerke in t atro in Abhängigkeit von der Biomasse-Nennwärmeleistung	76
Abbildung 27: Aktuelle Preise für Biomasse in Abhängigkeit von der Heizwerksgröße	77
Abbildung 28: Streubreite der Waldhackschnitzelpreise in Abhängigkeit von der Heizwerksgröße	77
Abbildung 29: Preise für vertraglich gebundene und vertraglich nicht gebundene Lieferungen von Waldhackschnitzeln (WHS) in Abhängigkeit von der Heizwerksgröße.....	78
Abbildung 30: Anzahl der Heizwerke mit und ohne Lieferverträge für Waldhackschnitzel in Abhängigkeit von der Heizwerksgröße.....	79
Abbildung 31: Zusätzliche Aufgaben der Biomasselieferanten in Abhängigkeit von der Biomasse-Nennleistung	81
Abbildung 32: Tabellenblatt des Berechnungsmodells für Biomasseentnahme und Nährstoffaustrag	84
Abbildung 33: Gegenüberstellung des Biomasse- und Nährstoffaustrags bei der Hackschnitzelgewinnung aus Fichtenkronen; Nährstoffaustrag angegeben als Durchschnittswert für die Elemente N, P, K, Ca und Mg	90
Abbildung 34: Theoretisch und tatsächlich gerücktes Schaffholzvolumen der Kronen in Abhängigkeit vom Aufarbeitungszopf für Fichte	95
Abbildung 35: Industrieholzpreise für Fichte, Kiefer, Buche und Eiche, Quelle: Holzpreisstatistik der Bayerischen Staatsforstverwaltung 1980 bis 2002.....	96
Abbildung 36: Schematische Darstellung der Deckungsbeiträge in Abhängigkeit vom BHD des ausscheidenden Bestandes für Fall 1.....	98
Abbildung 37: Schematische Darstellung der Deckungsbeiträge in Abhängigkeit vom BHD des ausscheidenden Bestandes für Fall 2.....	100
Abbildung 38: Schematische Darstellung der Deckungsbeiträge in Abhängigkeit vom BHD des ausscheidenden Bestandes für Fall 3.....	101
Abbildung 39: Leistung beim Fällen in Abhängigkeit vom BHD.....	103
Abbildung 40: Leistung beim Vorliefern/Rücken in Abhängigkeit vom BHD	104
Abbildung 41: Bündelmaschine Fiberpack beim Einsatz in Ebersberg.....	106
Abbildung 42: Leistung beim Hacken in Abhängigkeit vom BHD.....	107
Abbildung 43: Leistung beim Hackschnitzeltransport in Abhängigkeit von der Transportentfernung	108
Abbildung 44: LKW-Zyklus und Hackerauslastung bei Abstimmung nach Hackkosten und Transportkosten für ein Beispiel.....	112

Abbildung 45: Kosten frei Heizwerk in Abhängigkeit von Entfernung und Optimierungsart	113
Abbildung 46: Zeitgleich benötigte LKW nach optimierten Gesamtkosten.....	114
Abbildung 47: Ablaufabschnitte Logistikkette „Kleinprivatwald“	116
Abbildung 48: Ablaufabschnitte Logistikkette „Seilschlepper“	119
Abbildung 49: Ablaufabschnitte Logistikkette „Rückewagen“	121
Abbildung 50: Ablaufabschnitte Logistikkette „Zangenschlepper“	125
Abbildung 51: Ablaufabschnitte Logistikkette „Hacken auf der Rückegasse“	127
Abbildung 52: Ablaufabschnitte Logistikkette „Harvester“	130
Abbildung 53: Ablaufabschnitte Logistikkette „Hackschnitzel-Harvester“	133
Abbildung 54: Ablaufabschnitte Logistikkette „Mehrfachfällkopf“	136
Abbildung 55: Ablaufabschnitte der Logistikkette „Kronenholz – Rückewagen“	139
Abbildung 56: Ablaufabschnitte Logistikkette „Kronenholz – Bündler“	142
Abbildung 57: Diagramm der Nutzwerte der betrachteten Logistikketten	147
Abbildung 58: Stärken-Schwächen-Profil	148
Abbildung 59: Mehrfachfällkopf.....	154
Abbildung 60: Harvester mit Mehrfachfällkopf bei der Ernte eines Energiewaldes	154
Abbildung 61: Fiberpac auf Forwarder montiert	156
Abbildung 62: Fiberpac auf LKW montiert.....	156
Abbildung 63: Bündelaggregat Wood Pac auf Forwarder	157
Abbildung 64: Austauschbare Vorräte an Mb-Kationen (Ca, Mg und K) bis in 30 cm Bodentiefe (NIEDERBERGER 2003).....	161
Abbildung 65: Schematische Darstellung der Energiebilanz von Nicht-Holzprodukten und der primären Nutzung von Holz als Energieträger verglichen mit der primären stofflichen Nutzung mit anschließender sekundärer energetischen Verwertung von Holz (nach FRÜHWALD 2001, modifiziert).....	163

10.3 Tabellen

Tabelle 1: Produktionskapazität für Holzpellets in Bayern (Stand Ende 2003)	10
Tabelle 2: Angaben verschiedener Autoren zur Raumdichte in kg/m ³ von Fichte, Kiefer, Buche, Eiche und Pappel.....	23
Tabelle 3: Angaben verschiedener Autoren zum Schwindmaß in % des Frischmaßes von Fichte, Kiefer, Buche, Eiche und Pappel.....	23
Tabelle 4: Darrdichte, Rohdichte, Raumdichte und Schwindmaß für ausgewählte Baumarten	24
Tabelle 5: Gleichgewichts-Holzfeuchten bzw. -Wassergehalte in Anhalt an DIN 68100 (1984)	24
Tabelle 6: Umrechnungstabelle für Gewicht und Trockenmasse der Fichte mit und ohne Berücksichtigung des Schwindens.....	25
Tabelle 7: Angaben verschiedener Autoren zur Dichte der Rinde von Fichte, Kiefer, Buche, Eiche und Pappel.....	26
Tabelle 8: Angaben verschiedener Autoren zum Heizwert von Fichte, Kiefer, Buche, Eiche und Pappel in kWh/kg atro	28

Tabelle 9: Angaben verschiedener Autoren zum Heizwert der Rinde von Fichte, Kiefer, Buche, Eiche und Pappel in kWh/kg atro	28
Tabelle 10: Angaben verschiedener Autoren zum Heizwert der Nadeln und Blätter von Fichte, Kiefer, Buche, Eiche und Pappel in kWh/kg atro.....	28
Tabelle 11: Heizwert in Abhängigkeit vom Wassergehalt bezogen auf Gesamtmasse und enthaltene Trockenmasse für Nadelholz und Laubholz	29
Tabelle 12: Waldenergieholzpotentiale in Bayern auf Basis des nachhaltig möglichen Einschlags und die derzeitige Nutzung nach WAGNER und WITTKOPF (2000)	32
Tabelle 13: Technisches Flurholzpotential für Bayern nach WAGNER und WITTKOPF (2000)	35
Tabelle 14: Aufkommen von Industrierestholz in Bayern nach WAGNER und WITTKOPF (2000)	35
Tabelle 15: Nutzung des Industrierestholzes in Bayern nach WAGNER und WITTKOPF (2000)	36
Tabelle 16: Durchschnittliche Biomasseanteile der Baumkompartimente	37
Tabelle 17: Biomasse und Nährstoffgehalte der Baumkompartimente Derbholz m. R., Reisig und Äste sowie Nadeln/Blätter für verschiedene Baumarten nach JACOBSEN et al. (2002)	38
Tabelle 18: Relative Nährstoffgehalte der Baumkompartimente bezogen auf Derbholz m. R.	39
Tabelle 19: Abrechnungstabelle nach Schüttraummetern in Abhängigkeit von Baumart und Wassergehalt (Ausgangswert: Vergütung 0,02 € je kWh Energieinhalt).....	43
Tabelle 20: Abrechnungstabelle nach Tonnen in Abhängigkeit vom Wassergehalt (Ausgangswerte: Energieinhalt der Trockenmasse 5,2 kWh/kg, Vergütung 0,02 € je kWh Energieinhalt).....	44
Tabelle 21: Erlös je Srm Hackschnitzel bei Vergütung nach Wärmemenge (Ausgangswerte: Wassergehalt 30 %, Sollvergütung 0,02 € je kWh Energieinhalt, Nutzungsgrad 80 %)	45
Tabelle 22: Überblick der angewendeten Methoden	53
Tabelle 23: Durchschnittliche Transportgeschwindigkeiten für Schwerlastverkehr auf unterschiedlichen Straßenkategorien	56
Tabelle 24: Übersicht zu den Ablaufabschnitten und Leistungsfunktionen mit Quellenangabe für zehn ausgewählte Logistikketten	58
Tabelle 25: Aufteilung der Zeitarten nach Löffler (1992).....	61
Tabelle 26: Kraftstoffverbrauch und CO ₂ -Emissionen je Maschinenarbeitsstunde	64
Tabelle 27: Definition und Gewichtung der Entscheidungskriterien.....	66
Tabelle 28: Gewichtung der Hauptkriterien im Paarvergleich.....	69
Tabelle 29: Typ und Maßstab der Bewertung für die Einzelkriterien	70
Tabelle 30: Preisdifferenz zwischen vertraglich gebundenen und vertraglich nicht gebundenen Waldhackschnitzeln (WHS) in Abhängigkeit von der Heizwerksgröße (MW = Mittelwert)	79
Tabelle 31: Verwendete Indices für Preisanpassungsklauseln.....	80
Tabelle 32: Anbieter für Waldhackschnitzel	82
Tabelle 33: Preise für Waldhackschnitzel in Abhängigkeit von Heizwerksgröße und Anbieter	82

Tabelle 34: Theoretisch mögliche Biomasse-Entnahme im Beispiel „München“	86
Tabelle 35: Tatsächliche Biomasse-Entnahme im Beispiel „München“	87
Tabelle 36: Im Bestand verbleibende Biomasse im Beispiel „München“	87
Tabelle 37: Theoretisch möglicher und tatsächlicher Nährstoffaustrag am Beispiel „München“	89
Tabelle 38: Maximal mögliche Mehrausbeute, Mehrausbeute bei Vollbaumnutzung sowie bei Nutzung von Stammholz und Kronen jeweils bezogen auf Derbholz mit Rinde für ausgewählte Baumarten	92
Tabelle 39: Mehrausbeuten für Fichte bezogen auf das Kompartiment Derbholz mit Rinde in Abhängigkeit vom Alter	93
Tabelle 40: Ertragstafel für Mehrausbeuten bezogen auf verschieden intensive Nutzungsverfahren für Fichte	94
Tabelle 41: Tatsächlicher Anfall an Hackschnitzeln je Krone in Abhängigkeit vom Durchmesser des Kronenfußes für Fichte	95
Tabelle 42: Beispiel der Deckungsbeiträge (DB) in €/t atro bei vollmechanisierter Bereitstellung von Industrieholz frei Waldstraße im Vergleich zur Bereitstellung von Hackschnitzeln frei Werk mit der Logistikkette „Zangenschlepper“ für Fichte	99
Tabelle 43: Beispiel der Deckungsbeiträge in €/t atro bei vollmechanisierter Bereitstellung von Industrieholz frei Waldstraße im Vergleich zur Bereitstellung von Hackschnitzeln frei Werk mit der Logistikkette „Zangenschlepper“ für Kiefer	100
Tabelle 44: Beispiel der Deckungsbeiträge in €/t atro bei vollmechanisierter Bereitstellung von Industrieholz frei Waldstraße im Vergleich zur Bereitstellung von Hackschnitzeln frei Werk mit der Logistikkette „Zangenschlepper“ für Buche	101
Tabelle 45: Eingangsdaten für die Abstimmung von Hack- und Transportleistung	110
Tabelle 46: Zwischenergebnis der Abstimmung von Hack- und Transportleistung	110
Tabelle 47: Ergebnis der Abstimmung von Hack- und Transportkosten	111
Tabelle 48: Aufschlüsselung der Dauer eines LKW-Zyklus im Beispiel	111
Tabelle 49: Maschinenausrüstung Logistikkette „Kleinprivatwald“	115
Tabelle 50: Leistung und Kosten der Logistikkette „Kleinprivatwald“	116
Tabelle 51: Beurteilung der Logistikkette „Kleinprivatwald“ für Fichte	117
Tabelle 52: Maschinenausrüstung Logistikkette „Seilschlepper“	118
Tabelle 53: Leistung und Kosten der Logistikkette "Seilschlepper"	119
Tabelle 54: Beurteilung der Logistikkette „Seilschlepper“ für Fichte	120
Tabelle 55: Maschinenausrüstung Logistikkette "Rückewagen"	121
Tabelle 56: Leistung und Kosten der Logistikkette "Rückewagen"	122
Tabelle 57: Beurteilung der Logistikkette „Rückewagen“ für Fichte	123
Tabelle 58: Maschinenausrüstung Logistikkette „Zangenschlepper“	124
Tabelle 59: Leistung und Kosten der Logistikkette "Zangenschlepper"	125
Tabelle 60: Beurteilung der Logistikkette „Zangenschlepper“ für Fichte	126
Tabelle 61: Maschinenausrüstung Logistikkette „Hacken auf der Rückegasse“	127
Tabelle 62: Leistung und Kosten der Logistikkette "Hacken auf der Rückegasse"	128
Tabelle 63: Beurteilung der Logistikkette „Hacken auf der Rückegasse“	129
Tabelle 64: Maschinenausrüstung Logistikkette „Harvester“	130

Tabelle 65: Leistung und Kosten der Logistikkette "Harvester"	131
Tabelle 66: Beurteilung der Logistikkette „Harvester“ für Fichte	132
Tabelle 67: Maschinenausrüstung Logistikkette „Hackschnitzel-Harvester“	133
Tabelle 68: Leistung und Kosten der Logistikkette „Hackschnitzel-Harvester“	134
Tabelle 69: Beurteilung der Logistikkette „Hackschnitzel-Harvester“ für Fichte	135
Tabelle 70: Maschinenausrüstung Logistikkette „Mehrfachfällkopf“	136
Tabelle 71: Leistung und Kosten der Logistikkette "Mehrfachfällkopf"	137
Tabelle 72: Beurteilung der Logistikkette „Mehrfachfällkopf“ für Fichte	138
Tabelle 73: Maschinenausrüstung Logistikkette „Kronenholz – Rückewagen“	139
Tabelle 74: Leistung und Kosten der Logistikkette "Kronenholz – Rückewagen"	140
Tabelle 75: Beurteilung der Logistikkette „Kronenholz – Rückewagen“	141
Tabelle 76: Maschinenausrüstung Logistikkette „Kronenholz – Bündler“	142
Tabelle 77: Leistung und Kosten der Logistikkette „Kronenholz – Bündler“	143
Tabelle 78: Beurteilung der Logistikkette „Kronenholz – Bündler“	144
Tabelle 79: Kenndaten der ausgewählten Logistikketten für BHD 15 cm	145
Tabelle 80: Kraftstoffverbrauch, Energieaufwand und CO ₂ -Emission je Schüttraummeter Hackschnitzel der ausgewählten Logistikketten	146
Tabelle 81: Nährstoffvorräte auf unterschiedlichen Standorten (KREUTZER, 1979)	159
Tabelle 82: Nährstoffvorrat für verschiedene geologische Ausgangsgesteine in Bayern....	159
Tabelle 83: Möglichkeiten für forstliche Nutzung von Kronen- und Restholz bei unterschiedlichen Nährstoffvorräten im Boden	162

10.4 Abkürzungen

LWF	Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft	MAS	Maschinenarbeitsstunde
CO ₂	Kohlendioxid	GAZ	Gesamte Arbeitszeit
Srm	Schüttraummeter	RAZ	Reine Arbeitszeit
rm	Raummeter, Ster	AZ	Allgemeine Zeiten
fm	Festmeter	N	Stickstoff
Fm o. R.	Festmeter ohne Rinde	P	Phosphor
Fm m. R.	Festmeter mit Rinde	K	Kalium
Vfm	Vorratsfestmeter	Ca	Calcium
IL	Industrieholz lang	Mg	Magnesium
IS	Industrieholz kurz	a	Jahr
kWh	Kilowattstunde	ha	Hektar
MWh	Megawattstunde	WG	Wassergehalt
t atro	Tonne Trockenmasse		

11 Anhang

1	Übersicht zu den angenommenen Lohn- und Maschinenkosten	191
2	Übersicht der angenommenen Kraftstoffverbrauche.....	192
3	Umrechnung von Festmeterwerten auf BHD	192
4	Formeln zur Anpassung der Transportlogistik an die Hackerleistung	193
5	Fragebogen zur Umfrage bei den geförderten Bayerischen Heizwerken	195
6	Anteile der Baumkompartimente in Abhängigkeit vom Alter für Fichte, Kiefer und Buche nach JACOBSEN et al. (2002).....	200
7	Massenkorrekturfaktoren für Fichte nach KRAMER und AKÇA (1995)	201
8	Ertragstafeln für Mehrausbeuten bezogen auf verschieden intensive Nutzungsverfahren für Kiefer, Buche und Eiche.....	202
9	Umrechnungstabellen für Dichten mit und ohne Volumenschwund für Kiefer, Buche, Eiche und Pappel	203
10	Schüttdichten in kg/Srm für Hackschnitzel aus Fichte, Kiefer, Buche, Eiche und Pappel.....	205
11	Formeln zur Berechnung des Substitutionswertes von Hackgut und Industrieholz	206
12	Empfehlungen zur Lagerung von Hackschnitzeln.....	207

1 Übersicht zu den angenommenen Lohn- und Maschinenkosten

Kostensätze Arbeitskräfte

Arbeitskraft	Verfahren Lohnkosten	
	Art	Nummer in €/h
Arbeitskräfte und Maschinenführer landwirtschaftlicher Maschinenringe, Eigenleistung des Waldbesitzers	1, 2, 3	10
Arbeitskräfte bei Unternehmereinsatz	4 bis 10	25

Kostensätze für eingesetzte Maschinen

Teilarbeit	Maschine	Verfahren	Motorleistung	Maschinenkosten
		Nummer	in kW	in €/h
Fällen				
	Motorsäge	1, 2, 3, 4, 5	2,5	6,4
	Harvester	6	70	100
	Harvester mit Mehrfachfällkopf	8	70	95
Vorliefern/Rücken/Bündeln				
	Schlepper mit Rückewagen	3	70	55
	Seilschlepper	2, 3, 4, 5	50	25
	Zangenschlepper	4	90	30
	Forwarder	6, 7, 8	55	60
	Bündler auf LKW	10	353	180
Hacken				
	Schlepper mit Anbauhacker	1	50	30
	Schlepper mit Anhängenhacker	2, 3, 4	70	60
	Aufbauhacker auf Forwarder	5	95	190
	Hackschnitzelharvester	7	130	140
	Aufbauhacker auf LKW	6, 8, 10	235	90
Transport				
	Schlepper mit 2 Hängern	1, 2, 3	75	50
	LKW mit 2 Containern	4 bis 10	290	30

2 Übersicht der angenommenen Kraftstoffverbräuche

Teilarbeit	Maschine	Verfahren Nummer	Motorleistung in kW	Verbrauch in l/MAS	Funktion	Quelle
Fällen						
	Motorsäge	1, 2, 3, 4, 5	2,5	0,9	"=(-0,0694+0,6677*max. Motorleistung (kW))*Auslastungsfaktor 0,5)/Dieseläquivalent 0,9"	Pausch (2002); Löffler (1991)
	Harvester	6, 8	70	11,0	"=(8,66+0,034*max. Motorleistung)"	Pausch (2002)
Vorliefern/Rücken/Bündeln						
	Schlepper mit Rückewagen	3	70	6,3	"=0,09*Motorleistung"	Löffler (1991)
	Seilschlepper	2, 3, 4, 5	50	4,5	"=0,09*Motorleistung"	Löffler (1991)
	Zangenschlepper	4	90	8,1	"=0,09* Motorleistung"	Löffler (1991)
	Forwarder	6, 7, 8	55	5,4	"=(1,062+0,0786* Motorleistung)"	Pausch (2002)
	Bündler auf LKW	10	353	11,3	"=0,6 l je Srm"	Wittkopf (2004)
Hacken						
	Schlepper mit Anbauhacker	1	50	9,0	"(1 Liter je Srm)"	Hakkila (1989)
	Schlepper mit Anhängenhacker	2, 3, 4	70	20,8	"(1 Liter je Srm)"	Hakkila (1989)
	Aufbauhacker auf Forwarder	5	95	26,3	"=1 Liter je Srm + (1,062+0,0786* Motorleistung)"	Hakkila (1989); Pausch(2002)
	Hackschnitzelharvester	7	130	33,6	"=1l je Srm + (8,66+0,034*max. Motorleistung)"	Hakkila (1989), Feller et al. (1998), Pausch (2002)
	Aufbauhacker auf LKW	6, 8, 10	235	35,0	"(1 Liter je Srm)"	Hakkila, 1989; Stampfer et al. (1997)
Transport						
	Schlepper mit 2 Hängern	1, 2, 3	75	20,0	60 Liter/Stunde; 33 km Durchschnittsgeschwindigkeit; ergibt 20 l/h	Weise (2001)
	LKW mit 2 Containern	4 bis 10	290	70,0	35 Liter/100 km, 50 km/h Durchschnittsgeschwindigkeit; ergibt 70 l/h	Deutsches Verkehrsforum (2001), Schuhbauer (2004)

3 Umrechnung von Festmeterwert auf BHD

Grundlage der Umrechnung sind Baumkurven, welche die LWF 1999 im Rahmen der Timberchipper-Studie in einem Durchforstungsbestand im Bereich des Forstamts Geisenfeld an Fichte ermittelte. Die damals vorgefundenen Formigkeitswerte lassen sich nicht ohne weiteres auf andere Studien übertragen.

BHD in cm	Volumen in fm o.R.		Volumen in fm m.R.		BHD in cm	Volumen in fm m.R.		Volumen in fm o.R.		BHD in cm
10	0,035	0,043	0,035	0,043	10,0	0,035	0,028	0,035	0,028	9,14
11	0,046	0,056	0,04	0,048	10,5	0,04	0,033	0,04	0,033	9,63
12	0,059	0,071	0,05	0,060	11,4	0,05	0,042	0,05	0,042	10,5
13	0,074	0,087	0,075	0,088	13,1	0,075	0,064	0,075	0,064	12,3
14	0,091	0,105	0,1	0,116	14,5	0,1	0,086	0,1	0,086	13,8
15	0,109	0,126	0,125	0,143	15,8	0,125	0,109	0,125	0,109	15,0
16	0,130	0,148	0,15	0,171	16,9	0,15	0,132	0,15	0,132	16,2
17	0,152	0,171	0,175	0,198	18,0	0,175	0,155	0,175	0,155	17,2
18	0,176	0,197	0,2	0,224	19,0	0,2	0,178	0,2	0,178	18,1
19	0,201	0,224	0,225	0,251	19,9	0,225	0,202	0,225	0,202	18,9
20	0,229	0,254	0,25	0,277	20,5	0,25	0,226	0,25	0,226	19,7

Funktionen:

$$BHD = 0,0009 * V_{(o.R.)}^2 - 0,0076 * V + 0,0209$$

$$V_{(o.R.)} = 34,178 * BHD^{0,3694}$$

$$BHD = 0,0009 * V_{(m.R.)}^2 - 0,0063 * V + 0,0146$$

$$V_{(m.R.)} = 33,985 * BHD^{0,3918}$$

4 Formeln zur Anpassung der Transportlogistik an die Hackerleistung

Mit den folgenden Formeln kann bestimmt werden, wie viele LKW zeitgleich im Einsatz sein müssen für eine konkrete Hackaktion. Um zu errechnen, wie viele LKW-Fahrten insgesamt nötig sind, muss der Quotient aus gesamtem Hackschnitzelvolumen und Transportvolumen eines einzelnen LKW errechnet werden!

Eingangsgrößen:

Parameter	Abkürzung	Einheit
Maximale Hackerleistung	$I_{max}(H)$	Srm/h
Hackerkosten	$k(H)$	€/h
LKW-Kosten	$k(LKW)$	€/h
Container je LKW	$c(LKW)$	Stück
Containergröße	$g(C)$	m ³
Füllungsgrad	$f(C)$	%
Containerinhalt ⁵³	$i(C)$	Srm
Transportgeschwindigkeit	$v(LKW)$	km/h
Einfache Entfernung	$d(LKW)$	km
Abladezeit/Wartezeit	$z_a(LKW)$	h

Zwischenergebnisse:

Ergebnisgröße	Abkürzung	Formel	Einheit
Ladezeit	$z_{lad}(LKW)$	$= [c(LKW) * i(C)] / I_{max}(H)$	h
Fahrzeit	$z_{fahr}(LKW)$	$= [d(LKW) * v(LKW)] * 2$	h
Min.-Zeitbedarf/ LKW-Zyklus	$z_{min}(LKW)$	$= z_{lad}(LKW) + z_{fahr}(LKW) + z_a(LKW)$	h/Zyklus
Maximale. Leistung je LKW	$I_{max}(LKW)$	$= [c(LKW) * i(C)] / z_{min}(LKW)$	Srm/h
Zeitgleich benötigte LKW	$n(LKW)$	$= I_{max}(H) / I_{max}(LKW)$	Stück

Für die Optimierung der Hackkosten wird der Wert für die zeitgleich benötigten LKW, $n(LKW)$, auf eine ganze Zahl aufgerundet, für die Optimierung der Transportkosten wird $n(LKW)$ auf eine ganze Zahl abgerundet.

⁵³ Der Containerinhalt ergibt sich aus Containergröße und Füllungsgrad: $i(C) = g(C) * f(C)$

Optimierung Hackkosten

Ergebnisgröße	Abkürzung	Formel	Einheit
Benötigte LKW gerundet	$n_{opt}(LKW)$	=Aufrunden $n(LKW)$	Stück
Wartezeit Wald	Hacker	$z_w(H)$	h je h für Hacker
	LKW	$z_w(LKW)$	h je Zyklus
Dauer LKW-Zyklus	$z(LKW)$	= $z_{min}(LKW)+z_w(LKW)$	h
Tatsächliche Leistung je LKW	$l(LKW)$	= $l_{max}(H)/n_{opt}(LKW)$	Srm/h
Tatsächliche Leistung Hacker	$l(H)$	= $l_{max}(H)$	Srm/h
Kosten Hacken	$k_{Srm}(H)$	= $k(H)/l(H)$	€/Srm
Kosten Transport	$k_{Srm}(T)$	= $[k(LKW)/l(LKW)]$	€/Srm
Gesamtkosten je Srm	$k_{Srm}(G)$	= $k_{Srm}(H)+k_{Srm}(T)$	€/Srm

Optimierung Transportkosten

Ergebnisgröße	Abkürzung	Formel	Einheit
Benötigte LKW gerundet	$n_{opt}(LKW)$	=Abrunden $n(LKW)$	Stück
Wartezeit Wald	Hacker	$w(H)=[z_{min}(LKW)-[n_{opt}(LKW)*[c(LKW)*i(C)]]]/n_{opt}(LKW)$	h je h für Hacker
	LKW	$w(LKW)=0$	h je Zyklus
Dauer LKW-Zyklus	$z(LKW)$	= $z_{min}(LKW)$	h
Tatsächliche Leistung je LKW	$l(LKW)$	= $l_{max}(LKW)$	Srm/h
Tatsächliche Leistung Hacker	$l(H)$	= $l(LKW)*n_{opt}(LKW)$	Srm/h
Kosten Hacken	$k_{Srm}(H)$	= $k(H)/l(H)$	€/Srm
Kosten Transport	$k_{Srm}(T)$	= $k(LKW)/l(LKW)$	€/Srm
Gesamtkosten je Srm	$k_{Srm}(G)$	= $k_{Srm}(H)+k_{Srm}(T)$	€/Srm

Die Höhe der Gesamtkosten je Srm gibt letztendlich den Ausschlag, ob nach Hackkosten oder Transportkosten optimiert wird.

5 Fragebogen zur Umfrage bei den geförderten Bayerischen Heizwerken

Fax-Nr. 08161/71-4971

An die
Bayerische Landesanstalt
für Wald und Forstwirtschaft
Projekt Holzenergie
Am Hochanger 11

85354 Freising

Absender:

.....
(freiwillige Angabe)

1 In welchem Regierungsbezirk liegt ihr Heiz(kraft)werk?

2.1 Wie hoch ist die installierte Leistung bei ihrem Heiz(kraft)werk?

	Gesamtleistung	Biomassekessel	
Installierte Leistung	(kW)

2.2 Welche thermische und elektrische Energie wurde 2001 bei ihrem Heiz(kraft)werk tatsächlich realisiert?

	Biomassekessel	Gesamtenergie	
Thermische Energie	(MWh)
Elektrische Energie	(MWh)

3.1 Wie hoch war der Biomassebedarf ihres Heiz(kraft)werkes im Jahr 2001?

(Wassergehalt = Gewicht Wasser/Gewicht Frischmasse; atro = absolut trocken)

- in Schüttraummetern (Srm): (Srm)
- bzw. in Tonnen: (t) atro
 - Wassergehalt < 30 %
 - Wassergehalt %

3.2 Wird für Waldhackschnitzel mit höherem Wassergehalt weniger bezahlt?

- Ja
- Nein

Wenn Ja, wie staffeln Sie die Preise?

.....
.....

4.1 Die eingesetzte Biomasse setzt sich im Jahr 2001 zusammen aus:

- Sägerestholz (z. B. Sägespäne, Hackschnitzel, Rinde, Schwarten) %
- Waldhackschnitzel %
- Flurholz %
- Sonstige Biomasse; z. B.: %

4.2 Die dabei verwendeten Waldhackschnitzel setzen sich aus folgenden Baumarten zusammen:

- Fichte %
- Kiefer %
- Eiche %
- Buche %
- Sonst. Baumarten: %

5 Wie erfolgt die Abrechnung der Biomasse frei Werk?

- nach Volumen (Srm) und Wassergehalt
- nach Volumen (Srm)
- nach Gewicht (t) und Wassergehalt
- nach Gewicht (t)
- nach produzierter Wärme (MWh)

6 Von welchen Anbietern bezogen Sie 2001 wie viel Biomasse? Welche Preise haben Sie 2001 dafür bezahlt?

	Anbieter	Menge			Preis**	
		Srm	Tonne	MWh	DM	€
Sägerestholz	Eigene Produktion*					
	Sägewerke					
	Handelsunternehmen					
	Rinde					
	Sonstige:					
Waldhackschnitzel	Eigene Produktion*					
	Waldbesitzer- vereinigungen (WBV)					
	Privatwaldbesitzer					
	Handelsunternehmen					
	Sonstige:					
Flurholz	Eigene Produktion*					
	Sonstige:					
Sonstige Biomasse	Eigene Produktion*					
	Sonstige:					

*: Die Biomasse fällt im eigenen Werk an (bitte Gestehungskosten angeben)

** : Preise können wahlweise in **DM** oder in **€** angegeben werden

7 Lieferverträge im Jahr 2001

7.1 Haben Sie einen/mehrere langfristige(n) Liefervertrag (-verträge) über Waldhackschnitzel mit einem/mehreren Ihrer Lieferanten abgeschlossen?

- Ja Nein

Wenn Ja, mit wem?

Laufzeit des Vertrages in Monaten

- Forstunternehmer
- Handelsunternehmen
- Waldbesitzervereinigungen
- Privatwaldbesitzer
- Sonstige, z. B.

7.2 Wie haben Sie bei der Fixierung des Liefervertrages den Preis für Waldhackschnitzel über die Laufzeit festgelegt?

- fester Preis über die gesamte Laufzeit
- Monats-/ Quartals-/ Jahrespreise
- Sonstiges
-

7.3 Wenn Sie Preisanpassungsklauseln verwenden, an welche Indices sind diese gebunden?

Index	Anteil in %	Quelle
Heizöl		
Gas		
Diesel		
Fernwärme		
Spreißel-Schwarten		
Sonstiges:		

7.4 Hat Ihr Lieferant weitere Aufgaben übernommen?

- Ascheentsorgung

- Reinigung
- Anlagenwartung
- Sonstiges.....

8 Ist die gesamte Menge an Waldhackschnitzeln vertraglich gebunden?

- Ja Nein

Wenn Nein, welcher Anteil an Waldhackschnitzel ist vertraglich gebunden?

..... %

Woher beziehen Sie die vertraglich nicht gebundene Menge an Waldhackschnitzel?

Mengen in Srm t MWh

- Forstunternehmer
- Waldbesitzervereinigungen
- Privatwaldbesitzer
- Handelsunternehmen
- Sonstige:

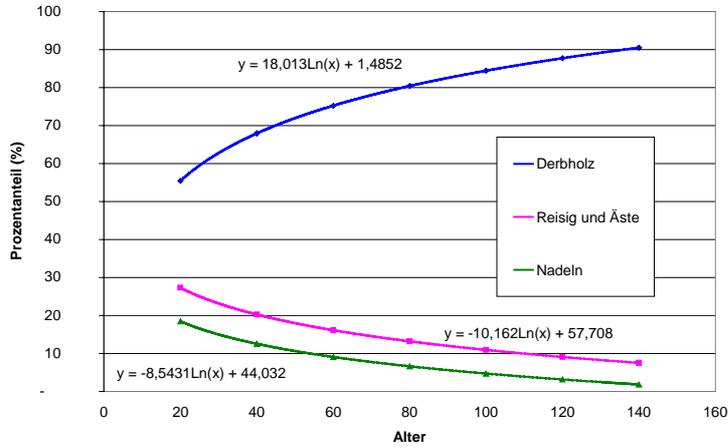
Welchen Preis bezahlen Sie für vertraglich gebundene Waldhackschnitzel?

Welchen Preis bezahlen Sie für vertraglich ungebundene Waldhackschnitzel?

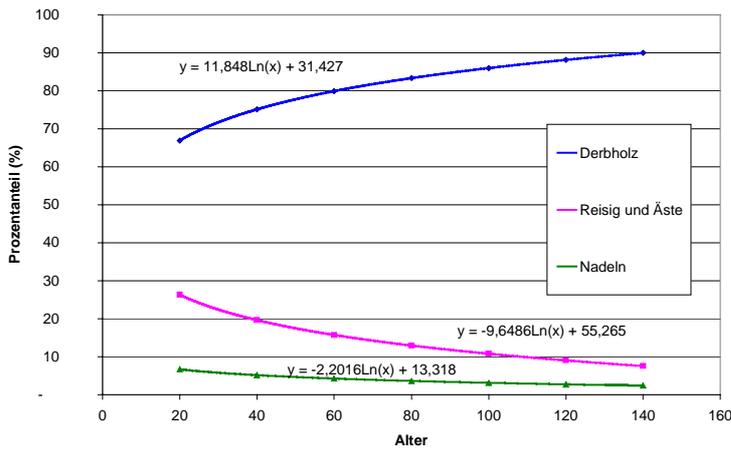
Haben Sie herzlichen Dank für Ihre Mitarbeit. Die von Ihnen angegebenen Daten werden selbstverständlich vertraulich behandelt. Veröffentlicht werden lediglich Mittelwerte und Trends. Rückschlüsse auf ihr Heizkraftwerk sind daraus nicht möglich.

6 Anteile der Baumkompartimente in Abhängigkeit vom Alter für Fichte, Kiefer und Buche nach JACOBSEN et al. (2002)

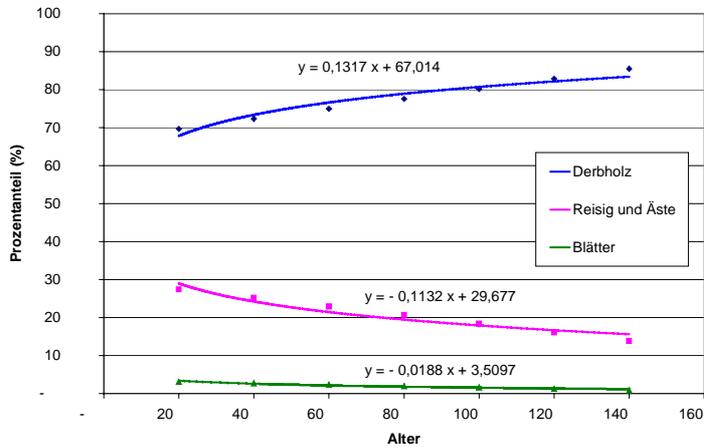
Fichte



Kiefer



Buche



7 Massenkorrekturfaktoren für Fichte nach KRAMER und AKÇA (1995)

Verkürzte Schätztafel zur Ermittlung des Stamminhalts von Einzelbäumen bei unterschiedlicher Zopfstärke in fm Derbholz mit Rinde (auch für anderes Nadelholz zu verwenden) nach KRAMER und AKÇA, A. (1995, S. 218).

BHD	Zopf 7	Zopf 10	Zopf 15	Zopf 20
10	100	28	-	-
11	100	44	-	-
12	100	59	-	-
13	100	71	-	-
14	100	81	-	-
15	100	88	16	-
16	100	92	33	-
17	100	95	46	-
18	100	96	58	-
19	100	96	67	-
20	100	96	75	13
21	100	97	81	27
22	100	97	85	38
23	100	98	87	37
24	100	98	89	56
25	100	99	90	62
26	100	99	91	68
27	100	99	92	73
28	100	99	93	76
29	100	99	94	79
30	100	99	95	82
32	100	99	96	86
34	100	99	97	89
36	100	100	98	92
38	100	100	98	93
40	100	100	98	94
45	100	100	99	96
50	100	100	99	97
55	100	100	99	98
60	100	100	100	98

Anwendungsbeispiel

Fichte, ausscheidender Bestand BHD 32 cm, gezopft bei 15 cm mit Rinde. Tabellenwert: 96. Das bedeutet, dass 95 % des Derbholzes mit Rinde auf den Stamm entfallen. Die restlichen 4 % enthält das Stück oberhalb des Zopfes.

8 Ertragstabellen für Mehrausbeuten bezogen auf verschieden intensive Nutzungsverfahren für Kiefer, Buche und Eiche

Kiefer

Baumart: Kiefer; Ertragstafel: Wiedemann II.0; Umtriebszeit: 120 Jahre

Nutzungsart	JP			JD			AD			VJ		
	0 - 20			20 - 60			60 - 90			90 - 120		
Altersspanne												
Bezugsmaß	Vfm/ha	Srm/ha	t atro/ha	Vfm/ha	Srm/ha	t atro/ha	Vfm/ha	Srm/ha	t atro/ha	Vfm/ha	Srm/ha	t atro/ha
Stammholzvorrat zur Mitte des Zeitabschnitts	30	75	13	245	613	106	371	928	160	434	1085	187
Biomassevorrat des gesamten Bestandes zur Mitte des Zeitabschnitts (Vollbaum)	-	112	48	-	817	352	-	1117	482	-	1247	538
Entnahme (Stammholz) während des gesamten Zeitraums der Nutzungsart	12	30	5	128	320	55	156	390	67	434	1085	187
Anzahl der Eingriffe je Nutzungsart	2			2			2			3		
Durchschnittlicher Entnahmesatz je Eingriff bei Stammholznutzung	6	15	2,6	50	125	22	70	175	30	121	303	52
Theoretischer zusätzlicher Biomasseanfall (Äste und Nadeln) je Eingriff	-	7	1,3	-	42	7	-	36	6	-	45	8
Zusätzlicher Anfall bei motormanueller Vollbaumnutzung je Eingriff (Variante 50%)	-	3	0,5	-	18	3	-	16	3	-	21	4
Zusätzlicher Biomasseanfall bei Nutzung der Kronen je Eingriff (Variante 33%)	-	2	0,3	-	11	2	-	11	2	-	14	2

Buche

Baumart: Buche; Ertragstafel: Wiedemann, Ertragsklasse II.0; Umtriebszeit 140 Jahre

Nutzungsart	JP*			JD			AD			VJ		
	0 - 20			20 - 50			50 - 100			100 - 140		
Altersspanne												
Bezugsmaß	Vfm/ha	Srm/ha	t atro/ha	Vfm/ha	Srm/ha	t atro/ha	Vfm/ha	Srm/ha	t atro/ha	Vfm/ha	Srm/ha	t atro/ha
Stammholzvorrat zur Mitte des Zeitabschnitts	20	50	11	68	170	38	392	980	219	595	1488	332
Biomassevorrat des gesamten Bestandes zur Mitte des Zeitabschnitts (Vollbaum)	-	71	40	-	236	132	-	1273	710	-	1792	1000
Entnahme (Stammholz) während des gesamten Zeitraums der Nutzungsart	2	5	1	60	150	33	120	300	67	595	1488	332
Anzahl der Eingriffe je Nutzungsart	1			2			2			4		
Durchschnittlicher Entnahmesatz je Eingriff bei Stammholznutzung	2	5	1,1	30	75	17	60	150	33	149	372	83
Theoretischer zusätzlicher Biomasseanfall (Äste) je Eingriff	-	2	0,5	-	29	7	-	45	10	-	76	17
Zusätzlicher Anfall bei motormanueller Vollbaumnutzung je Eingriff (Variante 50%)	-	1	0,2	-	12	3	-	19	4	-	35	8
Zusätzlicher Biomasseanfall bei Nutzung der Kronen je Eingriff (Variante 33%)	-	1	0,1	-	8	2	-	12	3	-	22	5

*Werte geschätzt, da Ertragstafel erst mit Alter 25 beginnt

Eiche

Baumart: Eiche; Ertragstafel: Jüttner, Ertragsklasse II.0; Umtriebszeit: 140 Jahre

Nutzungsart	JP*			JD			AD			VJ		
	0 - 20			20 - 60			60 - 120			120 - 180		
Altersspanne												
Bezugsmaß	Vfm/ha	Srm/ha	t atro/ha	Vfm/ha	Srm/ha	t atro/ha	Vfm/ha	Srm/ha	t atro/ha	Vfm/ha	Srm/ha	t atro/ha
Stammholzvorrat zur Mitte des Zeitabschnitts	20	50	11	110	275	63	325	813	186	452	1130	258
Biomassevorrat des gesamten Bestandes zur Mitte des Zeitabschnitts (Vollbaum)	-	71	41	-	382	218	-	1028	587	-	1299	742
Entnahme (Stammholz) während des gesamten Zeitraums der Nutzungsart	4	10	2	50	125	29	120	300	69	452	1130	258
Anzahl der Eingriffe je Nutzungsart	2			2			2			4		
Durchschnittlicher Entnahmesatz je Eingriff bei Stammholznutzung	2	5	1,1	25	62,5	14	60	150	34	113	283	65
Theoretischer zusätzlicher Biomasseanfall (Äste) je Eingriff	-	2	0,5	-	24	6	-	40	9	-	42	10
Zusätzlicher Anfall bei motormanueller Vollbaumnutzung je Eingriff (Variante 50%)	-	1	0,2	-	10	2	-	18	4	-	20	4
Zusätzlicher Biomasseanfall bei Nutzung der Kronen je Eingriff (Variante 33%)	-	1	0,1	-	6	1	-	11	3	-	13	3

*Werte geschätzt, da Ertragstafel erst mit Alter 25 beginnt

9 Umrechnungstabellen für Dichten mit und ohne Volumenschwund für Kiefer, Buche, Eiche und Pappel

Kiefer Wassergehalt	Fall 1: Ein über Fasersättigung ($w = 25\%$) gemessener fm Holz		Fall 2: Ein beim jeweiligen Wassergehalt gemessener fm Holz		
	[%]	Gewicht [kg]	Trockenmasse [kg]	Gewicht [kg]	Trockenmasse [kg]
0	431	431	490	490	114
5	453	431	503	478	111
10	479	431	518	466	108
15	507	431	535	454	105
20	538	431	553	443	103
25	574	431	574	431	100
30	615	431	615	431	100
35	663	431	663	431	100
40	718	431	718	431	100
45	783	431	783	431	100
50	861	431	861	431	100
55	957	431	957	431	100
60	1.077	431	1.077	431	100

Buche Wassergehalt	Fall 1: Ein über Fasersättigung ($w = 25\%$) gemessener fm Holz		Fall 2: Ein beim jeweiligen Wassergehalt gemessener fm Holz		
	[%]	Gewicht [kg]	Trockenmasse [kg]	Gewicht [kg]	Trockenmasse [kg]
0	680	558	558	680	122
5	656	558	588	690	118
10	631	558	620	701	113
15	607	558	657	714	109
20	583	558	698	728	104
25	558	558	744	744	100
30	558	558	798	798	100
35	558	558	859	859	100
40	558	558	930	930	100
45	558	558	1.015	1.015	100
50	558	558	1.117	1.117	100
55	558	558	1.241	1.241	100
60	558	558	1.396	1.396	100

Eiche	Fall 1: Ein über Fasersättigung		Fall 2: Ein beim jeweiligen Wassergehalt		
	(w = 25 %) gemessener fm Holz		gemessener fm Holz		
Wassergehalt	Gewicht [kg]	Trockenmasse [kg]	Gewicht [kg]	Trockenmasse [kg]	[%] von Fall 1
0	571	571	650	650	114
5	601	571	668	634	111
10	634	571	687	618	108
15	671	571	709	602	105
20	713	571	733	587	103
25	761	571	761	571	100
30	815	571	815	571	100
35	878	571	878	571	100
40	951	571	951	571	100
45	1.038	571	1.038	571	100
50	1.141	571	1.141	571	100
55	1.268	571	1.268	571	100
60	1.427	571	1.427	571	100

Pappel	Fall 1: Ein über Fasersättigung		Fall 2: Ein beim jeweiligen Wassergehalt		
	(w = 25 %) gemessener fm Holz		gemessener fm Holz		
Wassergehalt	Gewicht [kg]	Trockenmasse [kg]	Gewicht [kg]	Trockenmasse [kg]	[%] von Fall 1
0	353	353	410	410	116
5	372	353	420	399	113
10	393	353	430	387	110
15	416	353	442	376	107
20	442	353	456	365	103
25	471	353	471	353	100
30	505	353	505	353	100
35	544	353	544	353	100
40	589	353	589	353	100
45	643	353	643	353	100
50	707	353	707	353	100
55	785	353	785	353	100
60	884	353	884	353	100

10 Schüttdichten in kg/Srm für Hackschnitzel aus Fichte, Kiefer, Buche, Eiche und Pappel

Angaben für Hackschnitzel, wie sie im Wald anfallen (Volumenschwund unterhalb des Fasersättigungspunktes sowie ev. Verdichtung durch Transport nicht berücksichtigt). Grau hervorgehoben sind die in der Praxis gängigen Werte für die Wassergehalte 0 % (t atro), 30 % (bedingt lagerfähig), 40 % (vorgetrocknet) und 50 % (waldfrisch).

Wie viel wiegt ein Srm Hackschnitzel?

Wassergehalt [%]	Fichte [kg/Srm]	Kiefer [kg/Srm]	Buche [kg/Srm]	Eiche [kg/Srm]	Pappel [kg/Srm]
0	152	172	223	228	141
5	160	181	235	240	149
10	168	192	248	254	157
15	178	203	263	269	166
20	190	216	279	286	177
25	202	230	298	305	188
30	217	246	319	326	202
35	233	265	343	351	217
40	253	287	372	381	235
45	276	313	406	415	257
50	303	345	446	457	282
55	337	383	496	508	314
60	379	431	558	571	353

Wie viele Srm Hackschnitzel werden für eine t atro (WG 0 %) oder eine t bei bestimmtem Wassergehalt benötigt?

Volumen je	Fichte [Srm]	Kiefer [Srm]	Buche [Srm]	Eiche [Srm]	Pappel [Srm]
t atro	6,6	5,8	4,5	4,4	7,1
t WG 5 %	6,3	5,5	4,3	4,2	6,7
t WG 10 %	5,9	5,2	4,0	3,9	6,4
t WG 15 %	5,6	4,9	3,8	3,7	6,0
t WG 20 %	5,3	4,6	3,6	3,5	5,7
t WG 25 %	4,9	4,4	3,4	3,3	5,3
t WG 30 %	4,6	4,1	3,1	3,1	5,0
t WG 35 %	4,3	3,8	2,9	2,8	4,6
t WG 40 %	4,0	3,5	2,7	2,6	4,2
t WG 45 %	3,6	3,2	2,5	2,4	3,9
t WG 50 %	3,3	2,9	2,2	2,2	3,5
t WG 55 %	3,0	2,6	2,0	2,0	3,2
t WG 60 %	2,6	2,3	1,8	1,8	2,8

11 Formeln zur Berechnung des Substitutionswertes von Hackgut und Industrieholz

Ab welchem Preis ist es wirtschaftlicher, Hackschnitzel statt Industrieholz bereitzustellen?

$$p(HS) = \frac{p(IH) - k(IH)}{1 + ma} + k(HS)$$

Was darf die Produktion der Hackschnitzel maximal kosten, um noch rentabler zu sein?

$$k(HS) = p(HS) - \frac{p(IH) - k(IH)}{1 + ma}$$

Wie hoch müsste die Mehrausbeute sein, damit die Hackschnitzelproduktion lohnender ist?

$$ma = \frac{p(IH) - k(IH)}{p(HS) - k(HS)} - 1$$

Über welchem Industrieholzpreis lohnt die Hackschnitzelbereitstellung nicht mehr?

$$p(IH) = (1 + ma) * (p(HS) - k(HS)) + k(IH)$$

Unter welchen Kosten für Industrieholz lohnt die Hackschnitzelproduktion nicht mehr?

$$k(IH) = p(IH) - (1 + ma) * (p(HS) - k(HS))$$

$p(HS)$ = Erlös für Hackschnitzel in €/t atro bzw. in €/fm

$p(IH)$ = Erlös für Industrieholz in €/t atro bzw. in €/fm

$k(HS)$ = Kosten der Produktion von Hackschnitzeln in €/t atro bzw. in €/fm

$k(IH)$ = Kosten der Produktion von Industrieholz in €/t atro bzw. in €/fm

ma = Mehrausbeute bei der Produktion von Hackschnitzeln im Verhältnis zur Aushaltung von Industrieholz

$$ma = \frac{m(HS)}{m(IH)} - 1$$

$m(HS)$ = Erntemenge der Hackschnitzel in t atro bzw. in fm

$m(IH)$ = Erntemenge des Industrieholzes in t atro bzw. in fm

12 Empfehlungen zur Lagerung von Hackschnitzeln

Um sich beim Umgang mit Hackschnitzeln möglichst wenig mit Schimmelpilzsporen zu belasten, sollten folgende Regeln beachtet werden (LWF, 2002):

- Holz möglichst in ungehackter Form vorlagern bzw. vortrocknen.
- Die Lagerdauer der Schnitzel kurz halten (Anhaltswert: drei Monate).
- Möglichst wenig Grünanteile (Nadeln oder Laub) einlagern.
- Den Anteil der Feinfraktion niedrig halten.
- Grobhackgut (ab 50 mm) trocknet besser, wodurch die Pilzentwicklung weniger schnell fortschreitet.
- Schnitzellager möglichst entfernt von Arbeits- und Wohnplätzen anlegen sowie die Hauptwindrichtung beachten.
- Keine Kleider, Nahrungs- oder Genussmittel in Räumen aufbewahren, in denen Hackschnitzel gelagert werden.
- Kesselräume und Lager möglichst sauber halten.
- Durch entsprechende räumliche Ordnung die Verwendung in der Reihenfolge der Einlagerung gewährleisten ("first in first out").
- Bei Außenlagerung die Haufen in Form von Spitzkegeln ausbilden, damit die Durchfeuchtung bei Regen möglichst gering bleibt.
- Bei Innenlagerung statt gleicher Schütthöhe die Dammform vorziehen.
- Die Lagerräume hoch und zugig gestalten, damit Kondensation über den Haufen verhindert wird.
- Bei Innenlagerung (Bunker) ein Abluftsystem vorsehen.
- Die Abluft aus der Lüftung kann direkt in den Brennraum geleitet werden, dabei werden die Sporen verbrannt.
- Kaltlufttrocknung, Kaltbelüftung und Lagerung in überdachten Draht- oder Holzgitterkästen hat sich als günstig erwiesen und ist somit zu empfehlen.

Beim Umgang mit deutlich erkennbar verschimmeltem Material ist es notwendig Atemschutzmasken zu verwenden. Vom Bayerischen Landesamt für Arbeitsschutz, Arbeitsmedizin und Sicherheit (LfAS) werden Staubmasken der Partikelfilterklasse P2 empfohlen. Diese Filter halten auch feine Stäube zurück. Sie haben ein Ausatemungsventil und sind leicht und problemlos zu tragen.

Ziel sollte es immer sein, durch entsprechende Logistik sowohl den Holzabbau durch Weiß- und Braunfäulepilze als auch die hygienisch bedenkliche Schimmelbildung zu minimieren.

Erklärung

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die der Fakultät Wissenschaftszentrum Weihenstephan für Ernährung, Landnutzung und Umwelt der Technischen Universität München zur Promotionsprüfung vorgelegte Arbeit mit dem Titel:

Bereitstellung von Hackgut zur thermischen Verwertung durch Forstbetriebe in Bayern

am Department für Ökosystem- und Landschaftsmanagement, Lehrstuhl für Forstliche Arbeitswissenschaft und Angewandte Informatik unter der Anleitung und Betreuung durch Professor Dr. Walter Warkotsch ohne sonstige Hilfe erstellt und bei der Abfassung nur die gemäß § 6 Abs. 5 angegebenen Hilfsmittel benutzt habe.

Ich habe die Dissertation in keinem anderen Prüfungsverfahren als Prüfungsleistung vorgelegt.

Ich habe den angestrebten Doktorgrad noch nicht erworben und bin nicht in einem früheren Promotionsverfahren für den angestrebten Doktorgrad endgültig gescheitert.

Die Promotionsordnung der Technischen Universität München ist mir bekannt.

Freising, den 20. Dezember 2004

Stefan Wittkopf

Lebenslauf

Stand: Dezember 2004

Persönliche Daten

Name: Stefan Wittkopf
Anschrift: Am Sonnenbichl 9
85356 Freising
geboren am: 13.04.1970
Familienstand: ledig

Beruf

seit 01.02.1998 Wissenschaftlicher Mitarbeiter an der
Bayerischen Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft
1997 bis 1998 Forstrat an der Forstdirektion Oberbayern
1995 bis 1997 Referendarzeit bei der Bayer.
Staatsforstverwaltung

Studium

1990 bis 1995 Forstwissenschaft an der LMU München
Abschluss zum Diplom-Forstwirt

Wehrdienst

1989 bis 1990 Grundwehrdienst in Ulm und Landsberg

Schulen

1980 bis 1989 Rhabanus-Maurus-Gymnasium in St. Ottilien
1976 bis 1980 Grundschule Ried