Technische Universität München

FAKULTÄT FÜR FORSTWISSENSCHAFT UND RESSOURCENMANAGEMENT
TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN

Prozessanalyse und Ökobilanzierung der Bereitstellung von Waldhackgut zur thermischen Verwertung.

Projektbericht

Dieses Projekt wurde gefördert von der Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR) im Rahmen des Förderprogramms "Nachwachsende Rohstoffe" des Bundesministeriums für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz.

Zitiervorschlag:

EBERHARDINGER, A.; WARKOTSCH, W.; ZORMAIER, F.; SCHARDT, M.; HUBER, T.; ZIMMER, B. (2009): *Prozessanalyse und Ökobilanzierung der Bereitstellung von Waldhackgut.* Projektbericht in Auftrag der Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe. Freising, 2009.

Projektleitung:

Lehrstuhl für Forstliche Arbeitswissenschaft und Angewandte Informatik
Technische Universität München
Am Hochanger 13
85354 Freising
TEL 08161 71-4760
FAX 08161 71-4767
www.wzw.forst.tum.de/arwin

Projektteam:

Alexander Eberhardinger
TU München
eberhardinger@wzw.tum.de

Dr. Florian Zormaier, Markus Schardt
LWF Bayern, Sachgebiet 3.4 Holz und Logistik
florian.zormaier@lwf.bayern.de

Prof. Dr. Bernhard Zimmer
FH Salzburg
bernhard.zimmer@fh-salzburg.ac.at

Danksagung

Im vorliegenden Projektbericht sind die Ergebnisse des Forschungsprojektes „Prozessanalyse und Ökobilanzierung der Bereitstellung von Waldhackschnitzeln in Kooperation mit Waldbesitzern, Einschlags- und Transportunternehmen sowie Biomasseheiz(kraft)werken“ zusammengefasst.

Das Vorhaben wurde über einen Zeitraum von zweieinhalb Jahren von der Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR Förderkennzeichen 220-204-05) finanziell gefördert. Für diese maßgebliche Unterstützung möchten wir uns recht herzlich bedanken.

Im Rahmen der Datenerhebung, Fallstudien sowie Fachgesprächen und Workshops waren eine Vielzahl an Unternehmen, Institutionen, Waldbesitzer bzw. Forstbetriebe und Einzelpersonen beteiligt. Ihnen allen sei an dieser Stelle herzlich gedankt. Mit Ihrem Interesse, Ihrer Kooperationsbereitschaft sowie der fachlichen wie auch finanziellen Beteiligung und Unterstützung haben sie einen wesentlichen Beitrag zum Erfolg dieses Projektes geleistet. Gerade im Hinblick auf die Fallstudien im Bereich der Verfahrenstechnik ist auf das Engagement der beteiligten Personen hinzuweisen, welches notwendig ist, um derartige Studien überhaupt erfolgreich durchführen zu können.

Besonderer Dank gilt unseren Projektpartnern für die hervorragende Zusammenarbeit, die Offenheit in der gemeinsamen Diskussion und das hohe Maß an Zuverlässigkeit während der gesamten Projektlaufzeit.

Prof. Dr. Walter Warkotsch Alexander Eberhardinger

1 Inhaltsverzeichnis

1 INHALTSVERZEICHNIS 3

2 ZUSAMMENFASSUNG 5

3 PROBLEMSTELLUNG UND ZIELSETZUNG DES PROJEKTES 7

ALEXANDER EBERHARDINGER, WALTER WARKOTSCH

3.1 PROBLEMSTELLUNG 7
3.2 ZIELSETZUNG 9

4 IST-ANALYSE UND STÄRKEN-SCHWÄCHEN-ANALYSE DER BEREITSTELLUNG VON WALDHACKGUT ZUR ENERGETISCHEN VERWERTUNG 11

FLORIAN ZORMAIER, MARKUS SCHARDT, THOMAS HUBER

4.1 MATERIAL UND METHODEN 11
4.1.1 Umfrage bei geförderten Biomasseheiz(kraft)werken in Bayern 11
4.1.2 Analyse von Biomasseheiz(kraft)werken in einer ausgewählten Modellregion 13
4.2 ERGEBNISSE DER IST-ANALYSE 16
4.2.1 Zusammensetzung des Rohstoffes (Brennstoffmix) 16
4.2.2 Preise für Hackschnitzel und Sägenebenprodukte 18
4.2.3 Struktur der Biomasseversorgung 24
4.2.4 Qualitätsanforderungen 25
4.2.5 Abrechnungsmodalitäten 26
4.2.6 Holzasche 27
4.2.7 Einschätzungen zur eigenen Situation und zum Energieholzmarkt 29
4.2.8 Prozessketten der Waldhackschnitzelversorgung von Biomasseheizkraftwerken 31
4.3 ERGEBNISSE DER STÄRKEN-SCHWÄCHEN-ANALYSE 36
4.4 ERGEBNISSE DES WORKSHOPS MIT DEN BETEILIGTEN AUS DER MODELLREGION 41

ALEXANDER EBERHARDINGER, FLORIAN ZORMAIER

4.4.1 Schwachstellenergänzung und –sammlung 41
4.4.2 Lösungsansätze 43
4.5 BEWERTUNG DER ERGEBNISSE 45

5 INNOVATIVE VERFAHRENSTECHNIK ENTLANG DER WERTSCHÖPFUNGSKETTE „WALDHACKGUT“ 51

ALEXANDER EBERHARDINGER, WALTER WARKOTSCH

5.1 MATERIAL UND METHODEN 51
5.2 FALLSTUDIEN ÜBER DIE HOLZERNTE MIT SAMMELAGGREGATEN 56
5.2.1 Ernteversuch Ingolstadt: Energieholzaggregat an Raupenharvester in der Erstdurchforstung 59

5.2.2 Ernteversuch Zusmarshausen: Energieholzaggregat an 4-Rad-Harvester in der Nadelholz-Jungbestandspflege ... 69
5.3 Energieholzrückung mit der Spezialmaschine ABAB Carrier ... 76
5.4 Einsatz einer Trocknungsfolie bei der Lagerung von Waldrestholz – „Walki Energy Wrap“ ... 82
5.5 Elektronisches Lagermanagement mit MHG Bioenergy ... 87
5.6 Bewertung der Ergebnisse und Fallstudien ... 91

6 Implementation ... 100

Alexander Eberhardinger, Walter Warkotsch

6.1 Pilotversuch mit MHG Bioenergy ... 100
6.2 Workshop „FellerBuncher Technik“ ... 101

7 Ökobilanzierung der Bereitstellung von Waldhackschnitzeln ... 104

Bernhard Zimmer

7.1 Methodik ... 105
7.2 Ergebnisse ... 108
7.2.1 Biologische Produktion - Photosynthese ... 108
7.2.2 Fällung und Aufarbeitung ... 110
7.2.3 Rücken ... 111
7.2.4 Bündeln von Kronenmaterial ... 111
7.2.5 Hacken ... 112
7.2.6 Lagerung der Hackschnitzel ... 114
7.2.7 Trocknung von Hackschnitzeln ... 115
7.2.8 Transporte ... 117
7.2.9 Energieerzeugung – Hackgutqualität und Wirkungsgrad ... 122
7.2.10 Verwendung der Asche(n) ... 124
7.2.11 Zusammenfassende Darstellung der Ergebnisse - Szenarien ... 127
7.3 Bewertung der Ergebnisse ... 133
7.3.1 Einsatz von Primärenergie ... 135
7.3.2 Treibhauspotenzial (GWP_{100}) ... 138
7.3.3 Fazit aus der Sicht der ökologischen Bewertung ... 141

8 Schlussfolgerungen ... 142

9 Verzeichnisse ... 144

9.1 Abbildungsverzeichnis ... 145
9.2 Tabellenverzeichnis ... 148
9.3 Literaturverzeichnis ... 149

10 Anhang ... 155

2 Zusammenfassung

Der vorliegende Bericht dokumentiert die Ergebnisse eines Forschungsprojektes, welches von der Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe unter dem Titel *„Prozessanalyse und Ökobilanzierung der Bereitstellung von Waldhackschnitzeln in Kooperation mit Waldbesitzern, Einschlags- und Transportunternehmen sowie Biomasseheiz(kraft)werken“* gefördert wurde.

Die Ziele des Projektes umfasste organisatorische, technische, ökonomische und ökologische Fragestellungen. Dazu zählte die Untersuchung der

- organisatorischen Struktur der Bereitstellungsprozesse sowie deren Stärken und Schwächen,
- Einsatzmöglichkeiten innovativer Verfahrenstechnik entlang der Bereitstellungskette insbesondere bei der Energieholzernte,
- ökologischen Auswirkungen der Bereitstellung von Waldhackgut zur thermischen Verwertung.

Im Rahmen einer IST- und Stärken-Schwächen-Analyse wurde eine landesweite Umfrage bei den geförderten BMH(K)W in Bayern auf der Basis eines standardisierten Fragebogens durchgeführt. Schwerpunkte dieser Umfrage waren Anteile (Biomassemix und Mengen), Herkunft und Preise der eingesetzten Biomasse. Eine detaillierte Datenerhebung erfolgte mit Betreibern und Brennstofflieferanten einer ausgewählten Modellregion mit Hilfe von Leitfadeninterviews. Dabei standen die Erhebung der Struktur der aktuellen Beschaffungslogistik und deren individuelle Prozessketten im Vordergrund.

Auf der Basis einzelner Fallstudien wurden neue Techniken bzw. Verfahren der Energieholzernte und Biomasselogistik im Praxiseinsatz untersucht. Wesentlicher methodischer Baustein waren arbeitswissenschaftliche Zeitstudien im Fortschrittszeitverfahren. Die zeitliche Erfassung der einzelnen Ablaufabschnitte bildeten gemeinsam mit der Messung des Prozessoutputs sowie wichtiger Bestandes- und Hiebskennzahlen (beispielsweise Brusthöhendurchmesser, Eingriffstärke, Rückeentfernung) die Basis für die Analyse der Produktivität und Kosten des jeweiligen Verfahrens.

Die methodische Grundlage für die ökologische Betrachtung stellten die internationalen Normen zur produktbezogenen Ökobilanzierung dar (ISO 14040 und 14044). Die Betrachtung begann im Wald mit der biologischen Produktion der Biomasse bzw. des Holzes und umfasste im Weiteren die Prozessschritte „Fällung und Aufarbeitung“, „Rücken“, „Hacken“, „Lagerung“, „Trocknung“ und „Transport“. Die Bilanzierung wurde modular für jeden Prozessschritt und in fünf verschiedenen praxisnahen Szenarien zusammengestellt. Die Auswertung der Kennwerte ist auf die Wirkungskategorien „Treibhauseffekt“ und „Einsatz von Primärenergie“ fokussiert.

Die Ergebnisse des Projektes zeigen, dass hohe Erfahrungswerte und eine gute Kooperation der Akteure einen wichtigen Erfolgsfaktor innerhalb der Prozesskette darstellen. Negative Auswirkungen für das Hacken aber auch für die folgenden Prozessschritte haben vor allem eine unsachgemäße Lagerung des Rohmaterials, verunreinigtes Material, ungenaue Ortsangaben und zu kleine Poltergrößen. Schwachpunkte bestehen weiterhin während der Werksübernahme und Lagerung am Werk, insbesondere bei der Ermittlung des Wassergehalts, der Verunreinigung des Materials und der Gewichtsermittlung. Viele Schwächen wie die eingeschränkte Lagerfähigkeit, der Anlagenverschleiß und der Ascheanfall sind eng mit der Qualität des Brennstoffs verbunden.

Der in diesem Projekt dokumentierte Durchschnittspreis von 68 € pro t atro muss in Zusammenhang mit der großen Spannweite gesehen werden. Ursächlich für die Preisunterschiede sind Qualitätsunterschiede, die Menge der eingesetzten Biomasse und die Gestaltung der Lieferverträge bzw. die Rolle der Lieferanten im jeweiligen Betreibermodell. Tendenziell haben kleinere Heizwerke höhere Qualitätsansprüche an den Brennstoff und sind dementsprechend eher bereit, einen höheren Preis zu bezahlen als größere Heizwerke bzw. Kraftwärmekopplungsanlagen. Mit einem durchschnittlichen Anteil von 64 % der eingesetzten Jahresmenge dominiert das Sortiment Waldhackschnitzel den Brennstoffmix.

Die untersuchten Holzernteverfahren mit Energieholz-Sammelaggregaten zeigen, dass unter gewissen Rahmenbedingungen kostendeckende Einsätze auch in Beständen extrem niedriger Stückmasse möglich sind. In einer Erstdurchforstung wurden Bereitstellungskosten von 13,30 €/Srm frei Heizwerk kalkuliert.
Der Zeitpunkt des Eingriffs hat wesentlichen Einfluss auf das Risiko von Bestandesschäden und die Qualität des erzeugten Hackgutes. Wie bei der konventionellen Holzernte haben Faktoren wie Baumvolumen, Eingriffsstärke oder Rückedistanz einen erheblichen Einfluss auf Leistung und Kosten und führen bei wechselnden Hiebsbedingungen zu sehr unterschiedlichen Ergebnissen.
In weiteren Fallstudien wurden das Spezialpapier *Walki Energy Wrap* bei der Trocknung von Fichtenkronen und der Forwarderaufbau *ABAB Carrier* bei der Rückung von Hiebsresten untersucht. Ergänzt wird das Projektmodul „Innovative Verfahrenstechnik“ durch die Analyse der Polter- bzw. Lagermanagement-Software *MHG Bioenergy*.

Die Bereitstellung von Waldhackschnitzeln verfügt bereits heute über eine sehr hohe Energieeffizienz. Entlang der Prozessschritte Holzernte, Hacken, Lagerung und Transport werden je nach Bereitstellungsverfahren 1,5-6,5% der im jeweiligen Hackschnitzel-Sortiment enthaltenen nutzbaren Energie eingesetzt. Eine Erhöhung der Produktivität bei den einzelnen Prozessschritten führt auch zu einer Verbesserung der Energiebilanzen. Der Transport kann aus energetischer Sicht als kritischster Prozessschritt bezeichnet werden. Brennstoffqualität und Wassergehalt haben einen großen Einfluss auf die Ökobilanz. Dieser ist sehr viel größer als derjenige der Bereitstellungslogistik.

Eine unsachgemäße Lagerung der Waldhackschnitzel führt sehr schnell zu hohen Verlusten und zu deutlich schlechteren Energiebilanzen. Bei einer Lagerung „grüner“ Hackschnitzel über einen Zeitraum von drei Monaten ist der Verlust bereits höher als die gesamte Energie, die zur Bereitstellung aufgewendet wurde. Wärmegeführte BMH(K)W haben bessere Gesamtwirkungsgrade als stromgeführte und damit auch eine bessere Ökobilanz. Der Wirkungsgrad einer Feuerungsanlage beeinflusst die Ökobilanz ebenfalls sehr viel stärker als die Bereitstellungskette.

3 Problemstellung und Zielsetzung des Projektes

3.1 Problemstellung

Die neuesten Statistiken der Arbeitsgruppe „Erneuerbare Energien - Statistik“ des Bundes-umweltministeriums bescheinigen dem „Alleskönner“ Biomasse (Elektrizität, Wärme, Kraftstoffe) eine enorme Bedeutung:
Rund 70 Prozent der gesamten Endenergie aus erneuerbaren Energiequellen werden durch Biomasse (biogene Festbrennstoffe, biogene flüssige und gasförmige Brennstoffe, biogener Anteil des Abfalls und Biokraftstoffe) bereitgestellt. Während die Biomasse innerhalb der Stromerzeugung einen Anteil von 23 Prozent einnimmt, hat sie bezogen auf die Wärmeerzeugung aus erneuerbaren Energien einen Anteil von 94 Prozent (BMU 2009a). Der Rohstoff Holz nimmt unter den biogenen Festbrennstoffen den wichtigsten Anteil an der Wärmebereitstellung ein.

Durch die Nutzung von Biomasse wurden im Jahr 2007 rund 57 Mio Tonnen CO2 - Emissionen vermieden. Mit etwa 96.000 Beschäftigten und einem Gesamtumsatz von 10,7 Mrd. € (37,2% am Gesamtumsatz der erneuerbaren Energien) repräsentiert der Biomassesektor in beachtlicher Weise die nachhaltigen Wirtschaftsformen im Sinne der Agenda 21 (BMU 2009a).

Die rege Investitionstätigkeit innerhalb der Holzwirtschaft sowie beim Anlagenbau von Biomasseheiz(kraft)werken haben den Wettbewerb um den Rohstoff Holz in den letzten Jahren in hohem Maße verschärft. Sollen die ambitionierten Ziele des nationalen Biomasseaktionsplans erreicht werden, dann sind neben Fortschritten bei der Energieeinsparung und Effizienz der Energieerzeugung auch weitere Kapazitätserweiterungen notwendig.

Um die in Zukunft steigende Nachfrage decken zu können, sind neue Rohstoffpotenziale zu erschließen (BMU 2009b). Möglichkeiten dafür bestehen sowohl im Wald als auch außerhalb. Für die Mobilisierung dieser Rohstoffquellen werden jedoch praxisbezogene und nachvollziehbare Marketinginstrumente sowie belastbare Kalkulationsgrundlagen benötigt, um Anreize für die Bereitstellung von Waldhackschnitzeln zu schaffen.
Anstehende Nutzungskonflikte zwischen energetischer und stofflicher Holznutzung werden bereits heute zum Teil kontrovers diskutiert. Die volkswirtschaftlichen und ökologischen Vorteile einer kaskadischen Rohstoffnutzung sind hinlänglich bekannt und werden auch von den politischen Entscheidungsträgern favorisiert (BMU 2009b). Es ist aber davon auszugehen, dass die Marktpreise und bestehenden Anreizprogramme einen entscheidenden Einfluss auf die Stoffströme haben werden. Um die politischen Ziele erreichen zu können und gleichzeitig einen Nutzungskonflikt zu vermeiden, sind speziell bei der Holzernte im Wald solche Potenziale zu erschließen, bei denen bislang kein Nutzungskonflikt besteht.

Bereits realisierte Anlagen zur Verwertung holzartiger Biomasse weisen häufig Defizite wie z. B. unzureichende energetische Effizienz oder mangelnde Wirtschaftlichkeit auf (KRAPF 2009). Häufig fehlt es bei der Projektrealisierung an Erfahrung und Sachkenntnis innerhalb der Betreibergesellschaften, die sich in vielen Fällen aus fachfremden Akteuren zusammensetzen. Nach FNR (2007) stellen Informations- und Wissensdefizite der Initiatoren ein großes Hemmnis für die erfolgreiche Realisierung von Bioenergieprojekten dar. Insbesondere

Fragestellungen zur Rohstoffsicherung und Organisation der Bereitstellungskette treten gegenüber anlagentechnischen und finanziellen Fragen in den Hintergrund (ACHILLES 2009). Die Bereitstellung unabhängiger Datenquellen und Kalkulationsgrundlagen scheint aus diesem Grunde für Initiatoren von enormer Bedeutung.
Die Marktpreise für Waldhackgut sind durch eine sehr hohe Streuung gekennzeichnet (WITTKOPF 2005; NEUGEBAUER 2005). Gründe dafür sind insbesondere die unterschiedlichen Qualitätsanforderungen im Hinblick auf die jeweilige Anlagentechnik sowie strukturell und zeitlich stark variierende Betreiber- und Lieferantenbeziehungen. Ebenso heterogen stellen sich Prozess- bzw. Logistikketten hinsichtlich Mechanisierungsgrad, System- und Lohnkosten dar. Zahlreiche Teilprozesse innerhalb der Hackschnitzelbereitstellung (Fällung, Vorliefern, Vortransport, Hacken, Lagern, Ferntransport) und die daraus resultierende Vielzahl an Schnittstellen lassen Rationalisierungspotenziale erwarten.
Verschiedene Fallstudien zeigen, dass mit den derzeitigen Bereitstellungskonzepten nicht immer positive Deckungsbeiträge für den Waldbesitzer erzielt werden (u. a. CREMER 2009; KANZIAN et al. 2008; WITTKOPF 2005). Diese Situation lässt Verbesserungsmöglichkeiten bei den vorhandenen Bereitstellungsverfahren erwarten und verlangt nach einer systematischen Analyse und Bewertung innovativer Technologien und Verfahren.
Neue Technologien und Produkte lassen sich in einer kleinstrukturierten Branche wie der deutschen Forstwirtschaft nur sehr schwierig implementieren. Kleine mittelständische Betriebe haben oftmals nur unzureichenden Zugang zu Forschungseinrichtungen und sind dadurch selbst gezwungen, innovative Produkte zu entwickeln und zu testen. (RÖDER et al. 2008). Über den Einsatz der insbesondere aus Skandinavien stammenden Technologie (z. B. Energieholz-Sammelaggregate) gab es in Deutschland zu Beginn des Projektes kaum Untersuchungen. Inwieweit diese Technologien auch unter den mitteleuropäischen Rahmenbedingungen eingesetzt werden können, ist dabei von hohem Interesse.
In der Öffentlichkeit wie auch in Fachkreisen ist zu beobachten, dass die Themen der Energieeffizienz, Ökologie und Nachhaltigkeit der energetischen Nutzung von Waldhackgut sehr kontrovers diskutiert werden. Heizwerkprojekte scheitern nicht selten an Einwänden oder Kritik, die mehr auf Vorurteilen als auf fachlich fundierten Grundlagen basieren (ACHILLES 2009; BAUDISCH 2008).
Eine ökologische Bewertung der einzelnen Prozessschritte der Brennstoffbereitstellung auf der Basis einer produktbezogenen Ökobilanz kann eine sachliche Grundlage für künftige Diskussionen und Entscheidungsträger liefern. Die bisherigen Studien zum Thema der erneuerbaren Energieerzeugung konzentrierten sich meist entweder schwerpunktmäßig auf die Energieerzeugungsanlagen oder auf Brennstoffe wie beispielsweise Holzpellets.

3.2 Zielsetzung

Ein wesentliches Ziel des Projektes ist die Analyse und Bewertung der Anforderungsprofile verschiedener Biomasseheiz(kraft)werke innerhalb einer Modellregion. Darüber hinaus sollten die Prozesse sowie die Stärken und Schwächen der Rohstoffbereitstellung beschrieben werden.

In Zusammenarbeit mit den beteiligten Werksbetreibern, Forstdienstleistern, Transporteuren und Waldbesitzern sollten übergreifende Verbesserungsansätze der Logistikkette Wald – Werk diskutiert und getestet werden. Um dies zu erreichen, wurden forsttechnologische Innovationen und neue Arbeitsverfahren anhand von Feldversuchen untersucht und bewertet.

Die im Rahmen des Projektes erfolgte Ökobilanzierung der einzelnen Prozessketten der Bereitstellung von Waldhackschnitzeln sollte einerseits einen Beitrag zur wirtschaftlichen Optimierung der Prozesse liefern und andererseits die Diskussion um die ökologische Optimierung der Energieerzeugung aus Biomasse ergänzen. In Abbildung 1 ist die Struktur des Projektablaufs dargestellt. Die wesentlichen drei Bausteine des Forschungsprojekts waren die Prozessanalyse, die Untersuchung innovativer Verfahrenstechnik und die Ökobilanzierung verschiedener Produktionsverfahren der Hackschnitzelbereitstellung.

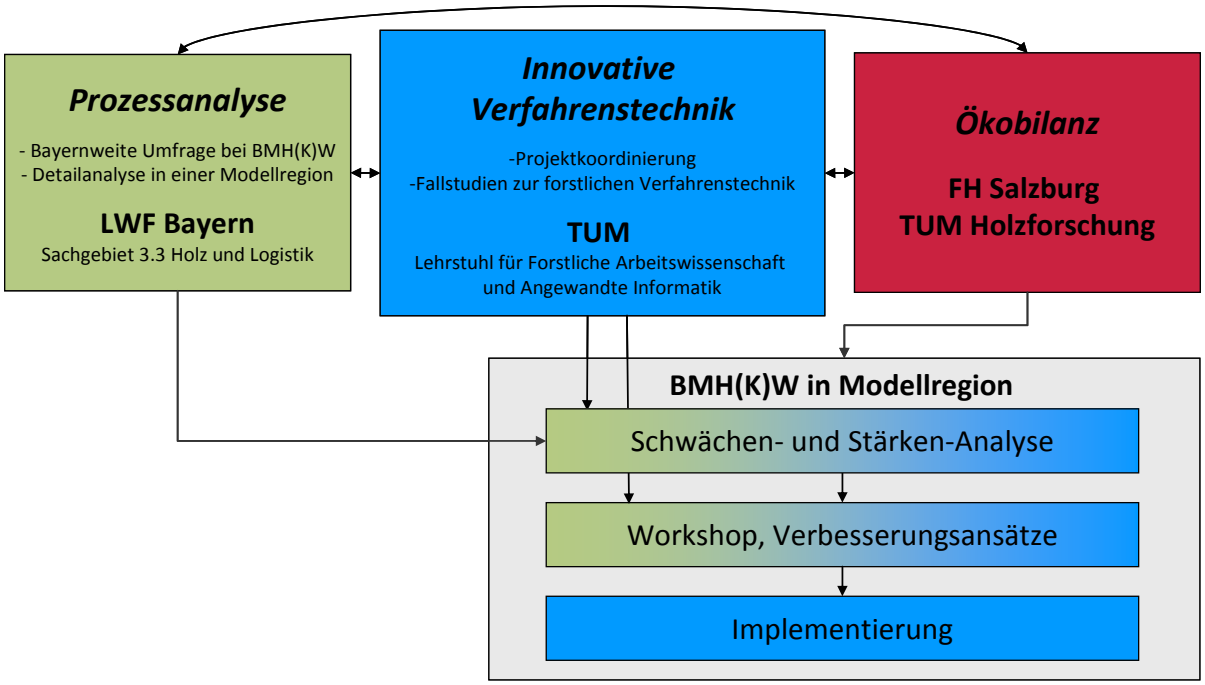


Abbildung 1: Projektaufbau mit den einzelnen Arbeitsmodulen

Der Lehrstuhl für Forstliche Arbeitswissenschaft und Angewandte Informatik der TU München – verantwortlich für Projektkoordination und Projektleitung - untersuchte in verschiedenen Fallstudien die Potenziale und Einsatzbereiche innovativer Verfahrenstechnik (siehe S. 51 ff).
Die bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft erstellte die Ist-Analyse und entwickelte in Kooperation mit der Projektleitung eine Stärken-Schwächen-Analyse über die Rohstoffversorgung der BMH(K)W (siehe S. 11 ff). Anschließend wurden auf einem gemeinsamen Workshop Verbesserungsvorschläge mit den

beteiligten Interessensgruppen diskutiert. In der Implementationsphase (siehe S. 100 ff) sollten die Ergebnisse der Fallstudien und die im Workshop formulierten Verbesserungsvorschläge in die Praxis umgesetzt werden.

Im dritten Projektmodul – der Ökobilanzierung – wurden die verschiedenen Verfahren der Rohstoffbereitstellung anhand ökologischer Kriterien inventarisiert und bilanziert (siehe S. 104 ff). Die Ökobilanz wurde in Kooperation mit der Holzforschung München konzipiert und von der Fachhochschule Salzburg in Kuchl bearbeitet. Die Basisdaten für die Bilanzierung wurden aus Literaturdaten sowie Studien über die Rohstoffversorgung und die innovativen Verfahrenstechniken entnommen.

4 Ist-Analyse und Stärken-Schwächen-Analyse der Bereitstellung von Waldhackgut zur energetischen Verwertung

Das Teilprojekt „Ist-Analyse der Rohstoffversorgung von BMH(K)W“ ist zweigeteilt und besteht einerseits aus einer Umfrage bei bayerischen Biomasseheiz(kraft)-werken und einer detaillierten Analyse von Biomasseheiz(kraft)werken in einer ausgewählten Modellregion.

Die schriftliche Umfrage bei den staatlich geförderten Biomasseheiz(kraft)werken in Bayern gibt einen Überblick über die Zusammensetzung des Rohstoffes Biomasse, dessen Preis und die Abwicklung der Biomassebeschaffung. Basierend auf der bayernweiten Umfrage soll die Situation der Rohstoffversorgung von Biomasseheiz(kraft)werken in einer ausgewählten Modellregion detailliert untersucht werden. Dabei sollen Stärken und Schwächen von unterschiedlichen Ansätzen der Biomasseversorgung identifiziert werden.

Die Ergebnisse dieses Teilprojekts wurden in den weiteren Arbeitsmodulen „Stärken-Schwächen-Analyse“ sowie „Workshop“ des Gesamtprojekts aufgegriffen. Die Ist-Analyse bildet somit eine Grundlage für die weiteren Projektmodule. Die Stärken- und Schwächen-Analyse bietet den Produzenten und Lieferanten von Waldhackschnitzeln sowie Biomasseheizwerkbetreibern Anregungen zur Verbesserung der Prozesskette.

4.1 Material und Methoden

4.1.1 Umfrage bei geförderten Biomasseheiz(kraft)werken in Bayern

Ziel der Umfrage war es, die aktuelle Situation bei den geförderten Biomasseheiz- und Biomasseheizkraftwerken hinsichtlich der Anteile (Biomassemix und Mengen), Herkunft, Beschaffung (Logistik) und Preise der eingesetzten Biomasse zu erfassen sowie die Abrechnungsmodalitäten transparent darzustellen. Der thematische Schwerpunkt der BMH(K)W-Befragung gilt dabei hauptsächlich dem Brennstoff Waldhackschnitzel.

Methodisches Vorgehen bei der Umfrage
Zur Ermittlung relevanter Informationen und von wichtigen Kennzahlen wurde eine Vollerhebung bei den staatlich geförderten Heiz(kraft)werken[1] in Bayern durchgeführt. Dazu wurden 168 Biomasseheiz(kraft)werke schriftlich gebeten, einen fünfseitigen standardisierten Fragebogen auszufüllen. Als Informationsgrundlage für die Adressen dienten die bei C.A.R.M.E.N. e.V. bzw. beim Technologie- und Förderzentrum (TFZ) publizierten Heizwerks-Listen (C.A.R.M.E.N. e.V. 2006; TFZ 2007). Der Fragebogen wurde in enger Abstimmung und Absprache mit den Projektpartnern entwickelt. Obwohl bei einer schriftlichen Befragung die Rücklaufquote in der Regel geringer ausfällt, war dieses Vorgehen hier sinnvoll, da die Betreiber zur Beantwortung ihre betrieblichen Unterlagen hinzuziehen mussten.

[1] *Einzelfallförderung durch den Freistaat Bayern, vergeben vom Technologie- und Förderzentrum (www.tfz.bayern.de)*

Die schriftliche Methode bietet darüber hinaus den Vorteil, dass der Befragte genügend Zeit hat, um sich mit der Fragestellung zu beschäftigen und vertraut zu machen. Dies ist bei einer telefonischen Umfrage kaum möglich (SCHNELL et al. 1995). Der Fragebogen bestand insgesamt aus 26, meist geschlossen formulierten Fragen und orientiert sich an den vorangegangenen Umfragen der LWF in den Jahren 2001 und 2003 (WITTKOPF 2005, NEUGEBAUER 2005). Lediglich fünf Fragen waren offen formuliert und enthielten keine festen Antwortkategorien. Drei Fragen waren in Form einer Tabellenmatrix zu beantworten. Der verwendete Fragebogen gliedert sich in fünf Themenabschnitte (siehe Anhang)

I. Basisdaten zum Biomasseheiz(kraft)werk

II. Brennstoff-Eigenschaften

III. Lieferung / Versorgung

IV. Asche

V. Einschätzung Energieholzmarkt / Ausblick

Zur Erleichterung des Ausfüllens konnten die Werksbetreiber zwischen unterschiedlichen Bezugsmaßen wählen (z.B. Schüttraummeter, Tonne atro, MWh). Diese Angaben wurden dann bei der Auswertung einheitlich mit festen Umrechnungsfaktoren in das Bezugsmaß Tonne atro (Tonne Trockenmasse) umgerechnet.

Als Bezugsjahr für die Datenerhebung gilt das abgeschlossene Jahr 2006. Sofern nichts anderes angegeben ist, beziehen sich alle Werte auf 1 Tonne Trockenmasse (t atro = absolut trocken, Wassergehalt 0 %). Zur Umrechnung in andere Maßeinheiten können dabei folgende Umrechnungsfaktoren herangezogen werden (WITTKOPF 2005, NEUGEBAUER 2005):

1 t atro entspricht 1,5 t mit Wassergehalt 30 % oder 2 t mit Wassergehalt 50 %

1 t atro entspricht ca. 4,5 Schüttraummeter (Srm) Buche/Eiche

6,5 Schüttraummeter (Srm) Fichte

6 Schüttraummeter (Srm) Kiefer

1 t atro entspricht einem Energieinhalt von 5 MWh

Rücklaufquote und Größenstruktur der an der Umfrage beteiligten BMH(K)W

73 Biomasseheiz(kraft)werke von den 168 im März 2007 angeschriebenen beteiligten sich an der schriftlichen Umfrage. Dies entspricht einer Rücklaufquote von über 40 %. Bei gewöhnlichen Marktumfragen liegt der Rücklauf im Allgemeinen nur zwischen 20 und 30 % (BEREKOVEN et al. 1991; BÖHLER 1992).

Um die Struktur der Biomasse(heiz)kraftwerke besser abbilden zu können, ist es sinnvoll, eine Unterteilung der Werke nach Größenklassen vorzunehmen. Dazu wurden basierend auf der Biomasse-Nennleistung vier Kategorien gebildet: Größenklasse 1 < 500 kW, Größenklasse 2 von 500 bis 999 kW, Größenklasse 3 von 1000 bis 4999 kW und Größenklasse 4 > 5000 kW (WITTKOPF 2005).

Abbildung 2 gibt die Verteilung der angeschriebenen 168 Heiz(kraft)werke in Bayern sowie der an der Umfrage beteiligten Werke nach Größenklassen wieder.

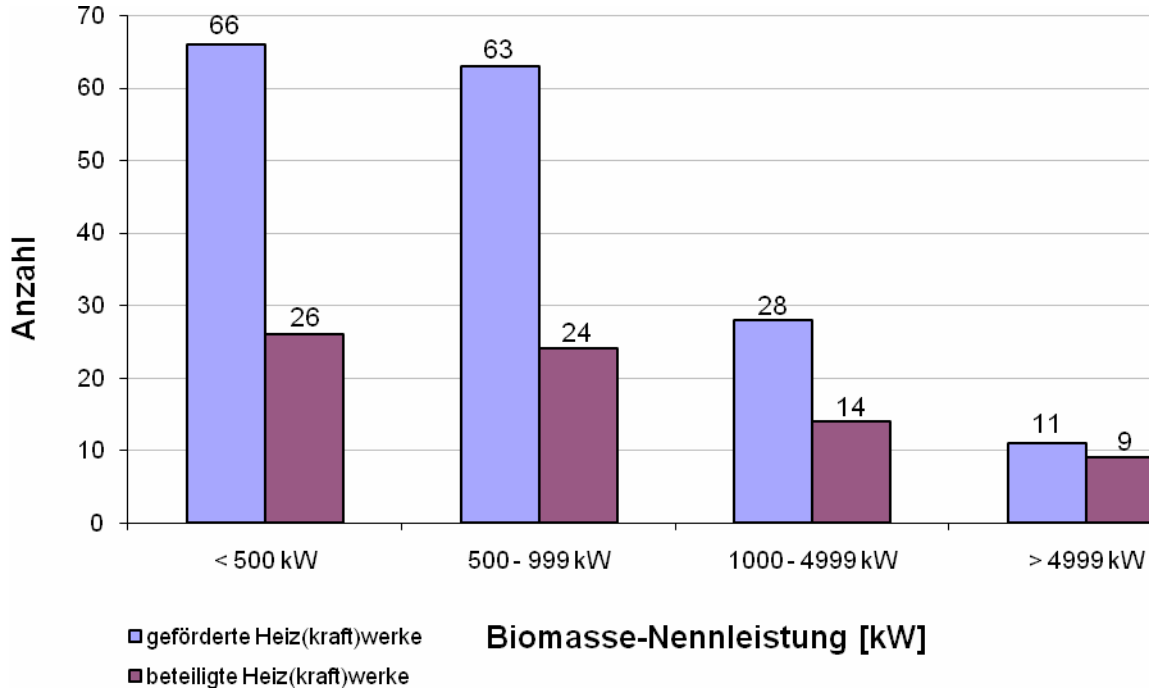


Abbildung 2: Umfragebeteiligung nach Biomasse-Nennleistung

Daraus wird ersichtlich, dass die Mehrzahl der Anlagen in einem Leistungsbereich unter 1000 kW angesiedelt ist.

4.1.2 Analyse von Biomasseheiz(kraft)werken in einer ausgewählten Modellregion

Ziel der Untersuchung von Biomasseheiz(kraft)werken in einer ausgewählten Modellregion ist es, detailliert die Versorgung mit Biomasse von verschiedenen Heiz(kraft)werken zu analysieren und Stärken sowie Schwächen in den Logistikketten aufzudecken. Analog zur schriftlichen Befragung liegt auch bei dieser Untersuchung der Schwerpunkt auf der Versorgung mit Waldhackschnitzeln.

Methodisches Vorgehen bei der Analyse der Modellregion

Die Untersuchung erfasste mit Hilfe von Leitfadeninterviews mit den Kraftwerksbetreibern und den Hackschnitzelversorgern (Hackerunternehmer, Waldbesitzer und deren Zusammenschlüsse) die Struktur der aktuellen Beschaffungslogistik. Dazu wurden u.a. Informationen zu der Anzahl der Rohstoffversorger, der Organisationsform, der Rechtsform, den Abrechnungsmodalitäten, der Lagerung, den Anforderungen in Hinblick auf Qualität und Quantität der Hackschnitzel, den Arten der Bereitstellungsketten und der Zusammenarbeit mit den Zusammenschlüssen der Waldbesitzer erhoben.

Die jeweiligen Gespräche wurden mit Hilfe einer beispielhaften Prozesskette (siehe Abbildung 3) zur Bereitstellung von Waldhackschnitzeln gegliedert (WITTKOPF 2005, FNR 2006, HARTMANN et al. 2007).

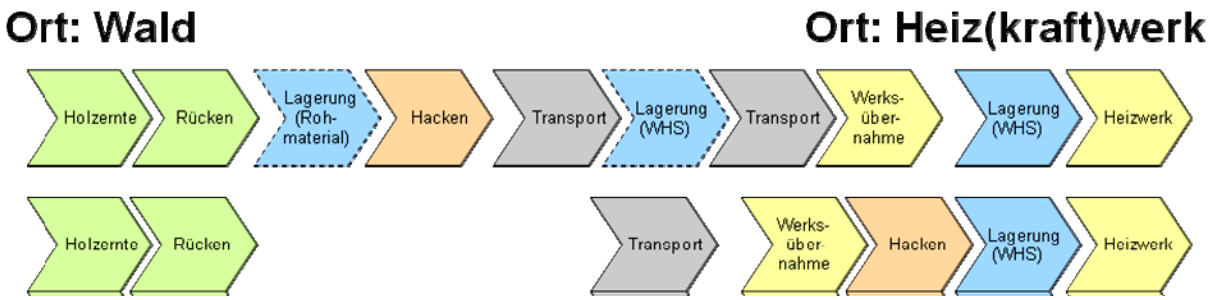


Abbildung 3: Beispiel für eine Prozesskette zur Bereitstellung von Waldhackschnitzeln

Anhand dieser Prozesskette wurde die Art und Weise der Versorgung mit Biomasse des jeweiligen Heiz(kraft)werks erhoben und somit die individuellen Prozessketten erfasst. Für jeden Prozessschritt wurde der jeweilige Ablauf, die betroffenen Akteure, deren Zielsetzung und Interessen sowie die Stärken und Schwächen des jeweiligen Arbeitsschrittes ermittelt. Insgesamt wurden jeweils ein Vertreter der neun Biomasseheiz(kraft)werksbetreibergesellschaften, zwei Forstunternehmer, die die Dienstleistung „Hacken“ anbieten und mehrere Heizwerke der Modellregion mit Waldhackschnitzel versorgen und zwei Waldbesitzervereinigungen befragt.

Beschreibung der Modellregion

Als Modellregion wurden Biomasseheiz(kraft)werke nord-westlich von Freising ausgewählt. Diese Region ist in Abbildung 4, die die geförderten Biomasseheiz(kraft)werke in Bayern darstellt, hervorgehoben.

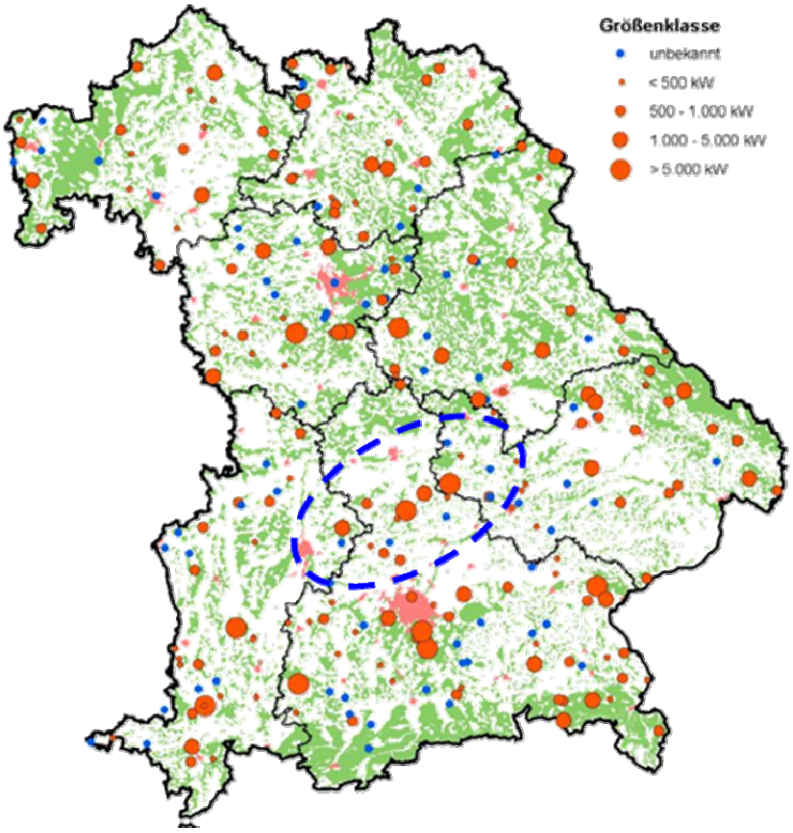


Abbildung 4: Ausgewählte Modellregion der geförderten Biomasseheiz(kraft)werke in Bayern (Quelle: RÖDER et al. 2008, S.75, verändert)

Die Heizwerke, welche sich zur Beteiligung an der Untersuchung bereiterklärt haben sind in Tabelle 1 in anonymisierter Form aufgeführt und beschrieben.

Tabelle 1: Biomasseheiz(kraft)werke der ausgewählten Modellregion

BMH(K)W	Biomasse-leistung (kW)	Größenklasse	Jährliche Brennstoff-menge	Anteil Waldhack-schnitzel	Bemerkungen (Stand: 2006)
BMHW A	325	< 500 kW	150 t atro	100 %	Heizwerk
BMHW B	300	< 500 kW	165 t atro	100 %	Heizwerk
BMHW C	500	500 – 999 kW	420 t atro	nahezu 100 %	Heizwerk
BMHW D	540	500 – 999 kW	460 t atro	nahezu 100 %	Heizwerk
BMHW E	850	500 – 999 kW	740 t atro	67 %	Heizwerk
BMHKW F	1300	1000 – 4999 kW	3670 t atro	95 %	Heizkraftwerk (ORC)
BMHW G	4000	1000 – 4999 kW	7100 t atro	78 %	Heizwerk
BMHW H	5250	> 5000 kW	5950 t atro	nahezu 100 %	Heizwerk
BMHKW I	26700	> 5000 kW	52960 t atro	90 %	Heizkraftwerk (Dampf)

Bei der Auswahl der Heiz(kraft)werke wurde insbesondere auf die Berücksichtigung der unterschiedlichen Größenklassen geachtet. Das kleinste Heizwerk hat eine Biomasse-Nennleistung von 300 kW, die Leistung des größten Heizkraftwerks beträgt über 25 MW. Analog dazu schwankt der Jahresbedarf an Biomasse zwischen 150 und über 50.000 t atro. Der Anteil an Waldhackschnitzel liegt bei sieben Werken über 90 %. Es sind sowohl sieben Biomasseheizwerke als auch zwei Heizkraftwerke (ORC, Dampf) beteiligt. Das Heizwerk G wurde im Jahr 2007 vergrößert und es wird zusätzlich eine ORC-Anlage installiert. Außerdem unterscheiden sich die beteiligten Anlagen in ihrer Organisationsform und Versorgungsstruktur mit Biomasse.

4.2 Ergebnisse der Ist-Analyse

Dieses Kapitel beinhaltet die Ergebnisse der schriftlichen Befragung der Biomasse(heiz)kraftwerke in Bayern. Sie gliedern sich in die Analyse der eingesetzten Brennstoffe, deren Preise sowie in die Struktur der Biomasseversorgung. Es folgen die Auswertungen zur Brennstoffqualität, zur Asche und die Einschätzungen zur eigenen Situation des Heizwerks sowie des Energieholzmarkts. Abschließend werden die erfassten Prozessketten der Modellregion zusammengefasst. Die Stärken und Schwächen der einzelnen Prozessschritte sind im Kapitel 4.3 dargestellt.

4.2.1 Zusammensetzung des Rohstoffes (Brennstoffmix)

Von den 73 ausgewerteten Biomasseheiz(kraft)werken machten 68 detaillierte Angaben zu ihrem eingesetzten Biomassebrennstoff. Dieser wird in die Sortimente Waldhackschnitzel, Sägenebenprodukte, Flurholz, Altholz und sonstige Biomasse unterteilt. Unter dem Begriff Flurholz werden biogene Festbrennstoffe außerhalb des Waldes definiert. Unter diese Kategorie fallen insbesondere auch die Sortimente „Landschaftspflegematerial (LP)“ und „Straßenpflegematerial (SP)“. Sonstige Biomasse beinhaltet neben landwirtschaftlichen Erzeugnissen (z. B. Rapsöl) auch die Verwendung von Holzpellets. Die Abbildung 5 gibt die Anteile der eingesetzten Biomasse wieder.

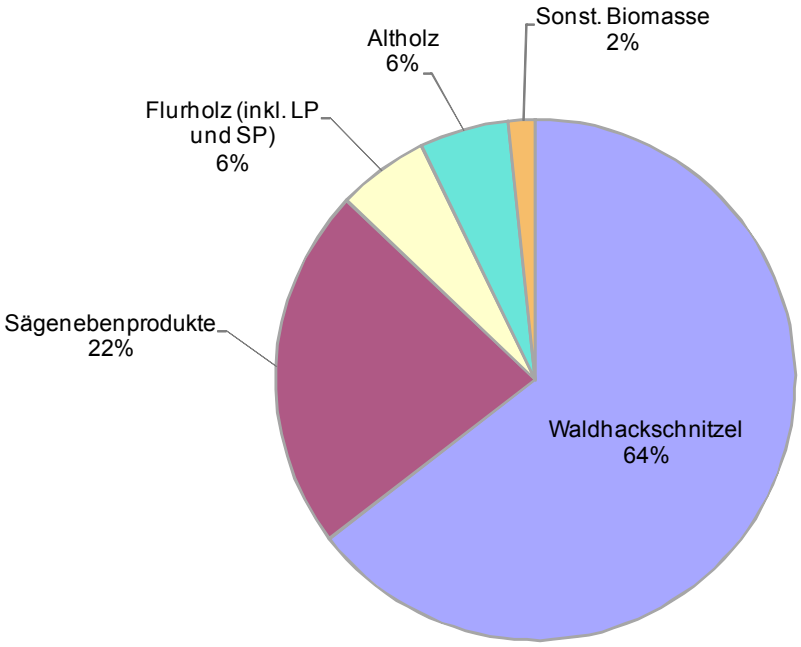


Abbildung 5: Anteile der eingesetzten Biomasse

Die bayerischen Heiz(kraft)werke decken ihren Bedarf hauptsächlich mit Waldhackschnitzel und Sägenebenprodukte (zusammen 86 % Anteil). Zwei Werke unter 500 kW Biomasse-Nennleistung verfeuerten ausschließlich Holzpellets als Brennstoff. Über alle Größenklassen hinweg annähernd gleich ist die Verteilung der Waldhackschnitzel hinsichtlich Laubholz- und Nadelholzanteil. Im Durchschnitt finden

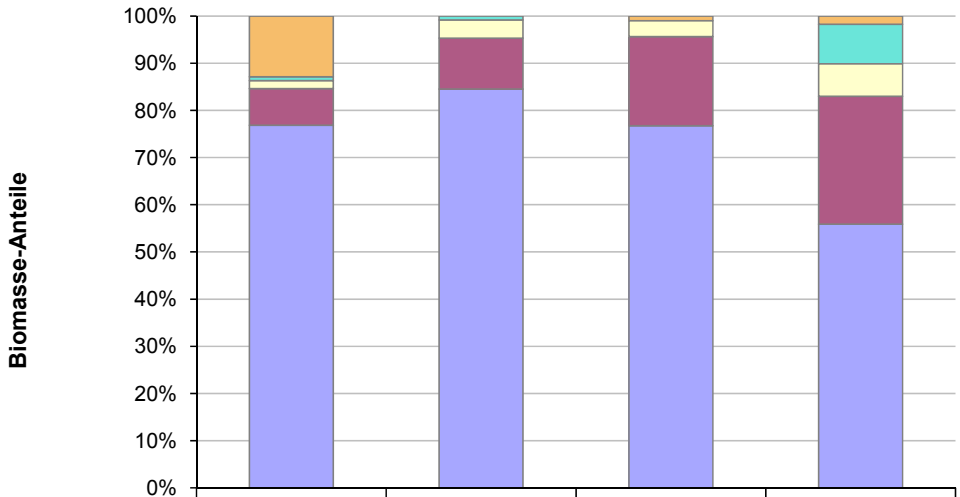
Hackschnitzel aus Laubholz zu ca. 20 % und aus Nadelholz zu etwa 80 % Verwendung.

Vergleicht man die ermittelten Brennstoffanteile mit der Umfrage von WITTKOPF (2005), so liegen die Werte in der gleichen Größenordnung. WITTKOPF (2005) ermittelte bei einer Datengrundlage von 52 BMH(K)W für Waldhackschnitzel einen Anteil von 66 %, für Sägenebenprodukte von 21 %, für Flurholz von 7 %, für sonstige Biomasse / Altholz von 6 %.

Der Anteil der eingesetzten Biomasse hängt stark von der jeweiligen Größe der Heiz(kraft)werke ab. Während Waldhackschnitzel in Werken unter 5000 kW Leistung ca. drei Viertel der gesamten Biomasse einnahmen, reduzierte sich dieser Anteil auf gut 50 % bei Werken mit über 5 MW Biomasse-Nennleistung. Sägenebenprodukte spielen hingegen als Brennstoff vor allem in größeren Werken ab 1 MW Leistung eine wichtige Rolle. Der Anteil dieses Brennstoffes sinkt bei kleineren Werken unter 1 MW deutlich ab.

Die Anteile der eingesetzten Biomasse sind in nachfolgender Abbildung 6 geordnet nach Heizwerksgröße dargestellt. Auffällig ist, dass Altholz nur in BMH(K)W über 5 MW Biomasse-Nennleistung eine gewisse Bedeutung hat (8 %).

Der recht große Anteil an „Sonstiger Biomasse“ von 13 % bei Werken unter 500 kW ist hierbei vor allem auf den Einsatz von Holzpellets zurückzuführen. Wie bereits erwähnt, heizen zwei kleinere Heiz(kraft)werke ausschließlich mit Pellets.



	< 500 kW	500 - 999 kW	1000 - 4999 kW	> 4999 kW
Sonst. Biomasse	13%	0%	1%	2%
Altholz	1%	1%	0%	8%
Flurholz (inkl. LP und SP)	2%	4%	3%	7%
Sägenebenprodukte	8%	11%	19%	27%
Waldhackschnitzel	77%	85%	77%	56%

Abbildung 6: Anteile der eingesetzten Biomasse bei verschiedenen Heiz(kraft)werksgrößen

Im Vergleich zur Arbeit von WITTKOPF (2005) zeigt sich bei den Werken über 500 kW Biomasse-Nennleistung eine Zunahme des Waldhackschnitzelanteils von 10 bis 20 %. Dagegen nahm bei diesen Größenklassen der Anteil an Sägenebenprodukten in etwa gleichem Umfang ab. Eine mögliche Erklärung für diese Entwicklung könnte sein, dass die Sägenebenprodukte vermehrt in sägewerkseigenen Heizwerken genutzt werden; ein Grund könnte aber auch in einem starken Preisanstieg bei den

Sägenebenprodukten liegen. Bei Heiz(kraft)werken unter 500 kW blieben sowohl der Waldhackschnitzelanteil als auch die Menge an Sägenebenprodukten in etwa gleich.

4.2.2 Preise für Hackschnitzel und Sägenebenprodukte

63 der 73 an der Umfrage beteiligten Biomasse(heiz)kraftwerke machten detaillierte Angaben zur Preisstruktur ihrer eingesetzten Biomasse. Aus Gründen der besseren Vergleichbarkeit werden die Ergebnisse der Untersuchung einheitlich in € / t atro angegeben. Da die Preise für Waldhackschnitzel oft erheblich schwanken werden sie nach den Einflussfaktoren „Heiz(kraft)werksgröße“ und „Lieferant“ näher betrachtet. Gleiches gilt auch für Sägenebenprodukte.

Preise nach Heizwerksgröße

Der durchschnittliche Preis für **Waldhackschnitzel** nimmt mit Zunahme der Biomasse-Nennleistung (Abbildung 7) bzw. der eingesetzten Brennstoffmenge (Abbildung 8) ab. Zahlen kleinere Werke unter 500 kW Biomasse-Nennleistung im Schnitt 100 € / t atro, so reduziert sich dieser Wert fast um die Hälfte bei Biomasseheiz(kraft)werken über 5000 kW Biomasse-Nennleistung. Der Durchschnittspreis liegt nach Menge gewichtet bei 61 € / t atro, ungewichtet bei 88 € / t atro.

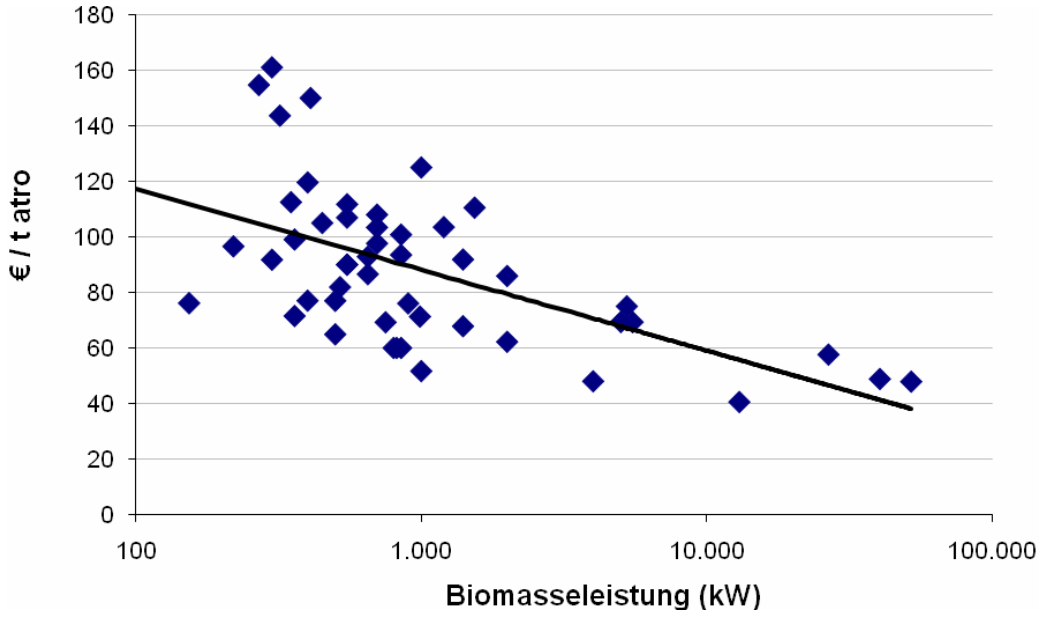


Abbildung 7: Preise für Waldhackschnitzel in Abhängigkeit von der Heiz(kraft)werksgröße im Jahr 2006

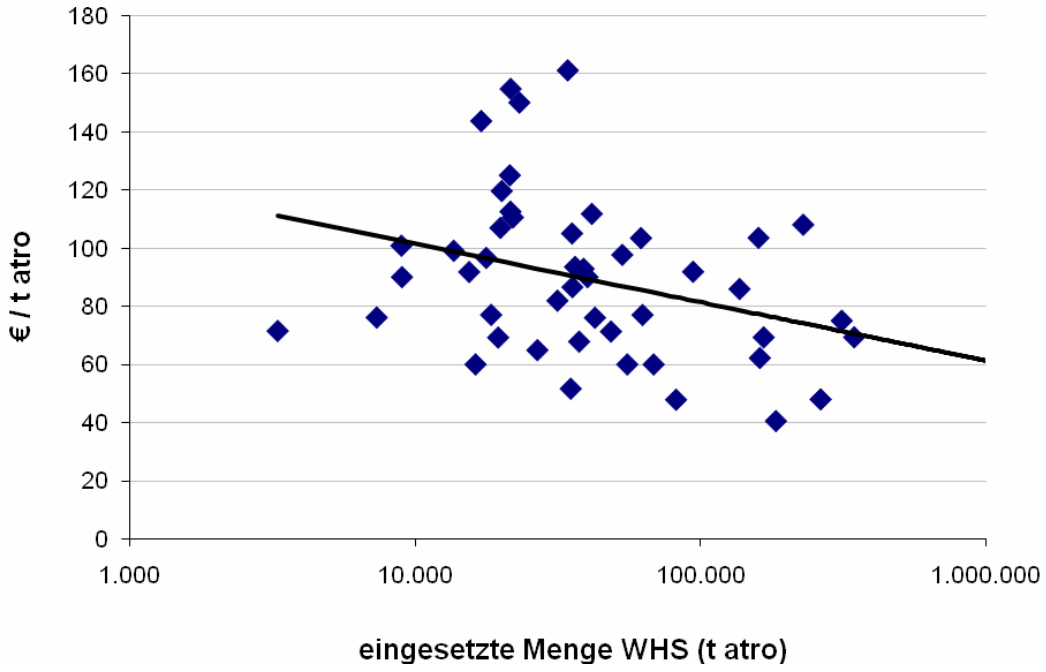


Abbildung 8: Preise für Waldhackschnitzel in Abhängigkeit der eingesetzten Rohstoffmenge im Jahr 2006

Im Rahmen der Befragung schwankten die Preise für Waldhackschnitzel über alle Größenklassen hinweg zwischen 20 und 161 € / t atro. Aufgrund dieser enormen Spannweiten werden die Preise für Waldhackschnitzel und für Sägenebenprodukte zunächst nach Heizwerksgrößen verglichen (siehe Abbildung 9).

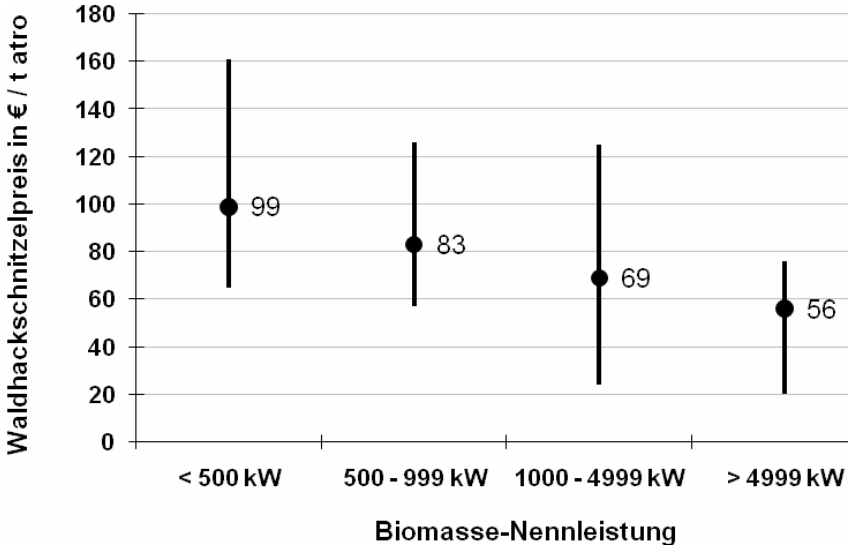


Abbildung 9: Minimum, Mittelwert und Maximum der Waldhackschnitzelpreise in Abhängigkeit von der Heiz(kraft)werksgröße (Erhebungsjahr 2006)

Auch innerhalb der einzelnen Größenkategorien schwanken die Preise zum Teil erheblich. Bei Waldhackschnitzeln zeigt sich aber bei großen Werken über 5 MW Biomasse-Nennleistung eine deutliche Abnahme der Schwankungsbreite. Ein ähnliches Ergebnis lieferte auch die Untersuchung von WITTKOPF (2005).

Bei den **Sägenebenprodukten** wurden Preise zwischen 31 und 111 € / t atro gezahlt. Abbildung 10 zeigt die Schwankungen der Preise in Abhängigkeit der Heizwerkgröße.

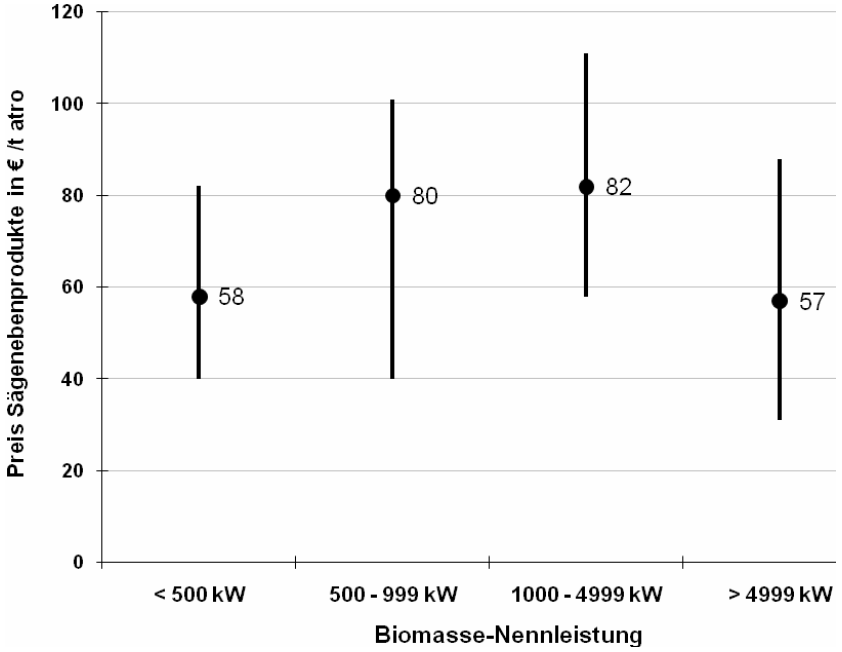


Abbildung 10: Minimum, Mittelwert und Maximum für Sägenebenprodukte in Abhängigkeit von der Heiz(kraft)werksgröße (Erhebungsjahr 2006)

Verglichen mit den Preisen bei Waldhackschnitzeln stellt sich bei den Sägenebenprodukten ein ähnlicher Preisabfall bei Heiz(kraft)werken dar. Kleinere Anlagen unter 500 kW zahlen hier jedoch nur 58 € / t atro und liegen damit auf dem Niveau von Werken mit einer Biomasse-Nennleistung über 5 MW. Hier gilt es aber zu berücksichtigen, dass in kleinen Werken (Größenklasse 1 und 2) nur eine relativ geringe Menge an Sägenebenprodukten verfeuert wird. Der Anteil der SNP an den eingesetzten Brennstoffen liegt hier bei unter 10 %. Dementsprechend beziehen sich die Preisangaben bis 1000 kW Heiz(kraft)werksgröße auf eine recht geringe Menge Sägenebenprodukte.

Tabelle 2 zeigt einen Vergleich der Preise mit denen aus den Untersuchungen von WITTKOPF (2005) und NEUGEBAUER et al. (2005).

Tabelle 2: Entwicklung der Waldhackschnitzelpreise (Mittelwerte)

Datenerhebung	< 500 kW	500 -999 kW	1000 - 4999 kW	> 5000 kW
Umfrage 2001 (Wittkopf 2005)	65 € / t atro	62 € / t atro	63 € / t atro	37 € / t atro
Umfrage 2003 (Neugebauer et al. 2005)	75 € / t atro	83 € / t atro	76 € / t atro	50 € / t atro
Umfrage 2006	99 € / t atro	83 € / t atro	69 € / t atro	56 € / t atro

Es zeigt sich, dass in den letzen fünf Jahren die Preise für Waldhackschnitzel zum Teil deutlich gestiegen sind. Vom Jahr 2003 auf 2006 sind die größten Steigerungsraten in der Heizwerkskategorie bis 500 kW festzustellen.

Preise nach Lieferant

Die Preise der Waldhackschnitzel und Sägenebenprodukte wurden auch hinsichtlich ihrer Herkunft untersucht. Dazu wurde die Preisstruktur der verschiedenen Anbieter bzw. Lieferanten getrennt nach den Größenklassen der Heiz(kraft)werke erfasst und ausgewertet. Dadurch können die Preise der unterschiedlichen Quellen miteinander verglichen werden (Tabelle 3 und Tabelle 4).

Bei den nachfolgenden Tabellen ist allerdings zu beachten, dass nicht für alle Preissparten von mehreren Werken Preise angegeben wurden. Somit können einige Angaben auf nur einer einzigen Preisnennung beruhen. Die Werte sind daher mit einer gewissen Vorsicht zu betrachten und sollten in erster Linie als Anhalt und Orientierungshilfe verstanden werden. Unabhängig davon liefert die Umfrage aber dennoch wichtige Informationen zu den 2006 in Bayern gezahlten Preisen für Biomasse.

Tabelle 3: Preise für Waldhackschnitzel in Abhängigkeit von Heiz(kraft)werksgröße und Anbieter

Heizwerksgröße	< 500 kW				500 - 999 kW			
		€ / t atro				€ / t atro		
Lieferant	**Anzahl***	**Min**	**Max**	**MW**	**Anzahl***	**Min**	**Max**	**MW**
eigene Produktion	3	76	105	**92**	1			**65**
WBV / FBG	4	71	161	**116**	9	65	107	**88**
Privatwaldbesitzer	7	65	157	**107**	11	60	101	**76**
Staatswald	2	69	150	**91**	1			**71**
Kommunalwald	1			**89**	5	71	108	**91**
Forstunternehmer	1			**120**	2	94	108	**101**
Handelsunternehmen	3	65	111	**80**	3	57	126	**89**
Sonstige								
Gesamtergebnis	21	65	161	**99**	32	57	126	**83**

Heizwerksgröße	1000 - 4999 kW				> 4999 kW			
		€ / t atro				€ / t atro		
Lieferant	**Anzahl***	**Min**	**Max**	**MW**	**Anzahl***	**Min**	**Max**	**MW**
eigene Produktion	2	24	101	**58**	3	48	72	**55**
WBV / FBG	2	49	104	**76**	6	49	76	**62**
Privatwaldbesitzer	3	67	111	**94**	3	45	72	**54**
Staatswald	1			**55**	3	46	72	**55**
Kommunalwald	2	49	55	**52**	3	44	72	**54**
Forstunternehmer	3	42	86	**62**	4	49	76	**61**
Handelsunternehmen	3	62	125	**85**	6	20	75	**52**
Sonstige					2	49	58	**53**
Gesamtergebnis	16	24	125	**69**	30	20	76	**56**

* Anzahl der Nennungen; Min = Minimum, Max = Maximum, MW = Mittelwert

Die weitaus höchsten Hackschnitzelpreise erzielen bei kleinen Werken bis 500 kW die Forstlichen Zusammenschlüsse (Waldbesitzervereinigungen – WBV, Forstbetriebsgemeinschaften – FBG) und die Privatwaldbesitzer. Das Energieholz aus eigener Produktion setzen die Heiz(kraft)werke dagegen meist auf deutlich geringerem Niveau an.

Besonders Waldhackschnitzel von Privatwaldbesitzern und Forstlichen Zusammenschlüssen erreichen häufig Preise über 100 € / t atro. Dies gilt aber nur für Werke bis 5 MW Biomasse-Nennleistung. Bei großen Heiz(kraft)werken sind die Preisschwankungen insgesamt geringer und das Preisniveau ausgeglichener, darüber hinaus werden hier fast einheitlich über nahezu alle Anbieter hinweg nur Spitzenpreise von 76 € / t atro erzielt. Lediglich ein Handelsunternehmer verkaufte hier deutlich unter den sonst üblichen Werten. Mit 20 € / t atro wurde damit eine Tiefstmarke gesetzt. Ein Grund für die geringeren Preise bei BMH(K)W über 5 MW Biomasse-Nennleistung dürfte dabei unter anderem in den anlagenbedingten niedrigen Qualitätsansprüchen großer Werke an das Produkt Hackschnitzel zu finden sein. Gesamt betrachtet scheint sich bei den großen Werken auch aufgrund der weiteren Einzugsgebiete ein überregionaler Marktpreis zu bilden (siehe auch Tabelle 5). Diese Tendenz zeigten schon die Studien von WITTKOPF (2005) und NEUGEBAUER et al. (2005).

Die Sägenebenprodukte werden von den Heiz(kraft)werken hauptsächlich direkt von den Sägewerken bezogen. Mengenmäßig spielen SNP als Biomasse-Brennstoffe vor allem bei größeren Werken über 1 MW Leistung eine gewisse Rolle, kleinere Werke setzen diesen Brennstoff meist nur in geringem und marginalem Umfang ein.

Tabelle 4: Preise für Sägenebenprodukte in Abhängigkeit von Heiz(kraft)werksgröße und Anbieter

Heizwerksgröße	**< 500 kW**				**500 - 999 kW**			
		€ / t atro				**€ / t atro**		
Lieferant	**Anzahl***	**Min**	**Max**	**MW**	**Anzahl***	**Min**	**Max**	**MW**
eigene Produktion								
Sägewerke	4	40	82	**58**	4	40	101	**71**
Handelsunternehmen					4	67	90	**76**
Sonstige					1			**94**
Gesamtergebnis	**4**	**40**	**82**	**58**	**9**	**40**	**101**	**80**

Heizwerksgröße	**1000 - 4999 kW**				**> 4999 kW**			
		€ / t atro				**€ / t atro**		
Lieferant	**Anzahl***	**Min**	**Max**	**MW**	**Anzahl***	**Min**	**Max**	**MW**
eigene Produktion								
Sägewerke	2	58	111	**96**	3	31	88	**57**
Handelsunternehmen	2	62	107	**88**				
Sonstige	1			**62**				
Gesamtergebnis	**5**	**58**	**111**	**82**	**3**	**31**	**88**	**57**

* Anzahl der Nennungen; Min = Minimum, Max = Maximum, MW = Mittelwert

Deutlich zeigt sich der Preisunterschied vor allem zwischen Heizkraftwerken über 5 MW (durchschnittlich 57 € / t atro) und Werken mit einer Leitung zwischen 1 und 5 MW (durchschnittlich 82 € / t atro).

Preise nach Wassergehalt

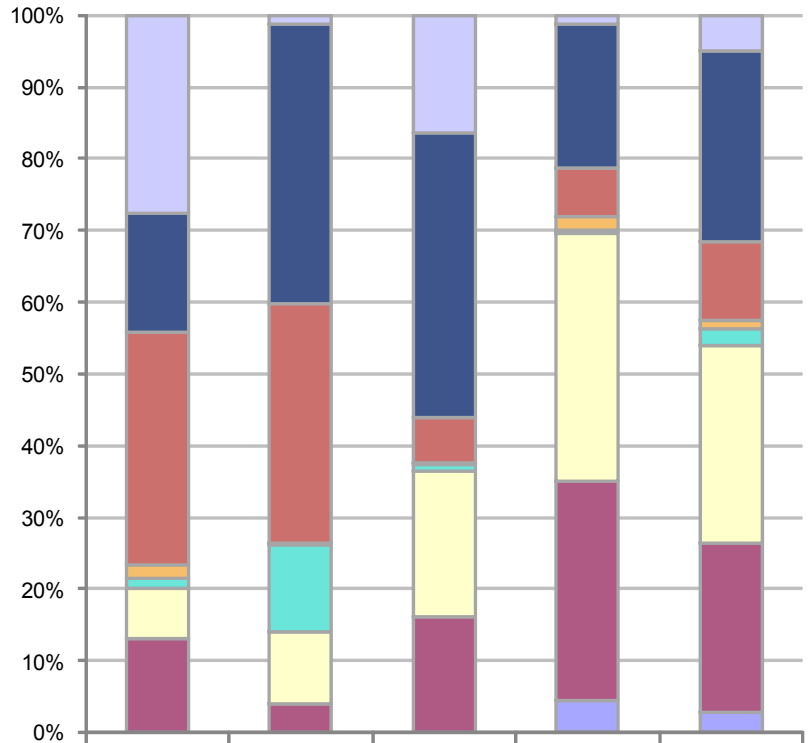
Des Weiteren beeinflusst auch der Wassergehalt die Gestaltung der Preise für Waldhackschnitzel. Die Frage „Wird für Waldhackschnitzel mit einem höheren Wassergehalt weniger bezahlt?“ bejahten von 63 Werken 27 (43 %). Jedoch beinhaltet die Gruppe der 36 Heizwerke, die die Frage verneinten, 27 Werke, die

nach der Wärmemenge abrechnen. Bei dieser Abrechungsmethode hat der Wassergehalt einen indirekten Einfluss auf den Erlös des Brennstofflieferanten.

Die erfassten Staffelungen der Waldhackschnitzelpreise sind sehr vielfältig. Beispielsweise wird eine unterschiedliche Anzahl von Preisgruppen gebildet oder die Preise sind in 1%, 5 % oder 10 %-Schritten gestaffelt.

4.2.3 Struktur der Biomasseversorgung

Abbildung 11 zeigt die Zusammensetzung der Lieferanten von Waldhackschnitzeln gegliedert nach Heiz(kraft)werksgröße.



	< 500 kW	500 - 999 kW	1000 - 4999 kW	> 4999 kW	Gesamt
eigene Produktion	28%	1%	16%	1%	5%
WBV / FBG	17%	39%	40%	20%	27%
Privatwaldbesitzer	32%	33%	6%	7%	11%
Staatswald	2%	0%	0%	2%	1%
Kommunalwald	1%	12%	1%	0%	2%
Forstunternehmer	7%	10%	20%	35%	28%
Handelsunternehmen	13%	4%	16%	30%	23%
Sonstige	0%	0%	0%	5%	3%

Abbildung 11: Anteile der Lieferanten für Waldhackschnitzel nach Heiz(kraft)werksgröße

Mit zunehmender Heizwerksgröße nehmen die Anteile der Handelsunternehmer und der Forstunternehmer zu. Der Anteil der Forstlichen Zusammenschlüsse (FBG / WBV) schwankt zwischen 17 und 40 % und beträgt im Durchschnitt etwa ein Viertel.

Sägenebenprodukte werden über alle Heizwerkgrößen vorwiegend direkt von Sägewerken (87 %) geliefert.

Die Transportentfernungen für Waldhackschnitzel liegen im Mittel bei etwa 20 km (siehe Tabelle 5). Aufgrund der teilweisen geringen Anzahl der Nennungen, bieten die Werte in erster Linie eine Orientierungshilfe.

Tabelle 5: Transportentfernungen für Waldhackschnitzel in Abhängigkeit von Heiz(kraft)werksgröße und Anbieter

Heizwerksgröße	< 500 kW				500 – 999 kW			
		€ / t atro				€ / t atro		
Lieferant	**Anzahl***	**Min**	**Max**	**MW**	**Anzahl***	**Min**	**Max**	**MW**
eigene Produktion	4	2	15	**6**	1	12	12	**12**
WBV / FBG	4	7,5	19	**12**	8	6	20	**14**
Privatwaldbesitzer	7	2	30	**10**	10	5	20	**12**
Staatswald	2	10	30	**20**	1		30	
Kommunalwald	1		19		4	4	15	**9**
Forstunternehmer	1		35		1		30	
Handelsunternehmen	3	15	65	**33**	3	5	25	**12**
Sonstige	0				**0**			
Gesamtergebnis	**21**	**2**	**65**	**19**	**28**	**4**	**30**	**17**

Heizwerksgröße	1000 - 4999 kW				> 4999 kW			
		€ / t atro				€ / t atro		
Lieferant	**Anzahl***	**Min**	**Max**	**MW**	**Anzahl***	**Min**	**Max**	**MW**
eigene Produktion	4	3	20	**12**	2	10	10	**10**
WBV / FBG	4	15	25	**20**	6	10	90	**28**
Privatwaldbesitzer	4	5	20	**14**	3	10	40	**22**
Staatswald	1		30		3	10	20	**17**
Kommunalwald	2	2	50	**26**	3	10	20	**15**
Forstunternehmer	3	20	50	**33**	3	10	80	**37**
Handelsunternehmen	3	5	26	**17**	4	10	70	**48**
Sonstige	0				1		80	
Gesamtergebnis	**21**	**2**	**50**	**22**	**25**	**10**	**90**	**32**

* Anzahl der Nennungen (Min = Minimum, Max = Maximum, MW = Mittelwert)

Ab 5 MW Heizwerksgröße steigt das Einzugsgebiet für Waldhackschnitzel, wie die größten Maximalwerte belegen. Generell ist aber zu erkennen, dass die Heizwerksbetreiber versuchen, ihren Bedarf an Waldhackschnitzeln aus ihrem direkten Umkreis zu decken.

4.2.4 Qualitätsanforderungen

56 der befragten Heiz(kraft)werke machten auch Angaben zu den Qualitätskriterien für Waldhackschnitzel. Der Wassergehalt der Waldhackschnitzel spielt als Qualitätskriterium mit 39 Nennungen die größte Rolle, gefolgt von der Hackgutgröße mit 30 Nennungen. Als weitere Qualitätsanforderungen werden der Nadel- bzw. Blattanteil, Rindenanteil sowie Fremd- und Störstoffe genannt.

4.2.5 Abrechnungsmodalitäten

Die Abbildung 12 gibt einen Überblick über die gängigen Abrechnungsmethoden getrennt nach den Größenkategorien wieder. Gesamt betrachtet wird am häufigsten nach der produzierten Wärme und nach der Kombination aus Gewicht und Wassergehalt abgerechnet.

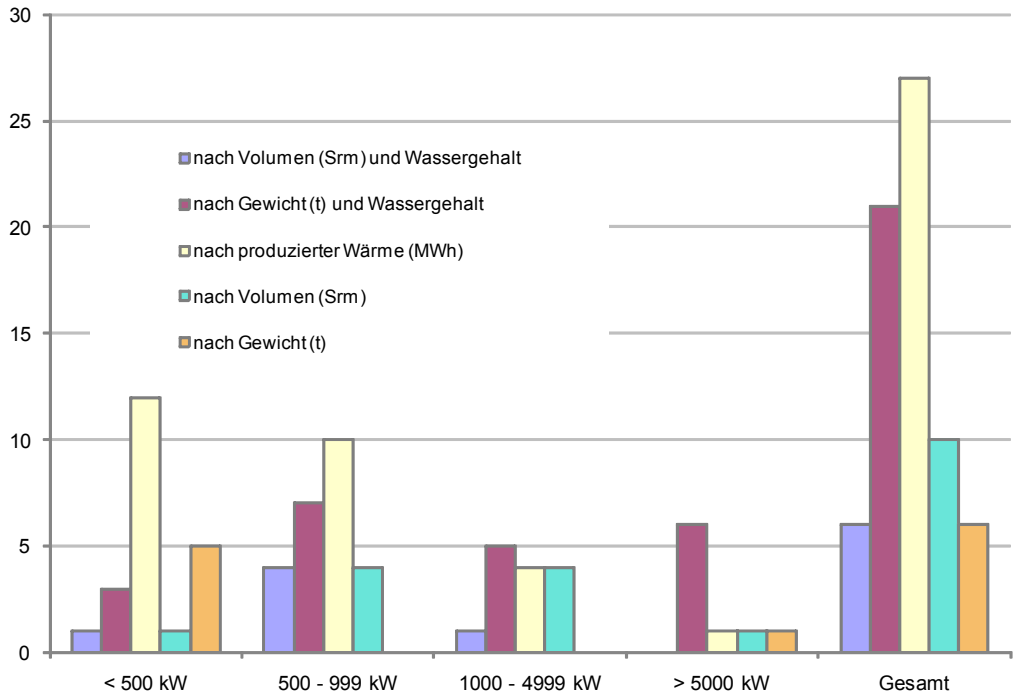


Abbildung 12: Anzahl der erfassten Abrechnungsmethoden für Biomasse nach Heiz(kraft)werksgröße

Interessant ist aber auch die Verteilung der Abrechnungsvarianten nach der Heiz(kraft)werksgröße. Kleinere Werke rechnen bevorzugt nach der produzierten Wärme (MWh) ab, bei größeren Werken dominiert eher die Abrechnung nach Gewicht (t) und Wassergehalt. Häufig besitzen kleinere Heizwerke nur einen einzigen Lieferanten. Der direkte Zusammenhang zwischen produzierter Wärme und Lieferant ist dadurch unproblematisch herzustellen. Weitere Abrechnungsmodalitäten sind das Volumen (Schüttraummeter) mit bzw. ohne Wassergehalt sowie das Gewicht ohne Wassergehalt.

4.2.6 Holzasche

Dieses Kapitel behandelt den Anfall an Holzasche (Rost- und Filterasche) sowie die Entsorgungswege und die dabei entstehenden Kosten.

Anfall an Holzasche

Nach Auskunft von 40 Heiz(kraft)werken beläuft sich der jährliche Anfall von Rost- und Filterasche auf relative Größen zwischen 0,5 % und 5,9 % der eingesetzten Biomasse (atro).

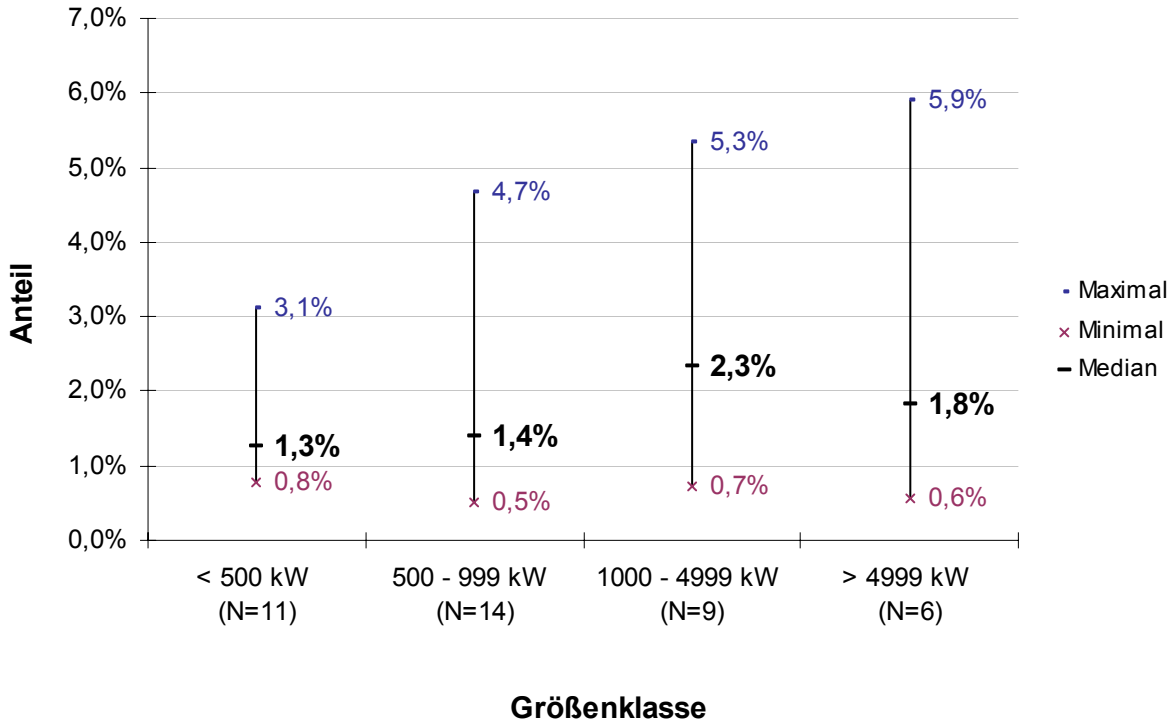
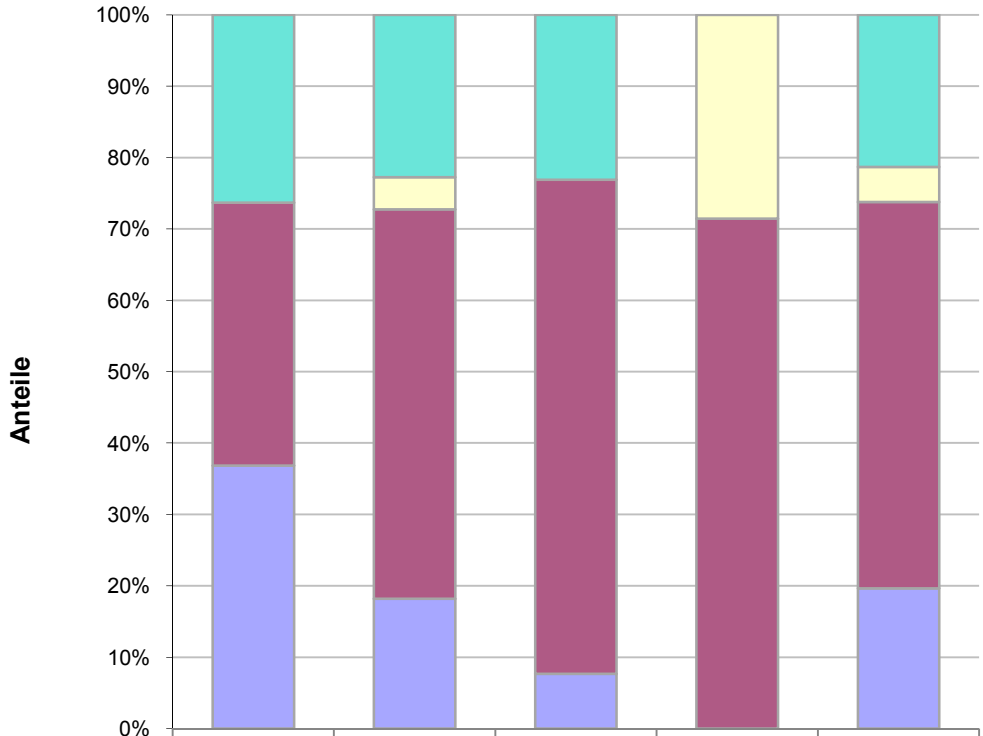


Abbildung 13: Gesamt-Anfall an Asche (Rost- und Filterasche) nach Heizwerksgröße

Bei einer Differenzierung der Werte nach Größenklassen von Biomasseheiz(kraft)werken sind zwei Tendenzen zu beobachten. Zum einen nimmt die Spannweite des Ascheanfalls mit der Größenklasse zu. Zum anderen werden mit steigender Größenklasse höhere Spitzenwerte erreicht. Die Werte gelten jeweils für den gesamten Ascheanfall. Der Anteil der Filterasche (Median) schwankt zwischen 0,10 und 0,23 % der eingesetzten Biomasse und beträgt somit im Mittel zwischen 8 und 13 % des Anfalls an Holzasche.

Entsorgung der Rostasche

Rostasche kann beispielsweise als Ausgangsstoff zur Herstellung von Düngemitteln verwertet oder auf einer Deponie beseitigt werden. 61 Heiz(kraft)werke gaben darüber Auskunft, wie mit ihrer Rostasche verfahren wird (siehe Abbildung 14).



	< 500 kW (N=19)	500 - 999 kW (N=22)	1000 - 4999 kW (N=13)	> 5000 kW (N=7)	alle (N=61)
Mitnahme durch Brennstofflieferant	26%	23%	23%	0%	21%
Sonstige	0%	5%	0%	29%	5%
Beseitigung	37%	55%	69%	71%	54%
Verwertung als Dünger (landw. Flächen)	37%	18%	8%	0%	20%

Abbildung 14: Verwertungs- und Entsorgungswege von Rostasche nach Heizwerksgröße

Mit zunehmender Größenklasse erfolgt eine Zunahme der Entsorgung der Asche auf Deponien und eine Abnahme der Verwertung als Dünger. Bis zur Heiz(kraft)werksgröße von 5 MW ist in etwa ein Viertel der Fälle der Brennstofflieferant vertraglich verpflichtet die entstehende Rostasche wieder mitzunehmen. Diese Heizwerke rechnen in der Regel den Brennstoff nach der produzierten Wärmemenge ab. Welche Versorgungs- bzw. Entsorgungsvariante der Brennstofflieferant wählt, wurde nicht erfasst und ist auch den Heizwerksbetreibern nicht immer bekannt. Jedoch dürfte bei kleinen Anlagen die Verwertung als Dünger überwiegen.

Kosten durch die Beseitigung von Asche

Den Angaben aus der Umfrage zufolge entstanden ausschließlich Kosten für die Ascheentsorgung. Bei keinem Werk waren Erlöse zu verzeichnen. Zwar geben einige Werke an, dass sie keine Ausgaben für die Entsorgung der Filterasche bzw. Rostasche tätigen. Es ist allerdings davon auszugehen, dass diese Werke nur Lieferanten besitzen, deren Leistung auf Basis der produzierten Wärme abgerechnet wird. In solchen Verträgen übernimmt in der Regel der Lieferant die Entsorgung der Asche, so dass für das Werk keine gesonderten Kosten für die Entsorgung entstehen.

Die Kosten sind also indirekt in der Wärmevergütung enthalten. Alternativ kann aber auch die Rostasche kostenfrei für die Verwertung als Dünger abgegeben werden. Die Kosten können erheblich schwanken, wie Tabelle 6 zeigt.

Tabelle 6: Kosten für die Entsorgung der Holzasche nach Heizwerk-Größenklassen

Größenklasse	< 500 kW				500-999 kW			
	Anzahl	Min (€/t)	Max (€/t)	arith. Mw (€/t)	Anzahl	Min (€/t)	Max (€/t)	arith. Mw (€/t)
Rostasche	8	0	245	60	12	0	300	83
Filterasche	4	0	225	96	9	0	250	85
Größenklasse	**1000-4999 kW**				**> 5000 kW**			
	Anzahl	Min (€/t)	Max (€/t)	arith. Mw (€/t)	Anzahl	Min (€/t)	Max (€/t)	arith. Mw (€/t)
Rostasche	4	25	113	70	6	0	50	33
Filterasche	4	60	230	122	6	80	120	104

Die Entsorgungskosten für Rostasche betragen im Mittel 65 €/t. Für die Beseitigung der Filterasche sind durchschnittlich 98 €/t zu entrichten und damit etwa das 1,5fache wie für die Verwertung oder Beseitigung der Rostaschen. Im Einzelfall werden 250 €/t für die Beseitigung der Filterasche und sogar 300 €/t für die Entsorgung der Rostasche bezahlt. Diese hohen Kosten fallen vor allem bei Heizwerken kleiner 1 MW an, was wahrscheinlich durch den geringen Mengenanfall der Asche erklärt werden kann.

4.2.7 Einschätzungen zur eigenen Situation und zum Energieholzmarkt

Aus Sicht der Heizwerksbetreiber liegen die vordringlichsten Probleme für das eigene Werk bei der Brennstoffversorgung (Kosten, Liefersicherheit, Qualität der Hackschnitzel) sowie bei der Anlagentechnik und deren Wartung (siehe Tabelle 7).

Tabelle 7: Zusammenstellung der wichtigsten Probleme für das eigene Heiz(kraft)werk[2]

Problem	Nennungen
Brennstoffkosten	10
Hackgutversorgung (Liefersicherheiten)	9
Anlagentechnik + Wartung	8
Qualität der Hackschnitzel	7
Ascheentsorgung (Kosten + "strenge" Düngeverordnung)	4
Auslastung der Anlage	3
Emissionswerte	2
Förderwesen	2
Qualitätsermittlung (u.a. Bestimmung Wassergehalt)	1
Brennstofflager	1
Auflagen von Behörden	1
Einspeisevergütung (Tarifgestaltung)	1
keine Probleme	1
Anzahl der Heizwerke ohne Angaben	35

[2] *Mehrfachnennungen sind möglich*

Betrachten die Heizwerkbetreiber den gesamten bayerischen Energieholzmarkt, so stehen die Entwicklung der Brennstoffkosten sowie die Potenziale an Energieholz und deren Mobilisierbarkeit im Vordergrund (siehe Tabelle 8).

Tabelle 8: Zusammenstellung der wichtigsten Probleme für den Energieholzmarkt Bayern

Probleme	Nennungen
Markt (Sprunghafte unkalkulierbare Preisentwicklungen)	14
Potenziale an Energieholz	3
keine Probleme	3
Erschließung von Reserven im Kleinprivatwald	2
fehlende Energieholzströme aus Wäldern der BaySF	2
fehlende Koordination im Bereich Waldhackschnitzel	1
Betreiberstruktur der BMH(K)W	1
saisonale Lieferengpässe	1
Verlust von Waldflächen durch Ausweisung von NSG/NP	1
Mangel an Fachpersonal	1
Anzahl der Heizwerke ohne Angaben	44

Tabelle 9 stellt die genannten Verbesserungsmöglichkeiten und Empfehlungen dar.

Tabelle 9: Zusammenstellung der Verbesserungsmöglichkeiten / Empfehlungen

mehr praktische Anwendung von DIN/EN-Normen (+Preisempfehlungen)
Begründung von Energiewäldern (Brachflächen, Autobahnkreuze)
Stärkere Mobilisierung von Landschaftspflegematerial
Mobilisierung von (Energie-)Holz aus Kleinprivatwald durch Beratung
verstärkte Auflagen bei Errichtung neuer BMH(K)W
bessere Zusammenarbeit mit Forschung und (staatlichen) Institutionen
Einführung eines Verbotes, dass Waldbesitzer Holz im Wald verbrennen
Informationsplattform über Bezugsmöglichkeiten von Hackschnitzeln
Lieferverträge mit Forstbetriebsgemeinschaften
mehr Aufklärung zur Ascheentsorgung
Bayernweite Waldenergieholz-Strategie
Hackerkosten senken durch günstigen Kraftstoff
Workshop mit Entscheidungsträgern
Moderate Preisentwicklung
keine Einschränkungen der Holznutzung durch Naturschutz
Förderung von kleinen BMHW
freie Marktwirtschaft
mehr zentrale BMH(K)W schaffen

Die Reihenfolge der Aufzählung beinhaltete keine Wertung. 53 Heizwerke machten keine Angaben.

4.2.8 Prozessketten der Waldhackschnitzelversorgung von Biomasseheizkraftwerken

Im Folgenden sind exemplarisch für jede Größenklasse eine Prozesskette der Versorgung eines Biomasseheiz(kraft)werks mit Waldhackschnitzel aufgeführt. Dabei sind die jeweiligen Teilprozesse den verantwortlichen Akteuren zugeordnet. Im Anhang sind alle neun erfassten Prozessketten der Versorgung der Biomasseheiz(kraft)werke mit Waldhackschnitzel beschrieben.

Prozesskette BMHW B (Größenklasse: < 500 kW)

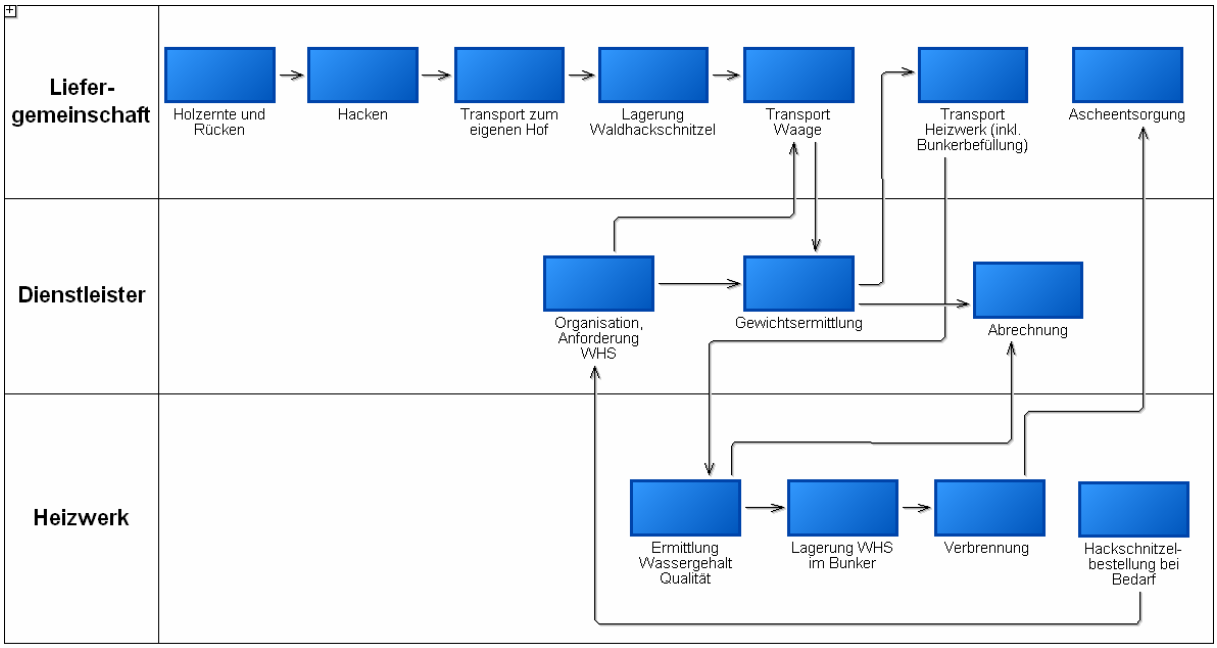


Abbildung 15: Prozesskette Waldhackschnitzelversorgung des BMHW B

Das kleine BMHW B wird von einer Kommune betrieben und zeichnet sich durch eindeutig festgelegte, einfache Strukturen zur Belieferung aus. Die Versorgung des Heizwerks mit Biomasse erfolgt durch eine Liefergemeinschaft von sieben ortsansässigen Waldbauern. Diese beliefern in einer festgelegten, sich wiederholenden Reihenfolge das Heizwerk und werden von einem vom Heizwerk bestellten Dienstleister (Überlandzentrale) koordiniert. Die geringe Anzahl beteiligter Partner, die kontinuierlich zusammenarbeiten, gewährleistet in Kombination mit der festgelegten Struktur einen gut abgestimmten Ablauf und eine qualitativ gute Versorgung. Problematisch kann wegen des fehlenden Lagerplatzes am Heizwerk nur die externe Zwischenlagerung der Waldhackschnitzel sein, wenn diese in größerem Umfang über längere Zeit erfolgt. Die klare Struktur hilft aber den Lieferanten dies zu optimieren.

Prozesskette BMHW D (Größenklasse: 500 – 999 kW)

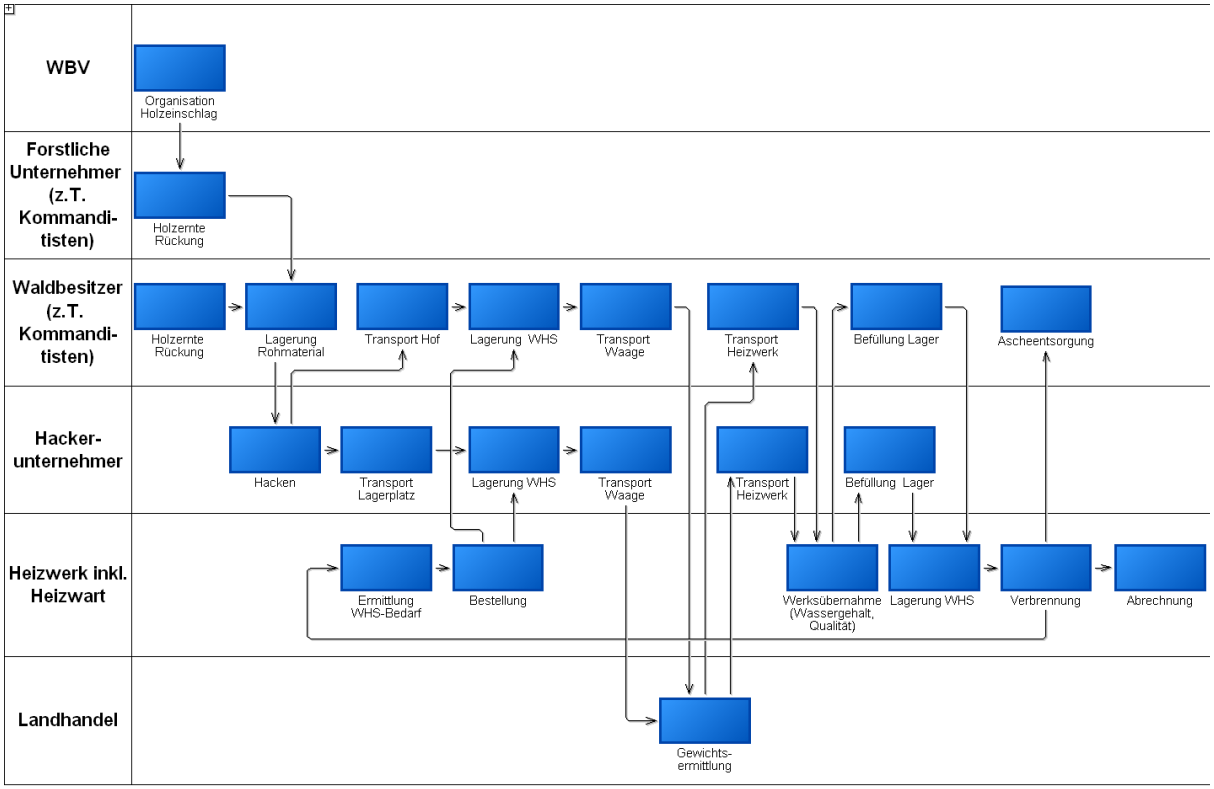


Abbildung 16: Prozesskette Waldhackschnitzelversorgung des BMHW D

Das BMHW D ist ein Beispiel für ein von der Waldbesitzseite geführtes Heizwerk. Die Holzernte inklusive Hacken sowie der Transport in ein Zwischenlager beim Waldbesitzer oder Hackerunternehmer laufen völlig entkoppelt von der Anlieferung ans Werk. Die Holzernte und das Hacken sind teilweise gesteuert durch die Geschäftsstelle der WBV oder geschehen autark durch den Waldbesitzer bzw. Hackerunternehmer. Die Anlieferung der Waldhackschnitzel erfolgt direkt in den Bunker, da keine Lagermöglichkeit am BMHW vorhanden ist. Der Abruf der Hackschnitzel wird vom Heizwerk direkt ohne vorgegebene Strukturen beim Lieferanten nach Bedarf in jedem Einzelfall durchgeführt und basiert auf der Kenntnis der örtlichen Strukturen sowie Überschaubarkeit der jährlichen Liefermengen. Die Lieferstrukturen sind relativ vielgestaltig, da einzelne Waldbesitzer und Hackerunternehmer als Lieferanten auftreten. Die zuverlässige Versorgung ist aber auch dadurch gewährleistet, dass ein Teil der Waldbesitzer am Heizwerk beteiligt sind. Die Vielfalt der Lieferanten erschwert die Lagerdauer der Waldhackschnitzel und die Qualitätsschwankungen bei den Waldhackschnitzeln zu reduzieren, ermöglicht aber ein Heizwerk dieser Größenstruktur mit geringem Verwaltungsaufwand zu betreiben.

Prozesskette BMHKW F (Größenklasse: 1000 – 4999 kW)

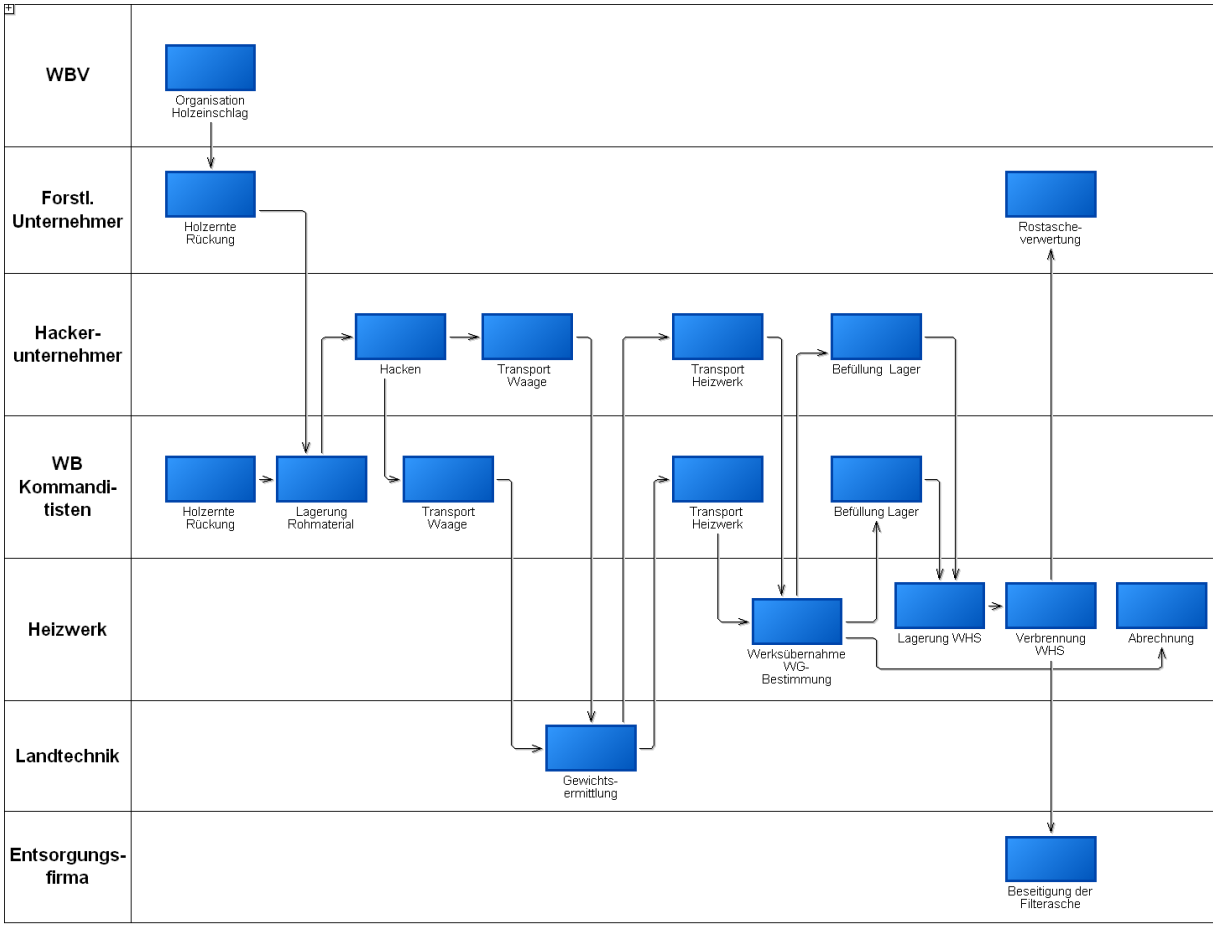


Abbildung 17: Prozesskette Waldhackschnitzelversorgung des BMHKW F

Das BMHKW F ist ein Beispiel für ein mittelgroßes Heizwerk mit Stromerzeugung, das als eigenständiger Betrieb geführt wird, in dem u. a. Waldbesitzer als Kommanditisten beteiligt sind. Die Holzernte und Zwischenlagerung des noch nicht gehackten Rohmaterials erfolgt auf Waldbesitz- oder WBV-Ebene entkoppelt von der BMHKW-Versorgung. Eine Steuerung findet auf dieser Ebene nicht statt. Die Waldbesitzer sind in ihrer Eigenschaft als Kommanditisten an einer ausreichenden Versorgung des BHKW interessiert. Das Hacken des Rohmaterials und das Anliefern an das Werkslager sind direkt gekoppelt und werden von einem begrenzten Unternehmer- / Lieferantenkreis durchgeführt. Die Anlieferung erfolgt in Abhängigkeit der Aufnahmefähigkeit des Werkslagers oder des Bedarfs über die direkte Kommunikation zwischen Werk und Lieferant ohne vorgegebene Strukturen. Der direkte Transport ins Werk bei niedrigen Anforderungen an den Wassergehalt der Waldhackschnitzel ermöglicht einen effizienten Ablauf der Versorgung eines mittelgroßen BMHKW mit eigenem Personal. Problematisch kann die Zwischenlagerung des Rohmaterials aufgrund von Waldschutzrisiken sein.

Prozesskette BMHKW I (Größenklasse: > 5000 kW)

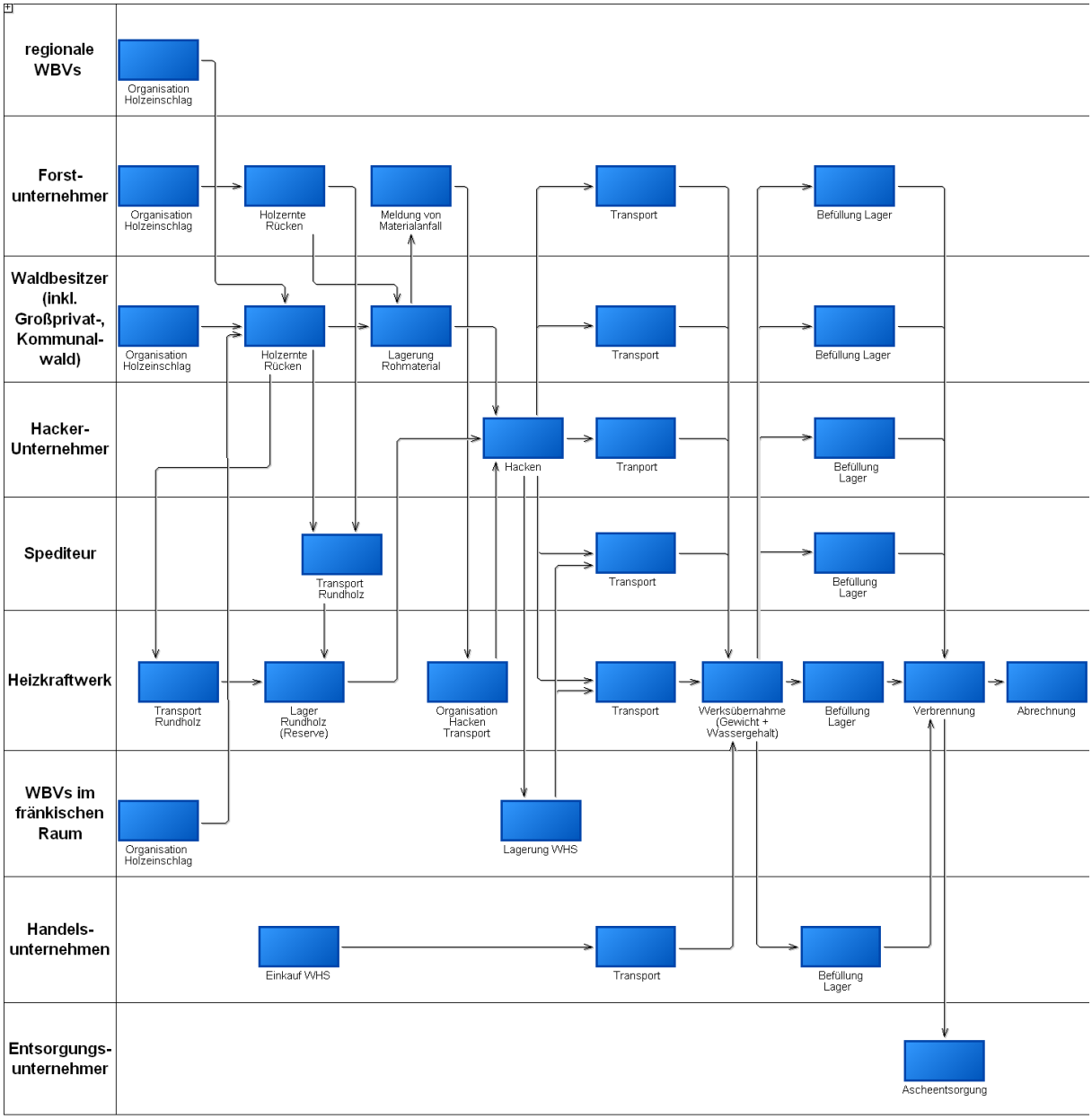


Abbildung 18: Prozesskette Waldhackschnitzelversorgung des BMHKW I

Das sehr große BMHKW I ist ein vom Waldbesitz und Wärmeabnehmern rechtlich unabhängiges Heizkraftwerk. Es wird von zahlreichen Lieferanten und von allen Stufen der Supply Chain beliefert. Dabei bilden die Forstunternehmer, die in der Regel auch die Holzernte durchgeführt haben, den Schwerpunkt. Die Steuerung des Großteils der Zufuhr beginnt bei der Einteilung der Hackerunternehmen für die an der Waldstraße oder an Sammelplätzen akquirierten Rohmaterialmengen. Das Angebot an Mengen „frei Waldstraße“ ist nicht vertraglich gesichert und wird auch nicht anderweitig gesteuert. Die Anfuhr der Waldhackschnitzel erfolgt direkt mit einem begrenzten Kreis an Transporteuren, mit Lkw aus dem eigenen Fuhrpark und zu einem geringeren Teil auch mit landwirtschaftlichen Maschinen. Eigene Lkw erhöhen die Flexibilität, führen aber auch zu höheren Fixkosten und zur Notwendigkeit diese kontinuierlich auszulasten und dadurch zu vermehrtem Organisationsaufwand.

Zusätzlich zu dem direkten Versorgungsweg von der Waldstraße ins Werk werden zwei Lagerplätze als Puffer vorgehalten, auf denen Rohmaterial zwischengelagert

wird. Dieser Puffer bedeutet eine Verteuerung der Bereitstellung, ermöglicht aber auch flexibler am Markt entsprechend den Preisen für das Rohmaterial zu agieren. Der Puffer sichert vor allem eine kontinuierliche Belieferung für „Notzeiten“, da das Werkslager nur eine begrenzte Lagerkapazität für etwa eine Woche besitzt.

Durch die Verbrennungstechnik in einem großen BMHKW können auch frisches Material mit einem hohen Wassergehalt und geringe Qualitäten genutzt werden, was die direkte Versorgung aus dem Wald und am „Spotmarkt“ möglich macht. Eine gezieltere Steuerung der Versorgung auf der Bereitstellungsebene könnte aber helfen, den Zwischentransport und die Lagerhaltung zu reduzieren.

Die Anzahl der beteiligten Akteure und der Schnittstellen und somit die Komplexität der Abläufe steigen mit der Heizwerksgröße und der benötigten Brennstoffmenge. Die befragten Heizwerkbetreiber verfolgen in Abhängigkeit von der Heizwerkgröße und Organisationsform unterschiedliche Ziele. Bei kleineren Anlagen unter 500 kW, die von Kommunen oder kirchlichen Institutionen betrieben werden, stehen teilweise ökologische und symbolische Aspekte vor ökonomischen Überlegungen. Anlagen, die von der Waldbesitzseite oder mit Beteiligung des Waldbesitzes betrieben werden, verfolgen auch das Ziel, langfristig den lokalen Absatz für ein relativ geringwertiges Sortiment zu vereinbarten Preisen zu sichern. Zusätzlich nimmt dann der Waldbesitz nicht nur als Brennstofflieferant sondern auch als Energieerzeuger an der Wertschöpfungskette der energetischen Holzverwertung teil.

4.3 Ergebnisse der Stärken-Schwächen-Analyse

Die nachfolgenden Auflistungen beinhalten die im Rahmen der Analyse der Waldhackschnitzelversorgung in der Modellregion durch Interviews mit den Akteuren der Prozesskette erfassten Stärken und Schwächen (Verbesserungsansätze) der einzelnen Prozessschritte, die sich auf die unterschiedlich gestalteten Prozessabläufe der verschiedenen BMH(K)W beziehen.

Prozessschritte Holzernte und Rückung

Stärken	Schwächen
+ gute Zusammenarbeit zwischen WBV und Forstunternehmer aufgrund jahrelanger Kontakte	- saisonale Schwankungen erschweren eine ganzjährige Versorgung
+ Prozesskette von der Holzernte bis zur Werksübernahme/Lagerung im Werk liegt in der Hand eines Lieferanten (z.B.: WBV/FBG, Liefergemeinschaft oder Unternehmer), dadurch keine Schnittstellenprobleme, eine durchgehende Organisation ist gewährleistet	- zu hohe Kosten
+ gute Kontakte und regionale Tätigkeit ermöglichen eine kontinuierliche Rohstoffversorgung	- mangelnde Einweisung
+ Versorgung aus der direkten Umgebung des Heizwerks: kurze Transportwege, gute Beziehungen in der Region und eine gute Erreichbarkeit der beteiligten Akteure	- Holzernte und Rückung nicht in einer Hand
+ jahrelange Erfahrung führt zu optimierten Arbeitsabläufen	
+ Versorgungssicherheit durch Deckung eines Anteil des Jahresbedarfs aus dem Wald der Heizwerkbetreiber	
+ Synergieeffekte durch Rücken von Stammholz und Kronen durch einen Unternehmer	

Schon bei Holzernte und Rückung wird durch eine gute Zusammenarbeit zwischen WBV und Forstunternehmer der Grundstein für eine funktionierende Waldhackschnitzelversorgung gelegt. Langjährige Erfahrungen und Kontakte der Beteiligten untereinander haben dabei positiven Einfluss auf das Arbeitsergebnis. Beachtet werden muss der hohe Kostenaufwand für die Bereitstellung des Rohmaterials.

Prozessschritte Lagerung des Rohmaterials und Hacken

Stärken	Schwächen
+ Verringerung der Schnittstellenprobleme durch Reduktion der Anzahl der beteiligten Akteure und durchgehende Organisation	- Beachtung der Waldschutzsituation (Borkenkäfer!)
+ Prozesskette von der Holzernte bis zur Werksübernahme/Lagerung im Werk liegt in einer Hand	- sofortiges Hacken, da kein Lagerplatz für Rohmaterial vorhanden
+ Akteure sind bereits gut eingespielt und haben langjährige Erfahrung	- keine optimale Bereitstellung: schlechte und unordentliche Lagerung, im Material befinden sich Steine und Erde, Poltergröße zu klein
+ Hackerunternehmer arbeiten sehr schnell und zuverlässig und sind rasch verfügbar (z. B. bei Käferproblematik)	- mangelnde Einweisung
+ Vortrocknung des Rohmaterials	- falsche Mengenmeldung aus Unerfahrenheit (zu wenig Material vor Ort)
	- Befahrbarkeit der Wege bzw. der Lagerplätze, keine Wendemöglichkeiten
	- fehlende Abstimmung mit den Nachbarn

Hohe Erfahrungswerte und eine gute Kooperation der Akteure als wichtiger Erfolgsfaktor innerhalb der Prozesskette setzen sich bei der Lagerung und beim Hacken des Rohmaterials fort. Für die optimale Bereitstellung der Hackschnitzel ist eine sorgfältige Berücksichtigung der Anforderungen des Hackers und der Transporteure notwendig. Dadurch lassen sich beispielsweise Standzeiten verringern. Negative Auswirkungen für das Hacken aber auch für die folgenden Prozessschritte haben vor allem die unsachgemäße Lagerung des Rohmaterials, verunreinigtes Material, ungenaue Ortsangaben, die Erschließungssituation und zu kleine Poltergrößen.

Prozessschritte Transport und Zwischenlagerung der Hackschnitzel

Stärken	Schwächen
+ Akteure sind bestens miteinander bekannt und eingespielt	- Zwischenlagerung führt zu Zusatzkosten
+ „Eigenlogistik“ (werkseigene Lkw) ermöglicht flexibles Reagieren	- Logistik des Abtransports - Stillstandzeiten für den Hacker
+ Schaffung von eiserner Reserve durch Lagerplätze für WHS und Rundholz	- Landwirte müssen oft sehr rasch ihr Fahrsilo räumen, wenn das Futter für den Winter eingelagert wird
+ Zwischenlager haben Pufferfunktion	- weite Transportentfernungen ohne „Rückfracht“
+ natürliche Trocknung der Hackschnitzel	- „first in – first out“ ist nicht gewährleistet
+ genaue Ablaufplanung, die den Partnern bekannt ist	

Prinzipiell sind Zwischenlager aus Kostengründen ungünstig, jedoch gibt es Gründe, die dafür sprechen, wie der fehlende Lagerplatz am Werk, die Pufferfunktion um Angebotsschwankungen auszugleichen, die Trocknung des Materials und der Einkauf bei günstiger Marktlage. Dies gilt vor allem dann, wenn der Lagerplatz mit geringen Zusatzkosten verfügbar ist.

Prozessschritt Werksübernahme

Stärken	Schwächen
+ eingespielte Übernahmeprozedur aufgrund der guten Bekanntheit untereinander und der vertrauensvollen Zusammenarbeit der beteiligten Akteure miteinander (Heizwerk, Forstunternehmer, WBV)	- Wassergehaltsermittlung
+ definierte Qualitäten (Größe, Wassergehalt)	- Fehlen einer Lkw-Waage (Umwege müssen in Kauf genommen werden)
	- Qualität des Straßenpflegematerials (Wassergehalt, Fremdmaterial, Schadstoffbelastung)
	- fehlende bzw. nur okulare Qualitätsbestimmung

Das eingespielte Zusammenarbeiten der Beteiligten spielt auch bei der Übernahme der Hackschnitzel durch die Heizwerke eine wesentliche Rolle und sorgt für Zufriedenheit bei den Akteuren. Mögliche Schwachpunkte ergeben sich bei der Ermittlung des Wassergehalts, der Verunreinigung des Materials und der Gewichtsermittlung.

Prozessschritt Lagerung der Waldhackschnitzel im Werk

Stärken	Schwächen
+ aufgrund konstruktiver Gespräche mit den Waldhackschnitzel-Lieferanten konnten Probleme abgestellt werden (gute Beziehungen, hohe Kooperationsbereitschaft)	- beschränkte Lagerkapazitäten
+ Behebung von Konstruktions- und Planungsschwächen durch zahlreiche Erfahrungen im laufenden Betrieb	- eingeschränkte Entwicklungsmöglichkeiten (keine Erweiterungen möglich)
+ ausreichende Lagerkapazitäten (ca. 6 Monate) und somit geringere Abhängigkeit von Lieferengpässen	- „frist in – first out“ ist nicht möglich
	- kein Hacken am Heizwerk möglich
	- technische Schwierigkeiten bei Lagerung im Bunker
	- technische / bauliche / konstruktionsbedingte Probleme
	- Kondenswasserbildung
	- Schimmelbildung bei Einlagerung von sehr feuchtem Material

Bei der Lagerung der Hackschnitzel im Heizwerk haben die Lagerkapazitäten entscheidenden Einfluss auf den weiteren Verlauf. Sie tragen entweder dazu bei, dass Lieferengpässe kompensiert werden können (dann wenn ausreichend Lagermöglichkeiten vorhanden sind). Oder sie sind beschränkender Faktor was die Erweiterungsmöglichkeiten des Werks angeht und erschweren die Lagerlogistik.

Prozessschritt Heizwerk

Stärken	Schwächen
+ vertrauensvolles Miteinander der beteiligten Akteure + viele Arbeiten können betriebsintern durchgeführt werden	- Brennstoffqualität: Größe, zu nass, zu hoher Nadelanteil, Verunreinigungen, mangelnde Qualität führenzu verstärktem Materialverschleiß und hohem Ascheanfall - technische / bauliche / konstruktionsbedingte Probleme - Planungen sollten mehr die Erfahrung der Praktiker (Hackschnitzellieferanten) berücksichtigen - Zusammenarbeit mit Kesselhersteller

Bei der Verarbeitung der Hackschnitzel im Heizwerk münden die Ergebnisse der vorherigen Prozessschritte in der Brennstoffqualität. Eine Tatsache, die den beteiligten Akteuren aller Prozessschritte bewusst sein sollte. Ein kontinuierlicher Erfahrungsaustausch und kommunikatives Zusammenarbeiten während der gesamten Prozesskette rückt in diesem Zusammenhang wiederum in den Vordergrund.

Prozessschritt Asche

Stärken	Schwächen
+ aus Sicht des Heizwerksbetreibers ist die Ascheentsorgung durch den Brennstoff-lieferanten eine Stärke + langjährige Erfahrung + Optimierung durch eigene Verbesserungen (wie z.B. Auffangkonstruktion durch „Big Packs“, die mit Radlader manipuliert werden)	- Düngemittelverordnung und deren Umsetzung (Rahmenbedingungen) - hohe Aschenanteile - hohe Kosten - technische / bauliche / konstruktionsbedingte Probleme - hoher Schlackenanteil verhindert Eignung zur Kompostierung

Organisation und Abrechnung

Stärken	Schwächen
+ wenig Partner, die frei Werk liefern + zeitnahe Abrechnung mit Gutschrift + vertraglich oder mit Beteiligung gebundene Lieferanten mit vereinbarten Liefermengen in definierten Zeiträumen + Versorgung mit Material aus den „eigenen“ Wäldern	- viele Partner, auf den unterschiedlichsten Stufen der Prozesskette - verzögerte Abrechnung - Versorgung am Spotmarkt

Eine korrekte und zeitnahe Abrechnung (monatlich) ist für Lieferanten, die Beziehung zu diesen und deren Identifikation mit dem Produkt von Bedeutung. Für einen Heizwerksbetreiber ist es von Vorteil einen überschaubaren Lieferantenstamm zu haben, der regelmäßig die vereinbarten Mengen in der definierten Qualität liefert.

Eine wichtige Stärke bei allen Prozessschritten und ein Lösungsansatz bei bestehenden Schwächen ist die kontinuierliche Kommunikation, d.h. der regelmäßige Austausch der beteiligten Akteure. Dabei ist es wichtig, dass klare und eindeutige Absprachen sowie Regelungen getroffen werden. Dies wird auch durch eine geringere Anzahl an Prozessbeteiligten erleichtert, da dadurch der Abstimmungsbedarf reduziert bzw. vereinfacht wird.

Außerdem zeigt sich, dass zahlreiche (technische, konstruktionsbedingte) Probleme rund um das Heizwerk im Laufe der Zeit und durch die gemachten Erfahrungen gelöst wurden. Die Betroffenen entwickelten individuelle Lösungsansätze und reagierten somit auf Planungsfehler bzw. fehlende Erfahrungswerte.

Die Qualität des Brennstoffs wird in Zukunft an Bedeutung gewinnen, da viele Schwächen wie eingeschränkte Lagerfähigkeit, Anlagenverschleiß und Ascheanfall eng mit der Qualität des Brennstoffs (Wassergehalt, Nadel- und Fremdstoffanteil) verbunden sind und Auswirkungen auf den wirtschaftlichen Betrieb haben.

4.4 Ergebnisse des Workshops mit den Beteiligten aus der Modellregion

Am 14. Januar 2008 wurde von der Forschungsgruppe ein Workshop am Zentrum Wald Forst Holz veranstaltet, bei dem die interviewten Vertreter der Heizwerksbetreiber und Brennstoffversorger der Modellregion teilnahmen. Der Workshop wurde von der TUM und der LWF organisiert und war wie folgt aufgebaut:

- Kurze Projekteinführung
- Vorstellung der Module „Innovative Verfahrenstechnik“ und „Ökobilanz“
- Erste Ergebnisse des Moduls „Ist-Analyse der Versorgung der BMH(K)W“
- Vorstellungsrunde der Teilnehmer des Workshops
- Schwachstellenergänzung und –sammlung durch die Teilnehmer
- Diskussion zu Möglichkeiten, Handlungsfeldern und Maßnahmen die Bereitstellungsprozesskette zu verbessern

4.4.1 Schwachstellenergänzung und –sammlung

Die Schwachstellen wurden mit Hilfe von mehreren Abfragerunden gestaffelt nach verschiedenen Prioritätsstufen (HP: höchste Priorität, MP: mittlere Priorität, NP: niedrige Priorität) ergänzt bzw. gesammelt. Tabelle 10 beinhaltet die gesammelten Schwachstellen. Dabei kam es auch zu Mehrfachnennungen. Zusätzlich sind die Prioritäten aus Sicht des jeweiligen Teilnehmers, der die Schwachstelle eingebracht hat, aufgeführt.

Tabelle 10: Im Rahmen des Workshops gesammelte Schwachstellen, gegliedert nach Prozessschritten[3]

Holzernte / Rückung	Lagerung (Rohmaterial) / Hacken
- Mobilisierung (Motivation zur Bereitstellung von Energieholz) (HP) - Preis (HP) - Zopfstärke / Stückmassegesetz (HP) - Preisentwicklung sowie – schwankung - Lieferkonstanz, Saisonalgang beim Angebot (MP) - Zopfdurchmesser (stofflich/energetisch) (NP) - Konstanter Auftragseingang (NP)	- Zeitspanne, Lagerung Rohmaterial (HP) - Lagerverluste (HP) - Zusammenspiel Hacken / Transport (HP) - kostspielige Logistik (HP) - Zusammenarbeit der BMH(K)W (z.B. Mengenaustausch) (NP)

[3] *Erläuterung: HP = Höchste Priorität, MP = Mittlere Priorität, NP = Niedrige Priorität*

Transport / Zwischenlagerung	Werksübernahme
- Transportmenge – Waldwege (MP) - Lagerkapazitäten (MP) - Zeitpunkt Lieferung ungleich Zeitpunkt Bedarf (NP) - Zwischenlagerung vermeiden (NP)	- einheitliche Abrechnungseinheit (HP) - Wassergehalts-Bestimmung (MP) (2-fach) - Entnahme d. Feuchteprobe am Lkw (MP) - Brennstoffbewertung (MP) - Bezahlung nach Qualität wünschenswert (MP) - Anliefersituation (zeitlich, Infrastruktur) (MP) - Nadelanteil (NP) - Abwiegen (Tageszeiten!) (NP) - Annahmezeiten (NP)
Lagerung Waldhackschnitzel am Werk	**Heizwerk**
- Lagerkapazität (HP) (2-fach) - zu kleiner Lagerplatz am Werk (HP) - Lagerung (Halle, Brennstoff, Menge) (NP)	- Brennstoffqualität / Energiegehalt (HP) - Optimierung Wirkungsgrad (MP) - Wassergehalt im Winter (NP)
Ascheentsorgung	**Allgemein**
- Kosten der Ascheentsorgung (HP) - Entsorgung Rost-/Elektrofilterasche (HP) - Ascheentsorgung (Düngemittelverordnung) (HP) - Koordination der Entsorgung (MP) - Düngemittelverordnung, Ascheentsorgung (MP) - Vorschriften + Bürokratie (MP) - Kosten der Ascheentsorgung (NP)	- Preis für Hackschnitzel müsste höher sein (NP) - Preis für Hackschnitzel müsste niedriger sein (NP) - EEG/Wettbewerbsverzerrung (NP)

4.4.2 Lösungsansätze

Die folgende Tabelle dokumentiert die im Rahmen der Diskussion entwickelten Lösungsansätze.

Tabelle 11: Lösungsansätze für verschiedene Verbesserungspotenziale

Handlungsfeld	Lösungsansätze
Mobilisierung	- Organisatoren notwendig - Bündeln, weitere Waldbesitzer integrieren (kritische Menge?)
Lieferschwankungen	- Netzwerk - Flexibilität
Transport, Waldhackschnitzel werden an den einzelnen Werken aneinander vorbei transportiert	- Zusammenarbeit, Austausch von Mengen
Zwischenlager	- Positiv: Sammel- und Pufferfunktion - Kooperation
Bestimmung Wassergehalt	- Trockenschrankmethode - Vertrauensverhältnis aufbauen
Bestimmung Brennstoffqualität	- Qualitätsansprüche genau definieren, je Werk sowie Kontrolle - Sieben - Kommunikation über Qualität
zu geringe Lagerkapazitäten	- neue Werke: auf Erfahrung bestehender Werke bauen - Kooperationsmodelle - Abfangen über Logistik - Technik: Lagerhalle, Ladefahrzeuge
Heizwertbestimmung (Theorie/Praxis)	- Wirkungsgrad überprüfen - Forschungsbedarf
Asche	- Mengenbündelung - Gesetzesentwurf - Konsequente Trennung Rostasche + Filterasche

Mobilisierung:
Zum Thema Mobilisierung wurde festgehalten, dass im Kleinprivatwald noch viele Reserven vorhanden sind. Durch „Organisatoren“ könnte man es schaffen, mehrere aneinander grenzende Waldbesitzer zu einer gemeinsamen Holzernte zu bewegen und somit Kleinstmengen an Energieholz zu bündeln.

Transport:
Ein Teilnehmer berichtete, dass die Hackschnitzellieferungen für die Werke sehr häufig aneinander vorbei fließen. Es bestünde ein Potenzial zur Reduzierung von Leerfahrten bzw. der Transportdistanzen. Um dieses Potenzial auszuschöpfen, müsste eine Art Börse oder Plattform entstehen, um Mengen zu tauschen und damit die Transportdistanzen insgesamt zu reduzieren.

Zwischenlager*:*
Ein Zwischenlager für Waldhackgut verursacht hohe Kosten in der Bereitstellungskette. Jedoch sind auch positive Eigenschaften zu erwarten (Sammel- und Pufferfunktion, Flexibilität). Mittels eines gemeinsamen Netzwerkes könnten die Nachteile im Einzelnen beschränkt (die Kosten minimiert) und die Vorteile (Flexibilität) genutzt werden. Dies kann beispielsweise durch die Nutzung eines gemeinsamen Lagerplatzes geschehen.

Bestimmung Wassergehalt:
Eine „gerechte“ Bestimmung des Wassergehalts sei „praktisch nicht möglich“. Zwar gebe es genaue Messmethoden wie etwa den Trockenschrank. Trotzdem bleibt das Problem, dass bei der Entnahme der Probe Schwankungen zu erwarten sind. Der Wert muss nicht unbedingt repräsentativ für die ganze Lieferung sein. Es sei daher wichtig, ein gutes Vertrauensverhältnis zwischen Lieferanten und Heizwerk aufzubauen.

Bestimmung Brennstoffqualität:
Für eine gerechtere Bewertung der angelieferten Brennstoffqualität schlagen die Teilnehmer vor, eine Stichprobe der Waldhackschnitzel zu sieben, um so eine prozentuale Verteilung von feinem und grobem Material zu erhalten. Diese Ergebnisse könnten in die Preisfindung mit einfließen. Weitere Vorschläge sind ein Bonussystem für Lieferanten, um dauerhaft bessere Qualitäten zu erhalten. Zwischen Heizwerk und Lieferant sollte intensiver über die Qualitätsanforderungen kommuniziert werden.

Lagerkapazität:
Vielerorts besteht deutliches Verbesserungspotential in der Anordnung der internen Infrastruktur (Heizwerk $\Leftrightarrow$ Lagerhalle). Die gesammelten Erfahrungen wären vor allem für die geplanten Neuinvestitionen von großem Wert. Meist jedoch werden für neue Projekte nur die technisch moderneren Werke besichtigt, anstatt die älteren.

Heizwertbestimmung:
Die in der Literatur genannten Heizwerte scheinen sich in der Praxis nicht immer zu bewahrheiten. Der Sachverhalt sei zu überprüfen.

Asche:
Mehrere Teilnehmer brachten ein, dass es nach wie vor keine präzise Regelung bei der Ascheentsorgung gibt. Meist trifft das zuständige Landratsamt die Entscheidung bezüglich der Ascheentsorgung. Es kann vorkommen, dass das gleiche Material aus verschiedenen Verwaltungsregionen aber sogar innerhalb des gleichen Zuständigkeitsbereichs völlig unterschiedlich bewertet wird. Hierfür sei ein Beschluss im Bundestag noch ausstehend. Die Teilnehmer erwarten daher politischen Druck für eine eindeutige Regelung.

Vorgeschlagen wurde, die Kleinmengen an Elektrofilterasche der kleineren Heizwerke zu bündeln, um so mehr Menge zu erhalten und die Entsorgungskosten zu verringern.

4.5 Bewertung der Ergebnisse

In diesem Kapitel werden einzelne Aspekte der Ergebnisse diskutiert, die im Rahmen der bayernweiten Umfrage bei geförderten BMH(K)W und der Analyse der Versorgung mit Waldhackschnitzel in der Modellregion erfasst wurden.

Die nachstehende Tabelle fasst die wesentlichen Schwächen der Prozesskette zusammen.

Tabelle 12: Auswahl wichtiger Schwächen der Prozesskette „Versorgung mit Waldhackschnitzel“

Prozessschritt	Schwächen
Holzernte und Rückung	- saisonale Schwankungen erschweren eine ganzjährige Versorgung - Bereitstellungskosten
Lagerung (Rohmaterial) und Hacken	- Beeinträchtigung der Lagermöglichkeit durch Waldschutzrisiken - keine optimale Bereitstellung: schlechte und unordentliche Lagerung, Poltergröße zu klein, mangelnde Einweisung, fehlende Abstimmung mit den Nachbarn - Befahrbarkeit der Wege bzw. der Lagerplätze, keine Wendemöglichkeiten
Transport und Zwischenlagerung	- Logistik des Abtransports (hohe Wartezeiten für Hacker und/oder Lkw) - zusätzliche Kosten für Zwischenlagerung
Werksübernahme	- Wassergehaltsermittlung
Lagerung der Waldhackschnitzel im Werk	- beschränkte Lagerkapazitäten - „frist in – first out“ ist nicht möglich - kein Hacken am Heizwerk möglich
Heizwerk	- Brennstoffqualität: Größe, Verstopfungen, zu nass, zu hoher Nadelanteil, Verunreinigungen, mangelnde Qualität führen zu verstärktem Materialverschleiß und hohem Ascheanfall, Verschlackung
Ascheentsorgung	- hoher Schlackenanteil verhindert Eignung zur Kompostierung

Bereitstellungskosten und Erlöse für Waldhackschnitzel

Die Ist-Analyse zeigte, dass die Bereitstellungskosten für Waldhackschnitzel und die am Heizwerk zu erzielenden Erlöse eine wichtige Rolle spielen.

Die Einschätzung der Hackschnitzelpreise muss differenziert erfolgen. Aus Sicht der Mehrzahl der Heiz(kraft)werkbetreiber sind die Kosten des Brennstoffs zu hoch. Waldbesitzer und deren Zusammenschlüsse äußern die Notwendigkeit, dass der Hackschnitzelpreis steigen sollte. Den Waldbesitzern sind die Hackschnitzelpreise oft zu niedrig, weil unter ihren Bedingungen die Bereitstellungskosten oft über den Erlösen für die Hackschnitzel liegen. Auf den Energieinhalt bezogen sind die Preise für Hackschnitzel die niedrigsten unter allen biogenen Brennstoffen und erheblich niedriger als fossile Brennstoffe (TFZ 2008). Den Betreibern der Heiz(kraft)werke eröffnet dies erhebliche Wertschöpfungsmöglichkeiten.

Es existieren zahlreiche verschiedene Möglichkeiten Waldhackschnitzel bereitzustellen. Diese unterscheiden sich im Grad der Mechanisierung, der eingesetzten Ausrüstung und in den einzelnen Prozessschritten. Derzeit sind teilmechanisierte Verfahrensketten am weitesten verbreitet. Sie bestehen aus den Schritten seilwindenunterstütztes Fällen, Rücken mittels Seil-, Klemmbank- oder Zangenschleppern, Hacken auf der Waldstraße mit kranbeschickten Hackern und Hackschnitzeltransport per Lkw.

Tabelle 13 vergleicht die Kosten von zehn verschiedenen Logistikketten für die BHD-Stufen 10, 15 und 20 cm.

Tabelle 13: Kosten bei der Bereitstellung von Waldhackschnitzel frei Heizwerk für verschiedene Logistikketten nach Wittkopf (2005)

Verfahren	Kosten [€ / Srm] **bei BHD = 10 cm**	Kosten [€ / Srm] **bei BHD = 15 cm**	Kosten [€ / Srm] **bei BHD = 20 cm**
Teilmechanisiert – „Kleinprivatwald“	16,00	14,50	-
Teilmechanisiert – „Seilschlepper“	18,00	14,20	12,50
Teilmechanisiert – „Rückewagen“	15,20	10,00	8,10
Teilmechanisiert – „Zangenschlepper“	18,60	12,50	10.50
Teilmechanisiert – „Hacken auf der Rückegasse“	26,20	14,50	10,40
Vollmechanisiert – „Harvester“	27,90	13,80	9,80
Vollmechanisiert – „Hackschnitzel-Harvester“	25,90	14,50	11,70
Vollmechanisiert – „Mehrfachfällkopf“	26,50	15,00	10,90
Vollmechanisiert – „Kronenholz – Rückewagen“	15,00	9,60	7,90
Vollmechanisiert – „Kronenholz – Bündler“	21,10	17,90	16,90

Die einzelnen in der Tabelle aufgeführten Logistikketten sind in der Dissertation von WITTKOPF (2005) ausführlich beschrieben und differenziert bewertet. Die beiden Verfahren zum Kronenholz beziehen sich auf den Durchmesser des Kronenfußes. Die aufgeführten Logistikketten unterscheiden sich in ihren Kosten/Srm, in ihrer Systemleistung und in ihren Systemkosten. Außerdem wird in der Tabelle auch der Einfluss der Stückmasse deutlich.

Eine Zusammenstellung der Bereitstellungskosten in Baden-Württemberg von TEXTOR et al. (2008) kommt zu ähnlichen Ergebnissen (siehe Tabelle 14).

Tabelle 14: Kosten der Bereitstellung von Waldhackschnitzel in Baden-Württemberg (€ / Srm) nach TEXTOR et al. 2008

Verfahren	minimal [€ / Srm]	maximal [€ / Srm]
Holzernte	5	15
Hacken	3	6
Transport (Nahbereich)	2	4
Hacken im Wald im Nahbereich (ohne Zwischenlager)	**10**	**25**
Lagerung	2	4
Umladen und (Fern-)Transport	3	6
Hacken im Wald mit Zwischenlager und Ferntransport	**15**	**35**

Stellt man diesem Kostenkorridor die zu erzielenden Waldhackschnitzelerlöse (siehe Kap. 4.2.2) gegenüber, so zeigt sich, dass es einerseits möglich ist, Waldhackschnitzel zu einem positiven Deckungsbeitrag bereitzustellen. Andererseits ist aber in Abhängigkeit vom Waldhackschnitzelpreis die Gewinnmarge für den Waldbesitz sehr gering bzw. die Bereitstellung defizitär. Deshalb ist eine sorgfältige Einsatzplanung eine wichtige Voraussetzung, um kostengünstig Waldhackschnitzel bereitzustellen und die Kostensteigerung beispielsweise durch Wartezeiten von Hacker und Lkw zu verhindern.

Als weitere Schwachpunkte der Bereitstellung von Waldhackschnitzeln werden unter anderem die schlechte und unordentliche Lagerung sowie zu geringe Poltergrößen des zu hackenden Materials im Wald und die Verschmutzung des Materials genannt. Diese Schwächen entstehen auch durch das Fehlen von klaren Vorgaben und führen zu höheren Bereitstellungskosten. Die BAYERISCHEN STAATSFORSTEN (2008a, 2008b) beispielsweise haben Grundsätze zur Bereitstellung von Energieholz und Grundsätze zur Lagerung von Waldhackschnitzeln veröffentlicht, die sich an ihre Forstbetriebe und bei Ihnen tätigen Forst- und Hackerunternehmer richten. Diese Empfehlungen beinhalten unter anderem Angaben zu Anforderung an das Material sowie Größe und Ausrichtung der Polter. Derartige Empfehlungen können von den für die Versorgung von Waldhackschnitzel verantwortlichen Akteuren (z.B. Forstliche Zusammenschlüsse, Liefergemeinschaft bzw. Heizwerke) allen an der Prozesskette Beteiligten (Waldbesitzer, Forst-, Hacker- und Transportunternehmer) vorgegeben werden. Außerdem könnten sie auch Bestandteil der Liefer- bzw. Dienstleistungsverträge sein. Zusätzlich gilt es, solche Empfehlungen intensiv zu kommunizieren und die Beteiligten der Prozesskette bei Bedarf entsprechend fortzubilden. Darauf aufbauend kann ein Qualitätsmanagementsystem entwickelt werden.

Saisonale Schwankungen und Waldschutzrisiken

Die ganzjährige Versorgung insbesondere der großen Heizwerke wird durch saisonale Schwankungen erschwert. Diese setzen sich aus nicht beeinflussbaren, durch die Natur vorgegebenen Faktoren (z.B. Bodennässe, Schneelagen) und aus beeinflussbaren Aspekten, wie beispielsweise die jährlichen Arbeitsschwerpunkte der Landwirte zusammen. Die an der Prozesskette Beteiligten können jedoch teilweise durch strategische Vorgehensweisen beide Faktoren ausgleichen. Ansatzpunkte hierzu wären auf Ebene des Waldbesitzes bzw. dessen Zusammenschlüssen eine entsprechende Auswahl der Hiebe hinsichtlich Befahrbarkeit und Höhenlage (Lage, flach-hoch) sowie Baumartenzusammensetzung. Auch können die Auswirkungen der saisonalen Schwankungen durch langfristige Versorgungsverträge oder durch die Beteiligung der Waldbesitzer am Heiz(kraft)werk verringert werden, weil dadurch die Interessen der Brennstofflieferanten mehr in Übereinstimmung mit den Interessen der Nachfrager gebracht werden.

Waldschutzrisiken können bis zu einem gewissen Maß strategisch umgangen werden (z.B. durch Lagerung außerhalb vom Wald). Jedoch erzwingt die Waldschutzsituation bei bestimmten Rahmenbedingungen immer wieder ein sofortiges Handeln (Hacken), welches negativen Einfluss auf die Qualität der Hackschnitzel und die Lagerfähigkeit hat.

Eine Möglichkeit als Reaktion der Heiz(kraft)werke auf diese Schwächen ist, wie Einzelbeispiele zeigen, die Anlage von Zwischenlagern bzw. Lagerplätzen mit zu hackendem Material außerhalb des Waldes als Puffer. Ein weiterer Lösungsansatz wäre die Einführung eines elektronischen Polter-und Lagermanagementsystems.

Zwischenlagerung

Eine allgemeingültige Empfehlung zur Zwischenlagerung von Waldhackschnitzel zu geben, ist schwierig. Zwischenlagerung führt zu zusätzlichen Kosten, hat aber auch, wie bereits erwähnt, verschiedene Vorteile. Bei kleinen Werken kann die Lagerung

auf waldbesitzereigenen Flächen und Einrichtungen in der Gesamtkalkulation kostengünstig sein, vor allem wenn am Werk kaum Platz vorhanden ist oder Grundflächen kostenintensiv neben dem Werk gepachtet / gekauft werden müssen. Zudem kann bei entsprechender Lagerung und Lagermanagement ein Trocknungseffekt erzielt werden, der eventuell mit einer Bonuszahlung honoriert wird. Welche energetischen Verluste bei der Lagerung der Waldhackschnitzel auftreten wurde aber nicht thematisiert. Allgemein wird die Zwischenlagerung als Rohmaterial bevorzugt (soweit Borkenkäferbefall dies zulässt), da in diesem Zustand die Trocknung besser voranschreitet und der ungebrochene Transport vom Hacker ins Werk möglich bleibt.

Qualität von Waldhackschnitzeln

Die Qualität von Waldhackschnitzeln wird beeinflusst unter anderem durch den Wassergehalt, den Anteil an Fremdstoffen (Erde, Sand, Steine), den Anteil an Nadeln, Blättern, Feinreisig, Rinde sowie die Größenverteilung und Formigkeit der Hackschnitzel. Hochwertige Hackschnitzel zeichnen sich vor allem durch einen geringen Fremdstoff- und Nadelanteil sowie durch einen niedrigen Wassergehalt aus. Der für das Heiz(kraft)werk optimale Wassergehalt ist abhängig von der eingesetzten Technik. Hochwertige Hackschnitzel sind besser lagerfähig und führen zu einem geringeren Anfall an Holzasche, weniger Störungen im Betriebsablauf sowie geringerem Materialverschleiß der Heizwerkstechnik. Als Nachteile für den Heiz(kraft)werksbetreiber stehen höhere Kosten und eventuell ein höherer logistischer Aufwand gegenüber. Der Waldbesitz kann durch die Bereitstellung hochwertiger Waldhackschnitzel höhere Erlöse erzielen und der Anteil der Nadeln und des Feinmaterials, die im Bestand verbleiben, müsste sich aufgrund angepasster Bereitstellungsketten erhöhen.

Einer vermehrten Bereitstellung und Verwendung von hochwertigen Waldhackschnitzeln stehen Waldschutzrisiken, der Kostendruck bei den Heiz(kraft)werken und eine Unterschätzung der Bedeutung der Qualität im Wege. Bei den Interviews mit den Heiz(kraft)werksbetreibern entstand jedoch der Eindruck, dass bei der Bedeutung der Hackschnitzelqualität teilweise ein Umdenken beginnt und die Vorteile wie bessere Lagerfähigkeit und geringerer Verschleiß, in den Vordergrund rücken.

Auf jeden Fall ist es notwendig, die bisherigen Bereitstellungsverfahren genauer hinsichtlich der zu erzielenden Hackschnitzelqualität zu betrachten und gegebenenfalls diese anzupassen und weiterzuentwickeln.

Werksübernahme und Lagerung der Waldhackschnitzel am Heizwerk

Auffällig bei der Betrachtung der Prozessketten war, dass mehrere Heiz(kraft)werke keine werkseigene Lkw-Waage besitzen und die Gewichtsermittlung an einen Dienstleister wie zum Beispiel den örtlichen Landhandel übertragen wurde. Dadurch ist die Anzahl der Akteure und Schnittstellen der Prozesskette gestiegen und somit auch deren Komplexität. Bei Neuplanungen ist der Bau einer Waage zur Gewichtsermittlung auf dem Betriebsgelände zu empfehlen. Dadurch werden auch die Schnittstellen reduziert.

Als weitere Schwachstelle wurde die Wassergehaltbestimmung aufgeführt. Es kommen verschiedene Messverfahren wie beispielsweise das

Trockenschrankverfahren oder kapazitive Verfahren (u.a. Pandis-Tonne) zum Einsatz. Die Verfahren unterscheiden sich im Zeitpunkt der Wassergehaltsermittlung (sofort oder zu einem späteren Zeitpunkt), im Messbereich und in der Messgenauigkeit (BÖHM, HARTMANN, 2004). Ein weiterer entscheidender Aspekt bei der Wassergehaltsermittlung ist die Entnahme einer repräsentativen Stichprobe. Auch bei diesem Arbeitsschritt sind eine klarer, transparente Vorgehensweise und ein vertrauenvolles Verhältnis der Vertragspartner von großer Bedeutung.

Die meisten Schwächen des Prozessschritts „Lagerung der Waldhackschnitzel am Heizwerk“ lassen sich nach Inbetriebnahme des Heiz(kraft)werks nur beschränkt lösen. Bei (großen) Werken ist bei Neuplanungen in der Regel zu empfehlen, ausreichende Lagerflächen am Werk mit einzuplanen, sowohl für Waldhackschnitzel, als auch für Rohmaterial. Dabei ist es Voraussetzung, dass Hacken am Werk überhaupt zulässig ist (Lärmschutz). Bei der Lagerung der Waldhackschnitzel sind Fragen der Qualitätsveränderung und von Energieverlusten bisher nur als kaum quantifizierbarer Faktor bekannt. Grundlagen, auf denen qualifizierte Entscheidungen gefällt werden können, in welcher Form und wie lang Rohmaterial und Waldhackschnitzel in Hinblick auf eine optimierte Energieausbeute und Verbrennungsqualität gelagert werden können, sind nur bruchstückhaft vorhanden. Hierzu sind noch praxisnahe Untersuchungen notwendig.

Bedeutung von Kommunikation und Strukturen

Die Bereitstellungskette vom Wald bis ins Werk ist je nach Rahmenbedingungen vielgestaltig und es sind teilweise zahlreiche Akteure beteiligt. Dies bedingt viele Schnittstellen, die fehlerträchtig sind, und deshalb eine konsequente Kommunikation erfordern. Dieses Schnittstellenmanagement wird bei den befragten Betrieben häufig dahingehend gelöst, dass langfristige Strukturen zwischen gleichbleibenden Partnern etabliert werden. Das Beharren auf „eingefahrene“ Beziehungen kann aber erheblich innovationshemmend wirken. Deshalb ist es von Bedeutung, die bestehenden Prozessketten transparent zu gestalten und sie allen beteiligten Akteuren bekannt und damit auch leichter veränderbar zu machen. Des Weiteren ist, in einem regelmäßigen Turnus die bestehende Prozesskette und deren administrative Abwicklung zu hinterfragen, um beispielsweise technische Weiterentwicklungen in der Bereitstellungstechnik oder in der elektronischen Datenverarbeitung zu integrieren.

Bei einigen (kleineren) der befragten Betriebe, die ihren Rohstoff aus dem näheren Umkreis beziehen können, zeigte sich, dass eine einfache und kostengünstige Verwaltungsstruktur erreicht werden kann, wenn sie sich auf wenige (frei Werk-) Lieferanten konzentrieren. Dies reduziert den Verwaltungsaufwand und erleichtert, vor allem bei fixierten Lieferrhythmen, die Anliefersteuerung und die Einhaltung der speziellen Qualitätsanforderungen.

Zur Optimierung der Verwaltungs- und Anlieferstrukturen sind bereits aus der Befragung und Analyse der bestehenden Strukturen einige positive Ansätze erkennbar. Um die genauen Vorteile verschiedener Strukturen beurteilen zu können, wären aber in Zukunft detaillierte Analysen (Zeitstudien) der administrativen Prozesse bei Beschaffung und Verwaltung und der möglichen Datenverarbeitungs-Unterstützung noch durchzuführen.

Rolle des Waldbesitzes bei der Prozesskette
Die Ist-Analyse hat gezeigt, dass der Waldbesitz bei der Prozesskette „Versorgung eines Biomasseheiz(kraft)werk mit Waldhackschnitzel“ unterschiedliche Rollen einnehmen kann. Dabei lassen sich drei Haupttypen ableiten:

- Verkauf der Hackschnitzel bzw. des zu hackenden Materials frei Waldstraße,
- Übernahme der Organisation der kompletten Logistikkette bis zum Heizwerk,
- Betreiber bzw. Teilhaber des Biomasse(heiz)kraftwerks.

Insbesondere die beiden letzten Rollen eigenen sich für Forstliche Zusammenschlüsse oder große Waldbesitzer. Die Rolle des Waldbesitzes verschiebt sich vom reinen Brennstofflieferant hin zum Energieerzeuer und somit steigen auch die Möglichkeiten diese zu beeinflussen. Durch eine Beteiligung an einem Heiz(kraft)werk sichert sich der Waldbesitz auch langfristig lokale Absatzmöglichkeiten für geringwertige Sortimente. Aufgrund des finanziellen Risikos und der notwenigen technischen Kenntnisse ist es sinnvoll, dass Waldbesitzer Heizwerke in Kooperation mit den entsprechenden Partnern betreiben.

Fazit
Zusammenfassend lassen sich folgende Schlussfolgerungen aus der Ist-Analyse und der Stärken- und Schwächen-Analyse ziehen:

- Die Prozessketten zeichnen sich aufgrund der unterschiedlichen Heizwerksgrößen und unterschiedlichen Organisationsformen durch eine große Vielfalt aus.
- Die Kosten-Erlössituation bei der Bereitstellung von Waldhackschnitzel ist „angespannt“ und somit ist weiterhin eine Optimierung der Bereitstellungskette notwendig.
- Die Qualität der Waldhackschnitzel wird an Bedeutung gewinnen. Die Prozesskette gilt es sowohl bei der Bereitstellung im Wald als auch im Heizwerk anzupassen.
- Klare Grundsätze durch den für die Versorgung von Waldhackschnitzel verantwortlichen Akteur an alle Prozessbeteiligten können einen Beitrag zu Verbesserung der Kosten-Erlössituation als auch der Waldhackschnitzelqualität leisten. Diese Vorgaben bieten auch die Grundlage für die Einführung eines Qualitätsmanagementsystems.
- Für eine zuverlässige Versorgung mit Waldhackschnitzel ist es zielführend, den Brennstoffproduzenten (Waldbesitz) eng einzubinden. Dies kann durch langfristige Verträge oder Beteiligung des Waldbesitzes am Heiz(kraft)werk geschehen.
- Aus Sicht der Heizwerksbetreiber (zumindest bei den nur lokal bis regional aktiven) erscheint es sinnvoll, nicht zu tief in die Prozesskette „Bereitstellung von Waldhackschnitzel“ einzugreifen, sondern vielmehr auf Kooperationen mit Waldbesitzern, deren Zusammenschlüsse oder Hackerunternehmer zu setzen.

5 Innovative Verfahrenstechnik entlang der Wertschöpfungskette „Waldhackgut“

Im Rahmen des Projekts wurden Fallstudien zu innovativer Verfahrenstechnik bei der forstlichen Hackschnitzelproduktion durchgeführt. Auf den verschiedenen Forst- und Agrartechnikmessen (u. a. ELMIA WOOD, KWF-Tagung, LIGNA, AGRITECHNICA) war in den letzten Jahren eine dynamische Produktentwicklung im Bereich der Energieholzbereitstellung zu beobachten. Dieser Entwicklung wurde in bisherigen Forschungsprojekten aufgrund geringer Praxiseinsätze noch kaum Rechnung getragen.

Bei der Auswahl und Untersuchung möglicher Maschinen bzw. Verfahren standen folgende Fragen im Vordergrund:

- Welche maschinentechnologischen Entwicklungen gibt es bei der Energieholzernte und welche Arbeitsverfahren lassen sich daraus ableiten?
- Welche Vor- und Nachteile bieten die neuen Produkte?
- Welche Potenziale bestehen bezüglich einer Umsetzung im deutschen Markt?

Die Versuchsreihen ermöglichten es, im Forstbereich bisher nicht verbreitete Technik zu testen, weiterzuentwickeln und schließlich in die Praxis zu integrieren. Die gewonnen Daten liefern Kalkulationsgrundlagen für künftige Investitions-entscheidungen. Die Erkenntnisse aus den Studien erlauben es, Handlungsempfehlungen bezüglich Einsatzplanung, Organisation oder technischer Weiterentwicklung abzugeben.

Bei der Auswahl sollten neue Produkte bzw. Verfahren entlang der gesamten Bereitstellungskette von der Fällung über Rückung, Hacken und Transport sowie die Lagerung berücksichtigt werden. Der Schwerpunkt dieser Untersuchungen lag in den Prozessschritten Fällen und Rücken.

In diesem Zusammenhang ist darauf hinzuweisen, dass sich forsttechnische Studien nicht „unter Laborbedingungen“ planen und durchführen lassen. Vielmehr ist die Organisation von Zeitstudien im Forstbereich von zahlreichen externen Faktoren abhängig, was den Planungsaufwand erhöht und ein anspruchsvolles Projektmanagement verlangt. Zu diesen externen Faktoren zählen u. a. Witterung, Befahrbarkeit des Versuchsbestandes, Flächenverfügbarkeit, zeitliche wie räumliche Verfügbarkeit der Maschinen und des Personals sowie die Auftragslage und Motivation der kooperierenden Unternehmen.

Während die jeweiligen Methoden und Ergebnisse zu den einzelnen Fallstudien in den entsprechenden Kapiteln beschrieben werden, werden die wesentlichen Erkenntnisse der einzelnen Fallstudien in Kapitel 5.6 gesammelt diskutiert und bewertet.

5.1 Material und Methoden

Hier werden die Methoden der arbeitswissenschaftlichen Zeitstudien zur Holzerntetechnik beschrieben, welche einen Schwerpunkt der Untersuchungen bildeten. Das jeweilige methodische Vorgehen in den weiteren Fallstudien zum Thema „innovative Verfahrenstechnik“ wird in den entsprechenden Kapiteln (5.3, 5.4, und 5.5) dargestellt.

Zeitstudienverfahren

In einer detaillierten Datenerhebung wurden sowohl die einzelnen Prozessabläufe der Maschineneinsätze als auch allgemeine Hiebsdaten und Bestandeseigenschaften der Versuchsflächen erfasst.

Die methodischen Grundlagen haben sich bereits in vorausgehenden Untersuchungen bewährt und werden am Lehrstuhl bereits seit einigen Jahren laufend angepasst und weiterentwickelt.

Die Erfassung der Zeiten, Bezugsmengen und Einflussfaktoren dient der Analyse sowie dem Vergleich der Prozessabläufe verschiedener Arbeitsverfahren. Darüber hinaus ist diese Datenerhebung notwendig für die Erstellung von Produktivitätsmodellen und die Kalkulation der Bereitstellungskosten.

Zur Anwendung kam das Fortschrittszeitverfahren, um die Reihenfolge und Verteilung der Arbeitsschritte rekonstruieren und bewerten zu können (REFA 1976). Diese Vorgehensweise ermöglicht es, die einzelnen Ablaufabschnitte jeweils für sich und deren Bedeutung innerhalb des gesamten Arbeitsablaufs darzustellen.

Die Arbeitsstudien wurden mit Hilfe der Zeitstudiensoftware *UMT* der Firma *Laubrass Inc*. (CAN) in Verbindung mit einem mobilen Datenfassungsgerät (*Latschbacher Recon*) durchgeführt.

Mit Hilfe der UMT-Software wurde ein auf das jeweilige Verfahren abgestimmtes Aufnahmeschema programmiert (siehe Abbildung 19). Als einzelne Ablaufabschnitte wurden u.a. Fahrzeiten, allgemeine Zeiten und die unterschiedlichen Kranarbeiten unterschieden.

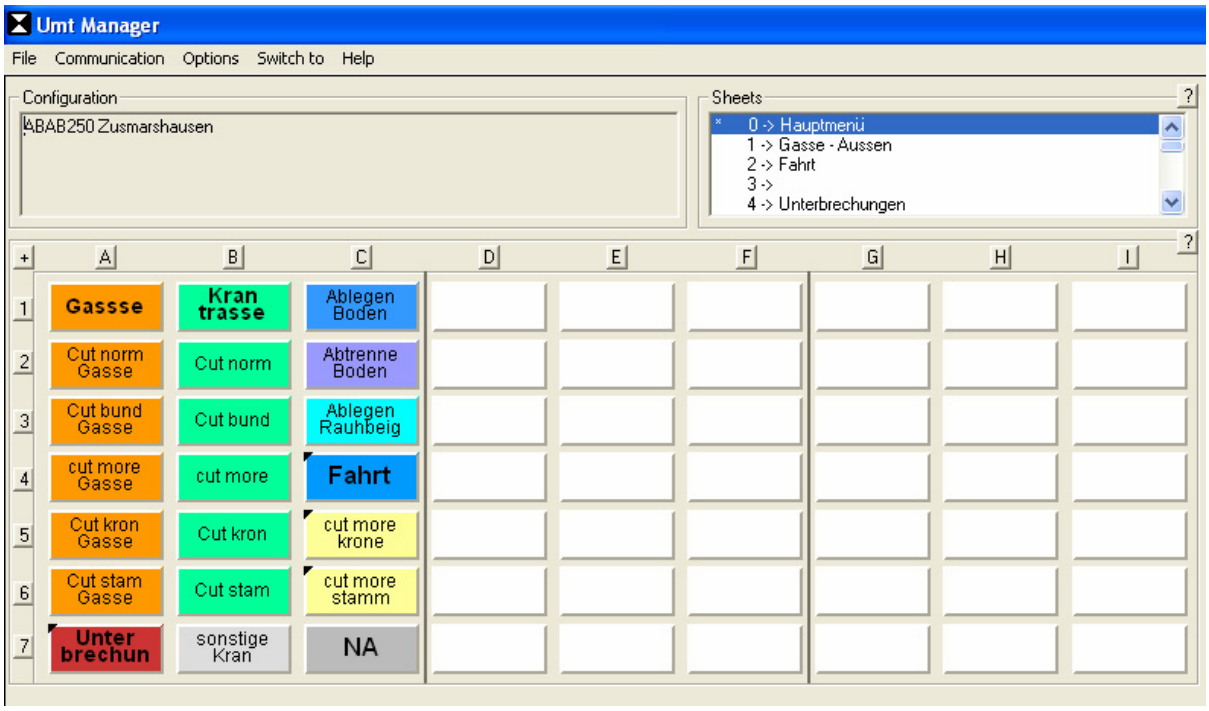


Abbildung 19: Beispiel für eine UMT- Aufnahmemaske bei einer Zeitstudie über die Holzernte mit einem Sammelaggregat.

Einzelne Ablaufabschnitte wie zum Beispiel Unterbrechungen sind in Untermenüs weiter unterteilbar. So kann innerhalb der allgemeinen Zeiten zwischen technisch- oder personalbedingten Unterbrechungen unterschieden werden.

Darüber hinaus ist es möglich, über Pop-up Menüs weitere Informationen, zum Beispiel Zahlencodes oder Notizen zu einzelnen Arbeitsschritten, zu ergänzen. Dies

wurde u.a. genutzt, um bei Fällvorgängen den jeweiligen Brusthöhendurchmesser des entsprechend markierten Baumes (siehe Farbcodierung) mit dem Zeitbedarf für das Fällen zu verbinden. Dadurch lassen sich bei der Datenauswertung Zeitbedarfsmodelle in Abhängigkeit vom Brusthöhendurchmesser berechnen.
In der letzten Zeile der Aufnahmemaske sind die Ablaufabschnitte „Unterbrechungen", „sonstige Kranarbeiten" und „nicht auswertbar" (*NA*) aufgeführt:
Die Taste *NA* gibt dem Zeitnehmer die Möglichkeit, Unterbrechungen für weitere Anweisungen an den Maschinenführer zu dokumentieren und somit bei der späteren Auswertung auszugrenzen, da diese Zeiten nicht der Arbeitszeit zuzurechnen sind. Sonstige Kranarbeiten" bezeichnen Tätigkeiten außerhalb des vordefinierten Spektrums, wie zum Beispiel die technische Entnahme zur Erreichung eines ausgezeichneten Baumes, abgedeckt werden. Zudem können jedem Arbeitsabschnitt Kommentare mit Hilfe eines Eingabefensters zugewiesen werden, um eventuelle Besonderheiten zu dokumentieren.
Unterbrechungen wurden differenziert nach *Allgemeinen Zeiten Maschine* (zum Beispiel kleine Reparaturen, Schlauchwechsel), *Allgemeine Zeiten Fahrer* (zum Beispiel Telefonat mit Revier-, Einsatzleiter), *Pausen* und *Rüstzeit* (Beginn und Ende des Arbeitstages) bei der Zeitstudie berücksichtigt.

Zuweisen der Bezugsgröße BHD zum Zeitbedarf
Bei Zeitstudien im Bereich Altdurchforstung[4] und Verjüngungsnutzung[5] sind die Bäume stark genug, um mit einer individuellen Baumnummer markiert werden können. Während der Datenaufnahme wird diese Nummer mit Hilfe eines automatischen Eingabefensters der Software festgehalten. Bei den hier beschriebenen Zeitstudien wäre es unter den gegebenen Voraussetzungen (niedriger BHD-Bereich, hohe Stammzahl) kaum möglich gewesen, einzelne Baumnummern auf dem Stamm zu markieren bzw. diese während der Zeitstudie wieder zu identifizieren.
Daher musste ein Aufnahme- und Markierungsverfahren entwickelt werden, welches sich für eine einfache Wiedererkennung während der Zeitstudien eignet.
Deshalb wurde der jeweilige BHD des Baumes anhand eines Farbcodes markiert, welcher während der Zeitstudie gut entschlüsselt und festgehalten werden konnte (siehe Abbildung 20).

[4] *Altdurchforstung (AD): „Pflegeeingriffe in Baumbeständen, deren Alter die Hälfte der Umtriebszeit überschritten haben; es steht im Allgemeinen die Kronenpflege im Vordergrund." (FER 1982).*
[5] *Verjüngungsnutzung (VJ): „Maßnahmen in Beständen, die im Planungszeitraum ganz oder auf Teilflächen verjüngt werden" (FER 1982).*

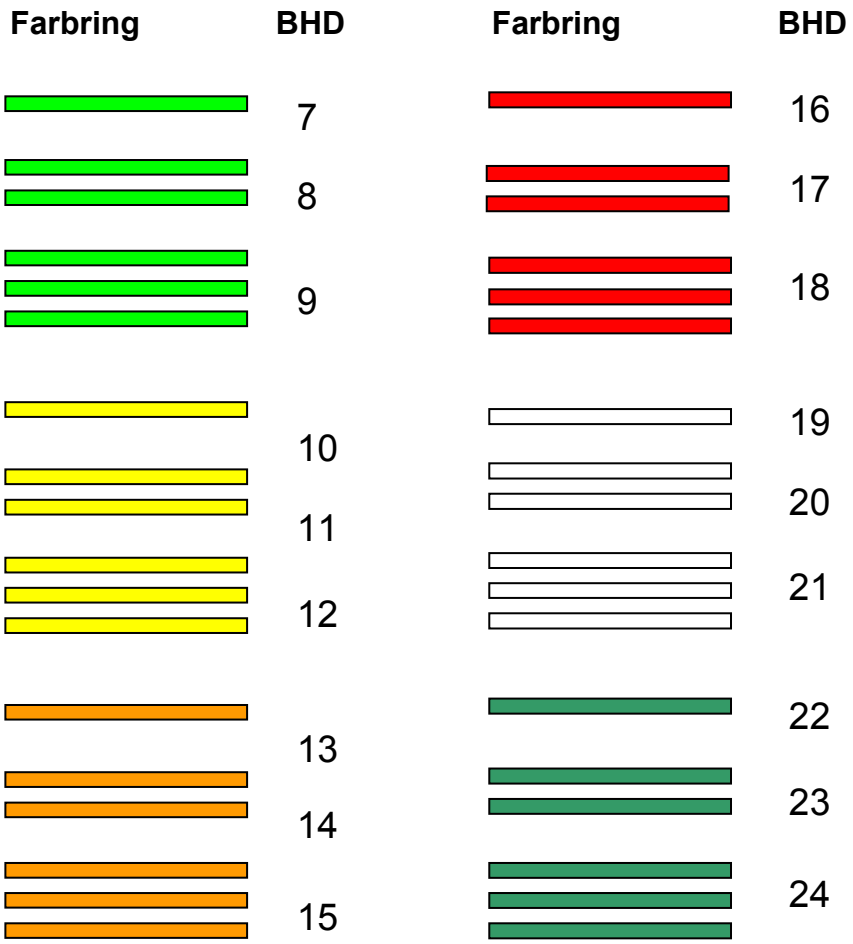


Abbildung 20: Farbcode zur Markierung und Zuweisung des Brusthöhendurchmessers

Vor der Zeitstudie wurde der BHD jedes zu entnehmenden Baumes gemessen und mit dem jeweiligen Farbcode markiert.
Beispiel: Ein Baum mit einem BHD von 12 cm erhielt drei gelbe Farbringe, ein Baum mit einem BHD von 8 cm zwei grüne Farbringe, usw. (vgl. Abbildung 20).

Im Zuge der Datenerhebung wurden auch wichtige Bestandesdaten (zum Beispiel BHD, Höhe, Baumvolumen, Rückeentfernung) erfasst. Anhand dieser Kennzahlen lassen sich die berechneten Ergebnisse der einzelnen Hiebe besser einordnen und mit anderen Studien vergleichen.
Die Daten der Feldstudien wurden mit Statistik-Programmen (Microsoft Excel, SPSS) ausgewertet. Aus den Leistungsdaten wurden Produktivitätsmodelle abgeleitet, anhand derer auch Ergebnisse unter anderen Bestandesverhältnissen (zum Beispiel unterschiedliches Baumvolumen) angeschätzt werden können.

Maschinenkostenkalkulation
Grundlage der Maschinenkostenkalkulation bilden die von der FAO[6] und dem KWF[7] empfohlenen Kalkulationsschemen, welche, basierend auf Gesprächen mit Maschinenvertriebsgesellschaften und Forstunternehmern, weiterentwickelt und

[6] *FAO = **F**ood and **A**griculture **O**rganization of the United Nations (www.fao.org)*
[7] *KWF = **K**uratorium für **W**aldarbeit und **F**orsttechnik e.V. (www.kwf-online.org)*

aktualisiert wurden. Grundsätzlich muss bei diesen Kalkulationen berücksichtigt werden, dass sie auf einem Modell basieren. In der Praxis vorzufindende spezifische Personal- und Kostenstrukturen verschiedener Unternehmen können im Detail zu anderen Ergebnissen führen.

Für das weitere Verständnis wird an dieser Stelle die Definition und Zusammensetzung der einzelnen Arbeitszeiten dargestellt. Entsprechend dem üblichen Vorgehen dient die Maschinenarbeitsstunde (MAS) als Bezugsbasis für die Kostenkalkulation und die Produktivitätsstudien.

Die Gesamtarbeitszeit (GAZ) setzt sich zusammen aus der reinen Arbeitszeit (RAZ) und den allgemeinen Zeiten (AZ), beispielsweise für Wartung, Rüsten und Umsetzen sowie anderen Unterbrechungen der produktiven Maschinenarbeitszeit (siehe Abbildung 21). In den Maschinenarbeitsstunden (MAS) sind gemäß internationaler Vereinbarung alle Unterbrechungen kleiner 15 Minuten enthalten. Im Englischen wird die MAS als *productive machine hour* (*pmh 15*) bezeichnet.

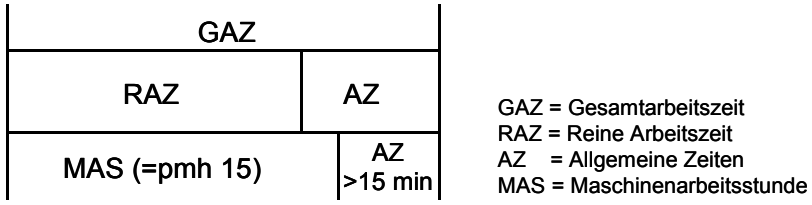


Abbildung 21: Definition der Arbeitszeiten

Bei der Auswertung und Interpretation von Zeitstudienergebnissen ist darauf zu achten, dass die in Zeitstudien erzielte Produktivität in der Regel deutlich über dem langfristig realisierbarem Leistungsniveau liegt. Dies gilt insbesondere beim Einsatz von Harvestern. PAUSCH (2006) konnte beim Vergleich von Zeitstudienergebnissen mit denen langfristiger Beobachtungen (insgesamt knapp 2.000 Tagesleistungen) einen Faktor von 1,4 – 1,6 nachweisen. Die Gründe für diese Unterschiede sind vielschichtig. Dazu zählen u.a. wechselnde Hiebsbedingungen oder die schwankende Tagesform des Fahrers bei langfristiger Beobachtung. Im Falle der Zeitstudie ist in der Regel von einer optimalen Bestandesvorbereitung, -einweisung und Auszeichnung auszugehen, womit ideale Vorausetzungen für hohe Leistungen gegeben sind. Beim Umgang mit Zeitstudienergebnissen und der Ableitung von Leistungspauschalen oder Kostensätzen sollte diese Erkenntnis stets berücksichtigt werden.

Die hier berechneten Zeitbedarfs- und Leistungswerte werden dennoch nicht mit einem Korrekturfaktor verrechnet. Der Grund dafür liegt in der Tatsache, dass mit Ausnahme des Ernteversuchs *Zusmarshausen* (siehe 5.2.2) auf Forstunternehmer mit relativ geringeren Erfahrungswerten mit der Feller-Buncher-Technologie zurückgegriffen werden musste. Es besteht also die Vermutung, dass sich im Rahmen dieser noch sehr jungen Technologie erhebliche Potenziale durch den Übungsgrad der Fahrer erschließen lassen. Gespräche mit Forstunternehmern bestätigten diese Einschätzung.

5.2 Fallstudien über die Holzernte mit Sammelaggregaten

Jungdurchforstungsbestände[8] sind in weiten Teilen des Waldbesitzes, vor allem aber im Kleinprivatwald, durch erhebliche Pflegerückstände gekennzeichnet (OHRNER 1999; PRETZSCH 2005). Ausbleibende Pflegemaßnamen führen zu überdichten Beständen und damit zu einer Hemmung von Wachstumsdynamik und Bestandesdifferenzierung. Mittel- bis langfristig entsteht dadurch sowohl ein erhöhtes Stabilitätsrisiko als auch eine reduzierte Wuchsleistung (KRAMER 1980). Dies trifft insbesondere für reine Fichtenbestände zu. In derartigen Beständen sind Durchforstungseingriffe im jungen Bestandesalter mit den gängigen Arbeitsverfahren aufgrund des Stückmassegesetzes zumeist nicht kostendeckend durchzuführen.

Die Baumvolumina des ausscheidenden Bestandes sind zu gering, so dass weder mit motormanuellen noch mit vollmechanisierten Ernteverfahren hohe Produktivitäten erreicht werden können. Die dadurch verursachten hohen Kosten je Erntefestmeter in Verbindung mit den geringen Erlösen dieser Sortimente ließen in der Vergangenheit keine akzeptablen Deckungsbeiträge erwarten. Dies mündet in einen Teufelskreis mit dem weiteren Aufschub der Pflegemaßnahmen und der Konsequenz geringerer Bestandesstabilität und Zuwachsleistung.

Seit einigen Jahren werden in Skandinavien die vor allem aus den USA bekannten Mehrfachfällköpfe (Feller-Buncher-Aggregate[9]) an europäische Verhältnisse angepasst und weiterentwickelt. Mit geringerem Eigengewicht und Ölflussbedarf eignen sich diese Aggregate nunmehr für den Anbau an „kleinere“ Trägerfahrzeuge.

Abbildung 22: NaarvaGrip 1500- 40e (links), ABAB 350 (mitte) und Bracke C 16.a (rechts) als Beispiele für Energieholzaggregate mit Sammelfunktion.

Dadurch werden diese Energieholzaggregate interessant für den Einsatz in den geschilderten jungen Durchforstungsbeständen mit geringen Stückmassen. Die Sammelfunktion dieser Aggregate ermöglicht es, mehrere Bäume direkt hintereinander zu fällen. Hierbei werden die Stämme in einem zusätzlichen

[8] *Jungdurchforstung (JD): „Pflegeeingriffe in Stangenorten und angehenden Baumbeständen, die nach Grundsätzen der Auslesedurchforstung zu behandeln sind“ (Bayerische Staatsforstverwaltung 1982).*

[9] *Feller-Buncher-Aggregat: Holzernteaggregat, welches durch einen Sammelgreifer mehrere Bäume direkt hintereinander fällen (engl. „to fell“ = fällen) und sammeln kann (engl. „to bunch“ = bündeln).*

„Sammelarm“ während der Fällung eines weiteren Baumes fixiert und schließlich gebündelt abgelegt. Diese Arbeitsweise hilft, Kranzeiten einzusparen und somit die Produktivität zu erhöhen. Beim Einsatz von Sammelaggregaten kommen verschiedene Verfahrensvarianten für das Fällen, Sammeln und Vorkonzentrieren der Bäume in Betracht. Vier verbreitete Verfahrensvarianten werden im Folgenden beschrieben:

„Einzelbaumverfahren“

Bei diesem Verfahren wird der Baum am Stammfuß abgetrennt und mit Hilfe der Tilt-Funktion des Aggregats (u. U. auch unterstützt durch Kran- und Fahrbewegungen) zu Fall gebracht. Anschließend wird der Baum auf dem Boden liegend so oft gekürzt, bis die für einen Forwarder oder Rückewagen maximal tolerierbare Transportlänge von etwa 6 m erreicht ist (siehe Abbildung 23). Schließlich werden die Bäume seitlich entlang der Rückegasse abgelegt. Das Kürzen und Ablegen erfolgt nicht direkt nach dem Fällen jedes einzelnen Baumes, sondern erst, wenn die maximale Ladekapazität des Sammelaggregats erreicht ist. Diese Rauhbündel werden in einem spitzen Winkel fischgrätenartig zur Rückegasse angeordnet, um die Ladearbeiten beim Rücken zu verkürzen.

Abbildung 23: Kürzen der Bäume im „Einzelbaumverfahren“

„Fällen und Bündeln“

Die „Bündelzange“ eines Sammelaggregats ermöglicht es, mehrere Bäume direkt hintereinander zu fällen und diese gemeinsam abzulegen. Nachdem der erste Stamm abgetrennt ist, kann der „Standardgreifer“ geöffnet werden, während der Sammelarm geschlossen bleibt und den Baum stehend am Aggregat fixiert (siehe Abbildung 24). Sobald der nächste Baum mit dem „Standardgreifer“ fixiert ist, kann der Sammelarm geöffnet werden. Die gefederten Greifer der Bündelzange sind flexibel und drücken den zu fällenden Baum beim Öffnen nicht vom Aggregat weg. Ist der Sammelarm geschlossen, wird der nächste Baum am Stammfuß abgetrennt. Das Sammeln mehrerer Bäume direkt hintereinander erfolgt so lange, bis die Kapazitätsgrenze des Aggregats (Zangenöffnung) bzw. des Krans (Hubkraft) erreicht ist. Die Kürzung der Bäume und das Ablegen auf Rauhbeigen verläuft analog zum vorherigen Verfahren (siehe oben).

Abbildung 24: Trennschnitt am Stammfuß beim Verfahren „Fällen und Bündeln“

„Gleichzeitiges Fällen mehrerer Bäume“
Diese Verfahrensvariante unterscheidet sich nur unwesentlich vom „Einzelbaumverfahren“. Hier werden jedoch mehrere Bäume gleichzeitig am Stammfuß getrennt. Dies ist nur dann möglich, wenn die Stammfüße entsprechend nahe zusammenstehen. Das Verfahren kann auch mit anschließenden Bündelvorgängen kombiniert werden. Wie bei den anderen Varianten werden die gefällten Bäume je nach Länge gekürzt und seitlich abgelegt.

„Krone-Stamm-Verfahren“
Hierbei werden eine oder mehrere Baumkronen in einer Höhe von etwa 5-6 m abgetrennt (siehe Abbildung 25). Anschließend ergeben sich mehrere Möglichkeiten für die weiteren Arbeitsgänge:

1. direktes Ablegen der Baumkrone auf eine Rauhbeige.
2. Ablegen auf den Boden und gegebenenfalls Kürzung
3. Sammeln weiterer Baumkronen (Bündelfunktion).
4. Abtrennen des Stammes direkt im Anschluss (Bündelfunktion).

Ein direktes Ablegen auf die Rauhbeige bzw. die Notwendigkeit zusätzlicher Trennschnitte erfolgt in Abhängigkeit von Baumhöhe, lokaler Bestandesdichte und dem Abstand zur Rauhbeige.

Abbildung 25: Abtrennen der Krone beim „Krone-Stamm-Verfahren“

5.2.1 Ernteversuch Ingolstadt: Energieholzaggregat an Raupenharvester in der Erstdurchforstung

Ziel der Untersuchung war es, Produktivität und Kosten sowie Grenzen des Energieholzaggregats NaarvaGrip 1400-50e in einer Nadelholz-Erstdurchforstung zu analysieren.

Technische Details des Maschinensystems
Als Trägerfahrzeug für das Aggregat diente der Raupenharvester Neuson 8002. Die gefällten und vorkonzentrierten Bäume wurden mit einem Valtra 120e Forstschlepper an die Forststraße vorgeliefert. Der Schlepper war mit einem Kronos 5000 Ladekran und einem Farmi Vario 121 Rückewagen ausgerüstet.

Abbildung 26: Neuson 8002 mit NaarvaGrip 1500-40e beim Fällen und Bündeln

In Tabelle 15 sind die wichtigsten technischen Daten des Maschinensystems zusammengestellt. Zu unterstreichen ist, dass der benötigte hydraulische Druck und ein ausreichendes Hubmoment für das Aggregat von dieser sehr leichten Trägermaschine hinreichend gewährleistet wurde.

Tabelle 15: Technische Details der Maschinentechnik im Versuch *Ingolstadt*

Harvester	**Neuson 8002**
Gewicht	8,3 t
Motorleistung	44 kW
Hydraulische Förderleistung	210 l/min
Kran	Neuson
Reichweite	9,3 m
Hubmoment	133 kNm
Fällkopf	NaarvaGrip 1500-40e
Gewicht	420 kg
max. Fälldurchmesser	32 cm
Benötigter Ölfuß	100 – 160 l/min
Greifervolumen	92 cm²
Schlepper	**Valtra 120e**
Gewicht	7,5 t
Motorleistung	88 kW
Hydraulische Förderleistung	120 l/min
Kran	Kronos 5000
Reichweite	7,5 m
Hubmoment	50 kNm
Rückewagen	Farmi Vario 121
Ladekapazität	13 t
Leergewicht	2,0-2,2 t
Ladevolumen	12,3 m³

Bestandesdaten

Die Studien wurden südöstlich von Ingolstadt in Zusammenarbeit mit der Forstdirektion des Wittelsbacher Ausgleichsfonds und der Thurn und Taxis Waldpflege GmbH durchgeführt. Die Versuche fanden in einem Fichten-Kiefern Bestand im Revier Münchsmünster statt. Der Versuchsbestand war 20-30 Jahre alt, einschichtig und dicht geschlossen. Die anstehenden Durchforstungsmaßnahmen wurden im Revierbuch als dringlich eingestuft. Sowohl die geringe Differenzierung des Bestandes als auch die enorme Bestandesdichte (siehe Abbildung 27) ließen in Verbindung mit den podsoligen und wechselfeuchten Standorten ein erhöhtes Stabilitätsrisiko erwarten.

Abbildung 27: Bestandesmarkierungen beim Versuch *Ingolstadt*

Die bereits erläuterte Struktur der Versuchsbestände verdeutlicht Abbildung 28, in der die extreme Durchmesserverteilung der geernteten Bäume dargestellt wird. Der mittlere BHD betrug 7,2 cm.

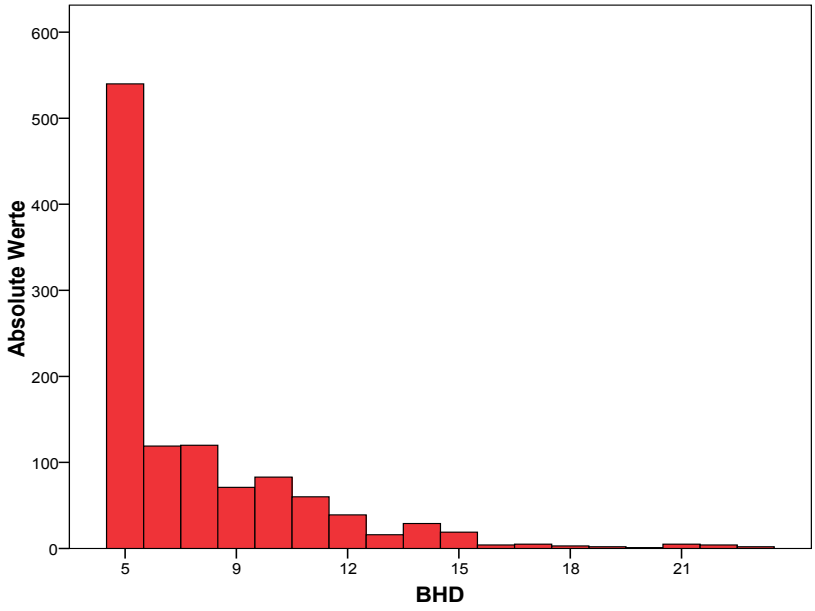


Abbildung 28: Durchmesserverteilung des ausscheidenden Bestandes (Ingolstadt)

Der Umfang der Zeitstudien beinhaltete insgesamt 1150 Bäume. Abbildung 28 veranschaulicht die linksschiefe Verteilung der Durchmesser, von denen mehr als die Hälfte unter dem BHD-Mittelwert von 7,2 cm lagen (siehe).

Tabelle 16: Bestandesdaten des Versuchsbestandes

Versuchsfläche / -gasse	Ingolstadt
mittlerer BHD (cm)	7,2
Gassengesamtlänge (m)	425
Größe der Hiebsfläche (ha)	0,85
Hiebsmenge (Srm)	158
Eingriffstärke (Srm je ha)	186
mittlere Rückeentfernung (m)	374

Beschreibung der Hiebsmaßnahme

Im Versuchsbestand wurden insgesamt sieben Gassen angelegt und 350 Srm entnommen. Für die Datengrundlage wurden drei Gassen vermessen und der Eingriff mit Zeitstudien begleitet. Der Hiebsanfall auf den Zeitstudienflächen betrug 158 Srm (siehe Tabelle 16). Die restlichen Gassen dienten der Eingewöhnungsphase des Harvesterfahrers (drei Arbeitstage).

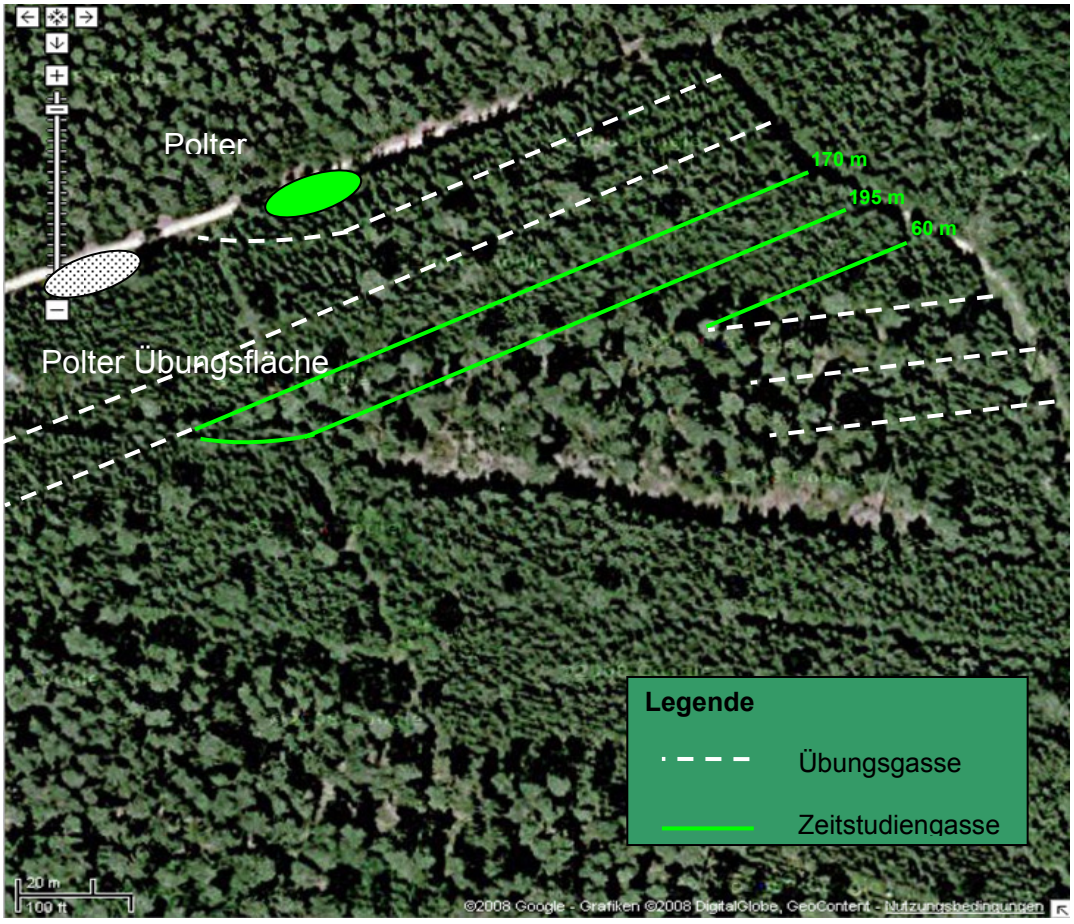


Abbildung 29: Übersichtskarte Versuchsfläche *Ingolstadt*

Der Arbeitsauftrag enthielt neben dem Anlegen der Rückegasse zusätzlich einen Durchforstungsauftrag im Bestandesinneren. Neben den Gassenbäumen wurden ausgewählte und markierte Bäume aus dem Bestandesinneren entnommen. Die markierten Bäume wurden mit unterschiedlichen Verfahrensvarianten gefällt, entlang der Gasse in Rauhbeigen mit einer Länge von 5-7 m vorkonzentriert und in einem spitzen Winkel „fischgrätenartig“ zur späteren Transportrichtung abgelegt. Zum Teil erforderte die außerordentlich hohe Bestandesdichte zusätzliche Arbeitsfahrten oder

die Entnahme weiterer Bäume, um ausreichend Raum für die Rauhbeigen zu schaffen.
Im Anschluss an die Fällung und Vorkonzentration erfolgte die Rückung mit dem System Forstschlepper – Rückewagen. Dabei kam ein Valtra 120e mit einem Farmi 121 Rückewagen zum Einsatz. Die gekappten Vollbäume wurden aufgeladen und zur Forststrasse vorgeliefert. Es wurden ein Polter für das Material aus der Trainingsphase und ein Polter für die geernteten Bäume auf den Versuchsgassen angelegt (siehe Abbildung 29).
Das vorgelieferte Energieholz wurde an der Forststrasse mit einem Jenz HEM 561 Mobilhacker gehackt, der von einem John Deere 8530 Schlepper angetrieben wurde. Das Hackgut wurde abwechselnd direkt in einen Schubboden-Lkw mit einem Fassungsvermögen von 85 Srm und in einen landwirtschaftlichen Kippanhänger mit einem Fassungsvermögen von 40 Srm geblasen und zum Heizwerk geliefert.

Maschinenkostenkalkulation
Bei einer jährlichen Auslastung von 2.000 Maschinenarbeitsstunden wurden für den Raupenharvester Maschinenkosten von 70 € und für den Schlepper 60 € pro Stunde kalkuliert. Für einen Harvester sind bei gleicher Auslastung je nach Leistungsklasse mit 115 bis 150 € und für einen Forwarder mit 75 bis 90 € pro Stunde zu rechen. Mit den eingesetzten Basismaschinen ist aufgrund der geringeren Fixkostenbelastung im Vergleich zum klassischen Zweimaschinensystem - bestehend aus Harvester und Forwarder - ein geringeres Produktivitätsniveau kompensierbar.
Entsprechend den Angaben des Unternehmers wurde der Mobilhacker mit einem Stundensatz von 175 € kalkuliert, der Schleppertransport mit 60,00 €/MAS und der Lkw-Transport mit 70 €/MAS.

Ergebnisse der Zeitstudien

Zunächst soll die Verteilung der einzelnen Ablaufabschnitte analysiert und diskutiert werden. In Abbildung 30 sind die Zeitanteile der verschiedenen Arbeitsschritte graphisch dargestellt.

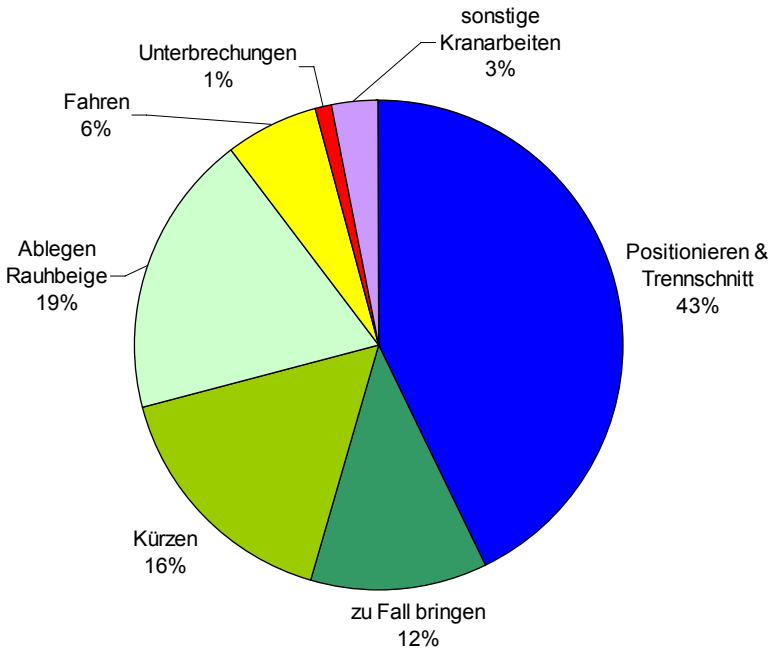


Abbildung 30: Anteile der Ablaufabschnitte beim Fällen im Versuch *Ingolstadt*

Es zeigt sich, dass die Ablaufabschnitte „Positionieren und Trennschnitt“ sowie „zu Fall bringen“ 55 % der gesamten Arbeitszeit ausmachen. Als weiterer Schwerpunkt nehmen das Kürzen und das Ablegen auf die Rauhbeigen zusammen 35% der Arbeitszeit ein. Die hohe Bestandesdichte und eine durch den Gassenaufhieb bedingte hohe Eingriffstärke führten zu relativ geringen Anteilen an Arbeitsfahrten. Mit nur 1 % fällt der Anteil von Unterbrechungen sehr gering aus. Im Vergleich zu anderen Versuchen konnte mit dem Raupenharvester das „Krone-Stamm-Verfahren“ aufgrund der Krangeometrie des Parallelarms kaum eingesetzt werden. Daher erhöhte sich der Aufwand beim Kürzen der Vollbäume.

Zeitbedarf Fällen und Vorkonzentrieren

Zur Berechnung der technischen Arbeitsproduktivität werden der Zeitbedarf für das Fällen und Vorkonzentrieren und die Stückmassen der Bäume benötigt. Unter dem Prozessschritt Fällen und Vorkonzentrieren ist der komplette Harvesterprozess zu verstehen, dass heisst alle Ablaufabschnitte während der Harvestertätigkeit (auch die Arbeitsfahrten, sonstige Kranarbeiten, Unterbrechungen) fließen in den Zeitbedarf mit ein. Im Durchschnitt betrug der Zeitbedarf für das Fällen eines Baumes 30,1 Sekunden. Dadurch ergibt sich eine durchschnittliche Fällleistung von 120 Bäumen je Maschinenarbeitsstunde (inklusive Unterbrechungen < 15 min). Das Zeitbedarfsmodell veranschaulicht den Anstieg des Zeitbedarfs pro Baum mit zunehmendem Durchmesser (siehe Abbildung 31).

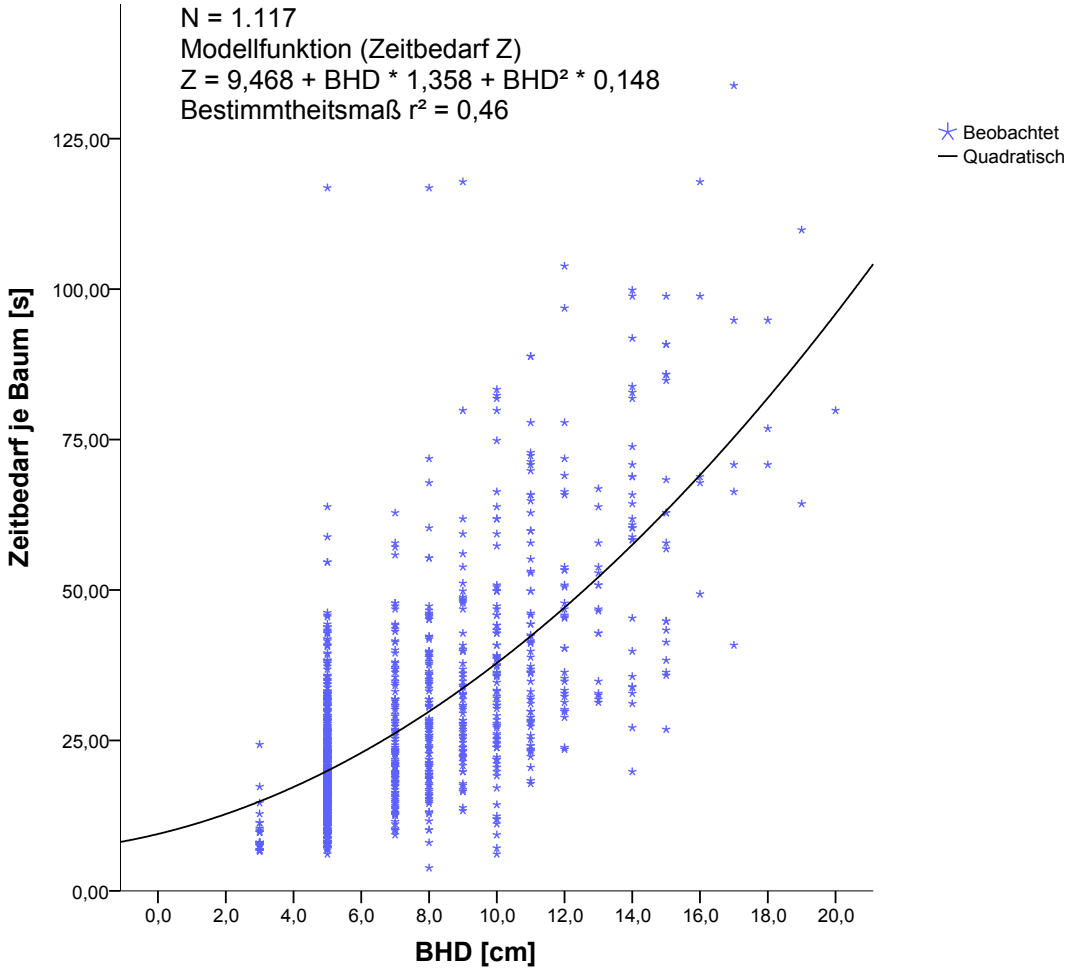


Abbildung 31: Zeitbedarfsmodell für den Prozessschritt Fällen und Vorkonzentrieren beim Versuch *Ingolstadt*

Bezieht man die Zeitbedarfswerte auf das jeweilige Baumvolumen, so lassen sich Produktivitätsmodelle erstellen, von denen sich ein bestimmtes Produktivitätsniveau in Abhängigkeit des Baumvolumens bzw. des BHD ableiten lässt. Auf eine Erstellung von Produktivitätsmodellen wurde im Laufe der statistischen Auswertung jedoch verzichtet, da eine zuverlässige Volumenberechnung weder mit Hilfe konventioneller Baumvolumenfunktionen (in der Regel erst ab BHD > 7cm repräsentativ) noch mit den aus der Literatur bekannten Biomassefunktionen (ZIANIS et al. 2005) möglich war. Bezogen auf die bereitgestellte Menge an Hackgut wurde eine durchschnittliche Produktivität von 16,4 Srm/h erreicht.

Bündelfunktion und Kapazitätsgrenze

Die Fällgrenze des Aggregats liegt laut Herstellerangaben bei einem Stockdurchmesser von 32 cm. Kein Baum des ausscheidenden Bestandes hatte diese Durchmessergrenze erreicht. Es traten keinerlei Probleme bei der Durchtrennung der Stämme auf. Effektives Bündeln ist allerdings nur bis zu einem Durchmesser von etwa 17 cm realisierbar (siehe Abbildung 32). Im Vergleich zum kleineren Modell NaarvaGrip 1500-25e, das in einem früheren Projekt untersucht wurde, liegt die Schnittleistung deutlich höher (EBERHARDINGER 2006). Die Greiferzangen sind durch die Einbindung von Schneideflächen zur Reduktion des

Schnittdurchmessers effektiver konstruiert, und der maximale Fälldurchmesser ist größer. Dies führt dazu, dass die Klauenzangen selbst bei stärkeren Durchmessern und ausgeprägten Wurzelanläufen geschlossen bleiben und dem Druck des schneidenden Messers entgegenwirken können.

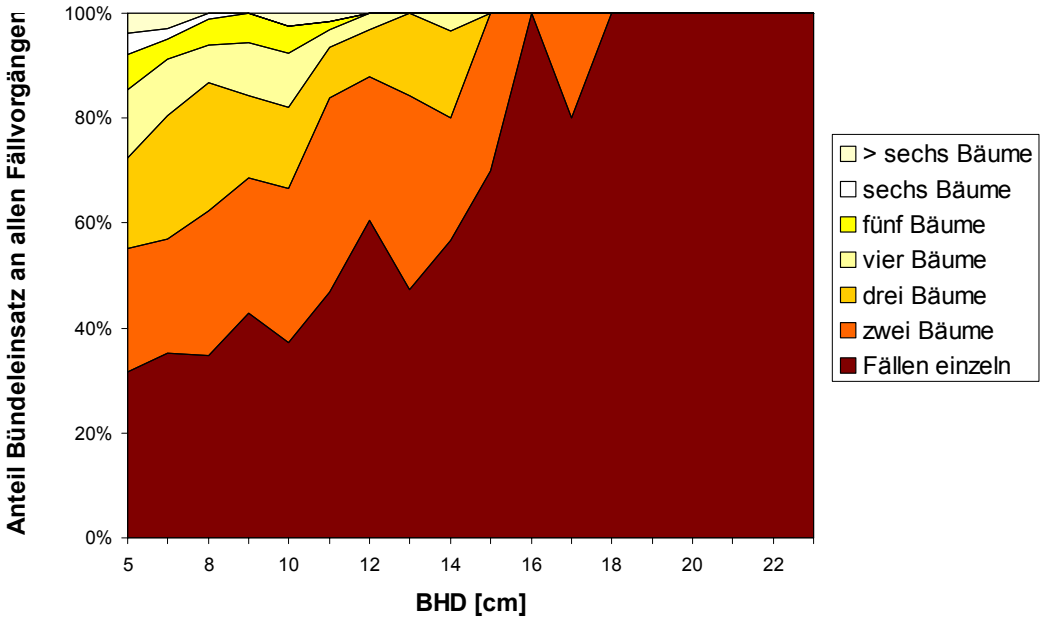


Abbildung 32: Verteilung der Bündelvorgänge mit dem NaarvaGrip 1500-40e.

Abbildung 32 veranschaulicht die Grenze des Bündelns mit dem Mehrfachfällkopf 1500-40e. In der Grafik ist dargestellt, wie viele Bäume bzw. Baumteile sich bei den jeweiligen Fällvorgängen in einem bestimmten BHD-Bereich im Aggregat befanden. Die Farbflächen markieren den Durchmesserbereich, bei dem der jeweilige Anteil aller Fällvorgänge mit einem, zwei, drei, usw. Bündelvorgängen durchgeführt wurden. So werden bei einem BHD von 5 cm 30 % der Bäume einzeln gefällt (brauner Bereich), bei 45% der Fällvorgänge befinden sich jedoch zwei oder drei Bäume im Aggregat (roter und oranger Bereich) und in weiteren 25% der Fällvorgänge befinden sich vier und mehr Bäume im Aggregat (gelber Bereich). Je höher der BHD ansteigt, desto geringer wird der Anteil an Bündelvorgängen (rote, orange und gelbe Flächen nehmen ab!). Bis auf einzelne Ausreißer (rotes Dreieck bei BHD 16 – 18 cm) wird die Bündelgrenze des Aggregats bei etwa 17 cm markiert (dunkelbrauner Gipfel), ab dem keine weiteren Bündelvorgänge mehr möglich sind. Dennoch konnte die Bündelzange in 60% aller Fällvorgänge eingesetzt werden, um dadurch Kranzeiten einzusparen.

Rücken bzw. Vorliefern an die Forststrasse

Die Rückung erfolgte mit dem System Forstschlepper-Rückewagen (vgl. Tabelle 15). Die Ablaufabschnitte Beladen und Entladen nehmen mit 46 % des Zeitbedarfs den Hauptanteil der Rückearbeiten ein.

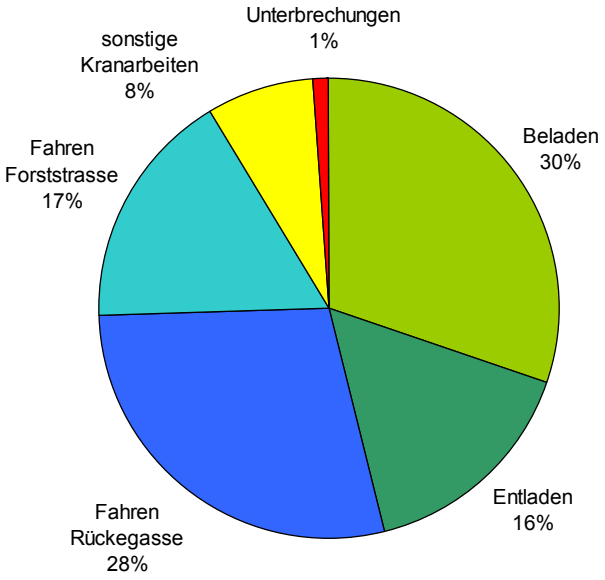


Abbildung 33: Anteile der Ablaufabschnitte beim Rücken im Versuch *Ingolstadt*

Dabei bestätigen die Ergebnisse die Erwartung, dass die Beladung im Bestand deutlich zeitintensiver ist als die Entladung an der Forststrasse. Der durchschnittliche Zeitbedarf für einen Beladungszyklus betrug 48,5 Sekunden, für einen Entladungszykles 26,1 Sekunden. Im Mittel benötigte der Schlepper 25,5 Minuten pro Fuhre. Grundsätzlich führt die Vorkonzentration der gefällten Vollbäume zu einer hohen Rückeleistung und damit zu geringen Rückekosten (vgl. Tabelle 17). Erheblichen Einfluss hat dabei die Qualität der Vorkonzentration bzw. die Anordnung und Ausrichtung der Rauhbeigen. Unter „Qualität“ ist hierbei insbesondere das Einhalten der Länge der Rauhbeigen zu verstehen.

Hacken und Transport

Das Hacken erfolgte mit dem mobilen Hackaggregat HEM 561 der Firma Jenz. Als Basismaschine diente ein John Deere 8530. Bei einem Kostensatz von 175 €/MAS wurden für das Hacken des Versuchsmaterials 3,9 €/Srm kalkuliert. Der Hackereinsatz wurde mit einer Zeitstudie begleitet.

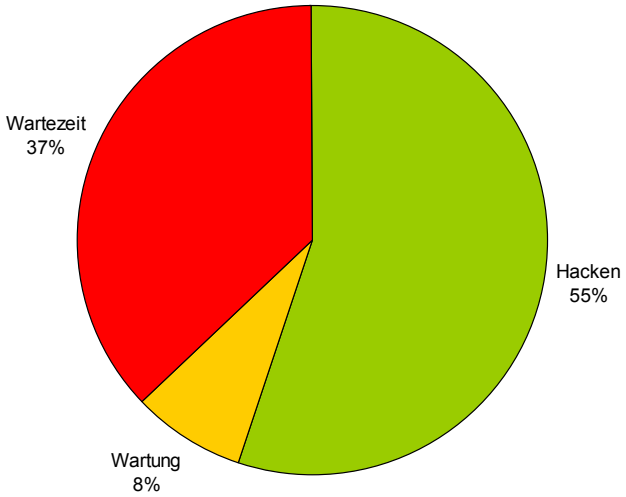


Abbildung 34: Anteile der Ablaufabschnitte beim Hacken im Versuch *Ingolstadt*

Ursächlich für die hohen Wartezeiten des Hackers (siehe Abbildung 34) und damit die relativ hohen Kosten des Hackens waren Verzögerungen bei der Warenannahme im Heizwerk. Bei genauerer Betrachtung der reinen Hackarbeiten zeigt sich, dass das Ausgangsmaterial sehr förderlich für den Arbeitsablauf war. Die gekappten Vollbäume eignen sich ideal für eine effiziente Kranzufuhr. Zum einen sind die Baumteile mit einer Länge von 5 - 7 m noch sehr gut zu manipulieren, zum anderen entstehen durch die Vorkonzentration in Rauhbeigen „kompakte Pakete“, welche sich wegen ihrer Länge und Lagerungsdichte sehr leicht zuführen lassen.

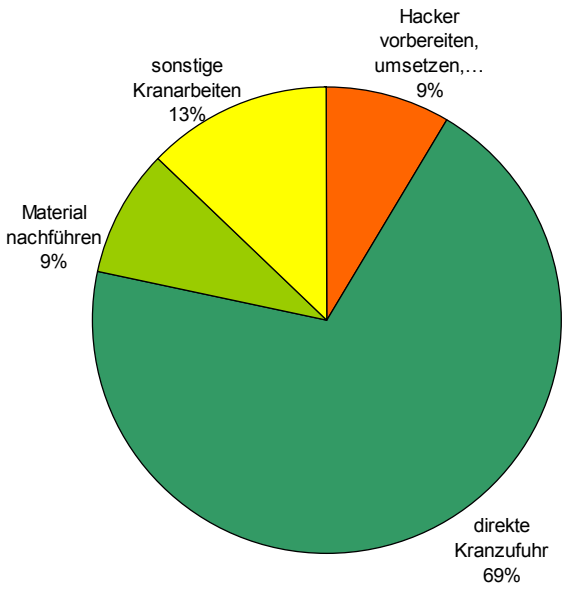


Abbildung 35: Unterteilung der reinen Hackereinsatzzeit in einzelne Ablaufabschnitte

Diese Vorteile führen zu einer hohen Trommellaufzeit und Produktivität. Betrachtet man die effektive Hackereinsatzzeit, so unterstreicht der geringe Anteil an „Nachführarbeiten“ (siehe Abbildung 35) die gute Eignung dieses Ausgangsmaterials zur Realisierung einer hohen Hackerleistung.

Kosten- und Erlössituation

Die angefallenen Kosten der einzelnen Prozessschritte sowie die Gesamtkosten des Systems bewegen sich im Kostenrahmen gängiger Bereitstellungsketten für Waldhackgut (siehe 4.2.2 und WITTKOPF 2005; KANZIAN et al. 2008; CREMER 2009).

Tabelle 17: Kosten der einzelnen Prozessschritte beim Versuch *Ingolstadt*

Prozessschritt	**Kosten**
Fällen und Vorkonzentrieren:	4,3 €/Srm
Rücken:	2,3 €/Srm
Hacken:	3,9 €/Srm
Transport:	2,8 €/Srm
Summe	**13,30 €/Srm**

Berücksichtigt man dabei die geringen Stückmassen des ausscheidenden Bestandes (vgl. Abbildung 28) werden die Potenziale der Sammeltechnik des Energieholzaggregats deutlich. Die unter den schwierigen Bedingungen erzielte Produktivität beim Fällen führt zu einer geringen Kostenbelastung frei Waldstrasse. Für die komplette Bereitstellungskette frei Werk ergeben sich Kosten von 13,30 € pro Srm.
Beim Vergleich mit in den letzten Jahren erzielten Hackschnitzelpreisen (siehe 4.2.2) wird deutlich, dass eine kostendeckende Bereitstellung von Waldhackgut möglich ist. Auch wenn die Preise erheblichen saisonalen Schwankungen unterworfen sind und eine breite Streuung besitzen, können bei mittel- bis langfristiger Betrachtung durchaus Preise von 13 bis 15 Euro pro Srm erzielt werden. Darüber hinaus sind die erzielten Produktivitäten durch technische Anpassungen und dem Übungsgrad der Maschinenführer sicherlich noch steigerungsfähig.

5.2.2 Ernteversuch Zusmarshausen: Energieholzaggregat an 4-Rad-Harvester in der Nadelholz-Jungbestandspflege[10]

Ein potenzielles Einsatzgebiet von Energieholzaggregaten sind Pflegeeingriffe im Stadium der Jungbestandspflege. Die Anforderungen sind auf diesen Flächen besonders hoch, da die Baumdimensionen noch erheblich geringer als in der Erstdurchforstung sind. Dies wirkt sich in hohem Maße auf die Kosten einer Pflegemaßnahme aus.

Im Fokus der Jungbestandspflege steht die Steuerung der Konkurrenzsituation, um das Bestockungsziel zu sichern und eine Differenzierung der Bestandesstruktur einzuleiten. In gemischten Jungbeständen spielt die Mischwuchsregulierung eine wesentliche Rolle, in naturverjüngten Reinbeständen gilt das Hauptaugenmerk der Stammzahlreduktion. Hervorzuheben ist die „Erkenntnis, dass Pflegemaßnahmen in Jungbeständen eine wichtige Investition im Hinblick auf die Stabilität und Sicherheit sowie die Volumen- und Wertzuwachsleistungen der Bestände bedeuten“ (KRAMER 1980).

Unter diesem Hintergrund wird die Feller-Buncher-Technik auch aus waldbaulicher Sicht interessant. Es besteht die Erwartung, durch vollmechanisierte Verfahren Kosten einsparen und große Flächen bearbeiten zu können. In enger Kooperation mit Waldbau- und Forsttechnikexperten der *Bayerischen Staatsforsten* wurde deshalb eine Fallstudie initiiert.

Bestandesdaten
Die Studie fand im Forstbetrieb Zusmarshausen statt. Als Versuchsfläche wurde ein naturverjüngter Fichtenreinbestand ausgewählt, welcher durch eine extrem hohe Bestandesdichte bei gleichzeitig geringen Baumdurchmessern charakterisiert war (siehe Abbildung 36).

[10] *Jungbestandspflege (JP): „Maßnahmen in Beständen zur Jungwuchs- und Dickungspflege“ (Bayerische Staatsforstverwaltung 1982)*

Abbildung 36: Versuchsfläche in Zusmarshausen. Als Maßstab dient ein Besenstil (links) bzw. ein Mobiltelefon (rechts).

In dem bis dato unbehandelten Bestand fand noch keine Astreinigung statt. Die Differenzierung war gering. In der „Bürstenwuchs“-Struktur wäre der Einsatz mit einem konventionellen Harvesteraggregat unter den gegebenen Umständen nicht möglich. In derartigen Beständen kamen für die Pflege bisher nur Mulchgeräte oder motormanuelle Verfahren in Betracht. Für motormanuelle Verfahren mit Freischneidegeräten ist mit hohen Pflegekosten zu rechnen, die Flächenwirksamkeit ist aber sehr hoch. Mit Hilfe von Mulchgeräten können die Kosten gesenkt werden, aber nur lineare Eingriffe umgesetzt werden.

In dem naturverjüngten Fichtenbestand ist mit Stammzahlen von bis zu 250.000 Pflanzen je Hektar zu rechnen (HAUGG 2008). Das Zeitbedarfsmodell wurde auf der Basis von zwei Versuchsgassen entwickelt. Für dieses Kollektiv wurde ein mittlerer BHD von 8, 4 cm berechnet. Aufgrund der Heterogenität der Versuchsfläche kann dieser Mittelwert nicht auf den gesamten Versuchsbestand übertragen werden.

Tabelle 18: Bestandes- und Hiebsdaten der Versuchsfläche in Zusmarshausen

Versuchsfläche	Zusmarshausen
Alter (Jahre)	5 - 20
Gassengesamtlänge (m)	400
Größe der Versuchsfläche (ha)	1,4
Hiebsmenge (Srm)	151
Eingriffstärke (Srm je ha)	108
mittlere Rückeentfernung (m)	160

Technische Details des Maschinensystems

Als Trägerfahrzeug für das ABAB 250 Energieholz-Sammelaggregat diente ein 4-Rad-Harvester der Firma Eco Log. Die Kompaktheit der 4-Rad-Maschine bei gleichzeitig hohem Hubmoment, der seitliche Kranaufbau (Sicht!) sowie die Krangeometrie waren wichtige Kriterien für die Wahl dieser Maschine, welche den Anforderungen des Versuchsbestandes angepasst sein sollte (siehe Tabelle 18 und Abbildung 37). Der Eco Log 550 ist in der unteren Leistungsklasse der Harvester

anzusiedeln, weist jedoch gegenüber dem Neuson 8002 deutlich höhere Leistungskennzahlen auf. Hinsichtlich der Bodenschonung ist er aufgrund des Gewichts, des Fahrwerks und der Aufstandsfläche weniger gut einzuwerten als der kleine Raupenharvester.

Abbildung 37: Eco Log 550 C mit ABAB 250 Energieholzaggregat im Versuchseinsatz.

Das Energieholzaggregat ABAB 250 der Firma Allan Bruks ist bezogen auf Gewicht, hydraulische Anforderungen und maximalen Fälldurchmesser durchaus mit dem NaarvaGrip 1500-40 vergleichbar. Beide weisen typische Kennzahlen der Sammelaggregate auf. Alleinstellungsmerkmal der ABAB-Aggregate ist die Aufhängung am Kran. Mit Hilfe eines Hydraulikzylinders kann das Aggregat vertikal stufenlos ausgerichtet werden (siehe Abbildung 22). Diese fixierende Aufhängung ermöglicht eine äußerst bestandesschonende Manipulation der abgetrennte Baumkronen bzw. Bäume.

Tabelle 19: Technische Details der eingesetzten Maschinentechnik im Versuch *Zusmarshausen*

Harvester	**Eco Log 550 C**
Gewicht	16,5 t
Motorleistung	190 kW
Hydraulische Förderleistung	234+234 l/min
Kran	Eco Log
Reichweite	10 m
Hubmoment	206 kNm
Fällkopf	**ABAB 250**
Gewicht	490 kg
Max. Fälldurchmesser	25 cm
Benötigter Ölfluss	120 l/min
Max. Öffnungsweite	59 cm
Forwarder	**Eco Log 564 C**
Gewicht	16,8 t
Motorleistung	130 kW
Hydraulische Förderleistung	210 l/min
Ladekapazität	12 t
Ladevolumen	23,3 m³
Kran	Loglift F71
Reichweite	8,5 m
Hubmoment	99 kNm

Das entlang der Rückegasse vorkonzentrierte Energieholz wurde mit dem Eco Log 564 C, einem Forwarder mittlerer Leistungsklasse, an die Waldstrasse gerückt und für den Hackprozess bereitgestellt.

Maschinenkostenkalkulation
Für den 4-Rad-Harvester wurde bei einer Jahresauslastung von 2.000 MAS ein Stundensatz von 115 € kalkuliert. Der geringere Kraftstoffverbrauch beim Arbeiten mit dem Energieholz-Sammelaggregat ist hierbei nicht berücksichtigt, da angenommen wird, dass die Maschine sowohl in der Stammholz- als auch in der Energieholzernte eingesetzt wird. Der Forwarder wurde mit 75 € / MAS kalkuliert.

Beschreibung der Pflegemaßnahme
Aufgrund der Ausgangssituation wurde ein schematisches Pflegeverfahren unter Berücksichtigung der Kriterien Pflegeeffekt, Schadrisiko und Kostenbelastung konzipiert. Die Pflegemaßnahme setzt sich zusammen aus dem Freischneiden der Rückelinien und der Anlage von 1,5 – 2 m breiten Krantrassen (siehe Abbildung 38).

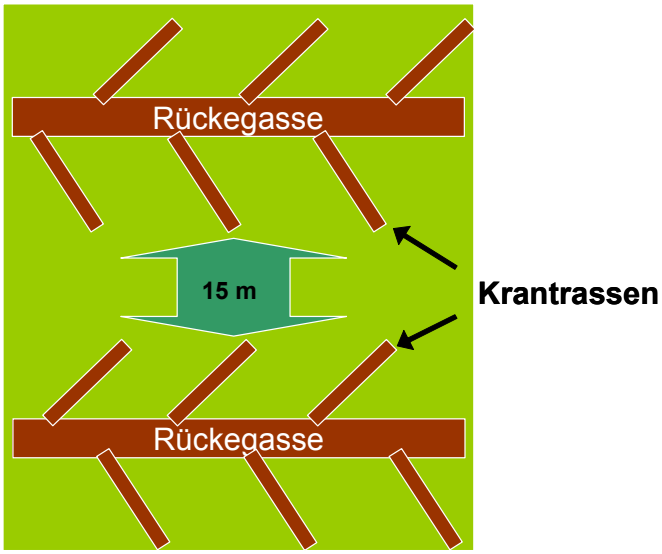


Abbildung 38: Schematische Darstellung des Pflegeingriffs beim Versuch *Zusmarshausen*

Das Freischneiden der Krantrassen sollte einen Beitrag für einen flächigen Pflegeeffekt leisten. Gleichzeitig dienten die Schneisen als Ablagefläche für die gefällten Bäume. Um eine möglichst pflegliche Verladung zu gewährleisten, wurden die Krantrassen fischgrätenartig in Transportrichtung frei geschnitten. Die Krantrassenlänge entsprach der maximalen Kranreichweite des Harvesterkrans. Der Abstand zwischen zwei wechselseitigen Krantrassen betrug ca. 6 bis 8 m, der Rückegassenabstand 30 m. Dementsprechend ergab sich eine „pflegefreie“ Zone von etwa 15 m. Die gefällten Bäume wurden mit dem Forwarder an die Rückegasse vorgeliefert und dort von einem Lkw-Hacker gehackt. Die Hackschnitzel wurden direkt in Container geblasen und ans Heizwerk transportiert. Im Rahmen der Zeitstudie wurden Leistungsdaten von fünf Rückegassen erfasst und ausgewertet.

Ergebnisse
Die Anteile der einzelnen Arbeitsschritte an der Gesamtarbeitszeit unterscheiden sich von der Verteilung beim Versuch mit dem Raupenharvester Neuson 8002. In Zusmarshausen wurde fast ausschließlich mit dem Krone-Stamm-Verfahren gearbeitet, bei dem das Fällen und Kürzen der Bäume in einem Arbeitsschritt zusammengefasst ist. Für dieses Arbeitsverfahren ist der Eco Log 550 aufgrund seiner Krangeometrie besser geeignet als der Neuson 8002. Die Bäume bzw.

Baumteile werden direkt auf die Rauhbeigen abgelegt. Deshalb fehlt der Arbeitsschritt „zu Fall bringen“ beim Versuch in Zusmarshausen, und das Kürzen der Bäume nimmt im Vergleich zum Versuch in Ingolstadt (siehe Abbildung 30) lediglich 1 % der Gesamtarbeitszeit ein.

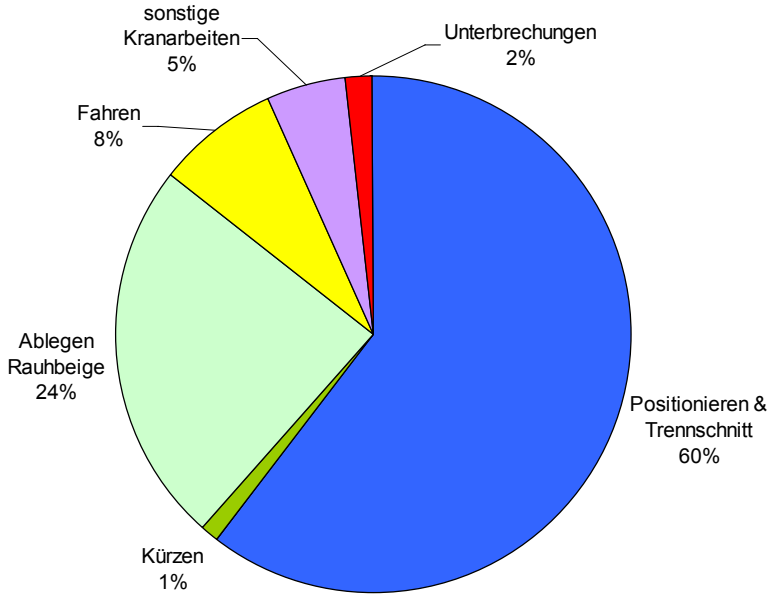


Abbildung 39: Anteile der Ablaufabschnitte beim Versuch *Zusmarshausen* mit dem Sammelaggregat ABAB 250

Hinsichtlich der anderen Ablaufabschnitte sind keine wesentlichen Unterschiede zu finden. Der geringe Anteil an Arbeitsfahrten in beiden Fallstudien lässt sich dadurch erklären, dass in den Ablaufabschnitten „Positionieren & Trennschnitt“ sowie „Ablegen Rauhbeige“ Fahrvorgänge enthalten sind.

Leistung Fällen und Vorkonzentrieren

Analog zum Versuch *Ingolstadt* wurde ein Modell entwickelt, um den Zeitbedarf für das Fällen und Vorkonzentrieren eines Baumes in Abhängigkeit des BHD abschätzen zu können. Aufgrund der extrem hohen Stammzahlen unterhalb der Derbholzgrenze flossen nur zwei Versuchsgassen in das Modell ein (N=279 Bäume). Der mittlere Zeitbedarf beträgt 33,9 Sekunden, was einer Fällleistung von 106 Bäumen pro Stunde entspricht. Im verprobten Kollektiv wurde ein durchschnittlicher BHD von 8,4 cm berechnet.

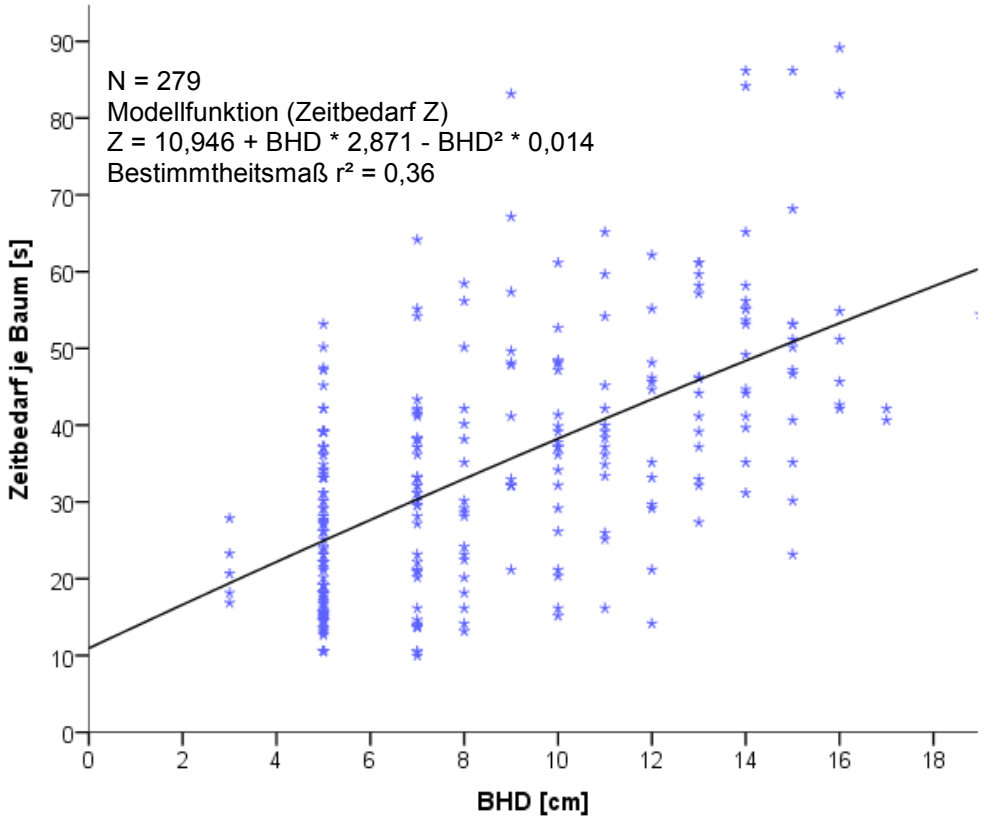


Abbildung 40: Zeitbedarfsmodell für das Fällen und Vorkonzentrieren beim Versuch *Zusmarshausen*

Der Anstieg des Zeitbedarfs mit zunehmendem BHD ist in Zusmarshausen nicht so ausgeprägt wie in *Ingolstadt* (Abbildung 31 und Abbildung 40). Ein Grund dafür kann das Arbeitsverfahren „Krone-Stamm“ sein, bei dem Fällen, Bündeln und Kürzen innerhalb eines Ablaufs erfolgen. Zeitaufwändiges Ablegen und Einkürzen am Boden gerade bei steigenden Durchmessern entfällt bei dieser Vorgehensweise.

Die durchschnittlich erzielte Produktivität wird getrennt nach Gassen dokumentiert, um der Streuung von BHD und Hiebsanfall je Flächeneinheit Rechnung zu tragen. Tabelle 20 zeigt die Auswirkungen der extremen Heterogenität des naturverjüngten Fichtenbestandes.

Tabelle 20: Produktivität für Fällen und Vorkonzentrieren in der Studie *Zusmarshausen*

Gasse	1	2	3	4	5	Mittelwerte
Hiebsmenge [Srm]	35	44	36	16	20	**30,2**
Produktivität [Srm/h]	13,7	11,4	9,4	12,0	12,1	**11,7**

Der Produktivitätsunterschied zwischen einzelnen Versuchgassen beträgt im Maximum 4,3 Srm (=46 %). Das erzielte Leistungsniveau ist unter Berücksichtigung der schwierigen Rahmenbedingungen positiv einzuwerten. Mit 11,7 Srm/MAS ist die durchschnittliche Leistung um 40% geringer als im Erstdurchforstungsversuch in Ingolstadt. Der Unterschied ist in erster Linie auf die geringeren Stückmassen

zurückzuführen, da die Abweichung in der Leistungskennzahl „gefällte Bäume pro Stunde“ mit 15% erheblich geringer ausfiel (vgl. Abbildung 31 und Abbildung 40).

Rücken bzw. Vorliefern an die Forststrasse

Entsprechend der unterschiedlichen Rückeentfernungen wurde beim Versuch *Zusmarshausen* ein um 10 % geringerer Fahrtzeitanteil als in *Ingolstadt* gemessen. Die restlichen Teilzeiten entsprechen der Verteilung des anderen Versuchs.

In beiden Studien wurde die Erwartung bestätigt, dass die Vorkonzentration des Energieholzes entlang der Rückegasse zu einer hohen Produktivität führten. Analog zur Fällleistung sind erhebliche Schwankungen (47%) zwischen einzelnen Gassen zu beobachten, wobei die durchschnittlichen Rückeleistungen innerhalb eines durchweg hohen Niveaus streuen (siehe Tabelle 21).

Tabelle 21: Produktivität für das Rücken in der Studie *Zusmarshausen*

Gasse	1	2	3	4	5	Mittelwerte
Hiebsmenge [Srm]	35	44	36	16	20	**30,2**
Produktivität [Srm/h]	44,8	35,7	32,7	36,5	48,3	**39,6**

Kosten

Die kalkulierten Kosten frei Heizwerk liegen deutlich über den marktüblichen Preisen für die unter den gegebenen Voraussetzungen erzeugte Hackgutqualität (hoher Fein- und Grünanteil). Kostendeckend können solche Maßnahmen also derzeit nicht durchgeführt werden.

Tabelle 22: Kalkulierte Kosten je Prozessschritt bei der Fallstudie *Zusmarshausen*

Prozessschritt	Kosten
Fällen und Vorkonzentrieren:	9,90 €/Srm
Rücken:	1,90 €/Srm
Hacken:	2,40 €/Srm
Transport:	3,00 €/Srm
Summe	**17,20 €/Srm**

Wie einleitend erwähnt, handelt es sich bei derartigen Pflegemaßnahmen um Investitionen in Bestandesstabilität und Wertsteigerung. Die Vermarktung der bereitgestellten Biomasse leistet dabei einen Beitrag zur Senkung der Pflegekosten. Kostensenkungspotenziale sind in erster Linie im Prozess der Fällung zu finden. Die Baumdimensionen in Jungbeständen sind aber sicherlich als limitierender Faktor zu sehen.

5.3 Energieholzrückung mit der Spezialmaschine ABAB Carrier

Der Transport von Energieholz, insbesondere der Vortransport ungehackter Ware ist gekennzeichnet durch die geringe Lagerungsdichte des Transportgutes (PATZAK 1984a,b; HAKKILA 2004). Ein geringer Warenwert bei gleichzeitig hohen Transportkosten führt zu einer Herausforderung für eine effiziente Bereitstellungskette. Das Vorliefern von Schlagabraum (Kronen und sonstigen Hiebsresten) zu geeigneten Hack- oder Lagerplätzen gestaltet sich mitunter äußerst kostenintensiv, da Stückmasse und Rückentfernung die wesentlichen Einflussfaktoren auf Leistung und Kosten darstellen (CREMER 2009). Der Vortransport sollte laut KANZIAN et al. (2008) deshalb auf kurze Distanzen beschränkt werden.

Nimmt man beispielsweise für gerückte Fichtenkronen einen Umrechnungsfaktor von 6,0 zwischen Raummaß (rm) und Frischgewicht (t lutro) an[11], so kann ein Forwarder der unteren Leistungsklasse (10 t Nutzlast) mit 15 m³ Ladevolumen und einer Volumenauslastung von 150% etwa 3,8 t transportieren und erreicht damit etwa 38 % seiner möglichen Nutzlast. Diese Problematik verstärkt sich, je unförmiger das zu transportierende Gut ist. Sollen beispielsweise Wurzelstöcke oder nur die Äste gerückt werden, erschwert sich der Vortransport im Rungenkorb. Das Risiko steigt, Teile der Ladung zu verlieren.

Für diese Anwendungen wurden von einigen Herstellern Spezialaufbauten für Forwarder entwickelt (z.B. ABAB Carrier, Wellink PressCollector, Ponsse Bio). Die containerförmige Konstruktion dieser Aufbauten ermöglicht eine im Vergleich zum Rungenkorb höhere Nutzlast und einen verlustarmen Materialtransport.

Abbildung 41: Eco Log 554 BCT mit ABAB Carrier im Versuchseinsatz bei der Rückung von Fichtenkronen (links). Auf Stützfüßen abgestellter Spezialaufbau ABAB Carrier (rechts).

In einer Fallstudie wurde der Spezialaufbau *ABAB Carrier* des schwedischen Maschinenherstellers Allan Bruks bei der Rückung von Fichtenkronen im Praxiseinsatz untersucht. Der ABAB Carrier (siehe Abbildung 41) ist ein wechselbarer Transportrahmen, dessen Seitenwände hydraulisch bewegt werden können. Dadurch kann der Schlagabraum komprimiert werden, wodurch die Lagerungsdichte steigt. Der Austausch des Rungenkorbes gegen den Carrier dauert

[11] *Ein Umrechnungsfaktor von 6 bedeutet, dass ein Energieholzpolter mit einem Raummaß von 120 rm (zum Beispiel: 10m lang * 4m breit * 3m hoch) einem Frischgewicht von 20 t entspricht.*

etwa 30 Minuten. Der Carrier kann während der Nutzung des Rungenkorbes auf Stützfüßen abgestellt werden (siehe Abbildung 41).

Material und Methoden

Ziel der Untersuchung war eine vergleichende Analyse der technischen Arbeitsproduktivität (TAP in t lutro/MAS bzw. Srm/MAS) der beiden Aufbauvarianten „Rungenkorb“ und „Carrier“. Um die technische Arbeitsproduktivität zu bestimmen, müssen Zeitbedarf und transportierte Menge erfasst werden. Zur Erhebung des Zeitbedarfs wurde eine Zeitstudie auf Basis des Fortschrittszeitverfahrens durchgeführt (vgl. Kapitel 5.1).

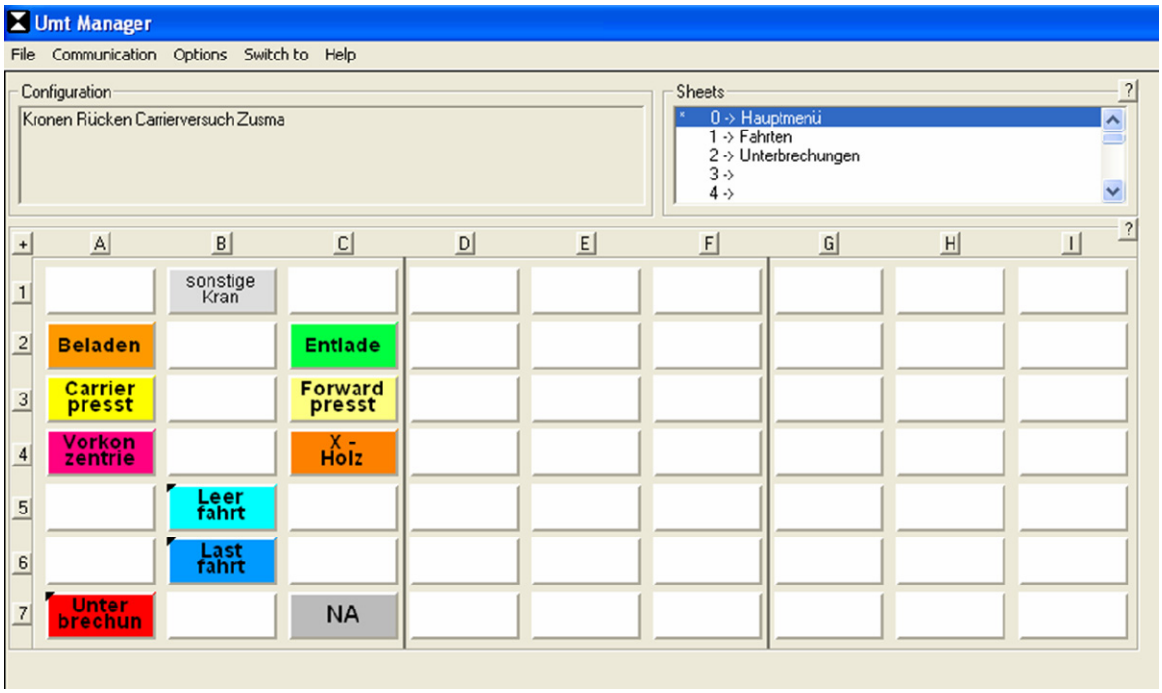


Abbildung 42: UMT- Aufnahmemaske für die Zeitstudie über die Carrier-Rückung

Die Ablaufabschnitte „Pressen mit Carrier“, „Vorkonzentrieren“ von Schlagabraum mit dem Kran und das Beladen mit „X-Holz“[12] wurden für diesen Einsatz in der Aufnahmemaske der UMT-Software ergänzt (siehe Abbildung 42).

Zur Erfassung der Ladegewichte wurde die Kranwaage *Loadmaster Multi* der Firma S.W. Development Gruppen AB (SWE) verwendet. Die Kranwaage erfasst automatisch das Gewicht jedes Ladevorgangs und addiert diese zu einem Gesamtgewicht je Fuhre, ohne dass dabei Wartezeiten für ein Auspendeln entstehen. Der Ladevorgang kann also ohne Einschränkungen durchgeführt werden. Die Fuhren wurden getrennt an der Waldstrasse abgeladen. Während des Hackens in Container-Lkw wurde als Kontrollmaß erneut das Fuhrengewicht mit dem auf den Lkw installierten On-board-Wiegesystemen bestimmt.

In der Studie waren zwei Maschinenführer auf beiden Versuchsflächen im Einsatz. Beide Fahrer arbeiteten sowohl mit dem Rungen- als auch mit dem Spezialaufbau. Ein Vergleich der Aufbauvarianten sowie des Leistungsniveaus ist dadurch möglich.

[12] *X-Holz = Stammfaule Erdstammstücke oder Wurzelanläufe zwischen 0,3 m und 2,0 m Länge, die im Laufe des Aufarbeitungsprozesses anfallen.*

Technische Details des Maschinensystems

Mit dem Eco Log 554 BCT wurde ein Forwarder der unteren Leistungsklasse gewählt (siehe

Tabelle 23). Der in der Fallstudie untersuchte Aufbau ist ein Prototyp, welcher in Anlehnung an die Herausforderungen des deutschen Marktes entwickelt wurde. Es sollte eine flexible Wechsellösung entstehen, die im Wald möglichst schnell zwischen Rungenkorb und „Containeraufbau“ umgebaut werden kann. Die Originalversion aus Schweden ist zusätzlich mit einem hydraulisch kippbaren Entlademechanismus ausgestattet. Das Gewicht des originalen Carriers ist mit 5,4 t ungleich höher als bei der Variante ohne Kippfunktion. Das erweiterte Ladevolumen des Carriers im Vergleich zum Rungenkorb lässt eine bessere Rückeleistung erwarten.

Tabelle 23: Technische Details des Forwarders Eco Log 554 BCT sowie des ABAB Carriers.

Forwarder	**Eco Log 554 BCT**
Leergewicht	12,0 t
Motorleistung	97 kW
Hydraulische Förderleistung	107 l/min
Ladekapazität	10,0 t
Ladevolumen (mit Rungenkorb)	15,4 m³ bzw. 18,5 m³
Kran	**Loglift F59**
Reichweite	8,5 m
Hubmoment	56 kNm
Spezialaufbau	**ABAB Carrier**
Gewicht	ca. 3 t
Ladekapazität	ca. 9 t
Benötigte Ölmenge	80 l/min
Ladevolumen	30 – 35 m³

Bestandesdaten

Der Versuchseinsatz fand in zwei getrennten Revieren des Forstbetriebes Zusmarshausen der *Bayerischen Staatsforsten* statt. In beiden Fällen handelte es sich um Fichten-Reinbestände, die sich im Stadium der Endnutzung befanden. Weitere Details der Versuchsbestände sind in Tabelle 24 dargestellt.

Tabelle 24: Bestandesdaten in zwei Versuchsorten beim Carriereinsatz

Versuchsflächen/-ort	**Fultenbach**	**Horgau**
mittlerer Kronenfußdurchmesser (cm)	17,4	20,4
mittlere Kronenlänge [m]	5,90	4,67
Größe der Hiebsfläche [ha]	1,7	1,3
Hiebsmenge [t lutro]	95,2	102,4
[Srm]	314,2	337,9
Energieholzanfall [Srm je ha]	184,8	259,9
Anzahl Fuhren	14	19
mittlere Rückeentfernung [m]	350	140

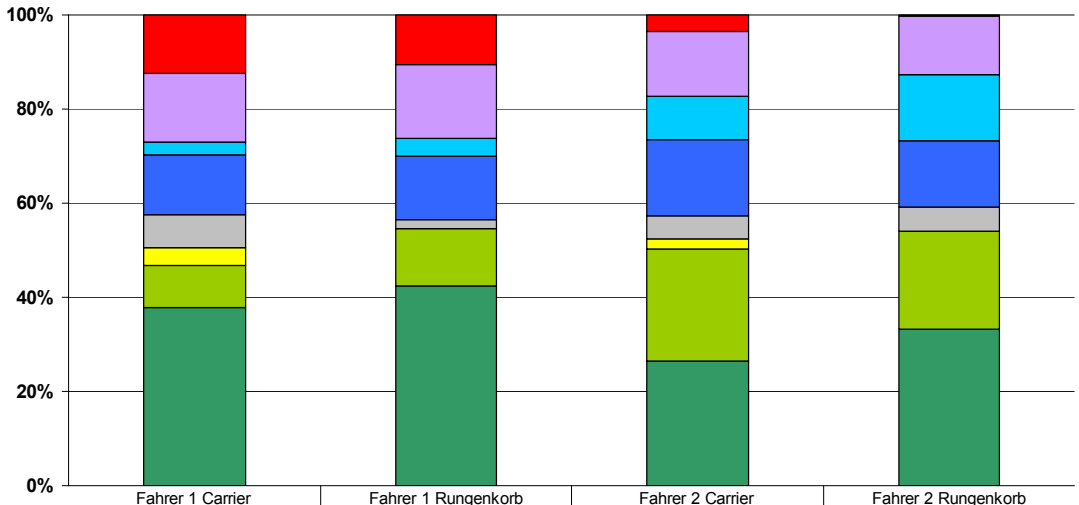
Für die Rückung von Bedeutung sind insbesondere die mittlere Rückeentfernung und die Stückmasse der Kronen. Die Rückedistanz ist in Horgau erheblich geringer als in Fultenbach. Aus den in Stichproben erfassten Kronendurchmessern wurden nach WITTKOPF (2005) durchschnittliche Kronenvolumen von 0,084 Srm/Krone bzw.

0,014 t atro/Krone in Fultenbach und 0,134 Srm/ Krone bzw. 0,022 t atro/Krone in Horgau kalkuliert. Bei höherer Stückmasse sowie geringerer Rückenentfernung war demzufolge in Horgau eine höhere Produktivität zu erwarten. Berücksichtigt werden muss dabei jedoch, dass der Anteil gebrochener Kronen in Fultenbach mit 62,2 % deutlich geringer als in Horgau (92,3 %) war.

Beschreibung der Hiebsmaßnahme
Bei beiden Hieben wurde die komplette Hiebsfläche vollständig geräumt. Im Anschluss an den Einschlag wurden die gefällten Bäume teils motormanuell (Fultenbach), teils vollmechanisiert (Horgau) aufgearbeitet. Das Stammholz wurde getrennt nach Sorten an die Waldstrasse geliefert. Der Auftrag für die Räumung beinhaltete sowohl Kronen und Äste als auch erdfaule Stammabschnitte und abgetrennte Wurzelanläufe. Das Ziel einer weitestgehenden Ausnutzung des Ladevolumens galt für beide Aufbauvarianten – Carrier und Rungenkorb. Um das Gewicht fuhrenweise getrennt erfassen zu können, wurde jede Fuhre in einem eigenen Polter an der Waldstrasse abgeladen, um eine Gewichtserfassung mit Hilfe der Lkw-Waage im Anschluss an das Hacken zu ermöglichen. Im konventionellen Praxiseinsatz würden die einzelnen Fuhren möglichst zu wenigen großen Haufen zusammengefasst, um Rangiervorgänge während des Hackens zu minimieren.

Maschinenkostenkalkulation
Auf Basis der bereits genannten Kalkulationsschemen (vgl. S. 54) wurde für den Forwarder mit der Sonderausstattung ABAB Carrier ein Stundensatz von 85 €/MAS berechnet. Dieser Wert liegt bezogen auf die Maschinenarbeitsstunde um 7 % höher als bei Standardausrüstung mit Rungenkorb. Im Rahmen der Kostenkalkulation beider Rückevarianten wird diese Differenz berücksichtigt.

Ergebnisse
Die beiden Fahrer zeigten deutliche Unterschiede bei der Verteilung der Ablaufabschnitte. Ein eindeutiger Trend zeigt sich lediglich beim „Beladen“ (Abbildung 43):



	Fahrer 1 Carrier	Fahrer 1 Rungenkorb	Fahrer 2 Carrier	Fahrer 2 Rungenkorb
Unterbrechungen	12,5%	10,7%	3,5%	0,3%
Entladen	14,6%	15,6%	13,7%	12,3%
Leerfahrt	2,6%	3,9%	9,4%	14,1%
Lastfahrt	12,7%	13,6%	16,0%	14,1%
sonstige Kranarbeiten	7,1%	1,7%	4,9%	5,1%
Komprimieren	3,6%	0,0%	2,4%	0,0%
Vorkonzentrieren	9,0%	12,3%	23,7%	20,9%
Beladen	37,9%	42,4%	26,4%	33,2%

Abbildung 43: Anteile der Ablaufabschnitte bei der Rückung mit Rungenkorb und Carrier in % der Gesamtarbeitszeit.

Fahrer 2 investiert relativ gesehen mehr als doppelt so viel Zeit in das Vorkonzentrieren von Kronenteilen und Ästen, bevor diese aufgeladen werden. Demgegenüber ist der Zeitanteil direkter Beladungen bei Fahrer 1 deutlich höher (siehe Abbildung 43). Auswirkungen auf die Leistung lassen sich aus diesen Zahlen jedoch noch nicht ableiten. Erst durch den Vergleich der Zeitbedarfswerte je Fuhre können Leistungsunterschiede im Übungsgrad beobachtet und erklärt werden (siehe Abbildung 44).

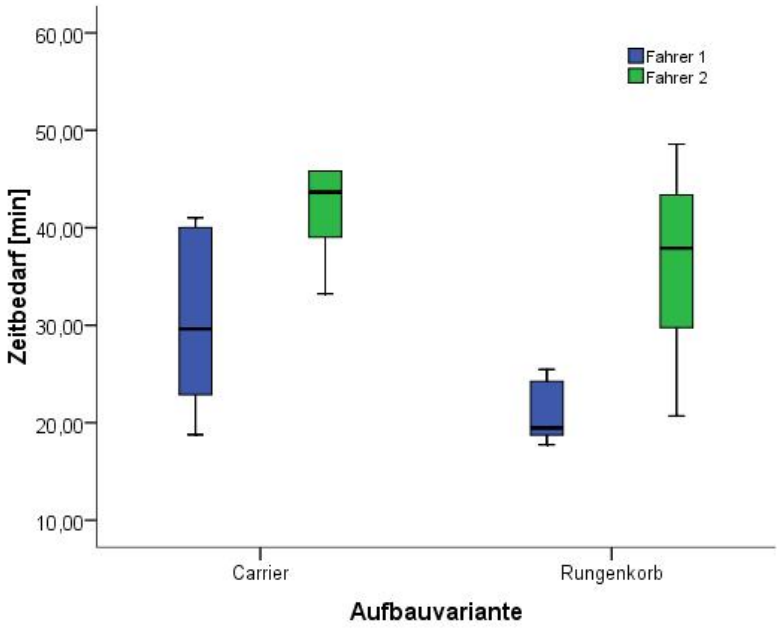


Abbildung 44: Vergleich des Zeitbedarfs je Fuhre in Abhängigkeit von der Aufbauvariante

Im Durchschnitt beträgt der Zeitbedarf je Fuhre 34,47 min mit dem Carrieraufbau und 27,44 min mit der Standardvariante. Eine Carrierfuhre nimmt also ein Drittel mehr Zeit in Anspruch. Erklärt wird dies vor allem durch die höhere Anzahl von Be- und Entladezyklen, die durch das erweiterte Ladevolumen möglich werden. Der mittlere Zeitbedarf für die einzelnen Entladezyklen war beim Rungenkorbaufbau deutlich kürzer (23%) als beim Carrier. Ursache dafür ist die größere Überladehöhe des Carriers bzw. die Möglichkeit, beim Rungenkorbaufbau seitlich mit dem Kran zwischen die Rungen zu schwenken. Abbildung 44 zeigt aber auch eindeutig den Unterschied der beiden Fahrer: Fahrer 1 benötigt je Fuhre 13 min (=37%) weniger als Fahrer 2. Beim Vergleich der erzielten Produktivität, bei der zusätzlich die ausgenutzte Ladekapazität berücksichtigt wird, erhöht sich der Leistungsunterschied auf einen Faktor von 1,75. Dass mit dem Spezialaufbau Carrier eine höhere Nutzlast erzielt werden kann, wurde in der Fallstudie bestätigt. Bei nahezu identischer Spannweite konnte die Nutzlast mit Hilfe des Spezialaufbaus um durchschnittlich 40 % gesteigert werden (siehe Tabelle 25).

Tabelle 25: Fuhrgewichte in Abhängigkeit von Fahrer und Aufbauvariante.

Aufbau	Fahrer 1	Fahrer 2
Rungenkorb Min	2,10	3,00
Rungenkorb Max	7,60	5,50
Rungenkorb Ø	**4,79**	**4,05**
Carrier Min	3,10	2,75
Carrier Max	8,70	6,42
Carrier Ø	**6,28**	**5,22**

Allerdings kompensiert der größere Zeitaufwand beim Rücken mit dem Carrier (vgl. Abbildung 44 und Abbildung 45), dass die gesteigerte Nutzlast auch zwangsläufig zu einer höheren Produktivität führt.

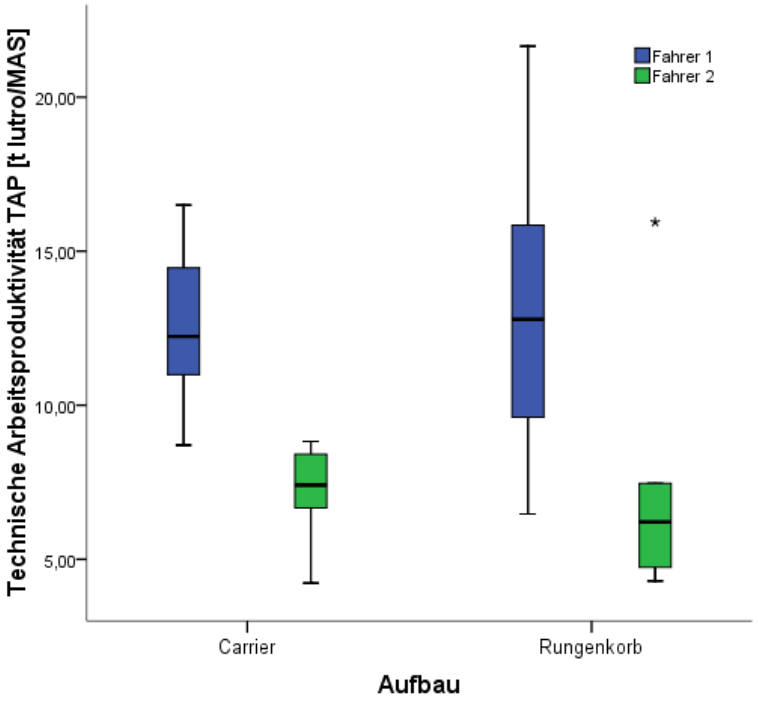


Abbildung 45: Vergleich der fuhrenweise Produktivität in Abhängigkeit von der Aufbauvariante

Abbildung 45 unterstreicht den bei den Zeitbedarfswerten bereits dokumentierten, erheblichen Unterschied im Produktivitätsniveau der beiden Fahrer. Während bei Fahrer 1 kaum ein Leistungsunterschied in beiden Aufbauvarianten dokumentiert wurde (lediglich die Streuung ist höher), erzielte Fahrer 2 mit dem Carrier ein höheres durchschnittliches Leistungsniveau. Gemittelt über alle Fuhren wurde mit dem Carrieraufbau eine durchschnittliche Produktivität von 10,95 t lutro/MAS und mit dem Rungenkorb 10,99 t lutro/MAS erzielt. Ein Produktivitätsvorteil durch die Aufbauvariante Carrier wurde also nicht beobachtet. Die Untersuchungen zeigten einen straffen signifikanten Zusammenhang zwischen Zeitbedarf, Fuhrengewicht und Produktivität.

Berücksichtigt man die höheren Maschinenkosten, so schneidet der ABAB Carrier unter den Rahmenbedingungen dieser Fallstudie geringfügig schlechter ab als die Standardmaschine. Bei gleicher Produktivität verursachen die Umbauzeiten zusätzliche Kosten, weiterhin ist ein höherer Maschinenstundensatz zu veranschlagen. Für den Carrier wurden dementsprechend Rückekosten von 7,76 €/t lutro bzw. 2,35 €/Srm[13] gegenüber 7,28 €/t lutro bzw. 2,21 €/Srm bei der Standardvariante mit Rungenkorb kalkuliert. Dass das höhere Ladevolumen nicht zu einer Steigerung der Produktivität führte, ist möglicherweise auf die Hiebsbedingungen dieser Studie zurückzuführen (siehe Kapitel 5.6).

5.4 Einsatz einer Trocknungsfolie bei der Lagerung von Waldrestholz – „Walki Energy Wrap“

Bei der Lagerung von Schlagabraum (Kronen, Ästen, Reisig und sonstige Hiebsreste) treten je nach Sortiment, Zeitpunkt und Mikroklima bereits nach kurzer Zeit messbare Trocknungserfolge auf (JIRJIS und LEHTIKANGAS 1993; HILLEBRAND und NURMI 2001). Wiederbefeuchtung kann aber insbesondere bei der Lagerung im Winter zu signifikanten Substanzverlusten und Wassergehaltszunahmen führen. Um dennoch eine hohe Qualität des im Anschluss an die Lagerung produzierten Hackgutes zu gewährleisten, werden in Skandinavien bereits seit einigen Jahren Spezialfolien zur Abdeckung von Schlagabraum in der Praxis eingesetzt.

Das Spezialpapier *Walki Energy*, hergestellt von der finnischen Walki Group, ist ein Laminat auf Papierbasis und eignet sich zum Abdecken von Energieholz, welches im Anschluss an die Lagerung gehackt werden soll. Das Spezialpapier ist mit einer Netzstruktur durchzogen und dadurch sehr reißfest. Nach Herstellerangaben sollte die Lagerdauer jedoch auf zehn Monate begrenzt sein. Die Abdeckung ist undurchlässig für Regen und Schnee. Beim Einsatz wird nur die Oberfläche des Polters abgedeckt, so dass die Luft weiterhin seitlich zirkulieren und dadurch ein effizientes Abtrocknen stattfinden kann. Das Papier muss vor dem Hacken nicht entfernt werden, sondern wird mitgehackt und im Werk verbrannt.

In einer Fallstudie wurde untersucht, wie sich die Verwendung dieses Spezialpapiers auf den Trocknungsverlauf von Fichtenkronen- und Reisigmaterial auswirkt.

[13] *Der Wassergehalt des Hackgutes betrug bei Anlieferung im Heizwerk 50%. Ein Umrechnungsfaktor von 3,3 wurde zu Grunde gelegt (WITTKOPF 2005).*

Material und Methoden

Der Versuch fand im Revier Wiggensbach des Forstbetriebs Sonthofen (*Bayerische Staatsforsten*) statt. Versuchsobjekte in dieser Untersuchung waren vier Energieholzhaufen aus Schlagabraum:

1. unter Schirm gelagert und mit Papier abgedeckt
2. unter Schirm ohne Abdeckung
3. auf Lichtung (mit Freilandcharakter) und mit Papier abgedeckt
4. auf Lichtung (mit Freilandcharakter) ohne Abdeckung

Die Holzerntemaßnahme fand in einem gemischten 130 Jahre alten Fichten-Buchenbestand statt. Der ausscheidende Bestand wurde motormanuell gefällt und aufgearbeitet. Der durchschnittliche Aushaltungszopf lag bei ca. 15 cm. Die Rückung erfolgte mit Forwarder und Seilschlepper. Der Schlagabraum wurde im Anschluss an die Stammholzrückung zur Forststrasse vorgeliefert. Zwei der vier Polter mit ausschließlich Fichtenkronen wurden im November 2008 mit Hilfe eines Forstschleppers abgedeckt. Dabei kam ein extra für den Versuch angefertigter Rahmen zum Abrollen des Papiers zum Einsatz (siehe Abbildung 46).

Abbildung 46: Abdeckung des Schlagabraumes mit Walki Energy Spezialpapier

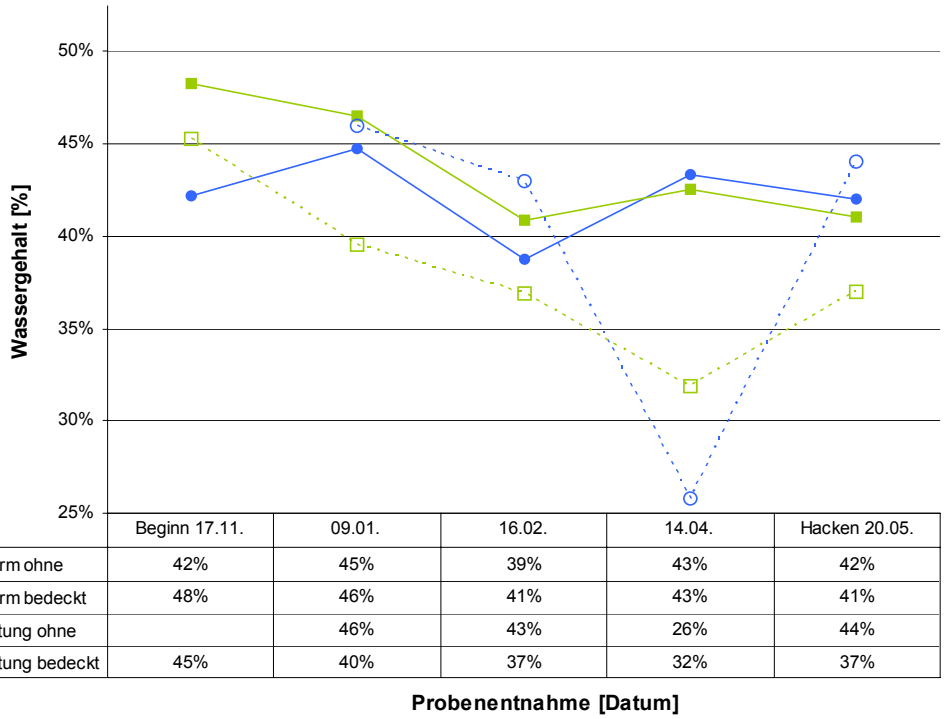
Um den Trocknungsverlauf der verschiedenen Varianten zu dokumentieren, wurden Wassergehaltsmessungen zu Beginn, während der Trocknungsphase und am Ende der Lagerung durchgeführt. Der Schlagabraum wurde am 20. Mai 2009 gehackt.
Dabei wurden jedem Haufen jeweils aus der mittleren Sektion Stammscheiben (Durchmesser = 12-18 cm), Äste (Durchmesser = 4-8 cm, Länge = 40-60 cm) und Reisig (270 – 400g) entnommen. Die Proben wurden gewogen und im Darrschrank bis zur Gewichtskonstanz getrocknet. Anschließend wurde das Trockengewicht bestimmt, um den Wassergehalt herzuleiten.

Ergebnisse

Die Versuchsergebnisse zeigen, dass insbesondere auf der Lichtung ein deutlicher Unterschied im Trocknungsverlauf zwischen den beiden Varianten (*bedeckt* und *ohne WW*) zu verzeichnen war. Im abgedeckten Haufen trockneten die Kronen konstant ab. Die Wiederbefeuchtung zwischen April und Mai fällt relativ gering aus. Am Ende der Lagerung wurde ein Wassergehalt von 37 % gemessen (siehe Abbildung 47). In der unbedeckten Variante wurde am Ende der Lagerung ein Wassergehalt von 44 % erreicht, obwohl auch in diesem Haufen zunächst ein

positiver Trocknungsverlauf zu beobachten war, bevor es zum Ende des Lagerversuchs zu einer extremen Wiederbefeuchtung kam.

Der nicht abgedeckte Haufen auf der Lichtung wurde erst einen Tag nach Ausbringung des Spezialpapiers an die Forststrasse geliefert. Deshalb fehlt der Wassergehaltswert zu Beginn der Untersuchung (siehe Abbildung 47).



	Beginn 17.11.	09.01.	16.02.	14.04.	Hacken 20.05.
Schirm ohne	42%	45%	39%	43%	42%
Schirm bedeckt	48%	46%	41%	43%	41%
Lichtung ohne		46%	43%	26%	44%
Lichtung bedeckt	45%	40%	37%	32%	37%

Abbildung 47: Ergebnisse der Wassergehaltsproben während der Lagerung zwischen November 2008 und Mai 2009

Die unter Schirm gelagerten Haufen weisen im Trocknungsverlauf nahezu keine Unterschiede auf. Ein Trend ist hier kaum abzuleiten. Im abgedeckten Haufen wurde jedoch ein höherer Wassergehalt zu Beginn der Lagerung gemessen. Dies kann aber auf den geringen Stichprobenumfang oder die Heterogenität im Haufen zurückzuführen sein. Der Wassergehalt sank um 7 % während der Lagerung. Im unbedeckten Polter unter Schirm wurde am Ende der Lagerung der gleiche Gehalt wie zu Beginn der Lagerung gemessen.

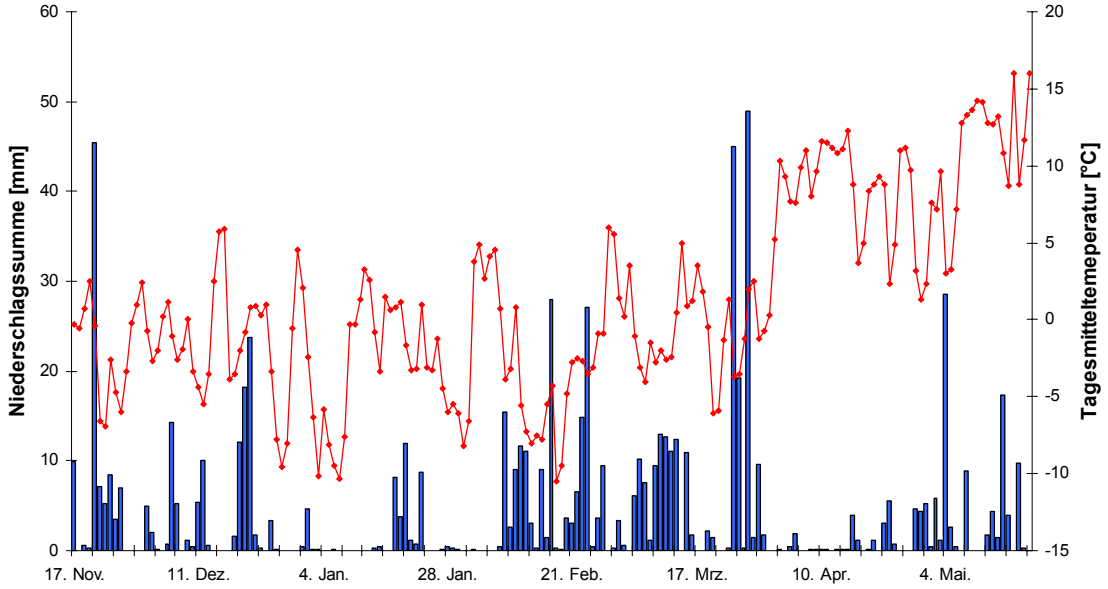


Abbildung 48: Witterungsdaten der Klimastation Sonthofen im Untersuchungszeitraum; Quelle: LWF Bayern

In Abbildung 48 sind die Witterungsdaten der Klimastation Sonthofen dargestellt. Die Regenereignisse im Mai könnten eine Erklärung für den geschilderten Widerbefeuchtungseffekt sein. Während sich die Starkregenereignisse Anfang März auf die Lager unter Schirm ausgewirkt zu haben scheinen, ist dies für die Lager auf der Lichtung nicht festzustellen. Generell ist hierbei zu beachten, dass die Werte der Klimastation nicht unmittelbar auf die Verhältnis vor Ort wirken müssen. Eine Interpretation der Daten der Klimastation ist daher kritisch zu hinterfragen. Vielmehr hat auch dass jeweilige Mikroklima mit den Faktoren Abschirmungsgrad, Wind, Verdunstung etc. Einfluss auf den Trocknungsverlauf.

Kosten und Potenziale

Um die Potenziale für eine Anwendung in der Praxis darzustellen sind die Material- und Ausbringungskosten von entscheidender Bedeutung. Für ein Szenario mit bestimmten Rahmenbedingungen wurden folgende Werte kalkuliert:

Tabelle 26: Szenariokalkulation der Kostensituation beim Einsatz von Walki Energy

Annahmen	
Maße *Standardpolter* [Länge/Tiefe/Höhe]	10m / 4m / 3m
Abzug für Verschnitt, Seitenabdeckung	20 %
Umrechnungsfaktor	1rm = 0,6 Srm
Abgedeckte Jahresmenge	30.000 Srm
Materialkosten	
Rahmenbau [€]	1.250,00
Preis Standardrolle [€]	809,00
Papierbedarf pro rm [m²/rm]	0,40
Papierbedarf pro Srm [m²/Srm]	0,67
Materialkosten pro Srm [€/Srm]	0,58
Arbeitskosten	
Zeitbedarf [h]	0,5
Maschinenkosten [€/h]	85,00
Arbeitskosten je Srm [€/Srm]	0,59
Gesamtkosten [€/Srm]	**1,17**

Zinseffekte wurden ebenso nicht berücksichtigt wie Substanzverluste (siehe 5.6). Individuelle Kostenstrukturen von einzelnen Unternehmen können hier zu Abweichungen bei den angesetzten Material- und Arbeitskosten führen. Die Rentabilität der Anwendung ist von einigen wesentlichen Faktoren abhängig:
Einerseits spielen die Preisdifferenzen bei unterschiedlichen Wassergehaltsstufen eine entscheidende Rolle für die zu erwartenden Umsatzerlöse. Andererseits ist die Kostenbelastung der Ausbringung abhängig vom Umfang der Anwendung. Bei größeren Haufen verringert sich die Fixkostenbelastung für das maschinelle Abdecken. Bei steigender Menge verringert sich die Fixkostenbelastung durch den Rahmenbau.

5.5 Elektronisches Lagermanagement mit MHG Bioenergy

Die Sicherung der Rohstoffversorgung ist für Heiz(kraft)werke schon heute ein wesentlicher Faktor für einen wirtschaftlichen und zuverlässigen Anlagenbetrieb. Künftig ist für einige Betreiber und Lieferanten eine Erhöhung des Volumenumsatzes zu erwarten. Damit steigen die Anforderungen an die Verwaltung und Steuerung der Informations- und Materialflüsse.

Für eine EDV-gestützte Steuerung und Verwaltung von Holzernte und Rundholztransport sind bereits diverse Softwarelösungen im Einsatz bzw. in der Entwicklung. Neben anderen beschreiben VON BODELSCHWINGH (2006), WINDISCH (2008) und KANZIAN et al. (2008) einen Auszug der derzeit angebotenen Systeme sowie die Vorteile der elektronischen Material- und Informationssteuerung.

Für die Lagerverwaltung und Materialflusssteuerung von Waldhackgut gibt es bisher kaum Softwarelösungen. Die meisten Softwarelösungen wurden für den Rundholzbereich entwickelt. SIKANEN et al. (2004) testete den Prototyp „Arbonaut Fleetmanager“, eine finnische Logistiksoftware, die explizit für die Bereitstellung von Waldhackgut entwickelt wurde.

Ein weiteres Produkt ist das System *MHG Bioenergy*, welches in Finnland bereits im Praxiseinsatz ist (www.mhgsystems.com). Dabei handelt es sich um eine dynamische Polterverwaltung, mit der Planung, Hacken und Transport von Energieholz gesteuert wird. Das System basiert auf einer Server gestützten Informations- und Kommunikationsplattform. *MHG Bioenergy* wurde speziell für Biomasse- bzw. Holzenergienetzwerke entwickelt und sollte deshalb im Rahmen einer Pilotstudie in diesem Projekt getestet werden.

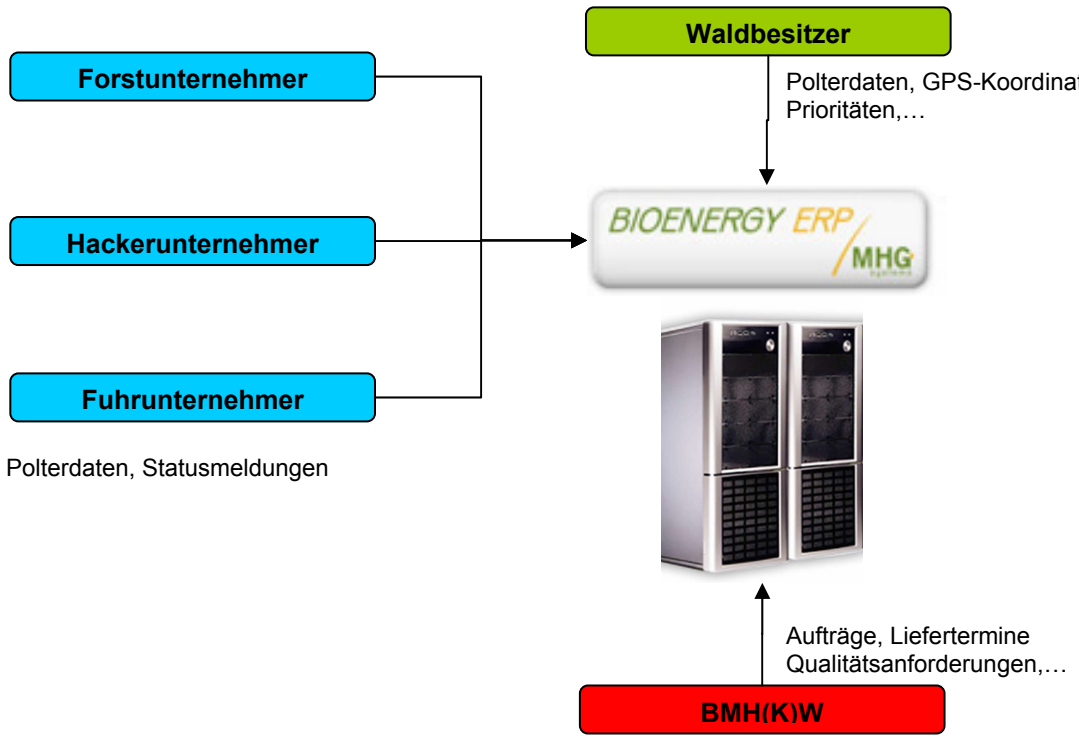


Abbildung 49: Schematischer Aufbau von MHG Bioenergy

In Abbildung 49 sind der Aufbau und ein Teil der möglichen Informationsströme dargestellt. Die potenziellen Nutzer dieses Tools sind Forst- und Hackerunternehmer, Waldbesitzer bzw. Forstbetriebsgemeinschaften und die jeweiligen Betreibergesellschaften von Heiz(kraft)werken.

Grundlage des Systems MHG Bioenergy ist eine Datenbank, die mit Hilfe eines Web-Servers verwaltet wird. Als Webclient für den Nutzer dient der Internetbrowser eines PCs oder Notebooks, es sind also keine Softwareinstallationen notwendig. Für die verschiedenen Beteiligten der Bereitstellungskette können unterschiedliche Nutzerprofile und Nutzungsrechte definiert und beliebig viele Logins zugewiesen werden. Auf der Datenbank können alle Stammdaten (zum Beispiel Kontaktinformationen, Fuhrpark) der beteiligten Firmen gepflegt werden.

Die wichtigsten Menüanwendungen sind die Projekt- und Lageranwendungen. Ein Projekt ist als eine Vertragseinheit zu verstehen, die mehrere Lager enthalten kann. Innerhalb eines Projekts werden Grundinformationen (Waldbesitzer, Kunde, Lieferort, etc.), Arbeitsschritte (Fristen für Rücken, Hacken, Transport), Verantwortlichkeiten und Verfahrensanweisungen verwaltet. Mit Hilfe von Alarmfunktionen werden die jeweiligen Nutzer auf Fristen hingewiesen. Arbeitanweisungen können direkt vom System an die Mobiltelefone der Nutzer gesendet werden. Die Lagererstellung erfolgt idealerweise vor Ort mit der mobilen Anwendung von *MHG Bioenergy* (siehe unten), ist aber auch im Online-Modus möglich.

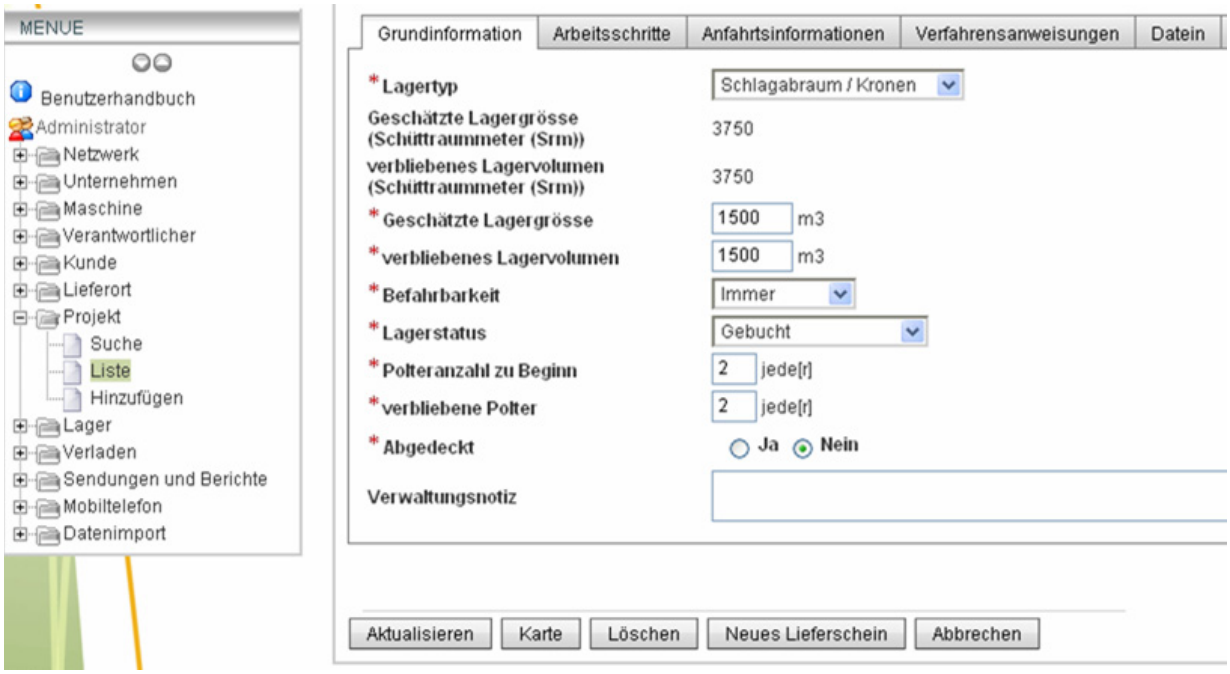


Abbildung 50: Menüansicht „Projekt“ in *MHG Bioenergy*

Ein Lager kann mehrere Polter einschließen (siehe Abbildung 51). Eine an GoogleMaps gebundene Kartenanwendung ermöglicht dem Disponenten, zusätzliche Informationen für den Hackerunternehmer bereitzustellen. Neben den GPS-Koordinaten zur Navigation können Wendemöglichkeiten, Abstellplätze für Lkw-Anhänger oder die Lage einzelner Polter eingezeichnet werden (siehe Abbildung 51).

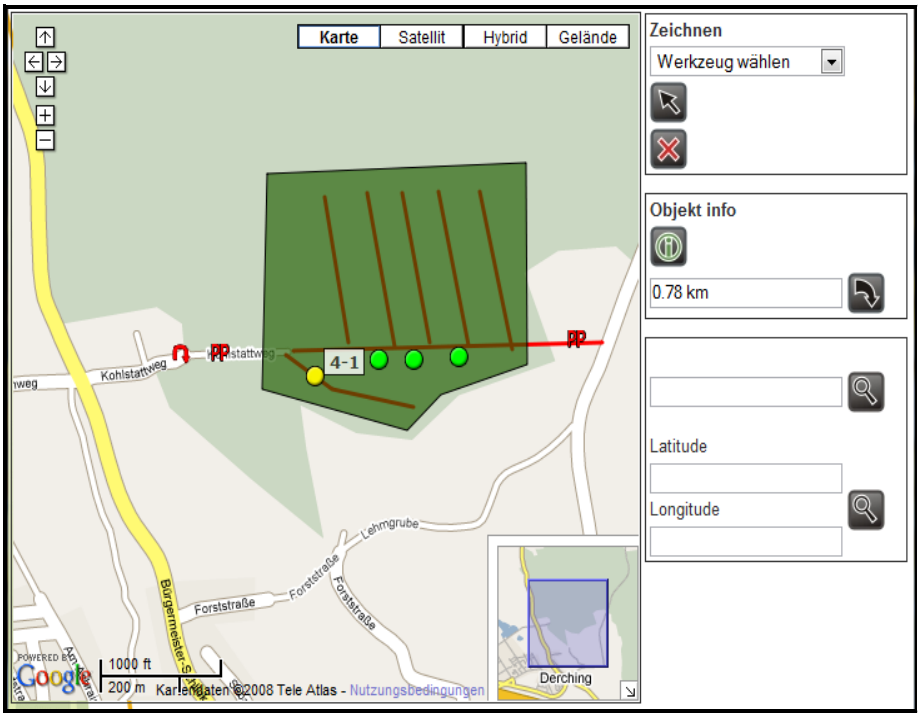


Abbildung 51: Kartenanwendung im *MHG Bioenergy* Menü - Darstellung eines Lagers (4-1) mit mehreren Poltern (hellgrüne Punkte), der Hiebsfläche (grüne Fläche) , Wendemöglichkeiten (Pfeil) und Abstellplätze für Lkw-Anhänger (PP)

Für die Erfassung der Energieholzpolter vor Ort gibt es eine mobile Anwendung. Mit Hilfe eines GSM/GPS-Mobiltelefons können die an der Waldstrasse oder einem Lagerplatz bereitgestellten Polter elektronisch erfasst und via SMS an die Datenbank gesendet werden.

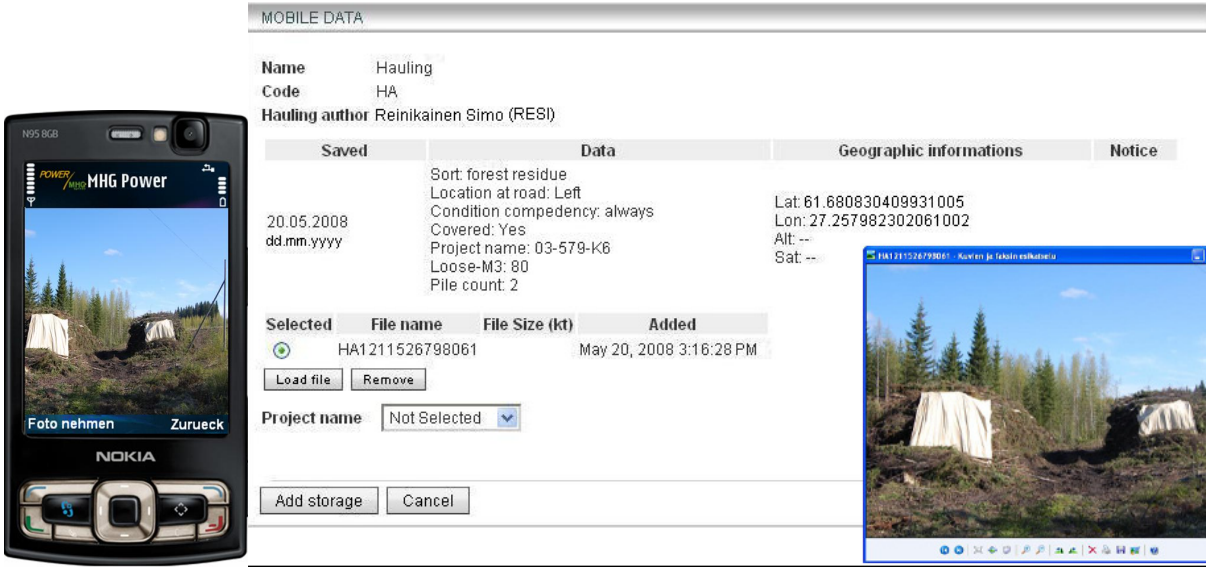


Abbildung 52 : *MHG Bioenergy* Software für Mobiltelefon: Funktion „Bild einfügen“ (links). Menüansicht der Importdatei eines per Mobiltelefon erfassten Lagers (rechts).

In Abbildung 52 ist eine Menüansicht der mobilen Anwendung von *MHG Bioenergy* sowie die Ansicht einer Importdatei dargestellt, welche vom Webclient aufgerufen werden kann. Neben den GPS-Koordinaten können mit dem Mobiltelefon weitere

Informationen (u. a. Poltergröße, Sortiment und Befahrbarkeit) dokumentiert und versendet werden. Ist im Mobiltelefon eine Kamera integriert, so kann ein Foto des Lagers den Polterdaten beigefügt werden. Die Importdatei zeigt zudem Name und Code des Nutzers sowie die Projekt- und Lageridentifikationsnummer an (siehe Abbildung 52).

MHG Bioenergy bietet die Möglichkeit, die Lager sowie Lieferscheine digital in Echtzeit zu verwalten. Durch die Buchung der Lieferscheine werden die Mengen der Lager automatisch aktualisiert. Dies bedeutet für den Disponenten, dass er jederzeit über den Status (gelieferte Mengen, Restmengen) der Lager informiert ist.

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Arbeitskreise zu den Erwartungen, Anforderungsprofilen und potenziellen Gewinnen beim Einsatz von *MHG Bioenergy* in Deutschland dargestellt.

Tabelle 27: Potenzielle Vorteile beim Einsatz von *MHG Bioenergy*

Für den Waldbesitzer	Übersicht über den Ablauf der Arbeiten – Kontrollfunktion
	schnelle Information über gelieferte Mengen und Qualitäten
	Kein Vergessen von Restmengen
	Erhalt bzw. Sicherung der Waldwege, Befahrbarkeit
	höhere Erlöse durch bessere Brennstoffqualität
	Reduktion des Verwaltungsaufwandes (Schnittstellen, elektr. Lieferschein)
Für den Hacker- bzw. Transportunternehmer	Kartenmaterial mit Detailinformationen
	Verringerung von Suchfahrten
	Reduktion von Wartezeiten im Wald und im Werk
	verbesserte Steuerung des Hackereinsatzes
	Optimierung der Nutzlast der Transportfahrzeuge
	Reduktion der Hack- und Transportkosten
	Mengennachweis gegenüber BMH(K)W und Waldbesitzer
	Reduktion des Verwaltungsaufwandes (Schnittstellen, elektr. Lieferschein)
Für das BMH(K)W	Visualisierung der Brennstoffverfügbarkeit (Ort, Menge, Qualität)
	optimierte Planung und Steuerung der Materialflüsse
	Reduktion der Hack- und Transportkosten
	Grundlage für Mengentausch und Tourenplanung zur Leerfahrtenreduktion
	Reduktion des Verwaltungsaufwandes (Schnittstellen, elektr. Lieferschein)
	Verbesserung der Brennstoffqualität

Die Darstellung in Tabelle 27 verdeutlicht, dass die Nutzung eines solchen Tools Vorteile für alle Beteiligten der Bereitstellungskette bieten kann. Herausforderungen für eine Umsetzung in die Praxis bestehen einerseits in der technischen und strukturellen Anpassung des Systems an die deutschen Rahmenbedingungen, anderseits in der Kooperationsbereitschaft der Beteiligten. Neben der Übersetzungen für eine deutsche Version wurden innerhalb des Projektzeitraumes bereits einige notwendige Anpassungen für einen Einsatz von *MHG Bioenergy* in Deutschland realisiert.

Die Gespräche mit den Experten haben gezeigt, dass es aus Sicht der Lieferanten und Betreiber von BMH(K)W generelle Anforderungen an ein elektronisches Polter- bzw. Lagermanagementsystem gibt. Dazu zählt unter anderem die Entwicklung von Schnittstellen zur Buchhaltungssoftware der Heizwerkbetreiber und Lieferanten sowie zur Wiegesoftware des BMH(K)W. Aus rechtlichen Gründen ist es zudem notwendig, den Gefahr- bzw. Eigentumsübergang dokumentieren zu können, weshalb eine Verknüpfung mit Verträgen sinnvoll erscheint.

Weiterhin ist es für einen effizienten Einsatz notwendig, das Quellen und Schrumpfen der Lager automatisch an die Eingabe der Werksdaten zu koppeln. Die unterschiedlichen Abrechnungsmodalitäten in der Branche verlangen zudem Flexibilität bei der Wahl der Bezugseinheiten (Srm, MWh, t atro etc.).

Um die Prozesse auf Hackterminals und Zwischenlager darstellen zu können, muss ein eigener Menüpunkt zur Verfügung stehen. Plausibilitätsprüfungen sollten bei allen Eingaben von abrechnungsrelevanten Daten durchgeführt werden, um Eingabefehler weitestgehend auszuschließen. Die Einführung eines elektronischen Lieferscheines ist ein wesentliches Anforderungskriterium für ein derartiges System. Der Lieferschein bedarf einer automatischen Nummerierung und Anbindung an den jeweiligen Kaufvertrag bzw. den entsprechenden Lieferanten und Lieferort.

Die erfolgreiche Abwicklung einiger Aufträge (zum Beispiel Seilkraneinsatz im Gebirge) erfordern eine Vorplanung. Dies bedeutet, dass Mengen, Lagerorte, etc. schon im Vorfeld sichtbar und planbar sein müssen.

Die geschilderten Anforderungen an einen Praxiseinsatz von dynamischen Poltermanagementsystemen zeigen, dass noch Entwicklungsbedarf für eine Umsetzung in Deutschland besteht.

5.6 Bewertung der Ergebnisse und Fallstudien

Einsatz von Energieholz-Sammelaggregaten

Steigende Lohnkosten und mangelnde Verwertungsmöglichkeiten haben dazu geführt, dass die Pflegekosten anstiegen und wichtige Maßnahmen deshalb aufgeschoben wurden. In den vergangenen Jahren stieg die Anzahl an Brennholzselbstwerbern aus dem „Hobbybereich“ enorm an. In zahlreichen Forstbetrieben gewinnen private Selbstwerber für den Einsatz in Pflege- und Erstdurchforstungsmaßnahmen immer mehr an Bedeutung. Diese Entwicklung sollte allerdings nicht nur unter ökonomischen Gesichtspunkten betrachtet werden. Berücksichtigt man den Organisationsaufwand für den Waldbesitzer sowie die Kriterien Bestandespfleglichkeit und Arbeitssicherheit, so ist der Einsatz mechanisierter Verfahren mit Hilfe von professionellen Unternehmern - sofern dies für den Waldbesitzer auch wirtschaftlich darstellbar ist - zu bevorzugen. Die hier beschriebenen Fallstudien können einen Beitrag dazu liefern, inwieweit neue technische Lösungen für derartige Pflegeingriffe in Frage kommen.

Die Ergebnisse zeigen, dass eine kostendeckende Energieholzbereitstellung in Nadelholz dominierten Jungdurchforstungsbeständen möglich ist. Eine Jungbestandspflege im deutlich geringeren Stückmassebereich gibt es jedoch nicht zum Nulltarif. Bei einer Beurteilung der untersuchten innovativen Verfahren muss berücksichtigt werden, dass der Pflegeeingriff eine Investition in die

Bestandesentwicklung und damit einen wertvollen Beitrag für Stabilität und Wuchsleistung bedeutet (vgl. 6.2).

Das erfasste Produktivitätslevel beider Studien kann unter den gegebenen Rahmenbedingungen (Baumvolumen, Bestandesdichte) positiv bewertet werden. Trotz der sehr geringen Stückmasse mag insbesondere der konzentrierte Hiebsanfall entlang der Rückelinie für das hohe Leistungsniveau verantwortlich sein. Neben der Eingriffsstärke ist die Verfahrensweise unter Verwendung des Sammelarms ursächlich für die erzielte Produktivität. Die relativ geringen Erfahrungswerte beim Einsatz dieser jungen Technologie lässt weitere Leistungssteigerungen erwarten. In der Literatur sind zahlreiche Studien verschiedener Energieholzaggregate mit unterschiedlichen Trägerfahrzeugen beschrieben. Einige aus dem deutschsprachigen Raum stammenden sollen hier diskutiert werden:

EBERHARIDNGER (2006) dokumentiert eine Produktivität von 11,7 Srm/MAS beim Einsatz des Mehrfachfällkopfes NaarvaGirp 1500-25e in einer Fichten-Erstdurchforstung (mittlerer BHD = 8,4 cm). Auf Basis der geringen Maschinenkosten des Schleppers werden Kosten von 5,10 €/Srm für das Fällen und Vorkonzentrieren kalkuliert. AFFENZELLER (2007) untersuchte die gleiche Maschinenkombination ohne Sammelfunktion beim Einsatz in einem Kiefernbestand mit Eiche und Lärche. Die geringere Systemleistung von 3,3 Srm/MAS für Fällen und Rücken unterstreicht den Vorteil der Mehrbaumeinrichtung.

WITTKOPF (2005) berichtet über einen Nadelholz-Durchforstungseingriff mit einem Harvester der mittleren Leistungsklasse und einem Sammelaggregat der Firma Timberjack. Die Produktivität für das Fällen ist mit 7,6 Srm/MAS bei einem mittleren BHD von 10 cm als sehr gering einzustufen. Entsprechend der Maschinenkosten des Harvesters lassen sich Kosten von 15,80 €/Srm für die Prozessschritte Fällen und Vorkonzentrieren kalkulieren. Beim genannten Versuch handelte es sich jedoch um einen selektiven Durchforstungseingriff.

Weitere Ergebnisse über den Einsatz von Fällaggregaten lieferte SCHULER (2006) beim Test des Prototyps *Plustech 730*. Das Aggregat wurde an einem 4-Rad Harvester bei der Ernte in einem Eichenmittelwald getestet. Trotz eines mittleren BHD des ausscheidenden Bestandes von 19,6 cm konnte eine Fällleistung von lediglich 19,1 Srm/MAS erzielt werden. Aufgrund der höheren Fixkosten des Harvesters wurden 7,20 €/Srm kalkuliert. Als Ursache für das relativ geringe Produktivitätsniveau wurde die zeitintensive Entnahme der stückmassearmen Strauchschicht angegeben.

ZAHN (2006) bzw. GABRIEL (2003) und KUTSCHINSKI (2004) beschreiben den Einsatz eines reinen Fällgreifers (ohne Sammelarm) mit Kettensäge, der an einen Forwarder angebaut wurde. Betont wird der Nachteil des Sägeschwerts, welches sich oftmals verkeilt und so zu einem hohen Anteil allgemeiner Zeiten führt. Im Versuch wurde neben dem Hackgutsortiment auch Brennholz ausgeformt. Aufgrund des fehlenden Vermessungssystems erforderte diese Maßnahme aber eine Vermessung im Anschluss an die Rückung. Der Einsatz mit dem Forwarder wurde kritisch beurteilt, da das Ladevolumen beim Rücken nur selten voll ausgeschöpft werden konnte und der Kran bei maximaler Auslage überlastet war.

AFFENZELLER (2008) untersuchte die Kombination eines Forwarders mit dem Moipu 400E Sammelaggregat. In der Studie fand in einem 35-40 jährigen kieferndominierten Bestand mit Eiche und Buche statt. Die Ausgangsstammzahl betrug 4770 Stück pro Hektar. Beim Einsatz eines mittleren Forwarder mit dem Moipu 400E Fäller-Sammler wurden Kosten zwischen 14,4 und 17,1 €/Srm frei Heizwerk kalkuliert.

BROKMEIER (2007) bestätigt ebenfalls die Vorteile der Sammler-Technologie gegenüber konventionellen Harvesteraggregaten in Durchforstungsbeständen mit schwachen Baumdimensionen. In einer Studie mit der Kombimaschine Pinox 828 verglich er das Feller-Buncher Aggregat Pinox 220 mit dem klassischen Aggregat Pinox 410. Der Vergleich der Deckungsbeiträge drei verschiedener Durchforstungs- bzw. Aushaltungsvarianten in unterschiedlichen Durchmesserbereichen (7 – 18 cm) fiel zu Gunsten der Energieholzvarianten aus.

In einem Versuch bei der Ernte einer Kurzumtriebsplantage analysierten BURGER und SOMMER (2003) die Kosten eines Harvesters mit einem Mehrfachfällkopf. Hier wurden 9,00 bis 10,00 €/Srm frei Energiewald (ohne Transport zum Heizwerk) bei einem mittleren BHD von 7cm kalkuliert.

Die Vielzahl in Frage kommender Maschinensysteme sowie die enorme Heterogenität der Einsatzgebiete untermauert die Einschätzung, dass keine „Patentrezepte“ ausgegeben werden können (vgl. 6.2). Ebenso verhält es sich mit der Beschränkung auf Faustzahlen. Wie bei der konventionellen Holzernte haben Faktoren wie Baumvolumen, Eingriffsstärke, Rückedistanz und nicht zuletzt der Übungsgrad des Maschinenführers einen erheblichen Einfluss auf die Produktivität. Die Fixkostenbelastung der eingesetzten Maschinen wirkt sich in hohem Maße auf den Deckungsbeitrag aus.
Die Ergebnisse der Fallstudie über die Jungbestandspflege sollten nicht dazu verleiten, Hektarpauschalen oder ähnliche Kalkulationsgrößen ohne Berücksichtigung der jeweiligen Rahmenbedingungen abzuleiten. Die aufgezeigte Streuung der Einzelwerte sowie die Vielfalt der Voraussetzungen und Ziele in der Jungbestandspflege sprechen gegen eine leistungsbezogene Entlohnung, wie sie in der Stammholzernte üblich ist. Hektarpauschalen sind ebenso ungeeignet und nicht transparent, da der Mengenanfall je Flächeneinheit bisher kaum angeschätzt werden kann.

Die Vorkonzentration in Rauhbeigen hat einen unmittelbaren Einfluss auf die Rückeleistung. Die gekürzten Vollbäume werden durch das Ablegen komprimiert. Das hohe Produktivitätsniveau lässt sich zudem dadurch erklären, dass im Vergleich zur Rückung von Stammholz kein Trennen unterschiedlicher Sortimente und „bündiges„ Poltern notwendig ist. Daher fallen die Nachteile der geringen Stückmasse und Lagerungsdichte nicht so stark ins Gewicht.
Das Risiko von Bestandesschäden während der Rückung kann insbesondere durch ein konsequentes Einhalten einer angepassten Transportlänge der Rauhbeigen sowie durch die Wahl des Einschlagszeitpunktes eingeschränkt werden. Beim Prozessschritt „Fällen und Vorkonzentrieren“ stellen der Einschlagszeitpunkt, der Übungsgrad sowie die Arbeitsweise des Fahrers und die Art der Aggregataufhängung die wesentlichen Einflussfaktoren dar.

Vollbaumverfahren sind mit einem signifikanten Entzug von Nährstoffen verbunden. Der Nährstoffexport hat unmittelbare Auswirkungen auf den Stoffhaushalt des Ökosystems und kann insbesondere auf schlecht versorgten Standorten Versorgungsengpässe nach sich ziehen. In den beschriebenen Ernteverfahren wurde keine „Reisigmatte“ zur Armierung der Rückegasse angelegt. Dadurch ist von einem gesteigerten Risiko von Boden- und Wurzelschäden auszugehen.

Die Ernte und Bereitstellung von Vollbäumen wirkt sich positiv auf die Hackleistung aus. Das Hacken von geringen Stammvolumen und entsprechenden hohen Rinden- und Blatt- bzw. Nadelanteilen führt allerdings zu geringeren Qualitäten. Der optimale Erntezeitpunkt ist parallel zur Schadensvorsorge außerhalb der Saftzeit, best möglichst im Winter. Dadurch lassen sich Grünanteile im Hackgut reduzieren und eine gute Ausgangssituation für eine Lagerung des Energieholzes ist gewährleistet.

Ein Nachteil der Energieholzaggregate ist das fehlende Vermessungssystem. Dadurch ist keine Ausformung von Industrieholz- oder Brennholzsortimenten bzw. nur mit zusätzlicher, zeitaufwendiger Messung nach der Rückung möglich. GUBA (2008) berichtet jedoch von der Möglichkeit, Brennholzsortimente in fallenden Längen (4-6m) auszuhalten und diese fuhrenweise zu vermarkten, um damit die Wertschöpfung zu erhöhen. Weiterhin gibt es inzwischen Sammelfällköpfe mit Vorschubwalzen und Längenvermessung (Moipu), was eine Aushaltung von Industrieholzsortimenten ermöglicht.

Die meisten Hersteller von Harvesteraggregaten präsentierten auf der ELMIA WOOD 2009 Sammelarme für konventionelle Fällköpfe (siehe Abbildung 53).

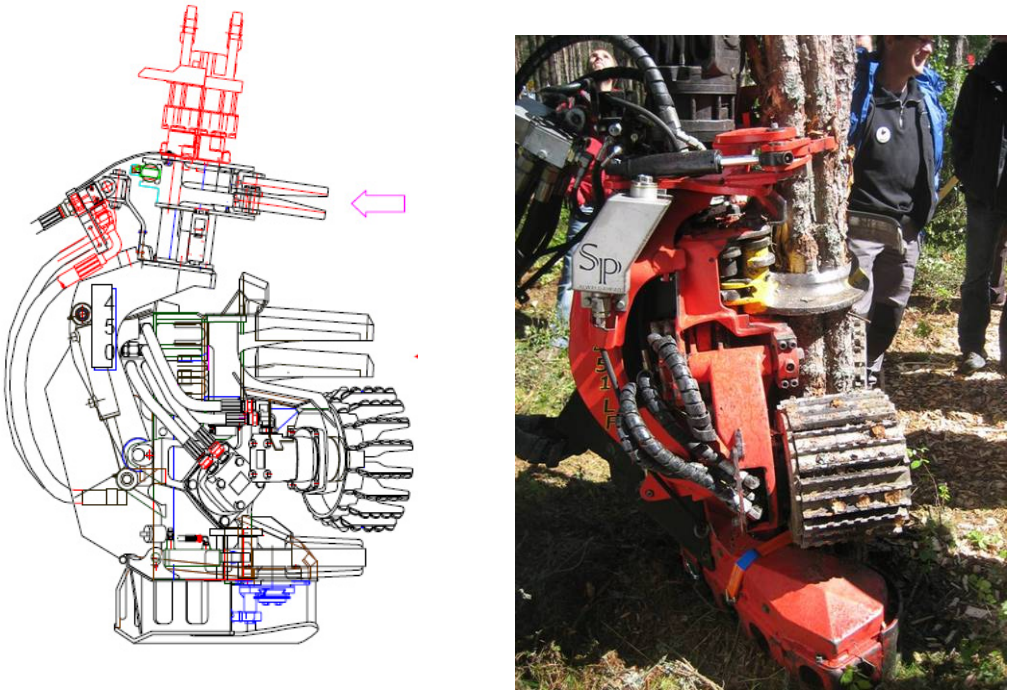


Abbildung 53: Harvesteraggregat mit Sammelarm; links: Waratah, rechts: SP

Die Vorteile dieser Sammeleinrichtung liegen in den geringen Umbaukosten sowie einer einfachen Installation und elektrischen Steuerung. Darüber hinaus bietet diese

Kombination eine hohe Flexibilität. So ist eine Standardaufarbeitung nach wie vor ohne Einschränkungen möglich. Bei der Energieholzernte unter Verwendung der Sammelfunktion besteht zudem die Möglichkeit, verschiedene Sortimente auszuhalten (Industrie- und Energieholz). Ein wesentlicher Vorteil bietet die Vorschub- und Entastungsfunktion, womit eine „Reisigmatte“ angelegt werden kann. Dies bedeutet, dass ein erheblicher Teil der Nährstoffe dem Bestand erhalten bleibt und gleichzeitig ein Beitrag für die Bodentragfähigkeit geleistet wird.
Der Nachteil dieser Aggregate liegt in der Schnittfunktion. In extrem dichten Beständen rutscht die Kette aufgrund hoher Spannungen häufig vom Schwert, was zu höherem Verschleiß und Wartungsaufwand führt. Generell ist für die konventionellen Aggregate ein höherer Reparaturkostenfaktor anzusetzen, was sich in den Maschinenkosten niederschlägt. Gegen den Einsatz insbesondere in Jungbeständen spricht die pendelnde Aufhängung so wie die größere Dimensionierung. Beide Faktoren erhöhen das Risiko von Bestandesschäden.

Der Einsatz der beschriebenen Verfahren ist aufgrund der maximalen Fälldurchmesser eingeschränkt. Für die Einsatzplanung ist es deshalb von enormer Bedeutung, potenzielle Bestände hinsichtlich ihrer technischen Machbarkeit (Durchmessergrenze) im Vorfeld zu überprüfen, um motormanuelles Zufällen auf ein Minimum zu reduzieren. Neben dem Einsatz in ehemaligen Windwurfflächen (Wibke, Lothar) und bei der Lichtraumprofilpflege werden die Energieholzaggregate derzeit vor allem außerhalb der Forstwirtschaft eingesetzt. Dazu zählen Rodungen für den Straßenbau oder Landschaftspflegemaßnahmen (Hecken, Gewässer- und Straßenbegleitgrün). Künftig dürfte die Technik auch bei der Ernte von Energieholzplantagen eine Rolle spielen.

Energieholz-Rückung mit Spezialaufbau
Vergleichbare Studien mit Spezialaufbauten für Forwarder sind derzeit nicht dokumentiert. Die Ergebnisse konnten nicht die Erwartungen bestätigen, dass der Einsatz des Spezialaufbaus ABAB Carrier unmittelbar positive Auswirkungen auf die Produktivität hat. Diese Tatsache bedeutet nicht, dass der Carrieraufbau per se negativ zu beurteilen ist. So verringert sich durch die höhere Nutzlast die Anzahl an Lastfahrten pro Flächeneinheit, was zu einer Verringerung von Bodenschäden führen kann, wenn eine an die Standortverhältnisse angepasste Maschine eingesetzt wird. Die relativ hohen Stückmassen der Kronen (Zopfdurchmesser 17 - 20 cm) verbesserten die Rahmenbedingungen insbesondere für das Standardverfahren. Bei schwächeren Kronendurchmessern, höheren Anteilen an Ästen sowie beim Rücken von Wurzelstöcken sind die technischen Voraussetzungen des Rungenkorbes deutlicher eingeschränkt. Weitere Untersuchungen unter wechselnden Rahmenbedingungen wären deshalb zu empfehlen. Andere Produkte mit ähnlicher Funktionsweise könnten dabei ebenso berücksichtigt werden.
Der Einsatz der kippbaren Originalversion des Carrieraufbaus lässt eine Leistungssteigerung erwarten. Jedoch nimmt die Entladezeit nur einen Anteil von etwa 15% an der gesamten Arbeitszeit ein, das Einsparpotenzial ist also begrenzt. Gleichzeitig steigen mit der Kippfunktion aber sowohl das Leergewicht, als auch die Investitionskosten. Die Beobachtungen zeigten, dass die Bauweise der Seitenwände Schwierigkeiten bei der Entladung verursachen. Während der Greifer beim Standardaufbau zwischen die Rungen geschwenkt werden kann, ist beim Carrier ein weiter Kranweg über die Kante der Seitenwand notwendig. Das Entladen des unteren Ladebereichs des Carriers ist durch die Seitenwand erschwert, da der

Greifer wegen der pendelnden Aufhängung seitlich wegkippt. Die Zeiterfassung der Kranzyklen bestätigt diesen Eindruck. Als Verbesserungsmaßnahme könnte eine u-förmige „Eingriffsluke“ aus der Seitenwand des Carriers „geschnitten“ werden. Dies könnte den Nachteil beim Entladen beheben, ohne dass dadurch Einbußen auf das Ladevolumen zu befürchten wären. Hydraulisch pressbare Rungensysteme wie sie bereits heute in Kanada eingesetzt werden, wären eine weitere Alternative.

Diskussion und Empfehlungen WalkiWisa

Die in dieser Arbeit dargestellten Ergebnisse der Fallstudie über den Einsatz eines Spezialpapiers bei der Energieholzlagerung kann erst einen ersten Anhalt über mögliche Einsatzvorteile geben. Die geringe Stichprobenzahl kann als zu gering angesehen werden. Unter den gewählten Rahmenbedingungen und einem Einsatz in schneereichen, montanen Regionen ist jedoch stets mit Problemen beim Flächenzugang zu rechnen. Ebenso ist der Gesamtumfang (Anzahl Polter, Varianten) sowie die fehlende Erfassung des Mikroklimas kritisch zu diskutieren. Strahlung, Wind, Verdunstungseffekte und Beschirmungsgrad spielen eine bedeutende Rolle während des Trocknungsverlaufs. Die Berücksichtigung bzw. versuchstechnische Analyse des Mikroklimas ist allerdings nur mit einem enormen Material- und Arbeitsaufwand verbunden.

HILLEBRAND und NURMI (2001) dokumentieren in einem vergleichbaren, aber erheblich aufwendigeren Versuch (Lagerdauer Juni bis Januar) insbesondere den Effekt der Wiederbefeuchtung. Sie wiesen einen Wassergehaltsunterschied von 15% zwischen abgedeckten und nicht abgedeckten Poltern nach.

KANZIAN (2005) berichtet ebenfalls vom positiven Effekt der Abdeckung. In einer Fallstudie testete er das Spezialpapier „Advantage Extra“ von Mondi Packaging Frantschach AG. Verschiedene Varianten der Lagerung (freier Lagerplatz, Waldlager unter Schirm) von Energieholzbündeln aus Schlagrücklass wurden untersucht. Die Abdeckung führte zum höchsten Trockengehalt aller Varianten. Im Vergleich zum entsprechenden Waldlager ohne Abdeckung wurde ein Unterschied von 10% des Trockengehalts gemessen.

JIRJIS und LEHTIKANGAS (1993) führten einen Lagerungsversuch mit Fichten Schlagabraum durch, bei dem ein vergleichbares Spezialpapier zur Abdeckung eingesetzt wurde. Sie konnten neben dem Effekt der besseren Trocknung (Differenz von 11 % bei 11 Monate Lagerdauer) geringere Trockensubstanzverluste belegen. In der unbedeckten Variante betrugen diese insgesamt 10% (1% pro Monat) während der Trockenmasseverlust unter Abdeckung mit 2.3% (0.2% pro Monat) deutlich abgesenkt wurde.

Die Lagerung von Schlagabraum im Wald ist nur dann sinnvoll, wenn dies die lokale Forstschutzsituation erlaubt. Die Abdeckung von Energieholzpoltern mit dem Ziel der Qualitätssicherung kann unter ökonomischen Aspekten ausschließlich dann empfohlen werden, wenn ein geringerer Wassergehalt des Hackgutes vom Kunden durch einen höheren Preis honoriert wird. Von der Anwendung lassen sich jedoch einige Vorteile ableiten:
Die bisherigen Studien zeigen, dass ein höherer Trockengehalt des Hackgutes erreicht werden kann. Der Bildung von Eisbrocken im Energieholzpolter kann durch die Abdeckung vorgebeugt werden. Einsatzbereiche finden sich insbesondere bei

der Lagerung in den Herbst- und Wintermonaten. Interessant kann die Abdeckung mit Spezialpapier vor allem dort sein, wo der Flächenzugang sehr kurzfristig verhindert wird (Wintereinbruch), also in schnee- bzw. niederschlagsreichen Regionen. Aber auch an Hackterminals, wo Schlagabraum oder andere Energieholzsortimente zur Lagerung vorgeliefert werden, scheint ein sinnvoller Einsatz denkbar.

Elektronisches Lagermanagement *MHG Bioenergy*

Die Vorteile des elektronischen Polter- und Lagermanagements sind nachgewiesen und hinlänglich beschrieben (u.a. BAUER und VON BODELSCHWINGH 2003, LEMM et al. 2006, VON BODELSCHWINGH 2006, SIKANEN 2004). Softwaresysteme, die auf die Anforderungen der Brennstofflogistik abgestimmt sind, gibt es im deutschsprachigen Raum derzeit aber kaum. Im Vergleich zur Rundholzlogistik ergeben sich u.a. wegen dem zusätzlichen Prozessschritt „Hacken“ sowie der Mehrzahl an Maß- und Abrechnungseinheiten gestiegene Herausforderungen an eine transparente und lückenlose Mengenerfassung bzw. -darstellung.

KANZIAN et al. (2008) beschreibt einige verfügbare Lösungen, die Mehrzahl davon wurde aber für den Rundholzbereich entwickelt. SIKANEN (2004) berichtet über das System *Arbonaut Fleetmanager*: Eine Fallstudie über diesen skandinavischen Prototypen zeigte Einsparpotenziale insbesondere beim Einweisungsaufwand und den Telefonkosten auf. WINDISCH (2008) untersuchte auf der Basis einer Kosten-Nutzen-Analyse zwei finnische Betreibernetzwerke, in denen das System *MHG Bioenergy* eingesetzt wird. In verschiedenen Szenarien wurde nachgewiesen, dass der Einsatz von *MHG Bioenergy* Einsparpotenziale für alle Beteiligten der Wertschöpfungskette Waldhackgut bietet. Da im Rahmen dieses Projektes keine Fallstudie durchgeführt werden konnte (siehe 6.1), besteht weiterer Forschungsbedarf, um die Ergebnisse auch bei der Umsetzung unter deutschen Rahmenbedingungen validieren zu können.

Entscheidend für eine erfolgreiche Etablierung derartiger Systeme ist die Kooperations- und Innovationsbereitschaft aller beteiligten Unternehmen. Vorurteile und Misstrauen gegenüber Marktpartnern sowie der Widerstand gegenüber sich verändernden Geschäftsprozessen machen eine Umsetzung unmöglich.

In diesem Zusammenhang sind die Fragen nach der Organisation und den Zuständigkeiten im Falle einer Umsetzung von MHG Bioenergy zu klären:

- Wer ist für die Administration des Systems verantwortlich?
- Wer ist für die Poltererfassung im Wald zuständig?
- Welcher Netzwerkpartner genießt welche Zugangsrechte?

Diese Fragen stehen in enger Verbindung mit dem jeweiligen Betreibermodell des Heizwerks sowie der Organisationsstruktur der Bereitstellungskette und verlangen aufgrund der Vielfalt in der Heizwerkslandschaft (siehe 4.3) eine individuelle Abstimmung. Vorausblickend gilt es, auch die Entwicklung bei den Anbietern von Softwarelösungen abzuwarten, ob sich spezialisierte Softwarelösungen wie beispielsweise *MHG Bioenergy* durchsetzen können oder ob bestehende Softwaresysteme für Rundholz erweitert werden, um auch den Ansprüchen der Hackgutbereitstellung zu genügen.

Fazit über innovativen Techniken und Verfahren:

- Die Ergebnisse der Fallstudien mit Energieholz-Sammelaggregaten zeigen, dass unter gewissen Rahmenbedingungen kostendeckende Einsätze auch in extrem stückmassearmen Beständen möglich sind. Die Feller-Buncher-Technologie kann daher einen Beitrag zur effizienten Pflege bislang zurückgestellter Flächen leisten. Für die Bereitstellung von Waldhackgut bedeutet dies, dass neue Rohstoffquellen erschlossen werden können.

- Wie bei der konventionellen Holzernte haben Standortfaktoren wie Baumvolumen, Eingriffsstärke oder Rückedistanz und in besonderem Maße der Übungsgrad des Maschinenführers einen erheblichen Einfluss auf Leistung und Kosten. Wechselnde Hiebsbedingungen sind also jeweils zu berücksichtigen, da diese zu unterschiedlichen Ergebnissen führen. Bezüglich der Wahl des Aggregattyps, der am besten geeigneten Trägermaschine und des Arbeitsverfahrens kann kein Patentrezept ausgegeben werden.

- Eine reine Jungbestandpflege gibt es nicht zum Nulltarif. Die Pflege sollte jedoch als Investition in Bestandesstabilität und –qualität und damit als Investition in die Zukunft gesehen werden. Weitere Einsatzmöglichkeiten bestehen insbesondere in der Lichtraumprofilpflege, in Folgebeständen von Kalamitätsflächen (*Wibke*, *Lothar*), in Laubholzjungbeständen und in Energieholzplantagen.

- Vollbaumverfahren führen zu einem signifikanten Entzug von Nährstoffen. Darüber hinaus ist beim fehlenden Anlegen einer „Reisigmatratze“ von einem gesteigerten Risiko von Bodenschäden auszugehen. Um Bestandesschäden zu vermeiden, sollten gerade die Maßnahmen in jungen Waldbeständen außerhalb der Saftzeit stattfinden. Der Zeitpunkt des Eingriffs hat wesentlichen Einfluss auf das Risiko von Bestandesschäden und die Qualität des erzeugten Hackgutes.

- Die derzeitige Situation der Bereitstellungslogistik bietet Verbesserungspotenzial und verursacht unnötige Kosten und Qualitätsverluste. EDV gestütze Lagermanagementsysteme sind bereits am Markt verfügbar und könnten einen Beitrag zur Optimierung leisten. Erst eine detaillierte Evaluierung in einem Praxistest kann die tatsächlichen Kosten-Nutzen-Effekte eines elektronischen Polter- bzw. Lagermanagements für Waldhackgut aufzeigen. Weiterhin könnte so den Fragen zur Kooperations- und Innovationsbereitschaft bzw. zum Abbau von bestehenden Hemmnissen nachgegangen werden.

- Der Aspekt der Qualität des Brennstoffs Waldhackgut wird in Zukunft eine wichtige Rolle einnehmen. Insbesondere hinsichtlich der Lagerung von Energieholz und Waldhackgut ist eine Reihe technischer Entwicklungen zu beobachten, gleichzeitig sind dennoch einige Fragen ungeklärt (siehe 5.4). Es gilt, innerhalb jedes Prozessschrittes der Supply Chain alle technischen und organisatorischen Möglichkeiten der Qualitätssteigerung zu prüfen und gegebenenfalls umzusetzen, da mit der Qualitätssteigerung sowohl ökonomische als auch ökologische Vorteile verbunden sind.

- Die Produktentwicklung im Bereich der Forsttechnik zeigt eindeutig die zunehmende Bedeutung der Energieholzbereitstellung auf. Innovation heißt dabei nicht zwangsläufig Verbesserung des Status-quo (siehe 5.3). Dennoch muss die dynamische Entwicklung auf dem Sektor der Biomasselogistik von den Akteuren in der Bereitstellungskette verfolgt werden.

6 Implementation

Das Ziel dieser Projektphase war es, Verbesserungsvorschläge auch tatsächlich in die Praxis umzusetzen. Diese wurden von den beteiligten Akteuren aus der Modellregion innerhalb der Ist- und Stärken-Schwächen-Analyse sowie während des Workshops formuliert. Mögliche Handlungsfelder wurden identifiziert und hierarchisch hinsichtlich ihrer Relevanz und Umsetzungsmöglichkeiten strukturiert. Neben Problemen bei der Brennstoffübernahme (Heizwertbestimmung, Wassergehaltsbestimmung, Lagerkapazität) und der Ascheentsorgung wurde insbesondere die Organisation der Brennstoffversorgung (Transportorganisation, Informationsfluss, Mangenaustausch; siehe 4.4) als ein dringendes Handlungsfeld eingestuft.

6.1 Pilotversuch mit MHG Bioenergy

Im Rahmen des Workshops (siehe 4.4) wurde die Idee einer gemeinsamen Informationsplattform vorgestellt und von den Teilnehmern mit besonderem Interesse aufgenommen. Auf die Idee, das finnische Informationsmanagement MHG Power innerhalb des Projektes in der Modellregion zu testen, reagierten die anwesenden Betreiber, Waldbesitzervertreter und Logistikdienstleister sehr positiv.

Ziel des Pilotprojektes war es, die in Finnland bereits verbreitete (ca. 200 Lizenzen) Software in einem deutschen Netzwerk zu testen. Dabei sollte untersucht werden, welche Vorteile und Verbesserungspotenziale zu erreichen sind, inwieweit dieses Tool innerhalb der deutschen Rahmenbedingungen geeignet und welche Anpassungen bzw. Weiterentwicklungen gegebenenfalls notwendig sind.

Gemeinsam mit den Anbietern von *MHG Bioenergy*, einem Kraftwerkbetreiber und einer Waldbesitzervereinigung wurde ein erster Zeit- und Arbeitsplan für ein derartiges Pilotprojekt erarbeitet. Die Einbindung der Forst- und Hackerunternehmer stellte sich schließlich als unüberwindbare Hürde heraus. Die Dienstleister konnten nicht für eine Beteiligung an einer Testphase gewonnen werden.

Als Begründungen gegen eine Teilnahme wurden der Mehraufwand für die Dateneingaben und Statusmeldungen genannt. Aus Sicht der Unternehmer bietet die Anwendung der Software nur in geringem Umfang unmittelbare Vorteile für den eigenen Betrieb als vielmehr für das BMH(K)W und den Waldbesitzer. Der Vorteil hochwertigen Kartenmaterials wurde nicht gewürdigt, da wegen der Ortskundigkeit der einzelnen Unternehmer keine weiteren Hilfsmittel notwendig sind. Zweifel besteht ebenso an einer Reduzierung des Verwaltungsaufwandes und Steigerung der Hackerauslastung aufgrund verbesserter Planungsgrundlagen. Inwieweit die Ursachen dieser Argumentation jedoch eher in einer mangelnden Kooperations- und Innovationsbereitschaft bzw. Vorurteilen und Widerstand gegenüber sich verändernden Geschäftsprozessen zu suchen sind soll hier nicht weiter diskutiert werden. Festzuhalten ist, dass diese Argumente bei künftigen Bestrebungen für einen Praxiseinsatz berücksichtigt werden müssen.

6.2 Workshop „FellerBuncher Technik“

Am 24. November 2008 wurde ein Workshop zum Thema Energieholzaggregate organisiert. Dazu wurden Forstunternehmer, Waldbauexperten, Revier- und Einsatzleiter sowie Maschinenhersteller ans Zentrum Wald Forst Holz in Freising - Weihenstephan eingeladen.

In der derzeitig schwierigen Situation der Forstservicebranche gibt es zahlreiche Forstunternehmer, die an dieser in Deutschland noch relativ jungen technischen Entwicklung sehr interessiert sind und teilweise bereits Aggregate getestet haben. Ein zielgerichteter Austausch über die gesammelten Erfahrungen fand bisher aber kaum statt.

Die Zielstellung des Workshops war es, Erfahrungen gemeinsam zu diskutieren, um bestehende Kompetenzen zu bündeln, den Entwicklungsprozess auf diesem Gebiet zu beschleunigen sowie einen Beitrag zum Wissenstransfer zu leisten. Die fachlichen Fragestellungen waren entsprechend der heterogenen Zusammensetzung der Teilnehmer sehr vielschichtig (siehe Tabelle 28):

Tabelle 28: Fragestellungen des Workshops

waldbauliche Fragen	Welche Waldbestände eignen sich für den Einsatz?
	Welche waldbaulichen Ziele können mit der neuen Technologie erreicht werden?
technische Fragen	Was sind die Vor- und Nachteile der verschiedenen Schnittsysteme?
	Was sind die Vor- und Nachteile unterschiedlicher Aggregataufhängung?
	Was sind geeignete bzw. optimale Trägerfahrzeuge?
ökonomische Fragen	Was sind die wesentlichen Einflussfaktoren auf die Kosten?
	Mit welchen Kosten ist in unterschiedlichen Beständen zu rechnen?
organisatorische Fragen	Was sind die wichtigsten Einsatzempfehlungen?
	Welche Einsatzbereiche außerhalb des Waldes gibt es?

Die unterschiedlichen Aggregattypen und Aufbauvarianten ergeben vielseitige Möglichkeiten der Kombination für verschiedene Einsatzgebiete. Pauschale Urteile sind deshalb nicht ziel führend. Die Aggregate werden sowohl von einigen „klassischen“ Forstmaschinenherstellern darunter Waratah, JohnDeere, Silvatec, Ponsse sowie von „Spezialisten für Biomassemaschinen“ zum Beispiel Allan Bruks, PentinPaja und Bracke angeboten. Auffällig ist, dass sich teilweise sehr unterschiedliche Bauweisen entwickelt haben (siehe Abbildung 2). Dazu zählt beispielsweise die Art der Schnittfunktion (Sägekette oder Messer). So wird beim *Bracke C16.a* (siehe Abbildung 22) eine ¾ Zoll starke und auf einer Stahlscheibe fest montierte Sägekette verwendet. Hinsichtlich Stabilität und Wartungsaufwand ist diese gegenüber den Fällköpfen mit einem oder mehreren Schnittmesser(n) im Nachteil (zum Beispiel NaarvaGrip 1500-40 siehe Abbildung 22). Der Vorteil des Kettensystems ist ein sauberer und schneller Schnitt. Gerade in sehr schwachen Jungbestandsflächen („Fichten–Bürstenwuchs“) ist dies vorteilhaft, da die dicht gewachsenen Bäumchen effektiv gemäht werden können.

Bei einigen Aggregaten schneidet das Messer zum Aggregatkörper, bei anderen zur Haltezange. Darüber hinaus gibt es auch die Variante mit zwei zusammenführenden Messern. Generelle Vor- bzw. Nachteile können wohl erst durch langfristige Einsatzerfahrungen belegt werden.

Für die Art der Aggregataufhängung am Trägerfahrzeug sind ebenso verschiedene Lösungen verfügbar (pendelnd, mit fixierendem Zylinder oder doppelter Pendelbremse). Die für konventionelle Aggregate verbreitete pendelnde Aufhängung ist weit verbreitet. Eine pendelnde Aufhängung ermöglicht eine bessere Manipulation bzw. Positionierung des Aggregats besonders bei weiter Kranauslage. Bei dieser beweglichen Aufhängung können die Bäume aber nur bedingt senkrecht aus dem Bestand zur Rückegasse gehoben werden. Dies kann zu Produktivitätseinbußen führen und erhöht das Risiko von Bestandesschäden. Manche Hersteller empfehlen für die pendelnde Aufhängung deshalb den Einsatz einer doppelten Pendelbremse. Mit Hilfe von speziellen Hydraulikzylindern an der Kranspitze (*AllanBruks*) kann der Fällkopf in jeder Position stufenlos fixiert werden. Eine fixierende Aufhängung erleichtert es, Bäume oder Baumkronen senkrecht bzw. im jeweils notwendigen Winkel äußerst schonend für den verbleibenden Bestand zur Rückegasse zu heben.

Je nach Verfahren ergeben sich unterschiedliche Anforderungen an die Trägermaschine. Die Fixkostenbelastung, die Anforderungen an die Hydraulikleistung sowie Sichteinschränkungen und Platzbedarf beim gewählten Verfahren sind wichtige Entscheidungsgrößen für die Wahl der entsprechenden Maschine. Ein Forwarder (Tragschlepper) weist deutliche Kostenvorteile gegenüber einem Zweimaschinensystem auf. Dies liegt einerseits an den geringeren Stundensätzen, die für den Betrieb zu veranschlagen sind und andererseits an Einsparungen beim Maschinentransfer. Schließlich muss nur eine Maschine umgesetzt werden.

Für einen Harvester oder Bagger sind deutlich höhere Kostensätze einzukalkulieren. Beide Alternativen bieten jedoch als Trägerfahrzeug in der Regel die Vorteile der größeren Hubkraft, Kranreichweite und der besseren Sicht. Gerade bei Gassenaufhieben ist die Sicht ein entscheidender Faktor. Konventionelle Forwarder sind hier nur begrenzt einsatzfähig.

Handlungsempfehlungen für verschiedene Verfahrensvarianten und Einsatzbereiche können einerseits aus standardisierten Holzernteverfahren abgeleitet werden. Dazu zählen die Qualität der Hiebsvorbereitung, klare Arbeitsaufträge und eine stetige Kommunikation zwischen Revierleiter und Forstunternehmer. Gerade im Hinblick auf die schwierigen Rahmenbedingungen bei der Behandlung junger Pflege- und Durchforstungsbestände ist das Zusammenwirken waldbaulichen und forsttechnischen Know-Hows von zentraler Bedeutung. Nicht zuletzt deshalb bestehen für die Schwachholzernte mit Sammelaggregaten besondere Anforderungen. So haben Holzernteschäden in derartig jungen Wachstumsstadien bedeutendere Auswirkungen als bei Einsätzen im hohen Baumalter. Die logistischen Herausforderungen für den anschließenden Hackprozess sowie die Frage der Qualität des erzeugten Brennstoffs sind weitere Besonderheiten. Die Hackschnitzelproduktion bei geringeren Stammvolumen und entsprechend hohen Rinden- und Blatt- bzw. Nadelanteilen führt zu Einbußen bei der Qualität. Der Zeitpunkt des Eingriffs hat wesentlichen Einfluss auf das Risiko von Bestandesschäden und die Qualität des erzeugten Hackgutes. Hinsichtlich der Brennstoffqualität ist der optimale Erntezeitpunkt parallel zur Schadensvorsorge außerhalb der Saftzeit, best möglichst im Winter. Dadurch lassen sich Fein- bzw.

Grünanteile sowie der Wassergehalt des Energieholzes reduzieren und eine gute Ausgangssituation für die Lagerung ist gewährleistet.

In der Pflege von naturverjüngten Beständen mit hohen Bestandesdichten wurden bisher in erster Linie schematische Arbeitsverfahren getestet. Dabei werden neben dem Freischneiden der Rückegassen in regelmäßigem Abstand Kranlinien senkrecht zur Rückegasse angelegt. Diese dienen einerseits als Ablagemöglichkeit für die gefällten Bäume. Anderseits wird über diese Stammzahlreduktion der Pflegeeffekt erhöht. Selektive Verfahren, bei der einzeln ausgewählte Zuwachsträger gefördert werden sollen, kommen bei nicht allzu hohen Stammzahlen, also eher bei gepflanzten Beständen in Betracht.

Wechselnde Hiebsbedingungen der verschiedenen Einsatzbereiche führen dazu, dass es im Einzelfall jeweils eine optimale, angepasste Maschinenkombination mit einer entsprechenden Verfahrensvariante gibt. So kann ein Forwarder sehr kostengünstig eingesetzt werden, wenn er seitlich der Maschine arbeitet und in einem Arbeitsgang fällt und direkt in den Rungenkorb verlädt. Sollen aber Rückegassen in äußerst dichten, naturverjüngten Beständen mit der gleichen Maschine angelegt werden, ist der Einsatz aufgrund schlechter Sicht und dem hohen Abstand zwischen Aggregat und Fahrerkabine erheblich eingeschränkt.

Dieser Aspekt hat Auswirkungen auf die unternehmerische Strategie: Sollte sich ein Forstunternehmer nun auf den Einsatz in der Energieholzernte spezialisieren, oder sollte er sich ein zusätzliches Standbein verschaffen? Welchen Einsätzen will und kann er sich in seinem bisherigen oder künftigen Aktionsradius am ehesten stellen? Sicherlich sind mit diesen Entscheidungen wesentliche Konsequenzen verbunden. Die Spezialisierung zur Energieholzernte verlangt eine Investition in einen auf die Bedürfnisse abgestimmten Maschinenpark. Für eine nur auf ein Einsatzgebiet (zum Beispiel Profilraumpflege) beschränkte Erweiterung des Dienstleistungsspektrums muss unter Umständen „lediglich“ in ein Aggregat investiert werden. Wesentlichen Einfluss auf diese Entscheidung haben außerdem die zu erwartenden Einsatzflächenpotenziale in und außerhalb der Forstwirtschaft. Neben den Möglichkeiten bei der Jungbestandspflege, Erstdurchforstung und Lichtraumprofilpflege sind Einsätze in der Landschafts- und Gewässerpflege, bei Rodungen zum Beispiel für den Straßenbau, in der Pflege an Straßenböschungen sowie in der Ernte von Energieholzplantagen vorstellbar.

Die bisherigen Studien zeigen, dass unter gewissen Rahmenbedingungen kostendeckende Einsätze auch in extrem stückmassearmen Beständen möglich sind. Eine reine Jungbestandpflege gibt es jedoch nicht zum Nulltarif. Wie bei der konventionellen Holzernte haben Faktoren wie Baumvolumen, Eingriffsstärke und Rückedistanz einen erheblichen Einfluss auf Leistung und Kosten und führen bei wechselnden Hiebsbedingungen zu unterschiedlichen Ergebnissen. Insbesondere die Baumhöhe spielt bei der Vollbaumernte mit Sammelaggregaten eine wichtige Rolle, da sie die Anzahl notwendiger Trennschnitte festlegt.

7 Ökobilanzierung der Bereitstellung von Waldhackschnitzeln

Die Gewinnung von Energie (Strom und Wärme) aus nachwachsenden Energieträgern wird meist schon aufgrund der regenerativen Quelle als umweltgerecht erzeugt und ökologisch positiv gesehen und gewertet. Zusätzlich wird der Einsatz von Biomasse bzw. Waldhackschnitzel in der Regel als klimaneutral gewertet, da der Brennstoff bei seiner Produktion durch die Bäume diejenige Menge an Kohlendioxid (CO_2), die bei der Verbrennung wieder freigesetzt wird zuvor der Atmosphäre entzogen hat. Diese sogenannte und immer wieder betonte CO_2-Neutralität des Brennstoffes „Holz“ und hier im Besonderen „Waldhackschnitzel“ führt leicht zu einer Nichtbeachtung möglicher Optimierungspotenziale in den Bereitstellungsverfahren, der Logistik und Lagerung sowie der Verbrennungstechnologie. Auch auftretende Substitutionseffekte werden in dieser Betrachtungsweise ignoriert (WEGENER und FRÜHWALD 1994; WEGENER und ZIMMER 2001; ZIMMER und WEGENER 2001)

Die im Rahmen des Projektes erfolgte Darstellung ökologischer Kennwerte der einzelnen Prozessketten der Bereitstellung von Waldhackschnitzeln soll einerseits einen Beitrag in der Diskussion zur die Optimierung der Prozesse liefern und andererseits die Diskussion um die ökologische Optimierung der Energieerzeugung aus Biomasse ergänzen.

Umweltzeichen, Zertifikate und vergleichende produktbezogene Ökobilanzen spielen im harten Kampf um Marktanteile eine immer wichtigere Rolle nicht nur beim Konsumverhalten der Verbraucher, sondern auch als Entscheidungsgrundlage bei öffentlichen Ausschreibungen und Planungen.

Eine geeignete Methode zur Beurteilung und Bewertung von Umweltwirkungen des wirtschaftlichen Handelns ist die Erstellung von sogenannten Ökobilanzen. Die Ökobilanz ist eine der vielen Methoden des Umweltmanagements im Rahmen von Managementsystemen bzw. einer ganzheitlichen Ökozertifizierung. Mit Hilfe der in den vergangenen Jahren entwickelten und in zahlreichen Veröffentlichungen beschriebenen Methodik der Ökobilanzierung (AHBE et al. 1990; UBA 1992, 1995a,b; SETAC 1993; BÖNING 1995; Nordic Council of Ministers 1992, 1995; ISO-Normen 1998,2006) ist es sowohl auf betrieblicher Ebene als auch produktbezogen als Lebensweganalyse möglich, die Umweltwirkungen unterschiedlicher Produktionsverfahren und unterschiedlicher Produkte zu erfassen und nachfolgend auch zu bewerten. Bei der Erstellung einer Ökobilanz werden lediglich ökologische, nicht aber ökonomische und soziale Aspekte berücksichtigt.

In produktbezogenen Ökobilanzen soll der gesamte Lebensweg von Produkten von der Rohstoffgewinnung über die Produktherstellung und die Nutzung des Produktes bis hin zur Entsorgung oder Rückführung in Kreisläufe betrachtet werden. Über den gesamten Lebensweg werden die Wirkungen auf die Umwelt und die natürlichen Lebensgrundlagen ermittelt und bewertet (Braunschweig und MÜLLER-WENK 1993).

Gerade zum Thema der Energieerzeugung, auch aus Holzbrennstoffen, wurde bereits eine ganze Reihe von Studien zu deren ökologischer Bewertung veröffentlicht. Beispielhaft zu nennen sind die Arbeiten von FRISCHKNECHT et.al. (1995), NUSSBAUMER (2002), JUNGBLUTH et al. (2002) oder WITZLINGER (2002). Die Arbeiten haben allerdings meist einen anderen Fokus und konzentrieren sich entweder schwerpunktmäßig auf die Energieerzeugungsanlagen und nicht auf die Bereitstellungsketten oder auf Brennstoffe wie beispielsweise Holzpellets.

Im Zentrum dieses Projektes stehen die Prozesse zur Bereitstellung von Waldhackschnitzeln zur Energieerzeugung. Waldhackschnitzel werden typischerweise aus sogenanntem Waldrestholz, also Kronenmaterial und Schlagabraum oder aus der Erstdurchforstung gewonnen. Je nach der jeweiligen Markt- und Erlössituation ist es auch denkbar, dass auch die Industrieholzsortimente „IL“ oder „IK“ direkt energetisch verwertet werden.

Durch das „Erneuerbare-Energien-Gesetz 2009“ erhöhen sich die Mindestvergütungen gemäß § 8 Abs. 2 EEG vom 24. Juli 2004 unter anderem für Strom, der „...ausschließlich aus Pflanzen oder Pflanzenbestandteilen, die in landwirtschaftlichen, forstwirtschaftlichen oder gartenbaulichen Betrieben oder im Rahmen der Landschaftspflege anfallen und die keiner weiteren als der zur Ernte, Konservierung oder Nutzung in der Biomasseanlage erfolgten Aufbereitung oder Veränderung unterzogen wurden...“ um 6 Cent/kWh für Anlagen bis einschließlich 500 kWel und um 4 Cent/kWh für Anlagen bis einschließlich 5 MWel (TFZ 2009).

Dieser sogenannte „NAWARO-Bonus“ kann in der Folge bei stetig wachsender Nachfrage nach Energieholz zu einer Verschiebung der Sortimente hin zur direkten energetischen Verwertung von Holz führen. Besonders betroffen werden die oben angeführten Industrieholzsortimente sein, die bislang stofflich vor allem in der Holzwerkstoff- sowie der Zellstoff- und Papierindustrie eingesetzt werden. Zu einer ähnlichen Betrachtungsweise kamen auch GRONALT et al. (2005).

7.1 Methodik

Die methodische Grundlage für die ökologische Betrachtung bilden die internationalen Normen der 14000er Reihe (14040-14044) zur produktbezogenen Ökobilanzierung, die 2006 überarbeitet und in zwei Normen (ISO 14040 und 14044) zusammengefasst wurden. In diesen Normen werden die methodischen Mindestanforderungen formuliert, die eine produktbezogene Ökobilanz erfüllen muß. Im Einzelnen handelt es sich um folgende Normen:

- **DIN EN ISO 14.040** (08:1997; 2006):
  Umweltmanagement - Ökobilanz - Prinzipien und allgemeine Anforderungen
- DIN EN ISO 14.041 (11:1998):
  Umweltmanagement - Ökobilanz – Festlegung des Ziels und des Untersuchungsrahmens sowie Sachbilanz
- DIN EN ISO 14.042 (07:2000):
  Umweltmanagement - Ökobilanz – Wirkungsabschätzung
- DIN EN ISO 14.043 (07:2000):
  Umweltmanagement - Ökobilanz – Auswertung
- **DIN EN ISO 14.044** (2006):
  Umweltmanagement – produktbezogene Ökobilanz

Ziel des Teilprojektes ist neben der ökonomischen Prozessoptimierung auch die ökologischen Kenndaten zu ermitteln und als Datengrundlage für weiterführende Studien aufzuarbeiten. Es wird dabei auf bereits vorhandene Daten aus der Literatur sowie auf im Projekt erhobene Prozessdaten zurückgegriffen. Die Betrachtung beginnt im Wald mit der biologischen Produktion der Biomasse bzw. des Holzes und beleuchtet im Weiteren die Prozessschritte „Fällung und Aufarbeitung“, „Rücken“, „Hacken“, „Lagerung“, „Trocknung“ und „Transport“. Im Prozess der Energieerzeugung sowie der Ascheverwertung wird auf bereits vorhandene Studien

(FRISCHKNECHT et.al. (1995), JUNGBLUTH et.al. (2002), STAHL und DOETSCH (2008)) verwiesen.

Wie bei allen zitierten und betrachteten Studien wurde jeweils die Herstellung der Produktionsanlagen nicht betrachtet, der Betrieb der Anlagen aber sehr wohl.

Das Sortiment „Waldhackschnitzel“, wie es in den Biomasseheiz- bzw. Biomasseheizkraftwerken eingesetzt wird, kann aus sehr unterschiedlichen Holzarten bestehen. Dabei ergibt sich das Problem der unterschiedlichen Rohdichten und Heizwerte für die Nadel- und die Laubhölzer, wobei die Nadelhölzer aufgrund der chemischen Zusammensetzung einen etwas höheren Heizwert bei gleichzeitig geringerer Dichte haben. Waldhackschnitzel werden üblicherweise in Schüttraummetern (Srm) gehandelt, wobei die Auflockerung beim Hacken zu einer großen Varianz der Streudichten, je nach Partikelgrößen führt. Weitgehend unabhängig von diesen Zusammenhängen ist die Holzmasse atro, weshalb üblicherweise in den Ökobilanzen von Holz und Holzprodukten die Tonne Holz atro als Bezugsgröße dient (WEGENER et. al. 1997; ZIMMER und KAIRI 2001).

Wie die Abbildung 54 zeigt besteht ein direkter Zusammenhang zwischen dem Heizwert bzw. Brennwert und dem Wassergehalt von Holz. Je mehr Wasser bei der Verbrennung verdampft werden muss desto niedriger liegt der Heizwert. Die Verdampfungswärme pro kg Wasser beträgt nach KALTSCHMITT und HARTMANN (2001) konstant 0,68 kWh/kg (bezogen auf 25°C Ausgangstemperatur).

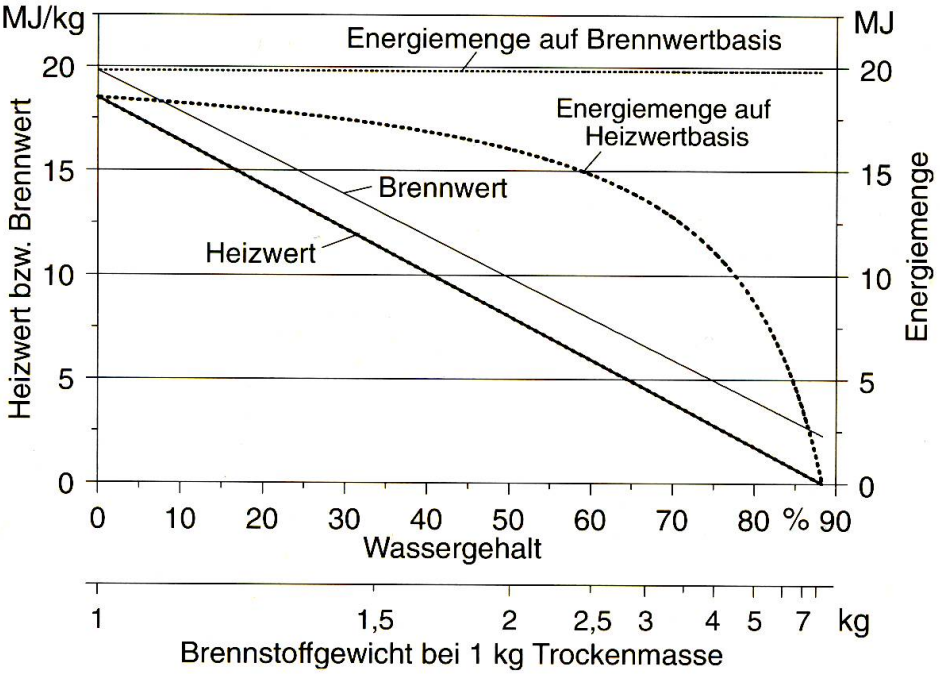


Abbildung 54: Zusammenhang von Heizwert, Brennwert und Energiemenge in einem kg Holztrockenmasse bei unterschiedlichem Wassergehalt (Kaltschmitt und Hartmann 2001, S.:262)

In Abhängigkeit von der Verbrennungstechnologie, kann diese Verdampfungswärme teilweise durch Kondensation zurück gewonnen werden (Abb. 1), wobei diese Technologie in der Regel erst ab einer Feuerungsleistung > 500-1000 kW ökonomisch sinnvoll eingesetzt werden kann. Das bedeutet, dass sich bei kleineren Anlagen, die aufgrund der Verbrennungstechnologie in der Regel Hackschnitzel mit einem geringeren Wassergehalt (etwa WG 30%) brauchen, der Einfluss des Wassergehaltes in den Hackschnitzeln größer ist als bei größeren Anlagen mit

Rauchgaskondensation. Beeinflusst wird hierbei die Energieausbeute, also der Gesamtwirkungsgrad und die Qualität der Verbrennung (Emissionen, Aschegehalt,…).

Die nachstehende Tabelle 29 aus WITTKOPF (2005) verdeutlicht den Zusammenhang und gibt die Heizwerte für Nadel- und Laubholz bei unterschiedlichen Wassergehalten an.

Tabelle 29: Heizwerte in Abhängigkeit vom Wassergehalt der Hackschnitzel bezogen auf die Gesamtmasse sowie die darin enthaltene Trockenmasse für Nadel- und Laubholz (WITTKOPF 2005, S. 29)

Wassergehalt	Nadelholz		Laubholz	
[%]	H_u der Gesamtmasse [kWh/kg]	H_u der Trockenmasse [kWh/kg]	H_u der Gesamtmasse [kWh/kg]	H_u der Trockenmasse [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
40	2,85	4,75	2,73	4,55
50	2,26	4,52	2,16	4,32
60	1,67	4,18	1,59	3,98

Im Folgenden werden deshalb zwei unterschiedliche Sortierklassen (Wassergehalt 30% und 50%) von Waldhackschnitzeln betrachtet.

Für einen Heizwert von 1 MWh ergibt sich eine Bedarfsmenge an Hackschnitzel mit einem Wassergehalt von 30% bei Laubholz 0,95 Srm sowie bei Nadelholz 1,34 Srm. Bei einem Wassergehalt von 50% steigert sich dieser Bedarf auf 1,02 Srm bei Laubholz bzw. 1,46 Srm bei Nadelholz.

Auf eine Untergliederung in einzelne Holzarten wird verzichtet, da Waldhackschnitzel in der Regel immer eine Mischung aus vielen Holzarten darstellen. Deshalb wird im Weiteren auch immer mit einem Mischsortiment NH/LH (mittlere Raumdichte 500 kg/fm; Heizwert 5,1 kWh/t_{atro}) gearbeitet.

In der Auswertung der Kennwerte wird aus Gründen der Übersichtlichkeit auf die Wirkungskategorien „Treibhauseffekt – GWP_{100}“ (berechnet nach IPCC (2007)) und „Einsatz von Primärenergie“ fokussiert. Diese beiden Wirkungsbereiche sind für die Fragestellung besonders wichtig, da sie einerseits den Wirkungsgrad der gesamten

Bereitstellungsketten beschreiben und die Diskussion um die CO_2-Neutralität verdeutlichen.

7.2 Ergebnisse

Im Folgenden werden die Ergebnisse für die einzelnen Module (Prozessschritte) dargestellt und anschließend zu Szenarien zusammengefasst.

7.2.1 Biologische Produktion - Photosynthese

Der Bereich der biologischen Produktion des Energieträgers Holz wurde von ZIMMER und WEGENER (1996) auf der Basis der Photosynthese modelliert und bildet die Grundlage für die Berechnung der CO_2-Speicherpotenziale in den Ökobilanzen Holz.

Alle Elemente die im Holz vorliegen sind der Ökosphäre durch den Baum beim Aufbau der Holzsubstanz entzogen worden. Das gilt für Kohlenstoff, Sauerstoff und Wasserstoff wie für Stickstoff, Calcium, Magnesium oder andere Elemente (z.B. Spurenelemente). Mengenmäßig sind Kohlenstoff, Sauerstoff und Wasserstoff die wichtigsten und machen zusammen durchschnittlich 99 % der Masse aus. Der Rest beinhaltet eine ganze Reihe von anorganischen Bestandteilen, die beispielsweise bei der Verbrennung von Holz wieder freigesetzt werden und als Emissionen eine negative Umweltwirkung haben können.

Unterzieht man Holz einer Elementaranalyse, erhält man die Massenanteile der Elemente Kohlenstoff, Sauerstoff und Wasserstoff im Holz. Die einzelnen Holzarten unterscheiden sich hinsichtlich der Zusammensetzung dieser Elemente nur sehr wenig (FENGEL und WEGENER 1984), so dass für Holz allgemein mit einem Gehalt von 50 % Kohlenstoff, 43 % Sauerstoff und 6 % Wasserstoff gerechnet werden kann. Auf der Grundlage der Photosynthese-Gleichung (Abb., (1)) kann davon ausgegangen werden, dass sämtlicher im Holz gespeicherter Kohlenstoff der Atmosphäre in Form von Kohlendioxid entzogen wurde. Analog dazu stammen Sauerstoff und Wasserstoff aus dem aufgenommenen Wasser bzw. ebenfalls aus dem Kohlendioxid.

Allerdings eignet sich der modellhafte Ansatz über die Photosynthese-Gleichung nicht, um die Massenströme richtig abzuschätzen, da die Massenanteile der Elemente im synthetisierten Traubenzucker nicht denen im Holz entsprechen. Die Gleichung (2) in Abbildung 3 zeigt einen hypothetischen Ansatz, der die Elementzusammensetzung im Holz widerspiegelt und eine Berechnung der Stoffströme über die Molmassen zulässt (Abbildung 55, Tabelle 30).

$$6\ CO_2 + 12\ H_2O \rightarrow C_6H_{12}O_6 + 6\ O_2 + 6\ H_2O \quad (1)$$

⇓

Modellgleichung

zur Berechnung der Massenströme beim Aufbau von Holz

$$8{,}4\ CO_2 + 12\ H_2O \rightarrow C_{8,4}H_{12}O_{5,4} + 8{,}7\ O_2 + 6\ H_2O \quad (2)$$

Beispiel für 1000 kg_{atro} Holz:

1851 kg **CO_2** + 1082 kg **H_2O** → 1000 kg **Holz** + 1392 kg **O_2** + 541 kg **H_2O**

Abbildung 55: Theoretischer Ansatz zur Berechnung der Input- und Outputströme zur Bildung von Holz durch die Bäume (aus ZIMMER und WEGENER 1996)

Über die Photosynthese wird Sonnenenergie in chemisch gebundene Energie umgewandelt und im Holz gespeichert. Auch der notwendige Input an Energie zum Aufbau von Holz, kann nicht aus der Photosynthese-Gleichung abgeleitet werden. Die Bilanz der biologischen Produktion muss aber auch hinsichtlich der Energie ausgeglichen sein. Es wird deshalb davon ausgegangen, dass der erreichbare Energieoutput, ausgedrückt durch den unteren Heizwert (H_u), auch dem Energieinput entspricht.

Tabelle 30: Sachbilanz des Submoduls "Biologische Produktion"; alle Werte beziehen sich auf eine Tonne absolut trockenes [t_{atro}] Holz

		Input	Output
Fichte, Kiefer:			
Energie, regenerativ	[MJ]	19.271	19.271
CO_2	[kg]	1.851	-
O_2	[kg]	-	1.392
H_2O	[kg]	1.082	541
Buche, Eiche:			
Energie, regenerativ	[MJ]	18.112	18.112
CO_2	[kg]	1.851	-
O_2	[kg]	-	1.392
H_2O	[kg]	1.082	541

Aus dem theoretischen Ansatz ergeben sich die in der nachfolgenden Tabelle 31 dargestellten Mengen, die als Kohlendioxid-Speicherung eingerechnet werden können. Dem oben gewählten Ansatz folgen auch SCHWEINLE (1996, 1997) bei der Bilanzierung der Rohholzproduktion in der BRD sowie RÖDL (2008) mit ihrer Ökobilanzierung der Holzproduktion in Kurzumtriebsplantagen.

Tabelle 31: Darstellung der Volumina [Srm] sowie der Kohlendioxid-Inputs im Modul „biologische Produktion“ bezogen auf jeweils einen Heizwert von einer MWh.

	Nadelholz	Mix	Laubholz
Wassergehalt 0%:			
Volumen [Srm/MWh]	1,27	0,98	0,90
Kohlendioxid [kg/MWh]	356	364	370
Wassergehalt 30%:			
Volumen [Srm/MWh]	1,34	1,04	0,95
Kohlendioxid [kg/MWh]	377	384	393
Wassergehalt 50%:			
Volumen [Srm/MWh]	1,46	1,13	1,04
Kohlendioxid [kg/MWh]	410	419	428

7.2.2 Fällung und Aufarbeitung

Da sehr unterschiedliche Sortimente zu Waldhackschnitzeln verarbeitet werden können, werden in diesem Modul auch unterschiedliche Prozesse betrachtet. Die Prozesse variieren auch, weil die jeweils eingesetzte Prozesstechnologie sehr von den jeweiligen Professionisten abhängt. Im Kleinprivatwald überwiegt natürlich der motormanuelle Anteil während in den Forstunternehmen zunehmend Vollernter (Harvester) zum Einsatz kommen.

Die Daten zu den Produktivitäten sowie die Leistungsdaten und Verbräuche kommen zum Großteil aus dem Projekt selbst bzw. aus der Literatur, wobei im Wesentlichen folgende Studie und Publikationen verarbeitet wurden: KNECHTLE (1997), WINKLER (1997), FEDRAU (2000), SCHWAIGER und ZIMMER (2001), KWF (2001), SPINELLI et al. (2002), ROHRMOSER und STAMPFER (2003), KANZIAN (2005), WITTKOPF (2005).

Die motormanuelle Aufarbeitung benötigt einen Energieeinsatz zwischen 3,93 und 6,01 kWh je bereitgestellte MWh Waldhackschnitzel, was einem Anteil von 0,4 bis 0,6% des jeweiligen Energieinhaltes des Hackschnitzelsortiments entspricht.

Beim Einsatz eines modernen Feller-Buncher-Systems liegen aufgrund der höheren Produktivität der Maschine die Anteile zwischen 0,4und 0,8% des jeweiligen Energieinhaltes. Generell ist bei allen Holzernte-Varianten das Stückmasse-Gesetz zu beachten. Wichtigste Einflussfaktor für die Produktivität und damit für den spezifischen Energieinput ist die Stückmasse d.h. das Baum- bzw. Kronenvolumen.

Für das Modul Fällung und Aufarbeitung kann festgehalten werden, dass die eingesetzte Methode nahezu keinen Einfluss auf den spezifischen Energieverbrauch hat.

Was beim Modul Fällung noch zu beachten ist, dass in jedem Fall ein Eintrag von Sägekettenölen und Hydraulikölen erfolgt, welcher aber nicht näher quantifiziert werden kann. Legt man die Daten von KNECHTLE (1997) und PETERS (2007)

zugrunde, dann muss beim Einsatz von Vollerntern von Hydraulikölverlusten in der Höhe von 7 g bis 47 g pro Srm Waldhackschnitzel ausgegangen werden. Hinzu kommen noch 9 g/Srm Schmiermittelverluste beim Vollernter und 55 g/Srm Kettenöle bei der motormanuellen Variante. Qualitativ bewertet bedeutet dies aber, dass der Einsatz von schnell biologisch abbaubaren Ölen zu fordern und in jedem Fall umzusetzen ist (PETERS 2007).

7.2.3 Rücken

Die Produktivität beim Rücken ist je nach Verfahren und Sortiment sehr unterschiedlich, wie die Untersuchungen gezeigt haben (WITTKOPF 2005). Die Vollbaumnutzung schneidet bezüglich der Produktivität beim Rücken besser ab als das Kronenrestholz, wobei auch hier ein deutlicher Einfluss der Kronenfußdurchmesser zu verzeichnen ist. Je nach Verfahren liegt die Produktivität zwischen etwa 12 und 45 Srm pro Stunde. Zum Einsatz kommen im Rahmen dieser Studie: Schlepper, Rückewagen, Zangenschlepper, Seilschlepper und Forwarder.

Die Daten zu den Leistungsdaten und Kraftstoffverbräuchen kommen zum Großteil aus dem Projekt selbst bzw. aus der Literatur, wobei im Wesentlichen folgende Studie und Publikationen verarbeitet wurden: KNECHTLE (1997), WINKLER (1997), FEDRAU (2000), SCHWAIGER und ZIMMER (2001), KWF (2001), SPINELLI et al. (2002), ROHRMOSER und STAMPFER (2003), KANZIAN (2005), WITTKOPF (2005).

Im Kleinprivatwald werden vorwiegend Schlepper mit Seilwinde | Rückewagen eingesetzt, der Energieeinsatz liegt zwischen 0,32 und 0,97% des jeweiligen Energieinhaltes.

Werden Zangenschlepper eingesetzt, liegen diese Werte bei 0,41 bis 0,99% des jeweiligen Energieinhaltes. Sinkt die Produktivität in diesem System aufgrund sehr geringer Durchmesser auf 5-10 Srm pro Stunde, dann erhöht sich der spezifische Energieeinsatz auf bis zu 2%. Auch hier ist wieder der Einfluss des StückmasseGesetzes erkennbar.

Viel günstiger schneiden hier wieder die Forwarder ab, die auf spezifische Energieeinsätze zwischen 0.24 und 0,72% kommen. In diesem Fall handelt es sich um leistungsfähige Maschinen, die vor allem im „professionellen Bereich – Forstunternehmen“ eingesetzt werden.

Ein Sonderfall im Hochgebirge ist die Bringung mit Seilbahnsytemen, hier wurde auf die Untersuchung von Schwaiger und Zimmer (2001) zurückgegriffen; die spezifischen Energieeinsätze liegen je nach Waldhackschnitzel-Sortiment zwischen 0,47% und 0,71% beim Nadelholz (W50).

Ähnlich zum Modul der Fällung ist der Verlust an Hydraulik-Ölen, hier ist mit Einträgen von 2 bis 10 g/Srm zu rechnen.

7.2.4 Bündeln von Kronenmaterial

Die Idee beim Bündeln von ungehacktem Kronenrestholz ist die Erhöhung der Lagerdichte, verbesserte Transportmöglichkeiten und eine effektivere, sprich leistungsfähigere Hackung aufgrund der leichteren Zuführung zum Hacker. Das Volumen der Bündel entspricht nach KANZIAN (2005) in etwa dem Volumen nach dem Hacken. Die Trockengehalte der Bündel lagen auch nach Lagerung um die 50-55%. Nähere Angaben zum Energieverbrauch finden sich bei WITTKOPF (2004), der

eine Arbeitsstudie eines Lkw-gestützten Bündelaggregats (Abbildung 56) durchgeführt hat.

Abbildung 56: Beispiele für Bündelaggregate: links auf einem Forwarder (Quelle: FIBERPAC 2009), rechts auf einem Lkw montiert wie bei WITTKOPF (2004) eingesetzt.

Umgerechnet auf den Energiegehalt des Waldhackgutes müssen zwischen 0,54 und 0,83% allein zum Bündeln veranschlagt werden.

Den Ferntransport sieht WITTKOPF (2004) aufgrund des Gefährdungspotenzials durch lose Teile als eher kritisch und KANZIAN (2005) ermittelte eine Auslastung beim Transport kleiner zwischen 40 und 50%.

7.2.5 Hacken

Zum Hacken werden heute unterschiedlich leistungsfähige mobile, seltener stationäre Hacker eingesetzt (Abbildung 57). In den wenigsten Fällen kann am Standort des Biomassekraftwerkes gehackt werden, da die Lärmbelastung zu hoch ist.

Abbildung 57: Beispiele für unterschiedlich leistungsfähige mobile Hacker: links an einem Schlepper angehängt (www.mus-max.at; 30.06.2009), rechts auf einem Lkw montiert (www.haeckselzug.de; 30.06.2009).

Im Kleinprivatwald werden häufig Anbaugeräte an den Schlepper eingesetzt während im professionellen Bereich zunehmend Lkw-gestützte Fahrzeuge zu finden sind. Die Leistungsbereiche liegen zwischen 10-50 Srm/h (WITTKOPF 2005) und 50-150

Srm/h (GRONALT et al. 2005, SCHNECKENER 2009), wenn an zentralen Hackplätzen oder Holzlogistikzentren gehackt wird. Werden auch Rundhölzer | Bäume mit größeren Durchmesser gehackt, kann die Leistung dieser Hacker auch bis zu 300 Srm ansteigen. Die maximalen Einlassdurchmesser liegen bei 80-90 cm.

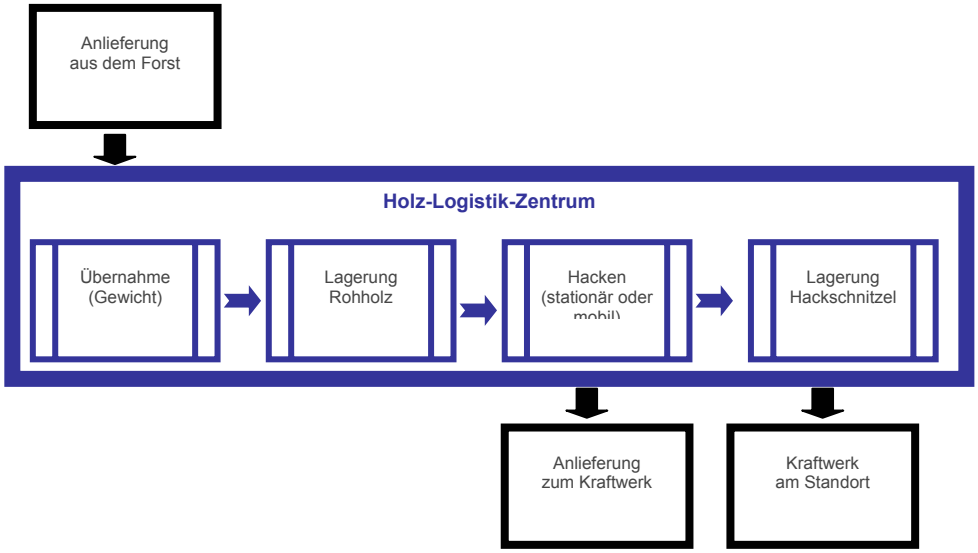


Abbildung 58: Beispiel einer möglichen Variante für ein Holzlogistikzentrum mit stationärem Hacker (nach Gronalt et.al. 2005)

Die Frage, wo das Material gehackt wird (Abbildung 58), ist eher eine organisatorische Fragestellung und beeinflusst die ökonomische Beurteilung sowie die Brennstoffqualität mehr als die ökologische Betrachtungsweise. In diesem Modul wird ausschließlich der Prozess des Hackens betrachtet, nicht die möglichen Anfahrten, da deren Länge und Anzahl von der Organisation des Ablauf abhängen.

Während die mobilen Hacker auf Lkw-Basis aufgrund Leistungsdaten mit spezifischen Energieverbräuchen zwischen 0,30% und 0,58% je nach Waldhackschnitzel-Sortiment auskommen, liegen die Werte für die Anbaugeräte mit 1,1-1,7% des jeweiligen Energieinhaltes deutlich höher.

7.2.6 Lagerung der Hackschnitzel

Die Lagerung von Hackschnitzeln kann an verschiedenen Stellen in der Bereitstellungskette erfolgen oder notwendig werden. Waldhackschnitzel werden meist aus erntefrischem Holzmaterial hergestellt, das hohe Wassergehalte von über 50% aufweist. Damit ergeben sich bei der Zwischenlagerung oder der Lagerung an der Heizungsanlage folgende Probleme:

- Eine Erhitzung des Hackschnitzelhaufens durch biologische Umsetzungsprozesse bis zur Selbstentzündung ist möglich
- Gesundheitsschädliche Schimmelbildung: An der Schüttungskrone nass eingelagerter Hackschnitzel kondensiert häufig Wasser. Dort finden Schimmelpilze einen idealen Nährboden.
- Substanzverlust durch biologische Abbauprozesse. Bei einem hohen Wassergehalt haben holzzersetzende Pilze gute Bedingungen und verringern den Energiegehalt des Hackguts.

Während Hackschnitzel mit einem Wassergehalt von <30% (W30) nach ÖNORM M 7133 als lagerbeständig gelten (Tabelle 32), unterliegen die Waldhackschnitzel mit einem Wassergehalt von 50% (W50) bei einer Zwischenlagerung den biologischen Abbauprozessen.

Tabelle 32: Wassergehaltsklassen von Hackschnitzeln und deren Lagerfähigkeit (nach ÖNORM M 7133)

Klasse	Grenzwert Wassergehalt [%]	Bezeichnung Lagerfähigkeit
W 20	<20	lufttrocken
W 30	20-29	lagerbeständig
W 35	30-34	beschränkt lagerfähig
W 40	35-39	feucht
W 50	40-49	erntefrisch

Der Substanzabbau des Holzes erfolgt sowohl durch biologische als auch durch chemische Prozesse, wobei immer auch ein Verlust des Energiegehaltes mit dem Abbau verbunden ist. Ein Teil der nutzbaren Energie geht also verloren. Nach SCHOLZ et al. (2005) können die mittleren Trockenmasseverluste zwischen 10% und 30% im Jahr betragen. Die nachfolgende Tabelle 33 verdeutlicht den Trockenmasseverlust je nach Lagerort und Lagerbedingungen.

Unkontrolliert, im Freien ist demnach mit monatlichen Verlusten von bis zu 4% bei den Waldhackschnitzeln mit einem Wassergehalt von 50% zu rechnen. Da der Brennwert auf die Trockenmasse bezogen wird, entspricht eine einmonatige Lagerung der Waldhackschnitzel (w50) einem spezifischen Energieeinsatz von 1%-4% des jeweiligen Energieinhaltes. Beim Sortiment w30 reduziert sich dieser Werte auf <1%.

Tabelle 33: Zusammenhang zwischen dem Wassergehalt bei der Einlagerung, dem Lagerungsort und dem Substanzabbau bei der Lagerung von Hackschnitzeln (nach WEBENAU et al. 1999; In: GOLSER et al. 2005)

Einlagerungs-wassergehalt [%]	Trockensubstanzabbau [% pro Monat]		Literaturquelle
	im Freien	unter Dach	
		0,5 bis 1	MARUTZKY (1982)
20		0,5	LAUER et al. (1986)
20		0,2	MITCHELL et al. (1988)
30		0,5 bis 1	WEINGARTMANN (1991)
40	1,3		JIRJIS (1995)
50		1 bis 2	WEINGARTMANN (1991)
50		2,8	LAUER et al. (1986)
50	4	2	MITCHELL et al. (1988)
55	1,8	1,3	STOCKINGER (1998)

7.2.7 Trocknung von Hackschnitzeln

Immer wieder diskutiert wird die Trocknung von Hackschnitzeln unter ökonomischen Aspekten (GOLSER et al. 2005; RATHKE 2009). Einerseits lassen sich durch die Trocknung Lagerverluste vermindern und andererseits will man mit der Trocknung der Waldhackschnitzel den Wassergehalt senken und damit den Heizwert erhöhen.

Auf alle Fälle sinnvoll ist die Verminderung des Wassergehaltes im Hinblick auf die Transporte von Waldhackschnitzeln. Bei 50% Wassergehalt ist der Lkw lediglich zur Hälfte mit Holz beladen, denn die andere Hälfte ist Wasser. Eine Trocknung der Hackschnitzel würde also in jedem Fall die Energiedichte erhöhen und damit den Energieeinsatz und die Emissionen beim Transport vermindern. Dieser Aspekt, der im Modul „Transporte“ auch noch aufgezeigt wird, kommt vor allem bei größeren Entfernungen zum Tragen.

Ein weiterer Aspekt der eine Trocknung sinnvoll erscheinen lässt ist die Qualität sowie der Wirkungsgrad der Verbrennung. Gerade Anlagen in einem Leistungsbereich von <500 kW brauchen aufgrund der Verbrennungstechnologie Energiehackschnitzel mit Wassergehalten <30% (W30). Sinkt bei diesen Anlagen die Qualität der Hackschnitzel durch einen höheren Wassergehalt so vermindert sich automatisch der Wirkungsgrad, da diese Feuerungsanlagen in der Regel nicht über eine Rauchgaskondensation verfügen. Erschwerend kommt hinzu, dass sich auch die Emissionswerte verschlechtern, da die Verbrennung nicht mehr optimal geführt werden kann.

RATHKE (2009) konnte außerdem zeigen, dass bei einer Stichprobe von 160 Proben in kleineren und mittleren Heiz- und Heizkraftwerken die Wassergehalte in zwei Drittel der Fälle >40% lagen (Abbildung 59. Bei einer Befragung der beprobten Betriebe stellte sich ferner heraus, dass kein einziger Betreiber einer Anlage <300kW den Wassergehalt bei der Lieferung der Hackschnitzel überprüft.

Auch im Leistungsbereich >1MW verzichten immer noch fast die Hälfte der Betreiber auf eine Messung des Wassergehaltes und übernehmen die Hackschnitzel rein nach dem Volumen, wobei eine Berücksichtigung des Wassergehaltes bei Anlagen >5MW Standard ist.

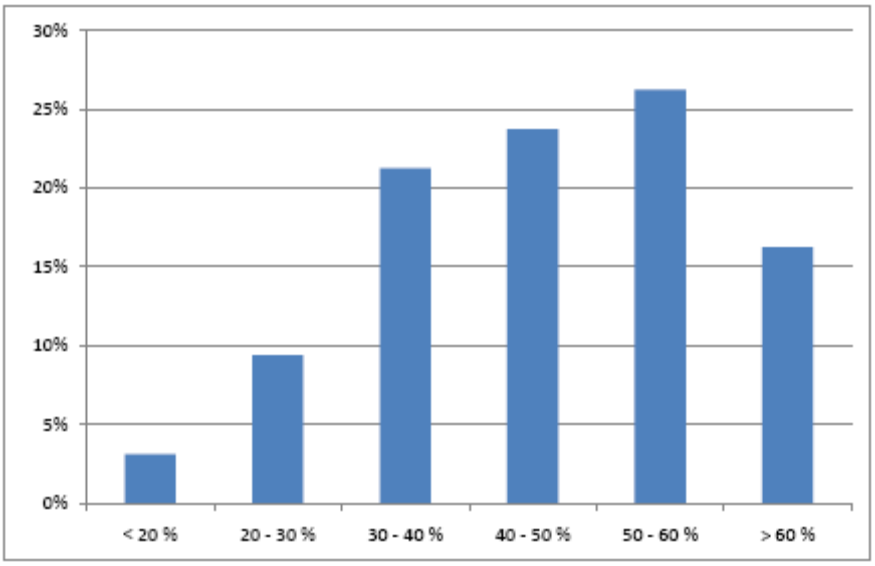


Abbildung 59: Relative Häufigkeit der bei Stichproben ermittelten Wassergehalte (N=160) in Hackschnitzeln (RATHKE 2009)

Wie viel an nutzbarer Energie dadurch verloren geht konnte im Rahmen dieser Studie nicht erhoben und ermittelt werden, es soll aber an dieser Stelle darauf hingewiesen werden, dass hier auch ein erhebliches ökologisches Optimierungspotenzial liegt.

Die Gründe für diese mangelhafte Berücksichtigung der Brennstoffqualität könnten einerseits in den unterdurchschnittlichen Kosten liegen, welche der Brennstoff bei Hackschnitzelheizanlagen im Verhältnis zu den Anlagenkosten hat und andererseits in einer mangelnde Regelung der Qualität und Qualitätskontrolle liegen. Das betrifft vor allem die kleinen Anlagen.

Die Potenziale für eine Trocknung von Energiehackschnitzeln sind, unabhängig davon ob Trommeltrockner, Bandtrockner oder Containertrockner eingesetzt werden, immer dann gegeben, wenn bislang ungenutzte Wärme genutzt wird. Beispielhaft ist hier die gezielte Nutzung von Abwärme bei stromgeführten Biogasanlagen und stromgeführten Biomasseheizkraftwerken (im Sommer), aber auch die Nutzung von Überschusswärme von Sägewerken im Sommer genannt.

Der Einsatz von fossilen Energieträgern zur Trocknung von Hackschnitzeln oder der Betrieb von eigenständigen Trocknungsanlagen ist wegen der Wirkungsgrade solcher Anlagen weder ökonomisch noch ökologisch sinnvoll (RATHKE 2009).

7.2.8 Transporte

In Abhängigkeit der Organisation der Bereitstellungskette muss das Material in ungehackter oder gehackter Form transportiert werden. In ungehackter Form ist das Volumen sehr hoch, was längere Transporte ohne „Verdichtung“ (siehe:“Bündeln von Kronenmaterial“) in der Regel ausschließt.

Wird im Wald bzw. an der Waldstrasse gehackt bieten sich verschiedenste Kombinationen an. Ähnlich den landwirtschaftlichen Erntesystemen kann direkt in den Anhänger eines Schleppers (Abbildung 60) oder in einen Container gehackt werden. Der Transport erfolgt dann mittels Schlepper oder Container-Lkw, wobei die Lkw für den Einsatz auf der Waldstrasse geeignet sein müssen. Container bieten sich auch dann an, wenn mit einem auf einem Forwarder montierten Hacker bereits auf der Rückgasse gearbeitet wird und die Hackschnitzel dann mittels Forwarder-system auch an die Waldstrasse geliefert werden (Abbildung 61).

Abbildung 60: Beispiele für unterschiedliche Anhängersysteme zum Transport von Hackschnitzeln mittels Schlepper (www.prilu.at; www.holzrueckung-huettler.at, 30.06.2009)

Abbildung 61: Beispiele für unterschiedliche Container-Systeme zum Transport von Hackschnitzeln

Wird auf Lagerplätzen auf den Boden gehackt, muss das Hackgut zusätzlich verladen werden oder es kommen Spezial-Lkw mit Greifern zum Einsatz (Abbildung 62).

Im Kleinprivatwald wird häufig nach dem Hacken mittels Anbau- und Anhänge-Hackern auch mit Schleppern transportiert. Die Ladevolumina schwanken je nach Anhänger zwischen 10m³ und 20m³ und die Reichweite bzw. die Transportentfernungen sind eher gering. WITTKOPF (2005) rechnet mit einer durchschnittlichen Geschwindigkeit von 33 km/h. Prüfberichten zufolge verbrauchen die typischerweise eingesetzten Schlepper lauf KWF-Prüfberichten (2009) im Arbeitseinsatz etwa 7 Liter Diesel pro Maschinenarbeitsstunde, was allerdings nicht für den reinen Fahrbetrieb gilt. Der spezifische Energieverbrauch beträgt je nach Drehzahl und Fabrikat 200-220 g/kWh, woraus sich bei Motorleistungen zwischen 80 und 120 kW ein Kraftstoffverbrauch von rund 16 bis 26 Liter Diesel/h errechnet.

Lkw ohne Anhänger, mit einem zulässigen Gesamtgewicht von 26 t, wie in Abbildung 61 und Abbildung 62 dargestellt, haben ein Ladevolumen von 30-35 Srm beim Lkw mit Ladekran und 45-50 Srm bei Lkw ohne Kran. Bezogen auf die Tonnage bedeutet das eine mögliche Zuladung von 11,3 t beim Lkw mit Kran und 12,5-13 t beim Lkw ohne Kran. Aufgrund der hohen Wassergehalte von mehr als 50% bedeutet dies, dass das Ladevolumen in der Regel nicht ausgeschöpft werden kann, weil die Begrenzung durch das Gewicht gegeben ist. Letzteres bezieht sich auf das gesetzlich zugelassene Gewicht nicht auf das technisch möglich, denn die Lkw könnten durchaus bis 35 t Gesamtgewicht (RIEDLER 2009) genutzt werden, was in anderen europäischen Ländern (z.B. Skandinavien) auch möglich ist. Der Verbrauch dieser Lkw wird von den Herstellern mit rund 27 bis 30 l/100 km angegeben (Iveco; Mercedes; Scania; Volvo), was aber in keinem Fall bei den Hackschnitzeltransporten angesetzt werden kann. Einen sehr großen Einfluss auf den Verbrauch hat der Fahrer und seine Fahrweise, ähnlich den Verbräuchen bei Forstschleppern. Nach Auskunft von PABST (2009) liegt der Verbrauch in der Praxis in etwa bei 40 Liter pro 100 Kilometer.

Abbildung 62: Beispiele für Spezialfahrzeuge mit Kran und Greifer, die auch auf der Waldstrasse eingesetzt werden können (www.riedler.com; 30.06.2009)

Wird an zentralen Plätzen gehackt kommen Sattelschlepperund Lastzüge (Abbildung 63) zum Einsatz, wobei ein gesetzlich zulässiges Gesamtgewicht von 40 Tonnen

nicht überschritten werden darf. Das Ladevolumen liegt je nach Aufbau und Basisfahrzeug zwischen 100 und 120 Srm und die Tonnage der Ladung zwischen 20 und 24 Tonnen beträgt.

Bei einem Wassergehalt von 50% bedeutet dies, dass nur zwischen 45 (Laubholz) und maximal 79 Srm bei Nadelholz geladen werden können. Für Waldhackschnitzel mit einem Wassergehalt von 30% erhöht sich die Kapazität auf vergleichbare 63 bis 111 Srm. Das bedeutet, dass hinsichtlich einer Optimierung der Lade- und Transportkapazitäten geringere Wassergehalte sowohl ökonomisch als auch ökologisch wünschenswert wären.

Im Klartext: Bei jeder Fuhre mit Hackschnitzeln „W30“ werden 6-7 Tonnen Wasser und bei „W50“ sogar 10-12 Tonnen Wasser transportiert.

Betrachtet man bei den Transporten die Entfernungskilometer zwischen Wald und Zwischenlager oder Wald und Heizwerk, dann muss zusätzlich die Auslastung der Transportmittel berücksichtigt werden. Auslastung bedeutet einmal eine Berücksichtigung Leerfahrten, aber auch der Auslastung der möglichen Ladekapazitäten.

Abbildung 63: Beispiele für Hackschnitzel Lastzug mit dreiachsigem Anhänger und Sattelschlepper mit Schubboden (www.riedler.com)

Bei allen Transporten mit Schleppern, Container-Lkw aber auch Spezial-Biomasse-Lkw ist davon auszugehen, dass in der Regel keine Rückfrachten möglich sind. Die vom IFEU-Institut (2007) vorgelegten Lebenszyklusdaten zu Transporten weisen für Lkw-Transporte (mittelschwere Güter) eine Gesamtauslastung von 50% aus. Diese wurde auch in hier angesetzt. ROTHENEDER und HANDLER (2006a,b) berichten im Fall der Hackgut-Transporte mit Schlepper je nach Anhängertyp sogar von sehr viel geringeren Auslastungen (bis 30%) in der Praxis.

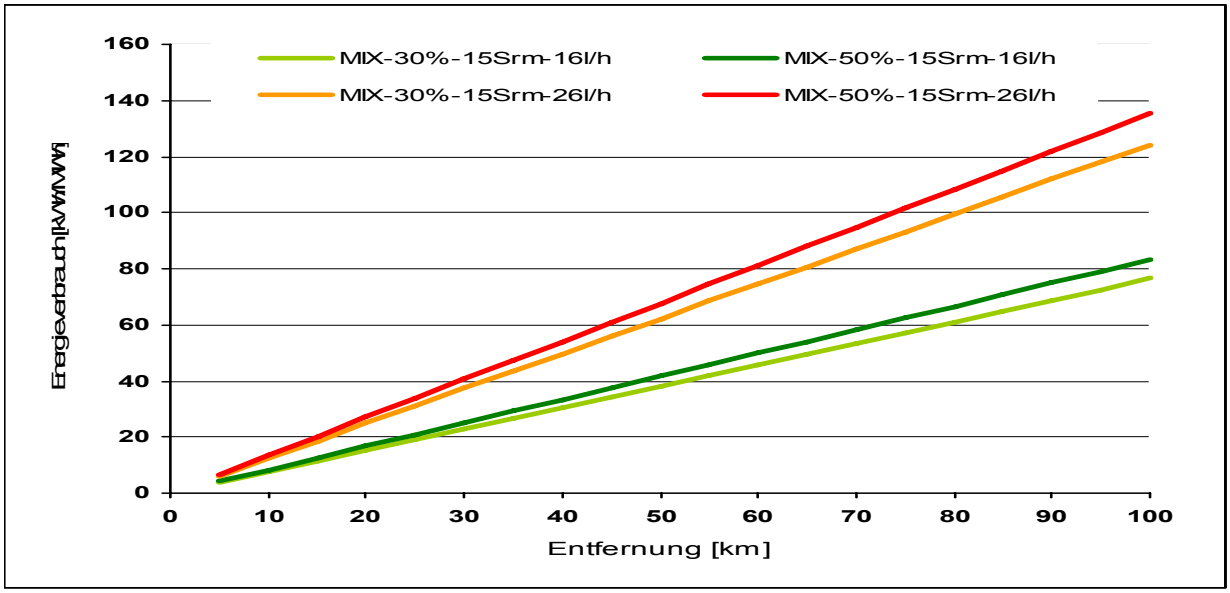


Abbildung 64: Spezifischer Energieverbrauch für den Transport von Waldhackschnitzeln mittels Schlepper (15m³-Anhänger) in kWh pro MWh Energieinhalt dargestellt für verschiedene Wassergehalte und Dieselverbräuche pro Stunde in Abhängigkeit von der Entfernung.

Aufgrund der permanent steigenden Nachfrage nach Energiehackschnitzeln ist davon auszugehen, dass sich insgesamt auch die Transportentfernungen erhöhen werden. Erhöhen werden sich die Entfernungen auch, weil der Anteil des Handels und der Internetbörsen zukünftig steigen werden (WEGENER et al. 2004; ZIMMER et al. 2004).

In Abbildung 64 ist der spezifische Energieverbrauch des Transportes mit Schlepper dargestellt. Deutlich zu sehen ist der große Einfluss des Wassergehaltes und des Kraftstoffverbrauches des Schleppers. Berücksichtigt ist die Auslastung von 50%, das bedeutet die Werte gelten für die Entfernungskilometer.

In Abbildung 65 sind zusätzlich zu zwei Varianten mit dem Schlepper die Transportmittel Lkw mit und ohne Kran, sowie der Lkw-Zug sowie der Transport mit der Deutschen Bahn dargestellt. Für die Berechnung des Energieverbrauches „Bahn“ wurde auf den Nachhaltigkeitsbericht (BAHN 2007) zurückgegriffen, wobei sich die Zahlen mit denen in der Studie des IFEU-Institutes (2007) decken.

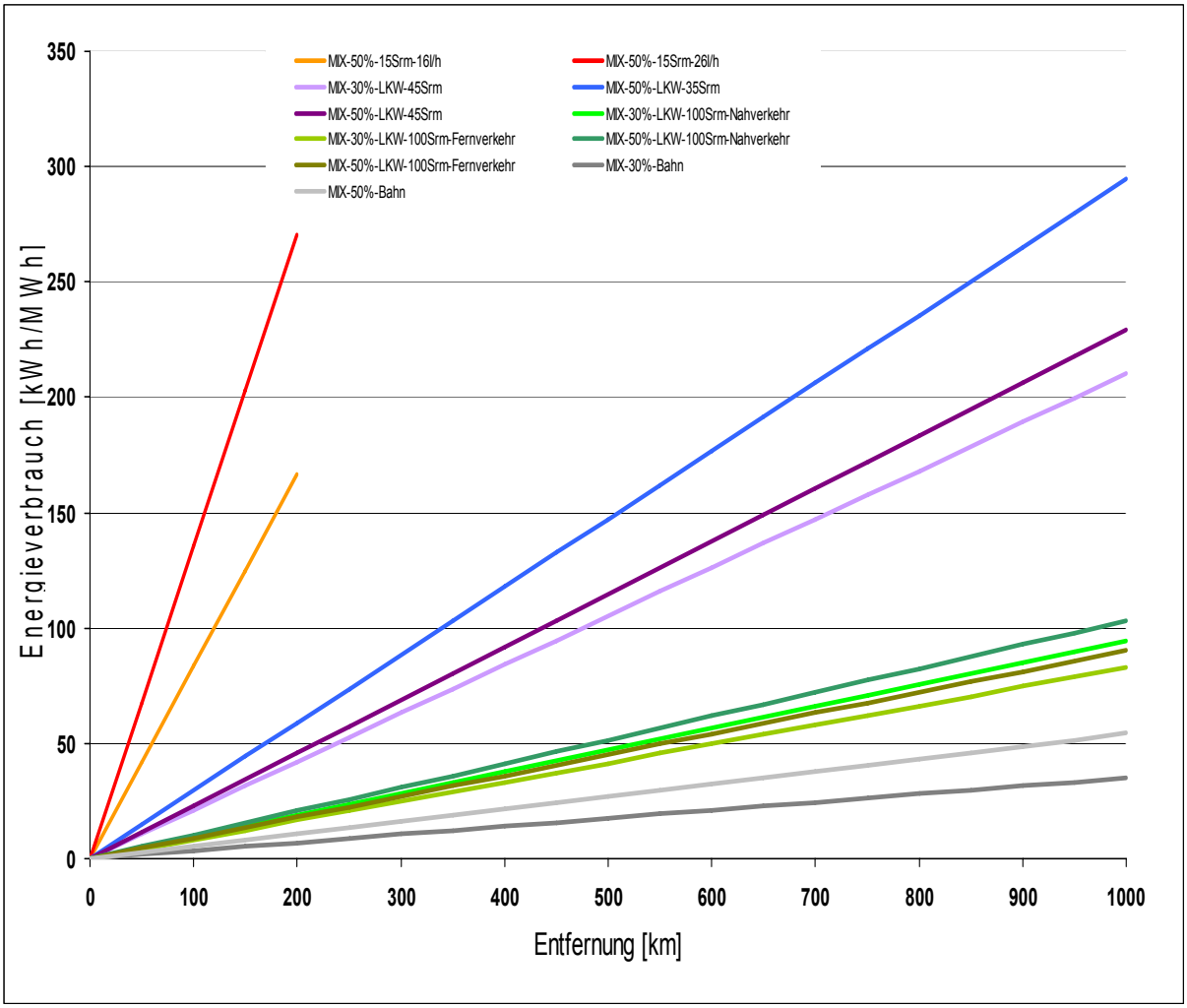


Abbildung 65: Spezifischer Energieverbrauch für den Transport von Waldhackschnitzeln für verschiedene Transportmittel in kWh pro MWh in Abhängigkeit von der Entfernung.

Der Energieverbrauch wurde in Abbildung 65 jeweils in kWh/MWh des jeweiligen Energieinhaltes der Waldhackschnitzelsortimente gerechnet. Deutlich sichtbar werden die sinnvollen Entfernungsbereiche, deshalb wurden auch für die Schlepper keine Entfernungen größer 200km dargestellt, wobei selbst dies schon als utopisch zu bezeichnen sind. 50 kWh entsprechen 5% des im Hackschnitzel enthalten Energieinhaltes, dieser Wert wird beim Bahntransport für das Sortiment „W30“ selbst bei 1000 km Entfernung noch nicht erreicht.

In der Beurteilung der Transportketten muss also hinsichtlich der ökologischen Bewertung immer sehr genau auf das jeweilige Transportmittel geachtet werden. Nicht zu unterschätzen ist auch der Einfluss des Wassergehaltes, egal welches Transportmittel eingesetzt wird.

Stellt sich die Frage ob der Bahntransport überhaupt realistisch ist, da er einen weiteren Umschlag braucht. In den vergangenen Jahren wurde die Bahnlogistik im Bereich der Holzwerkstoffindustrie bedeutend weiterentwickelt und es stehen sehr effiziente Systeme der Bahnverladung zur Verfügung. Dies könnte vor allem für Biomassekraftwerke im oberen Leistungsbereich von großer Bedeutung sein.

Abbildung 66: Modernes und leistungsfähiges Logistik-System für Biomassehackschnitzel (www.innofreight.com; 30.06.2009)

Jeder Umschlag braucht natürlich Ladertätigkeit. In der Regel werden sowohl auf Zwischenlagerplätzen, an Heizwerken sowie zum Beladen von Containern und Bahncontainern Radlader eingesetzt. Die Produktivität liegt etwa in dem Bereich von 240 Srm pro Stunde, wobei der Kraftstoffverbrauch je nach Leistung zwischen 10 und 20 Litern pro Stunde liegt (LIEBHERR 2009). Daraus ergibt sich ein spezifischer Energieverbrauch für die jeweilige Ladetätigkeit von 0,45 bis 1,39 ([kWh/MWh].

Die im Rahmen des Projektes ermittelten Transportentfernungen zum Heizwerk oder Heizkraftwerk liegen im Mittel bei 20 Kilometer, wobei die maximale Entfernung von 90 Kilometer bei den Heizkraftwerken >5000kW angegeben wird. Das bedeutet, dass alle befragten Biomasseheiz- und-heizkraftwerke in der Regel aus der Region versorgt werden. Je nach Versorgungssituation, wird aber bereits heute, wenn auch noch vereinzelt auf überregionale Lieferanten (Handel; „Spot-Markt“) zurückgegriffen.

7.2.9 Energieerzeugung – Hackgutqualität und Wirkungsgrad

Waldhackschnitzel werden in Energieerzeugungsanlagen mit sehr unterschiedlicher Verbrennungstechnologie und Leistung verbrannt. Unterschieden werden müssen reine Heizwerke von den Heizkraftwerken, die neben der Wärme auch Strom produzieren. Unterschieden muss auch nach der Nennwärmeleistung, wobei im Rahmen des Projektes vier Klassen gebildet wurden:

- < 500 kW
- 500-1000 kW
- 1000-5000 kW
- 5000 kW

Das Sortiment Waldhackgut hat über alle Biomasseheiz(kraft)werken gerechnet einen Anteil von 64% am Brennstoffmix. Betrachtet man nur die Leistungsklassen <5000 kW dann haben Waldhackschnitzel insgesamt einen Anteil zwischen 77% und 85% am Brennstoffmix. Im Projekt wurden in der gebildeten Modellregion 9 Betriebe ausgewählt und näher befragt, wobei in jeder Größenklasse, mit Ausnahme der zwischen 500-1000 kW, zwei Werke vertreten waren. Der Brennstoffbedarf der Werke betrug etwa 350.000 Srm (WG 0%), der Anteil der Waldhackschnitzel lag bei 90%.

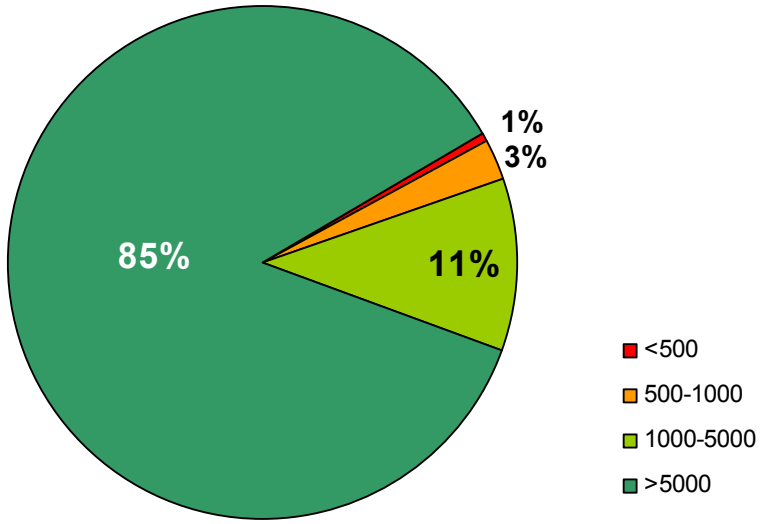


Abbildung 67: Prozentualer Anteil der Heiz- und Heizkraftwerke in der Modellregion am Brennstoffbedarf (Waldhackschnitzel) in Abhängigkeit von der Größenklasse.

Für die 9 Betriebe errechnet sich insgesamt ein Bedarf an Waldhackschnitzeln (WG 50%) von 352.580 Srm, wobei 85% des Bedarfes auf die beiden Heizkraftwerken >5000 kW entfällt und da wiederum der größte Betrieb mehr als dreiviertel der Gesamtmenge (ca.: 270.000Srm) benötigt.

Alle Anlagen <1000 kW sowie ein Betrieb >5000 kW sind reine Heizwerke; beide Betriebe im Leistungsbereich 1000-5000 kW sind Heizkraftwerke (ORC-Technologie) und der größte Betrieb (26,7MW) ist ein Heizkraftwerk mit Dampfturbine und Dampf-Auskoppelung.

Zur ökologischen Bewertung der Verbrennungstechnologie wird auf die Arbeiten von FRISCHKNECHT et al. (1995) verwiesen. Im Rahmen des Projektes soll vor allem die Bereitstellung der Waldhackschnitzel bewertet werden. Die Schnittstelle ist dabei die Brennstoffbeschaffung, die Brennstoffqualität sowie die Brennstoffanlieferung.

Für die 5 Heizwerke <1000 kW ist festzuhalten, dass der Wassergehalt des Brennstoffes eine entscheidende Größe ist, denn diese Heizwerke brauchen aufgrund der Verbrennungstechnologie trockenere Hackschnitzel, um optimal

Energie zu erzeugen. In der Regel werden diese Werke sehr lokal und regional, oft von ganz wenigen Lieferanten mit Brennstoff versorgt. Rathke (2009) konnte zeigen, dass gerade in diesem Leistungsbereich die Wassergehalte nicht oder kaum kontrolliert werden, dass die Wassergehalte zu hoch sind und damit auch die Lagerfähigkeit der Hackschnitzel eingeschränkt ist. Es treten Lagerverluste auf, die Trockenmasseverluste sowie der zu geringe Heizwert führen zu einem erhöhten Brennstoffbedarf und die Verbrennung ist nicht optimal, was sich in Störungen und dem Emissionswerten niederschlägt. Allein der Einsatz von W50 statt W30 führt zu einem 10% höheren Brennstoffbedarf. Damit liegt im Bereich der Hackschnitzelqualität ein weit höheres ökologisches Verbesserungspotenzial als in der Bereitstellungskette möglich ist.

Im Leistungsbereich 1000-5000 kW handelt es sich oft um Heizkraftwerke, welche die ORC-Technologie einsetzen, der Betrieb ist meist, aufgrund der Förderung, stromgeführt. Bei diesen Heizkraftwerken ist der Betrieb im Winter in der Regel sehr effizient, da der Wärmebedarf hoch genug ist, aber im Sommer sinken häufig die Gesamtwirkungsgrade, da das Koppelprodukt Wärme nicht abgesetzt werden kann. Wird die Produktion dann dem Wärmebedarf angepasst, sinkt die Stromproduktion, was zum ökonomischen Problem werden kann. Aus ökologischer Sicht ist allerdings die Wärmevernichtung und die damit drastisch sinkenden Wirkungsgrade sehr viel negativer zu bewerten. Hier besteht Handlungs- und Forschungsbedarf, diese Effekte konnten im Rahmen des Projektes nicht ausreichend bearbeitet werden.

Im Leistungsbereich >5000 kW spielt der Wassergehalt eine untergeordnete Rolle, da diese Anlagen in der Regel auf 50% ausgelegt sind und die Rauchgaskondensation wirtschaftlich einsetzen können. Stark schwankende Wassergehalte, Eis im Winter, hohe Fein- und Schmutzanteile erschweren allerdings auch in dieser Leistungsklasse den Betrieb erheblich und führen zu sinkenden Wirkungsgraden und schlechterer Verbrennungsqualität. Ein großes Problem stellen die zu meist knapp bemessenen Brennstofflager dar. Hier werden in der Regel Investitionskosten gespart, was sich aber im Betrieb negativ auswirkt. Immer wiederkehrende Schlechtwetterperioden (Schnee im Winter), die die Holzernte und den Transport des Holzes aus dem Wald unmöglich machen werden nicht bedacht und einkalkuliert.

Teilweise vorhandene Abwärmen im niederen- und mittleren Temperaturbereich, die zur Vorwärmung und Vortrocknung der Hackschnitzel eingesetzt werden könnten, können nicht genutzt werden, weil kein Raum oder Manipulationsplatz vorhanden ist. Kurzfristige Versorgung lässt wenig Spielraum zur Optimierung der Brennstoffqualität, sie vergrößert die Transportentfernungen. Zusätzlich eingerichtete Zwischenlagerplätze außerhalb bringen zusätzliche Transport- und Ladebewegungen. Insgesamt kann aber festgehalten werden, dass das ökologische und mehr noch das ökonomische Optimierungspotenzial bei diesen Werken in der Bereitstellungskette und der Versorgungslogistik zu finden ist.

7.2.10 Verwendung der Asche(n)

Dem Ökosystem Wald werden mit jeder Nutzung wichtige Nährstoffe entzogen. Gerade diejenigen Biomassen-Kompartimente, die bei einer Ganzbaumernte mit entnommen werden (Feinäste, Reisig, Rinde und Nadeln/Blätter), weisen besonders hohe Nährstoffkonzentrationen auf (ENGLISCH 2007).

In ihrer Publikation zum Thema Biomassenutzung und Nährtsoffentzug geben KÖLLING et al. (2007) zu bedenken:

„Die Größenordnung der in Bestand und Boden gespeicherten Nährstoffvorräte ist daher ein wichtiges Kriterium für die mögliche Intensität der Biomassenutzung. In den Abbildungen 4 und 5 sind zwei völlig unterschiedlich mit Nährstoffen ausgestattete Wälder gegenübergestellt. Als erstes fallen die immensen Unterschiede im Gesamtbetrag des Nährstoffvorrats auf: Der reiche Erlen-Eschen-Sumpfwald enthält auf dem Hektar über 3.500 Einheiten der Nährstoffe Calcium, Magnesium und Kalium, während der arme Weißmoos-Kiefernwald gerade einmal einen Vorrat von 50 Einheiten hat. Charakteristisch ist auch die Verteilung der Nährstoffe auf die drei Bestandteile Bestand, Auflagehumus und Mineralboden. Im reichen Wald sind über 95% der Vorräte im Mineralboden gespeichert, beim armen Kiefernwald sind es knapp 15% . Die restlichen 85% sind hier in den dicken Auflagehumuspaketen und vor allem in den Bäumen selbst gespeichert. Mit einer Vollbaumnutzung gehen dem reichen Wald nur 1% des gesamten Vorrats verloren, der arme Wald verliert fast 75% . Anders formuliert: Im ersten Fall wären mehrere Vollbaumnutzungen nacheinander problemlos möglich, bevor das Kapital verzehrt ist. Im zweiten Fall stellt bereits eine einzige Vollbaumnutzung die Nährstoffnachhaltigkeit in Frage.“

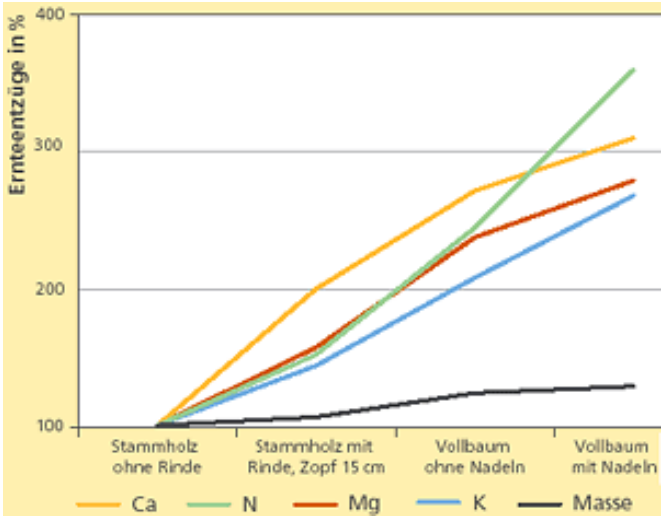


Abbildung 68: Prozentuale Erhöhung der Ernteentzüge in einem Fichten-Altbestand bei unterschiedlicher Nutzungsintensität an der Waldklimastation Ebersberg (KÖLLING et al. 2007).

Abbildung 68 zeigt eindrucksvoll die Zusammenhänge zwischen den geernteten Sortimenten und den Nährstoffexporten aus dem Wald. Aus ökologischer Hinsicht ist deshalb für die Nutzung von Kronenresthölzern, Vollbäumen oder anderen Waldresthölzern wie Wurzelstöcken etc. zu fordern, dass diese in jeder Hinsicht nachhaltig erfolgen muss. Ein differenzierte Beurteilung je nach Standort wird deshalb auch in Zukunft notwendig sein.

Während die Oxide des Kohlen- und des Stickstoffes bei der Verbrennung gasförmig in den Rauchgasen zu finden sind, verbleiben die Nährelemente Ca, K, Mg in der Holzasche zurück. Der Aschegehalt beträgt bei Holz bzw. Waldhackschnitzeln zwischen 1% und 5% abhängig vom Anteil der mitverwerteten Rinde, den Zweigen und Nadeln bzw. Blättern. Auch andere Verschmutzungen, wie Sand erhöhen den Aschegehalt. Es stellt sich also die Frage ob Holzaschen wieder in den Wald zurückgeführt werden können und dort die Nährstoffverluste ausgeglichen werden können (ZIMMERMANN und BUNDT 2000; KÖLLING und STETTER 2008).

ZIMMERMANN et al. (2002) folgern in einer Untersuchung zu den Auswirkungen der Ausbringung von Holzaschen in den Wald:

„Die Zugabe von Holzasche hatte eine Reihe positiver Auswirkungen auf Waldboden und -bäume. Neben einer Erhöhung des Boden-pH-Wertes und der Einbringung wichtiger Nährstoffe wie Ca, Mg, K und P förderte sie auch Biomasse und Wachstum der Feinwurzeln und führte zu höheren Nährstoffgehalten in den Feinwurzeln. In den Nadeln der Fichten konnte keine Zunahme der Nährstoffgehalte festgestellt werden, jedoch nahmen Nadelgewicht und -oberfläche sowie Wachstum der Bäume zu.

Die Holzascheausbringung birgt allerdings auch Gefahren. Nicht verfestigte Holzasche ist sehr leicht löslich und führt zu gravierenden Veränderungen der Bodenchemie. Dies konnten die Wissenschafter aufgrund der beiden unterschiedlichen Ausbringungszeitpunkte belegen. Zudem ist jede Holzasche mehr oder weniger stark mit Schadstoffen, insbesondere Schwermetallen, belastet, was langfristig zu einer Gefahr für den Waldboden werden kann. Deshalb ist eine Holzascheausbringung nur unter Beachtung folgender Punkte zu empfehlen:

- *Nur möglichst schadstoffarme Holzaschen ausbringen, die direkt in der Brennkammer von technisch hochwertigen Anlagen anfallen und von 100% naturbelassenem Holz stammen.*
- *Rigorose Qualitätskontrolle auf Schadstoffgehalte der Holzasche vor der Ausbringung.*
- *Die Asche muss vor der Ausbringung pelletiert (verfestigt) werden, damit sich ihre Löslichkeit reduziert und die chemischen Veränderungen im Boden dadurch moderater sind.*
- *Die Ascheausbringung sollte im Rahmen einer ökonomisch machbaren und ökologisch verträglichen Nachhaltigkeit vollzogen werden. Rechnet man mit einem durchschnittlichen Holzzuwachs von 10 m3 pro Hektare und Jahr, einer durchschnittlichen Holzdichte von 0,8 t/m3 und einem durchschnittlichen Ascheanfall von 2 %, dürften innert drei Jahren nur zirka 500 kg Holzasche pro Hektare ausgebracht werden. In der vorliegenden Studie wurden 8 t/ha ausgebracht - genug Holzasche für rund ein halbes Jahrhundert.“*

Hier liegt aber auch die Problematik in der Ascheausbringung. Die Belastung mit Schadstoffen aus dem Brennstoff aber auch aus anderen Verunreinigungen im Prozess. Insbesondere der Einsatz von Landschaftspflegehölzern und Straßenbegleitgrün bringt einen nicht unerheblichen Eintrag an Schadstoffen. Die Aussage „naturbelassener“ Brennstoff hilft hier überhaupt nicht weiter.

Die unterschiedlichen Aschen (Rostasche; Filterasche; …) müssen auch differenziert betrachtet werden wie eine Untersuchung von STAHL und DOETSCH (2008) gezeigt hat.

Das wesentliche Kriterium für den möglichen Einsatz der Holzaschen als Düngemittel sind die enthaltenen Nährstoffe. Betrachtet werden die Makronährelemente Calcium (Ca), Magnesium (Mg), Kalium (K), Phosphor (P) und Schwefel (S).

In der DüMV werden konkrete Anforderungen an die Oxid- bzw. Carbonatformen der Hauptnährelemente Ca, K und P gestellt. Mg kann bei Kalkdüngern als Ca gerechnet werden und findet somit ebenfalls Beachtung.

Nach STAHL und DOETSCH (2008) erfüllen 81 % aller Grobaschen direkt die Anforderungen an den Düngemitteltyp 'Kalkdünger aus Asche aus der Verbrennung pflanzlicher Stoffe' (30% CaO) ein. In der DüMV ist eine Toleranz von 2% CaO gestattet, so dass insgesamt 87 % der untersuchten Grobaschen die Anforderungen einhalten.

Die Verwertung von Holzaschen in der Landwirtschaft und im Garten ist aufgrund der Schwermetallbelastung der Aschen nicht oder nur sehr eingeschränkt möglich. Eine Verwertung von Holzaschen im Wald ist rechtlich nicht eindeutig geregelt.

Bei einer alleinigen Verwertung von Holzaschen im Wald müssen keine konkreten Anforderungen eingehalten werden.

Eine Schadstoffakkumulation ist zu vermeiden, eine Verwertung von Aschen im Wald ist grundsätzlich wünschenswert, weil Nährstoffe zurückgeführt werden. Aufbringungskonzepte werden derzeit entwickelt und eine Klärung der rechtlichen Situation wäre dringend notwendig.

7.2.11 Zusammenfassende Darstellung der Ergebnisse - Szenarien

Im Folgenden werden die Ergebnisse der einzelnen Module in verschiedenen praxisnahen Szenarien zusammengestellt und diese miteinander verglichen. Konstant gehalten wurde bei allen folgenden Szenarien die Entfernung zum Heiz- bzw. Heizkraftwerk. Generell ist festzuhalten, dass Holz ein dezentral wachsender Rohstoff ist und die Installation von Biomasseheiz(kraft)werken meist auch einen Ansatz bzw. eine Förderung der regionalen Wirtschaft enthalten sollte.

Ein Entfernungskreis mit einem Radius von 30 km entspricht immerhin einer Fläche von 2827 Quadratkilometer mit einer Waldfläche von etwa 99.000 ha und einem nach Bauer et al. (2006) geschätzten Waldenergieholzpotenzial von bis zu 1,06 Mio Schüttraummeter Waldhackgut.

Im Folgenden werden die Szenarien kurz beschrieben, sie unterscheiden sich vor allem im Grad der Professionalisierung sowie in der räumlichen Anordnung der zu bewältigenden Prozesse.

„Kleinprivatwald - Waldrestholz“

Mehr als die Hälfte des Waldes (54,2% (BWI 2)) in Bayern ist im Eigentum von 600.000-700.000 privaten und in der Mehrzahl kleinen Waldbesitzern. Diese Kleinwaldbesitzer bewirtschaften den Wald oft unregelmäßig, wenn Bedarf besteht, es die äußeren Umstände verlangen (z.B. Kalamitäten, …) und sie bewirtschaften ihre Wälder meist selbst und erledigen auch die meisten Arbeiten selbst. Die Fällung erfolgt in diesem Fall immer motormanuell

Im Kleinprivatwald wird die Nutzung von Waldrestholz zur thermischen Verwertung durchgeführt. Kronen und Schlagabraum der genutzten, bereits gefällten Bäume werden durch Schlepper an die Forststrasse vorgeliefert. Waldrestholz wird an der Waldstrasse durch mobilen Zapfwellenhacker gehackt und in einem landwirtschaftlichen Kipper (15Srm) geblasen. Es erfolgt dann der direkte Transport der Hackschnitzel ins Heizwerk, wobei die Entfernung 30 Kilometer beträgt.

„Profi - Waldrestholz“

Die Bewirtschaftung des Waldes durch „Profis“ meint vor allem die Arbeit der Forstunternehmen, die sich auf die Holzernte, die Holzbringung und oft auch die Vermarktung des Holzes spezialisiert haben. Zum Einsatz kommen mehr spezialisierte Maschinen, die Bedienung der Maschinen erfolgt in der Regel durch gut geschultes Personal. Die Produktivität ist dadurch in der Regel höher als im Szenario „Kleinprivatwald“.

Die Nutzung von Waldrestholz zur thermischen Verwertung durch ein Forstunternehmen ist hier betrachtet. Die Fällung des Holzes erfolgt entweder motormanuell, je nach Gelände, Baumarten und Baumdurchmessern, Die Kronen

und der Schlagabraum werden durch Forwarder an die Forststrasse vorgeliefert. Das Waldrestholz wird an der Waldstrasse durch einen mobilen Großhacker gehackt und direkt in einen Container-Lkw geblasen. Es erfolgt der direkte Transport der Hackschnitzel ins Heizwerk, wobei die Entfernung ebenfalls 30 Kilometer beträgt.

„Profi mit Zwischenlager im Wald“

Das Szenario ist dem vorangegangenen ähnlich, aber es erfolgt eine Zwischenlagerung des Hackgutes im Wald. Das bedeutet ein Sammeln der kleineren Mengen zur Optimierung des Transportes zum Heizwert oder als Zwischenpuffer, weil der Lagerplatz im Heizwerk zu klein ist. Die Verluste, die von der Lagerdauer sehr abhängig sind in diesem Szenario noch nicht berücksichtigt.

- Durchforstung und Nutzung von Waldrestholz zur thermischen Verwertung.
- Fällung und Aufarbeitung durch Harvester
- Rücken der Kronen und des Schlagabraums durch Forwarder an die Forststrasse
- Das Waldrestholz wird an der Waldstrasse durch mobilen Großhacker auf Lkw gehackt und in landwirtschaftlichen Kipper (15-40 Srm) geblasen.
- Transport der Hackschnitzel ins Zwischenlager (Entfernung 5 Kilometer)
- Umschlag der Hackschnitzel in Lkw-Zug mit Kran und anschließender Transport der Hackschnitzel ins Heizwerk, wobei die Entfernung wiederum 30 Kilometer beträgt.

„Profi mit Holzlogistik-Zentrum“

Durchforstung und Nutzung von Waldrestholz zur thermischen Verwertung. Fällung und Aufarbeitung durch Harvester. Rücken und Vortransport (10 Kilometer) der Kronen und des Schlagabraums durch Schlepper mit Rückewagen zum Holzlogistik-Zentrum. Das Waldrestholz wird dort durch mobilen Großhacker auf Lkw gehackt und direkt in Lkw-Züge geblasen, dann direkter Transport der Hackschnitzel ins Heizwerk, die Entfernung beträgt wieder 30 Kilometer.

„Feller-Buncher - Vollbaumnutzung“

Erstdurchforstung mit Nutzung von Vollbäumen zur thermischen Verwertung. Einschlag und Vorkonzentration der Vollbäume entlang der Rückegasse durch Harvester. Rückung der getrimmten Vollbäume durch Schlepper. Hacken durch mobilen Großhacker an der Waldstrasse, in Container Lkw geblasen. Abschließender Transport der Hackschnitzel ins Heizwerk. (30 km)

In Tabelle 34 sowie in Abbildung 69 sind die Ergebnisse zum Verbrauch an Primärenergie für alle Szenarien zusammengefasst dargestellt. Das Waldhackschnitzel-Sortiment „LH-30%“, reines Laubholz mit einem Wassergehalt der Hackschnitzel von 30%, stellt immer das günstigste Sortiment dar. Realistisch sind die beiden gemischten Sortiment, wobei hier deutlich der negative Einfluss des Wassergehaltes auf den notwendigen Energieeinsatz zu erkennen ist. Das aufgrund der geringen Dichte und des hohen Wassergehaltes schlechteste Sortiment ist das reine Nadelholzsortiment mit 50% Wassergehalt.

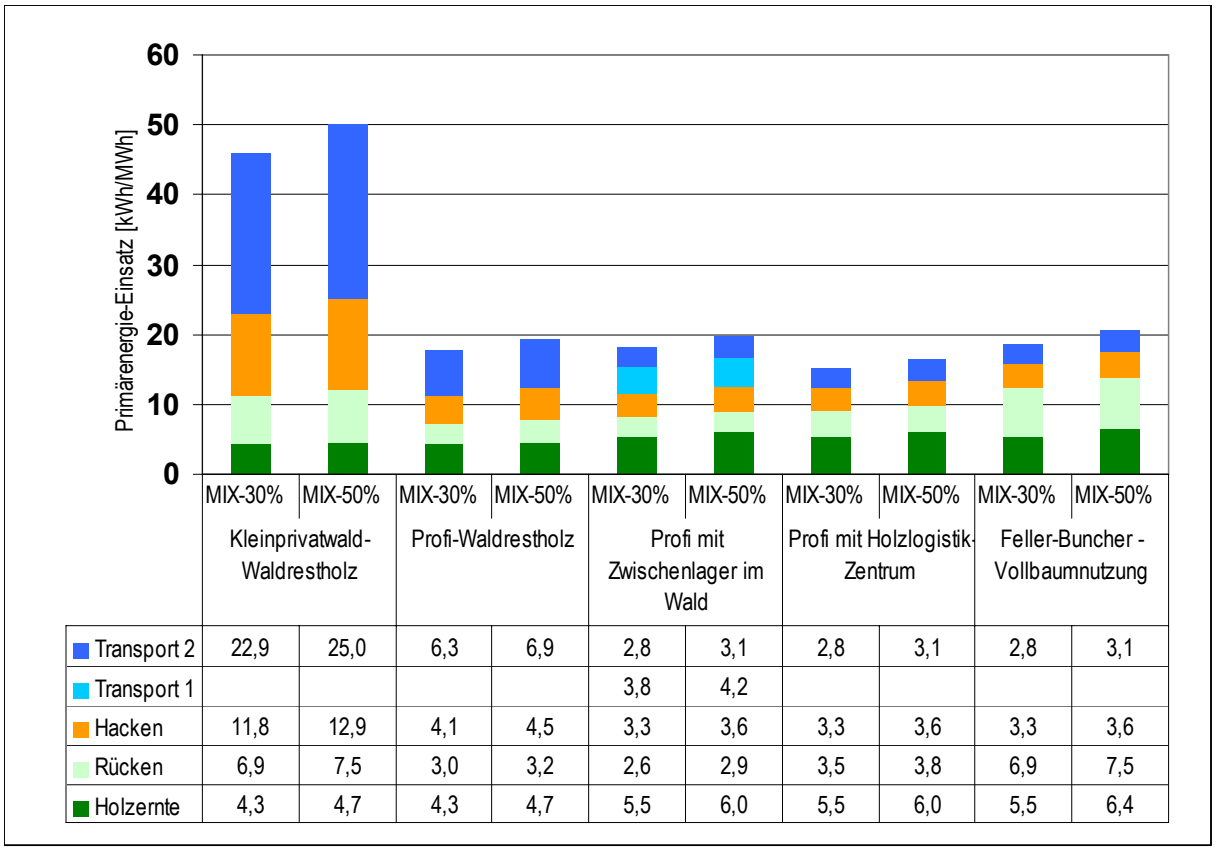
Tabelle 34: Einsatz von Primärenergie in den einzelnen Szenarien in Prozent de im jeweiligen Hackschnitzel-Sortiment enthaltenen nutzbaren Energie (H_u).

Szenario	LH-30% [% von H_u]	MIX-30% [% von H_u]	MIX-50% [% von H_u]	NH-50% [% von H_u]
Kleinprivatwald – Waldrestholz	**4,2**	**4,6**	**5,0**	**6,5**
Profi - Waldrestholz	**1,6**	**1,8**	**1,9**	**2,5**
Profi mit Zwischenlager im Wald	**1,8**	**1,8**	**2,0**	**2,5**
Profi mit Holzlogistik-Zentrum	**1,4**	**1,5**	**1,7**	**2,1**
Feller-Buncher - Vollbaumnutzung	**1,8**	**1,9**	**2,1**	**2,6**

Positiv wirkt sich die Produktivitätssteigerung in den stärker mechanisierten Verfahren aus, weshalb in der Variante mit Holzlogistik-Zentrum nur noch zwischen 1,4% und 2,1% der im Hackschnitzel enthaltenen Energie zur Aufarbeitung und den Transport zum Heizwerk aufgewendet werden müssen.

Etwas schlechter erscheint die Variante „Feller-Buncher“ allerdings muss hier berücksichtigt werden, dass es sich hier um eine Erstdurchforstung mit sehr kleinen BHD der zu entnehmenden Bäume handelt. Vor diesem Hintergrund und unter dem Aspekt der Mobilisierung von zusätzlichen Sortimenten ist dieser Energieeinsatz sehr positiv zu bewerten. Die in diesem Szenario ermittelten Werte passen gut zu den von RÖDL (2008) vorgelegten Energieaufwänden zur Holzproduktion in Kurzumtriebsplantagen. Für die Ernte und das Hacken werden bei RÖDL (2008), unter der Berücksichtigung des Wassergehaltes, etwa 1,0% des Energieinhaltes aufgewendet, hier werden für Harvester und Hacker zusammen von 0,8% bis 1,3% errechnet (Abbildung 69.

In allen Varianten, in denen ausschließlich Kronenrestholz verwendet wird und letzteres als ein Kuppelprodukt der Stammholznutzung zu sehen ist, könnte man auch die Fällung unberücksichtigt lassen, da dieser Energieeinsatz vielmehr dem Stammholz zuzurechnen ist. Aufgrund der unklaren und schwer abzuschätzenden mengenmäßigen Aufteilung von Kronenrestholz zu Stammholz wurde aber bewusst darauf verzichtet und gewissermaßen der „worst case“ angenommen.



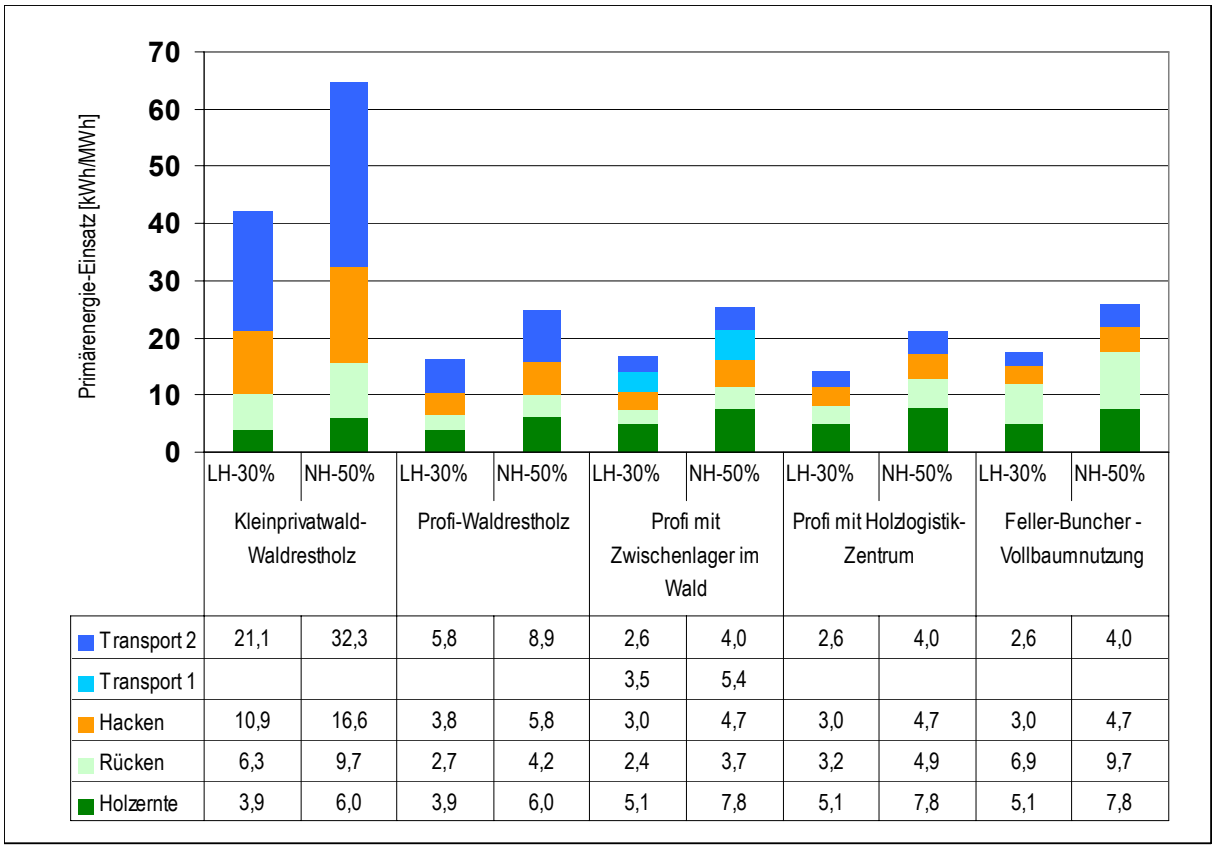
	MIX-30%	MIX-50%	MIX-30%	MIX-50%	MIX-30%	MIX-50%	MIX-30%	MIX-50%	MIX-30%	MIX-50%
	Kleinprivatwald-Waldrestholz		Profi-Waldrestholz		Profi mit Zwischenlager im Wald		Profi mit Holzlogistik-Zentrum		Feller-Buncher - Vollbaumnutzung	
Transport 2	22,9	25,0	6,3	6,9	2,8	3,1	2,8	3,1	2,8	3,1
Transport 1					3,8	4,2				
Hacken	11,8	12,9	4,1	4,5	3,3	3,6	3,3	3,6	3,3	3,6
Rücken	6,9	7,5	3,0	3,2	2,6	2,9	3,5	3,8	6,9	7,5
Holzernte	4,3	4,7	4,3	4,7	5,5	6,0	5,5	6,0	5,5	6,4

Abbildung 69: Einsatz von Primärenergie für die gemischten Waldhackschnitzel-Sortimente in den einzelnen Szenarien in kWh pro MWh (Hackschnitzel) dargestellt für die wesentlichen Prozesse. Deutlich wird der Einfluss des Wassergehaltes.

Die Variante „Kleinprivatwald“ fällt durch einen relativ hohen Energieeinsatz auf, allerdings muss auf die absoluten Zahlen hingewiesen werden und deutlich zu sehen ist hier der negative Einfluss der Hackschnitzeltransportes mittels Schlepper (mit Anhänger) über eine größere Strecke. Der landwirtschaftliche Schlepper ist in diesem Fall nicht sehr wirtschaftlich, wird aber in der Praxis sicherlich in diesem Entfernungsbereich noch eingesetzt werden, weil er einfach vorhanden und schnell verfügbar ist.

In Abbildung 70 wird der Einfluss der Holzarten-Zusammensetzung und des Wassergehaltes sehr deutlich. Besonders deutlich wird dies immer bei den Transporten, denn hier wird ein große Menge Wasser transportiert, was sicherlich nicht sinnvoll ist.

Zu Bedenken ist, dass vor allem beim Nadelholz die Lkw-Auslastung zurückgehen kann, weil aufgrund der geschütteten Volumina das Ladevolumen der begrenzende Faktor werden kann. Werden Hackschnitzel nach Volumen übernommen, was nach wie vor üblich ist, ist auch nicht davon auszugehen, dass beim Ladevorgang auf eine genügende Verdichtung geachtet wird. Aus der Sicht des Energieverbrauches zum Transport wäre das aber wünschenswert.



	Kleinprivatwald-Waldrestholz		Profi-Waldrestholz		Profi mit Zwischenlager im Wald		Profi mit Holzlogistik-Zentrum		Feller-Buncher - Vollbaumnutzung	
	LH-30%	NH-50%	LH-30%	NH-50%	LH-30%	NH-50%	LH-30%	NH-50%	LH-30%	NH-50%
Transport 2	21,1	32,3	5,8	8,9	2,6	4,0	2,6	4,0	2,6	4,0
Transport 1					3,5	5,4				
Hacken	10,9	16,6	3,8	5,8	3,0	4,7	3,0	4,7	3,0	4,7
Rücken	6,3	9,7	2,7	4,2	2,4	3,7	3,2	4,9	6,9	9,7
Holzernte	3,9	6,0	3,9	6,0	5,1	7,8	5,1	7,8	5,1	7,8

Abbildung 70: Einsatz von Primärenergie für die gemischten Waldhackschnitzel-Sortimente in den einzelnen Szenarien in kWh pro MWh (Hackschnitzel) dargestellt für die wesentlichen Prozesse. Besonders deutlich wird der Einfluss der Holzarten.

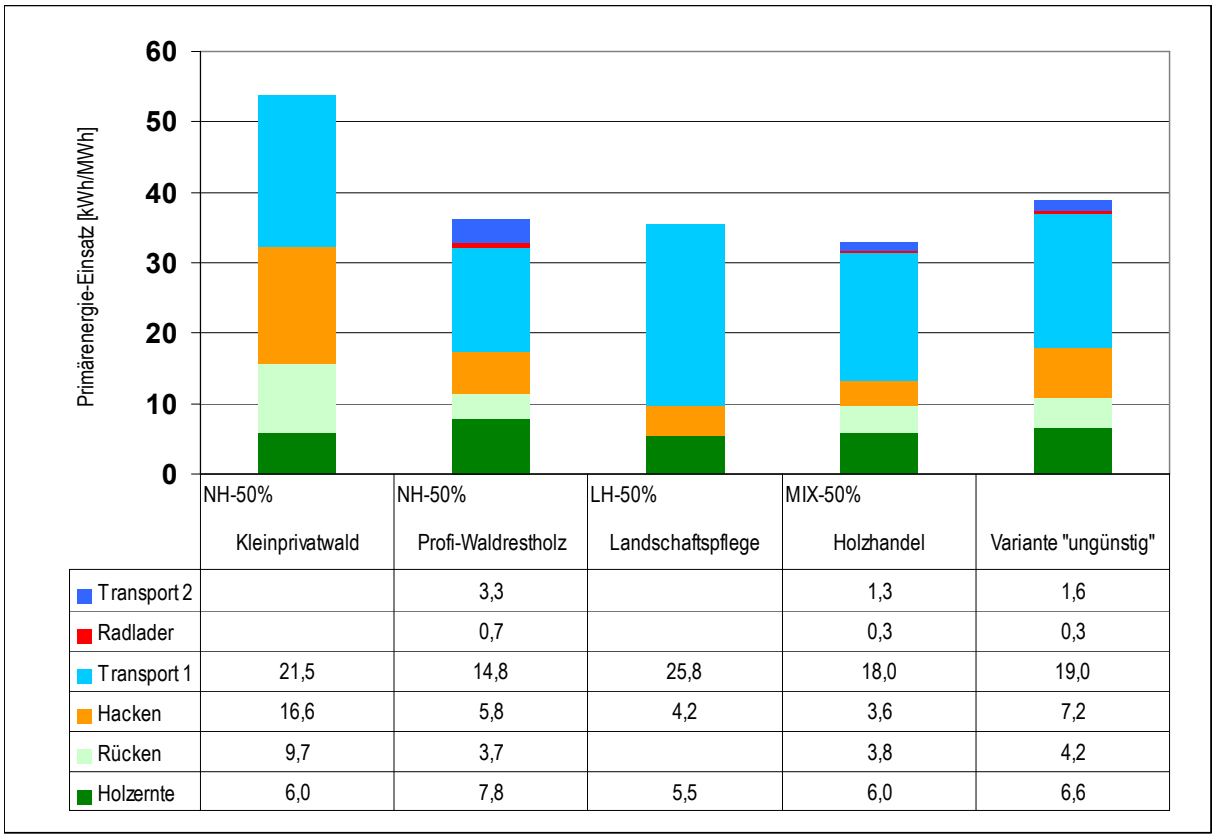
Die bislang angenommenen Entfernungen (30 km) erscheinen vor allem im oberen Leistungsbereich der Heizkraftwerke (>20 MW) als unrealistisch. Deshalb sollen nachfolgend zwei weitere Szenarien gerechnet werden, die einen günstigen und einen ungünstigen Fall abbilden.

Variante „ungünstig“

- Das Heizkraftwerk verfügt über einen geringen Lagerplatz am Kraftwerk und hat deshalb einen Zwischenlagerplatz in 10 Kilometer Entfernung. Dort ist ein Radlader stationiert, der die Ladetätigkeiten übernimmt. Der Transport erfolgt mit einer Spedition per Container-Lkw zum Werk (Auslastung 50%).
- Nur 20 % des Waldhackgutes (NH-50%) kommt aus einem Umkreis von 20 Kilometern aus dem Kleinprivatwald und wird von den Landwirten direkt zum Heizwerk geliefert
- 40% des Materials (NH-50%) wird von Forstunternehmern mittels Container-Lkw ins Zwischenlager geliefert, die Aufarbeitungskette entspricht der dem Szenario „Profi-Waldrestholz“; die Entfernung vom Wald zum Zwischenlager ist 50 Kilometer
- 20% des Materials (LH-50%) stammt aus der Landschaftspflege, wird an den Straßen direkt in Container gehackt und kommt aus einer Entfernung von durchschnittlich 100 Kilometern direkt zum Heizkraftwerk

- 20% des Materials (MIX-50%) kommt über den Holzhandel per Lkw-Zug, davon 10% direkt ins Werk und 10% ins Zwischenlager; die Aufarbeitungskette entspricht der dem Szenario „Profi-mit Holzlogistik-Zentrum“; die Entfernung vom Hackplatz zum Zwischenlager bzw. Werk ist 200 Kilometer.

In Abbildung 71 zeigen in der Säule ganz rechts die Ergebnisse für das sehr ungünstige, oben beschriebene Szenario, das trotzdem nur 3,9% der in den Waldhackschnitzeln enthaltenen Energie verbraucht.



	NH-50% Kleinprivatwald	NH-50% Profi-Waldrestholz	LH-50% Landschaftspflege	MIX-50% Holzhandel	Variante "ungünstig"
Transport 2		3,3		1,3	1,6
Radlader		0,7		0,3	0,3
Transport 1	21,5	14,8	25,8	18,0	19,0
Hacken	16,6	5,8	4,2	3,6	7,2
Rücken	9,7	3,7		3,8	4,2
Holzernte	6,0	7,8	5,5	6,0	6,6

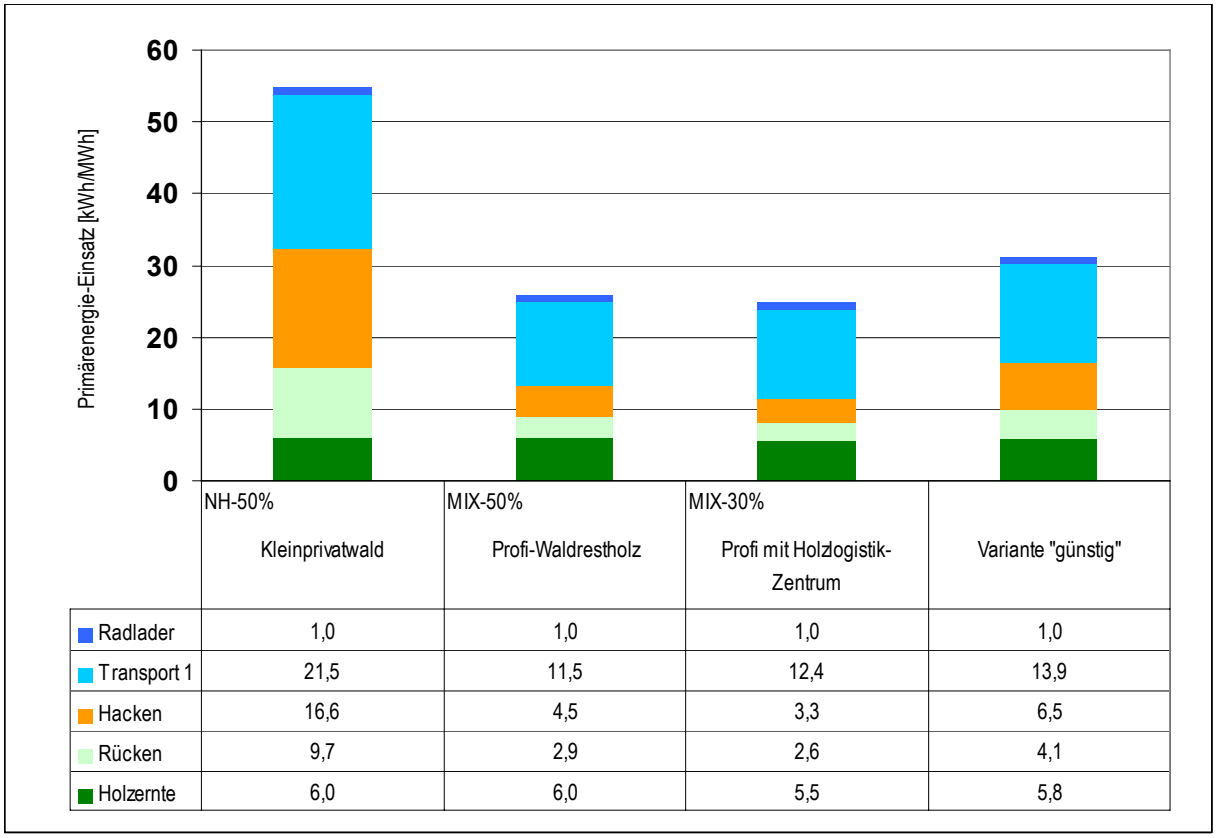
Abbildung 71: Einsatz von Primärenergie [kWh/MWh] für die Variante „ungünstig“ inklusiv der Beiträge der einzelnen Sortimentsanteile

Variante „günstig“

- Das Heizkraftwerk verfügt über einen ausreichend großen Lagerplatz am Kraftwerk. Dort ist ein Radlader stationiert, der die Ladetätigkeiten übernimmt. Der Transport erfolgt mit einer Spedition per Lkw-Zug (Auslastung 50%).
- Nur 20 % des Waldhackgutes (NH-50%) kommt aus einem Umkreis von 20 Kilometern aus dem Kleinprivatwald und wird von den Landwirten direkt zum Heizwerk geliefert
- 40% des Materials (MIX-50%) wird von Forstunternehmern mittels Container-Lkw ins Zwischenlager geliefert, die Aufarbeitungskette entspricht der dem Szenario „Profi-Waldrestholz“; die Entfernung vom Wald zum Zwischenlager ist 50 Kilometer

- 40% des Materials (MIX-30%) stammt von Forstunternehmen, die dem Szenario „Profi mit Holzlogistik-Zentrum“ entsprechend arbeiten. Im Holzlogistik-Zentrum wird das Material vorgetrocknet und kommt mit einem Wassergehalt von 30% zum Heizkraftwerk. Die Entfernung beträgt immerhin noch 150 Kilometer.

In Abbildung 72 sind die Ergebnisse der Variante „günstig“ dargestellt. Mit 3,12% des Energiegehaltes zeigt diese Variante die Grenzen der Optimierung auf der einen Seite, aber zusammengefasst auch die insgesamt gute Energiebilanz der Waldhackschnitzel. Werden statt der 150 Kilometer nur 100 Kilometer für die 40% des Sortiments MIX-30% angesetzt reduziert sich der Energieeinsatz auf 2,96%.



	NH-50% Kleinprivatwald	MIX-50% Profi-Waldrestholz	MIX-30% Profi mit Holzlogistik-Zentrum	Variante "günstig"
Radlader	1,0	1,0	1,0	1,0
Transport 1	21,5	11,5	12,4	13,9
Hacken	16,6	4,5	3,3	6,5
Rücken	9,7	2,9	2,6	4,1
Holzernte	6,0	6,0	5,5	5,8

Abbildung 72: Einsatz von Primärenergie [kWh/MWh] für die Variante „günstig“ inklusiv der Beiträge der einzelnen Sortimentsanteile

7.3 Bewertung der Ergebnisse

Waldhackschnitzel sind ein Kuppelprodukt der nachhaltigen Forstwirtschaft, das Hauptprodukt ist die Produktion von Holz zur stofflichen Verwertung (Stammholz). Das Potenzial zur Gewinnung von Waldhackschnitzeln ist, betrachtet man den Altersklassenwald, über die Zeit der Bestandesentwicklung unterschiedlich aber mehrmals vorhanden.

Immer dann, wenn bei der Pflege des Waldes (z.B. Erstdurchforstung) aus ökonomischer Sicht kein stofflich verwertbares Material anfällt, kann es durchaus ökonomisch interessant sein Energieholz (z.B. Brennholz oder Waldhackschnitzel) zu gewinnen. Bei höheren Bestandesaltern können in der Regel die Kronen zusätzlich

genutzt und entnommen werden, wobei die Frage nach dem Zopfdurchmesser (Grenze zwischen stofflicher und energetischer Verwertung) zu stellen ist. Wurzelstöcke bilden ein sicher untergeordnetes Potenzial dar, da sie nur im Fall einer Rodung oder eines Kahlschlages genutzt werden können.

In Plenterwäldern bzw. plenterwaldartig genutzten Wäldern bleibt ausschließlich die Nutzung der Kronenresthölzer übrig. Aus der Sicht der ökologischen Bewertung sind zwei Problemfelder zu beachten:

A. Nutzungkonflikt: Naturnähe | Totholz

Eine Intensivierung der Waldwirtschaft durch die Nutzung sämtlicher anfallender Biomasse kann durchaus zu Nutzungskonflikten führen. Naturnähe und Totholzanteile sind immer dann gefährdet, wenn die Nutzung der Energieholzpotenziale die Ziele des Naturschutzes gefährdet.

Die eventuellen Qualitätsverluste sind schwer zu quantifizieren müssen aber zukünftig, vor allem bei steigender Nachfrage in die Diskussion einfließen.

B. Nährstoffverluste durch Intensivierung der Nutzung

Die Nutzung der Kronenresthölzer sowie die Vollbaumnutzung exportiert, wie oben gezeigt wurde deutlich mehr Nährstoffe als die reine Nutzung von Stammholz. In der Rinde, dem Reisig und vor allem in den Blättern sind die Nährelementgehalte deutlich höher.

Eine Rückführung der Nährstoffe über die Ausbringung eines Teils der Aschen ist in der Diskussion. Hier sind nach wie vor viele Fragen offen. Die rechtliche Situation ist unklar, aber auch die Frage, ob es sinnvoll ist die Aschen, die teilweise doch zu hohe Gehalte an Schwermetallen aufweisen, in das Waldökosystem auszubringen. Die Definition der Aschen aus „naturbelassenen“ Hölzern und Waldhackschnitzeln ist nicht Ziel führend, denn gerade Hölzer aus der Landschaftspflege (entlang der Straßen geerntet) bringen, obwohl naturbelassen, doch erhebliche Probleme mit sich.

Aus der Sicht der Ökobilanzierung müssen die Verluste an Nährelementen negativ betrachtet werden, konnten aber im Rahmen dieses Teilprojektes nicht quantifiziert werden. Andererseits könnte die Rückführung geeigneter Aschen in das System zu Gutschriften führen, aber auch hier konnten keine qualifizierten Zahlen gefunden werden. Hier sei auf das vom FNR geförderte Projekt „Organo-Asche-Presslinge als zukunftsorientiertes Düngemittel - Produktionsoptimierung, ernährungs-kundliches Potential und Machbarkeitsstudie“ hingewiesen, dass sich ausschliesslich mit diesen Fragestellungen auseinandersetzt.

In jedem Fall muss eine Nutzung von Kronenresthölzern oder Vollbäumen zu energetischen Zwecken vor dem Hintergrund der jeweiligen Standorts-verhältnisse gesehen werden. Dort wo das Nährstoffangebot des Standortes ungenügend ist muss auf diese Art der Nutzung aus ökologischer sicht verzichtet werden. (Vgl. ETTL 2007)

Inwieweit die Zwischenlagerung von Material, welche in erster Linie der Trocknung dient auch zur Verminderung der Nährstoffexporte beiträgt, konnte nicht geklärt werden.

7.3.1 Einsatz von Primärenergie

Bei der Betrachtung des Energieeinsatzes zur Bereitstellung der Waldhackschnitzel wurde auf eine Allokation der Verbräuche im Modul Fällung auf Stammholz und Kronenrestholz verzichtet.

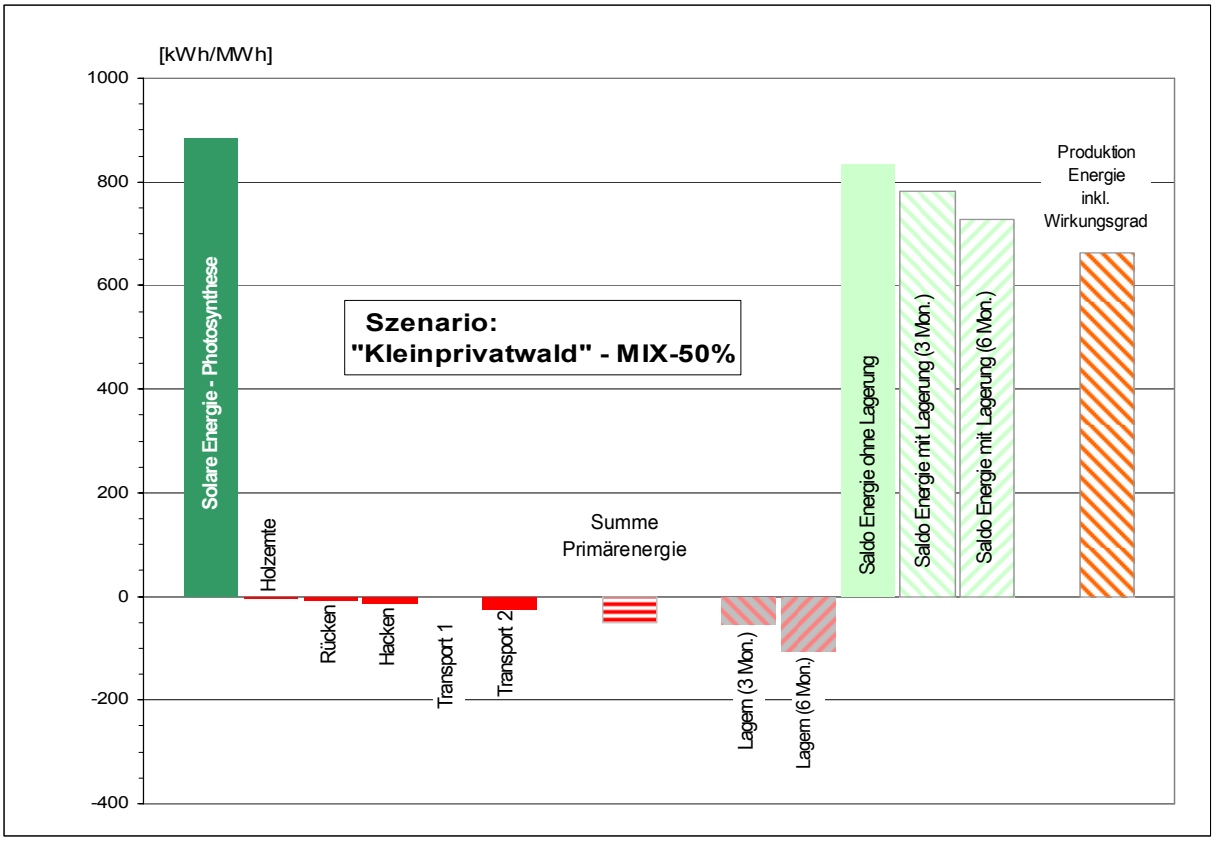


Abbildung 73: Einsatz von Primärenergie [kWh] pro MWh bereitgestellter Brennstoff (MIX-50%) für das Szenario „Kleinprivatwald – Waldrestholz“. Dargestellt sind auch die im Holz gespeicherte, technisch nutzbare Sonnenenergie (H_u) sowie die Verluste durch Lagerung. Der Wirkungsgrad des Kraftwerkes wurde mit 80% angenommen.

Das Modul „Biologische Produktion“ wird in der Abbildung 73 durch den Balken „Solare Energie – Photosynthese“ vertreten. Die Energiemenge entspricht dem Heizwert (H_u) und berücksichtigt den Wassergehalt. Auffallend ist der sehr geringe Energieeinsatz, der im Verhältnis zur gespeicherten Energie für die Bereitstellung der Waldhackschnitzel bis zum Heiz(kraft)werk notwendig ist.

Sehr deutlich wird auch der Verlust durch Lagerung, es wurde ein mittlerer Verlust von 2% der Trockenmasse pro Monat gerechnet, was bei einem Wassergehalt von 50% ein realistischer Wert ist. Bereits bei einer Lagerung von nur drei Monaten ist der Verlust höher als die gesamte Energie, die zur Bereitstellung aufgewendet wurde.

Auf der rechten Seite (rote Säule) ist die Menge an Energie, die in Form von Wärme und Strom gewonnen werden kann, wenn der Wirkungsgrad der Feuerungsanlage bezogen auf den eingesetzten Brennstoff 80% beträgt. Nicht berücksichtigt wurde eine eventuelle Rauchgaskondensation, die nur in größeren Anlagen möglich ist.

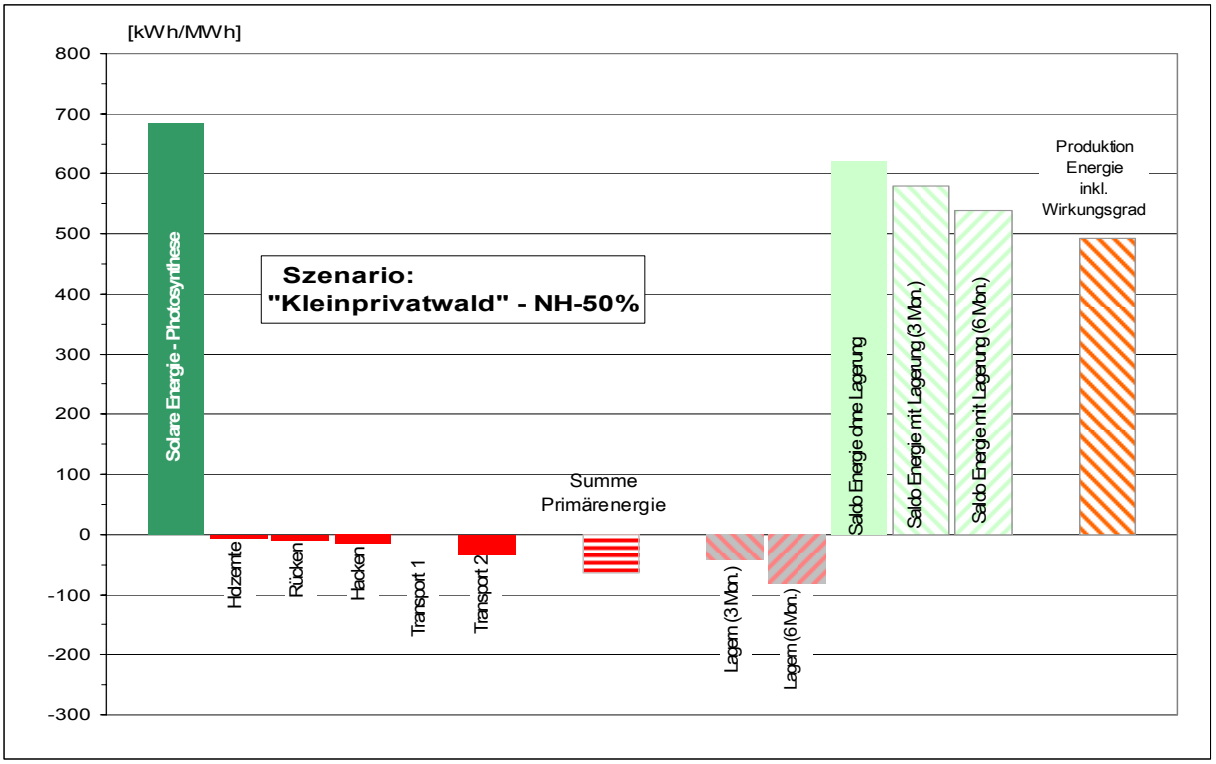


Abbildung 74: Einsatz von Primärenergie [kWh] pro MWh bereitgestellter Brennstoff (NH-50%) für das Szenario „Kleinprivatwald – Waldrestholz“. Dargestellt sind auch die im Holz gespeicherte, technisch nutzbare Sonnenenergie (H_u) sowie die Verluste durch Lagerung. Der Wirkungsgrad des Kraftwerkes wurde mit 80% angenommen.

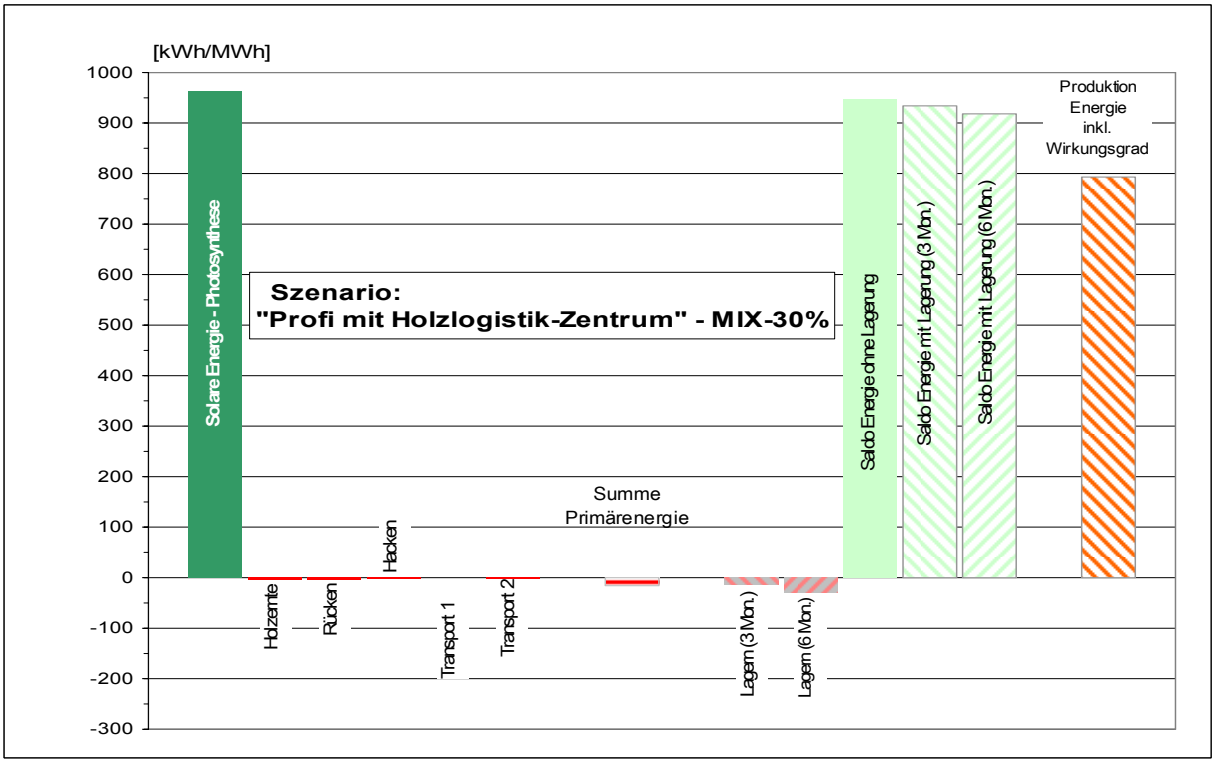


Abbildung 75: Einsatz von Primärenergie [kWh] pro MWh bereitgestellter Brennstoff (MIX-30%) für das Szenario „Profi – mit Holzlogistik-Zenztrum“. Dargestellt sind auch die im Holz gespeicherte, technisch nutzbare Sonnenenergie (H_u) sowie die Verluste durch Lagerung. Der Wirkungsgrad des Kraftwerkes wurde mit 80% angenommen.

Abbildung 74, Abbildung 75 und Abbildung 76 zeigen Variationen der Bereitstellungsketten bzw. der unterschiedlichen Sortimente an Waldhackschnitzeln. Aufgrund des Maßstabes sind die Energieeinsätze (Abbildung 75) kaum noch sichtbar.

Abbildung 74 zeigt den Einfluss der Holzart. Reines Nadelholz mit einem hohen Wassergehalt stellt gewissermaßen den „schlechtesten Fall“ dar, wenn das Hackgut dann noch in kleinen Anlagen ohne Rauchgaskondensation eingesetzt wird. Hier wird die Notwendigkeit der Trocknung des Materials sichtbar, wodurch die Effizienz des gesamten Systems deutlich verbessert werden könnte. Deutlich wird aber auch in diesem Fall, die eher untergeordnete Rolle der Bereitstellungskette am Gesamtergebnis. Vermeiden von Lagerverlusten durch Trocknung und Erhöhung des Heizwertes durch Trocknung, kurz eine deutliche Verbesserung der Brennstoffqualität, bringt in diesem Szenario eine stark verbesserte Bilanz.

Der positive Einfluss des reduzierten Wassergehaltes kann sehr gut in Abbildung 75 gezeigt werden. Eine Zwischenlagerung über ein Holzlogistik-Zentrum verbessert die Energiebilanz durch eine Vorkonzentration des Materials, die Verkürzung der „Schleppertransporte“ und die Möglichkeit einer potenziellen Vortrocknung.

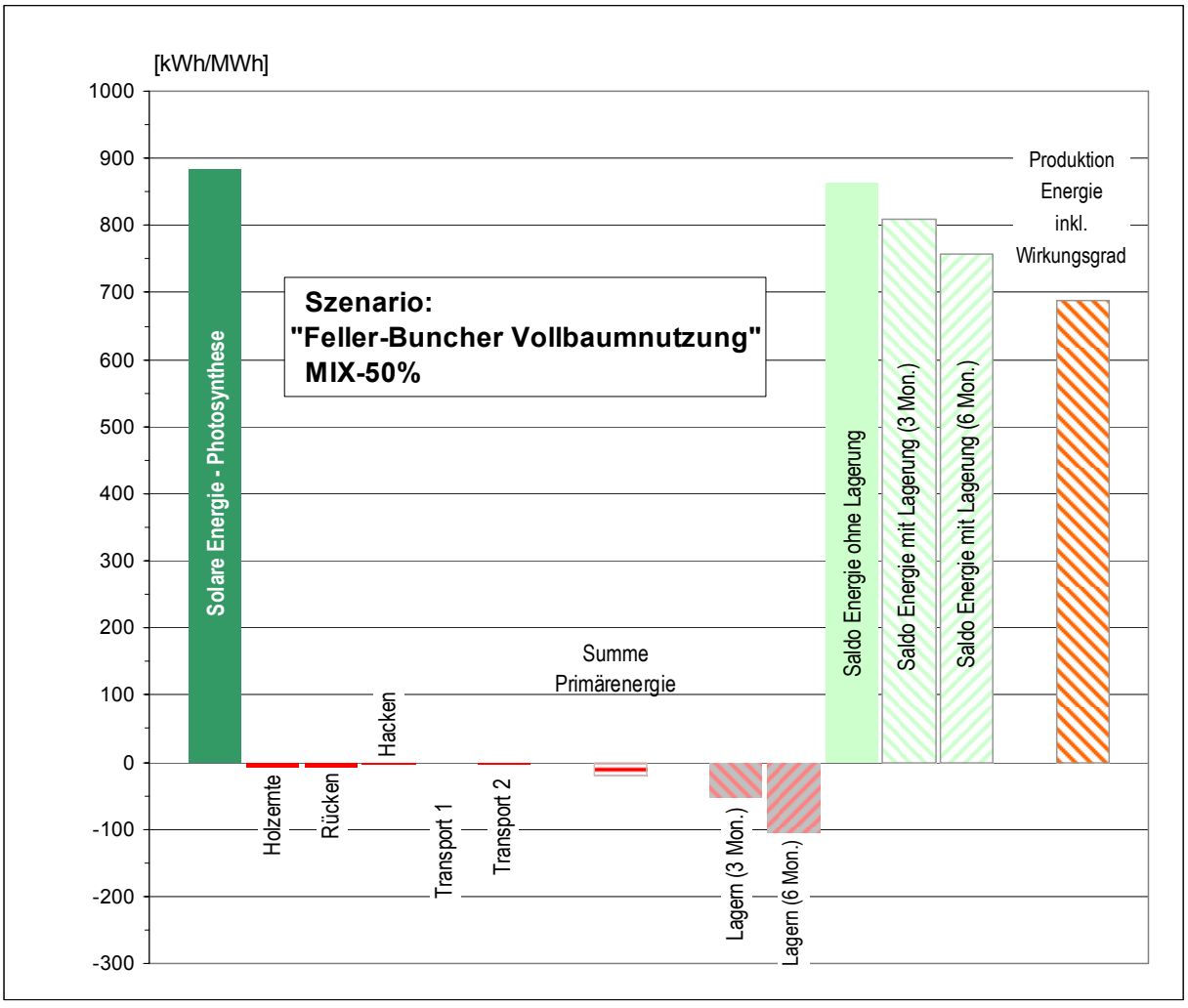


Abbildung 76: Einsatz von Primärenergie [kWh] pro MWh bereitgestellter Brennstoff (MIX-50%) für das hoch mechanisierte Szenario „Feller-Buncher - Vollbaumnutzung“. Dargestellt sind auch die im Holz gespeicherte, technisch nutzbare Sonnenenergie (H_u) sowie die Verluste durch Lagerung. Der Wirkungsgrad des Kraftwerkes wurde mit 80% angenommen.

Die Variante „Feller-Buncher – Vollbaumnutzung“ in Abbildung zeigt, dass selbst eine hoch mechanisierte Variante der Bereitstellung durch die hohe Produktivität trotz sehr geringer Baumdurchmesser und eines sehr ungünstigen Stück-Masse-Verhältnisses mit einer sehr guten Energiebilanz aufwarten kann.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass alle Bereitstellungsketten über sehr günstige Energiebilanzen verfügen. Eine Optimierung der Prozesse und Abläufe unter wirtschaftlichen Aspekten wirken sich in jedem Fall auch positiv auf die Energiebilanz aus, wenn auch nur noch sehr gering. Sehr viel größer sind die Potenziale die Energiebilanzen zu verbessern im Bereich der Lagerung, der Brennstoffqualität sowie angepassten Verbrennungsqualität.

Kleinere Anlagen sind in der Regel auf geringere Wassergehalte ausgelegt, werden aber dennoch oft, das haben die Untersuchungen und Erhebungen gezeigt, mit schlechterer Brennstoffqualität betrieben. Das führt zu höheren Lagerverlusten, zu einer schlechteren Verbrennung, zu höheren Emissionswerten und geringeren Wirkungsgraden.

Gravierend wird die Energiebilanz immer dann verschlechtert, wenn „stromgeführte“ Heizkraftwerke im Sommer nicht genügend Wärmeabnehmer haben und dann die Wärme ungenutzt bleibt. Der Gesamtwirkungsgrad dieser Anlagen ist dann deutlich niedriger, was durch eine Optimierung der Bereitstellung niemals ausgeglichen werden kann. Derartige Anlagen nutzen das Potenzial des nachwachsenden Energieträgers Holz bei weitem nicht aus und sind oft nur aufgrund der staatlichen Förderung wirtschaftlich. Hier liegt ökologisches Optimierungspotenzial.

7.3.2 Treibhauspotenzial (GWP_{100})

In der Wirkungskategorie Treibhauspotenzial (GWP100) werden die Emissionen zusammengefasst, die einen Beitrag zur Klimaerwärmung beitragen. Im Fall der Bereitstellungskette von Waldhackschnitzeln, die derzeit vor allem durch den Einsatz fossiler Treibstoffe für Motorsägen, Harvester, Hacker und Transportmittel dominiert wird, sind die wichtigsten Emissionen CO_2, CH_4 und N_2O. Die Gewichtung und Berechnung erfolgte nach der Methode der IPCC (2007).

In Abbildung 77 sind die Beiträge der einzelnen Prozessschritte zum GWP_{100} für das Szenario „Kleinprivatwald“ (MIX-50%) aufgezeigt. Alle Werte beziehen sich auf den Energiegehalt von einer MWh bereitgestellter Energie in Form von Hackschnitzeln.

Die Gutschrift zu Beginn (grüne Säule, links) resultiert aus der Holzproduktion durch Photosynthese und zeigt diejenige Menge an CO_2, die in den Hackschnitzel mit einem Wassergehalt von 50% festgelegt wurde. Deutlich zu sehen ist der sehr geringe Beitrag der einzelnen Prozessschritte, die im letzten Balken „Summe-GWP_{100}“ aufsummiert wurden.

Natürlich wird bei der Verbrennung der Hackschnitzel im Heiz- bzw. im Heizkraftwerk der gesamte im Hackschnitzel gebundene Kohlenstoff oxidiert und gasförmig als CO_2 freigesetzt. In Summe ergibt sich daraus ein GWP_{100}, welches genau der Menge in Balken „Summe-GWP_{100}“ entspricht.

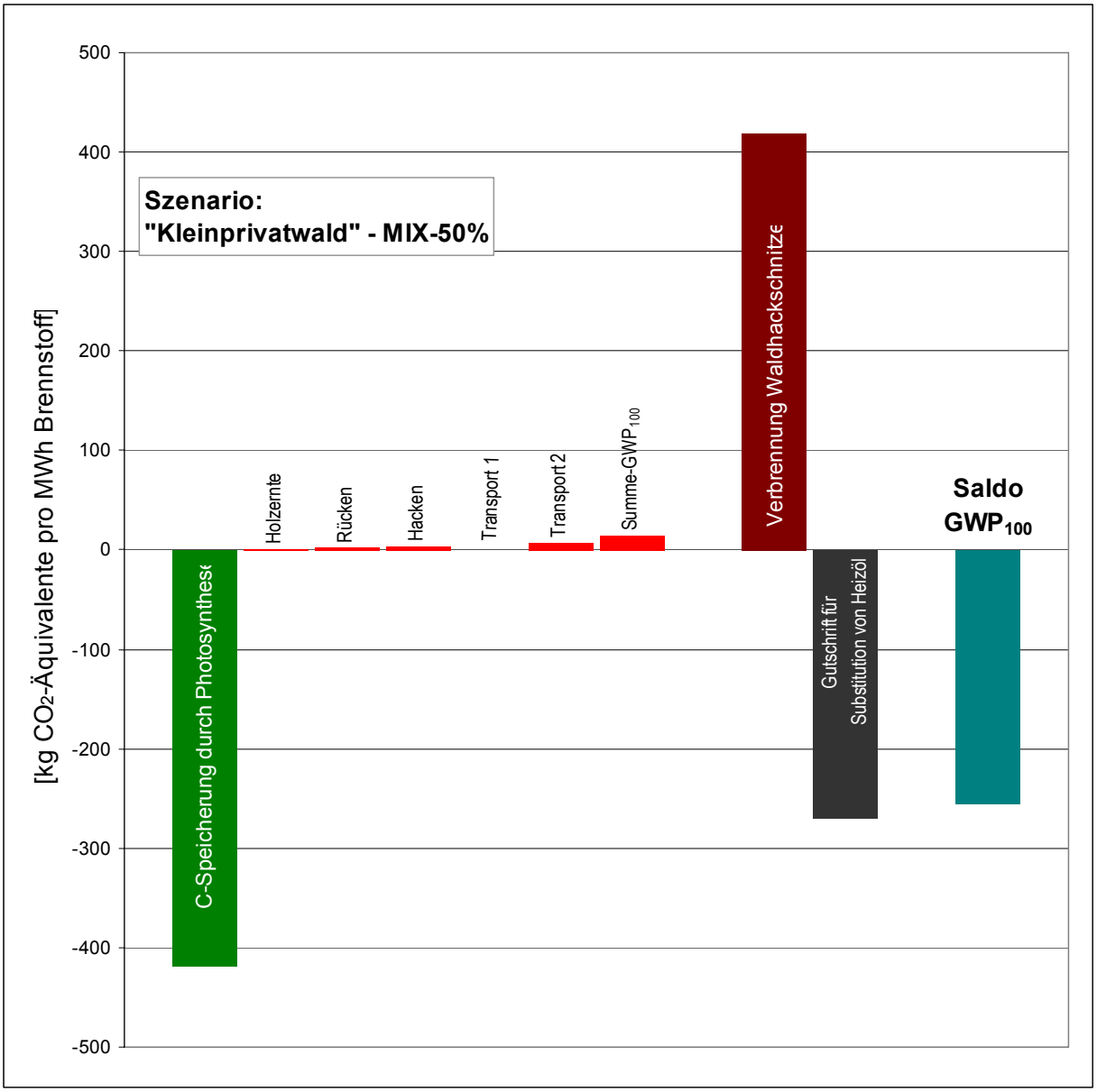


Abbildung 77: Treibhauspotenzial (GWP100) dargestellt für das Szenario „Kleinprivatwald—Waldrestholz“. Bei der Verbrennung von Holz wird der im Holz festgelegte Kohlenstoff wieder freigesetzt, allerdings substituiert die Energie aus Biomasse diejenige aus fossilen Energieträgern (Heizöl)

Durch die Umstellung von fossilen auf regenerative Energieträger ergibt sich allerdings ein Substitutionseffekt. Der Umwelt werden durch den Einsatz der Waldhackschnitzel diejenigen Emissionen aus den fossilen Energieträgern gewissermaßen erspart. (Öl | Gas). Es wird also eine Gutschrift gegeben (grauer Balken), die in dieser Grafik derjenigen CO_2-Menge entspricht, welche durch die vollständige Oxidation des Kohlenstoffes im Heizöl freigesetzt wird. Die klimarelevanten Emissionen aus der Vorkette des Heizöl sind in diesem Fall bewusst nicht berücksichtigt, da das Heizöl ja nicht tatsächlich eingesetzt wird. Als Ergebnis (Saldo GWP_{100}) ergibt sich dann ein negatives GWP_{100}, was aus Sicht des Klimaschutzes natürlich positiv zu bewerten ist.

Dieses Ergebnis zeigt, dass Holz als Energieträger keineswegs CO_2-neutral ist, denn es müssen die Substitutionseffekte berücksichtigt werden. Derzeit werden diese nicht betrachtet.

Abbildung 78 zeigt die Ergebnisse für das gleiche Szenario, aber für Nadelholz mit einem Wassergehalt von 50%.

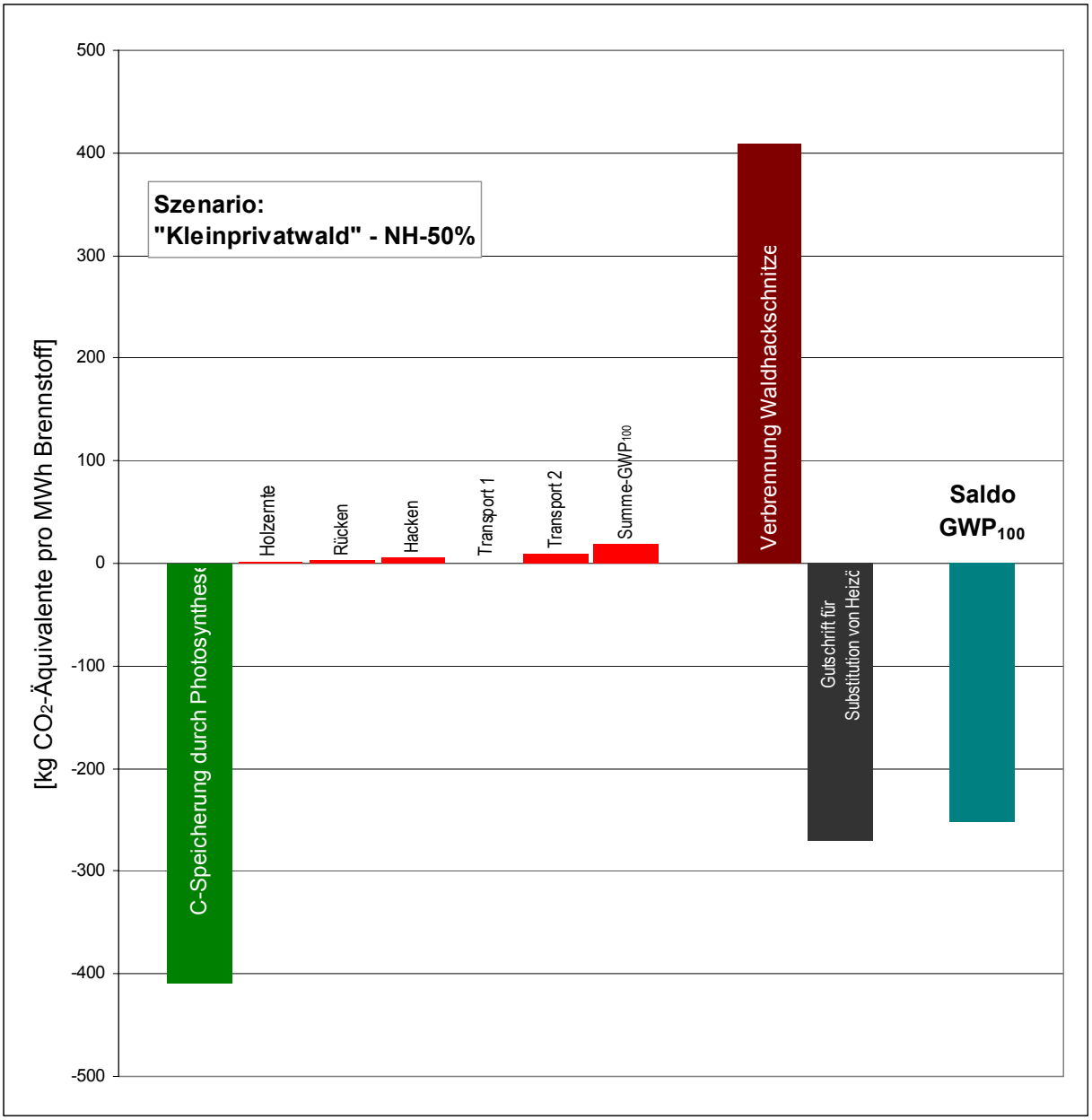


Abbildung 78: Treibhauspotenzial (GWP100) dargestellt für das Szenario „Kleinprivatwald—Waldrestholz“. Bei der Verbrennung von Holz wird der im Holz festgelegte Kohlenstoff wieder freigesetzt, allerdings substituiert die Energie aus Biomasse diejenige aus fossilen Energieträgern (Heizöl)

In der derzeitigen Klimadiskussion werden die oben beschriebenen Potenziale der Energiesubstitution und deren Auswirkung auf die Kohlenstoffbilanzen, wie sie auch BETZ et al. (2002) beschrieben haben nicht berücksichtigt.

Die Frage um die Nutzungskaskade von Holz kann aber ohne die Betrachtung der Kohlenstoffspeicherpotenziale über die Zeit sowie die Berücksichtigung der Potenziale zur Material- und | oder Energiesubstitution nicht beantwortet werden.

7.3.3 Fazit aus der Sicht der ökologischen Bewertung

- Die Bereitstellung von Waldhackschnitzeln verfügt bereits heute über eine sehr hohe Energieeffizienz. Eine Erhöhung der Produktivität führt auch zu einer Verbesserung der Energiebilanzen.
- Transporte verschlechtern die Energiebilanzen. Je größer die Entfernung umso höher der Energieverbrauch, diese Aussage stimmt nur dann, wenn das Transportmittel dasselbe ist. In der Regel werden aber für größere Entfernungen leistungsfähigere Transportsysteme eingesetzt.
- Heizkraftwerke im oberen Leistungsbereich (>20MW) sollten über einen Gleisanschluss verfügen, denn die Transportentfernungen werden sich aufgrund der steigenden Dichte der Kraftwerke gerade für diese Werke erhöhen. Eine leistungsfähige Bahnlogistik ist derzeit in Entwicklung, sie verbessert die Energiebilanzen.
- Brennstoffqualität und Wassergehalt haben einen großen Einfluss auf die Ökobilanz, er ist sehr viel größer als derjenige der Bereitstellungslogistik.
- Unsachgemäße Lagerung der Waldhackschnitzel führt sehr schnell zu hohen Verlusten und zu deutlich schlechteren Energiebilanzen.
- Wärmegeführte Heizwerke und Heizkraftwerke haben bessere Gesamtwirkungsgrade als stromgeführte und damit auch eine bessere Ökobilanz. Der Wirkungsgrad der Feuerungsanlage beeinflusst die Ökobilanz ebenfalls sehr viel stärker als die Bereitstellungskette.
- Die Nährstoffverluste im Wald sind in jedem Fall zu minimieren, eine Rückführung der Nährelemente durch Ausbringung von Aschen ist derzeit in Diskussion, hier besteht bezüglich der Ökobilanz noch Forschungsbedarf.
- Die Bewertung des Nutzungskonfliktes durch zukünftige Intensivierung ist derzeit mit der Methode der Ökobilanzierung nicht befriedigend zu lösen. Die Ansätze zur Wirkungskategorie „Naturraumbeanspruchung“ sind in Diskussion, hier müssen zusätzlich auch andere Methoden der „Zielfindung“ und „Risikoabwägung“ eingesetzt werden.
- Die zukünftig steigende Nachfrage nach Energie aus regenerativen Quellen kann zu Verschiebungen der Anteile der stofflichen und energetischen Nutzung von Holz führen. Die höchstmögliche Effizienz durch die kaskadische Nutzung des Holzes ist anzustreben. Die staatliche Förderung der Nutzung von Waldhackschnitzeln ist zu hinterfragen. Es besteht weiterer Forschungsbedarf über Lebenswegbilanzen die ökologisch optimalen Nutzungswege zu finden.
- Die Effekte der Energiesubstitution auf die Kohlenstoffbilanzen sind nach wie vor nicht berücksichtigt.

8 Schlussfolgerungen

Zusammenfassend lassen sich aus den drei Projektbausteinen folgende Schlussfolgerungen ziehen:

Die Prozessketten zeichnen sich aufgrund der unterschiedlichen Heizwerksgrößen und unterschiedlichen Organisationsformen durch eine große Vielfalt aus. Die Kosten-Erlössituation bei der Bereitstellung von Waldhackschnitzel ist „angespannt“ und somit ist weiterhin eine Optimierung der Bereitstellungskette notwendig. Die Qualität der Waldhackschnitzel wird an Bedeutung gewinnen. Die Prozesskette gilt es diesbezüglich sowohl bei der Bereitstellung im Wald als auch im Heizwerk anzupassen.
Klare Grundsätze durch den für die Versorgung von Waldhackschnitzel verantwortlichen Akteur an alle an der Prozessbeteiligten können einen Beitrag zu Verbesserung der Kosten-Erlössituation als auch der Waldhackschnitzelqualität leisten. Diese Vorgaben bieten auch die Grundlage für die Einführung eines Qualitätsmanagementsystems.
Für eine zuverlässige Versorgung mit Waldhackschnitzel ist es zielführend, den Brennstoffproduzenten (Waldbesitz) eng einzubinden. Dies kann durch langfristige Verträge oder Beteiligung des Waldbesitzes am Heiz(kraft)werk geschehen. Aus Sicht der Heizwerksbetreiber (zumindest bei den nur lokal bis regional aktiven) erscheint es sinnvoll, nicht zu tief in die Prozesskette „Bereitstellung von Waldhackschnitzel“ einzugreifen, sondern vielmehr auf Kooperationen mit Waldbesitzern, deren Zusammenschlüsse oder Hackerunternehmer zu setzen.

Die Feller-Buncher-Technologie kann einen Beitrag zur effizienten Pflege bislang zurückgestellter Flächen leisten. Daraus lassen sich für die Bereitstellung von Waldhackgut neue Rohstoffquellen erschließen. Unter gewissen Rahmenbedingungen sind kostendeckende Einsätze auch in extrem stückmassearmen Beständen möglich. Eine reine Jungbestandpflege gibt es jedoch nicht zum Nulltarif. Die Pflege sollte jedoch als Investition in Bestandesstabilität und –qualität und damit als Investition in die Zukunft gesehen werden. Weiterer Forschungsbedarf besteht insbesondere für den Einsatz in der Lichtraumprofilpflege, in Folgebeständen von Kalamitätsflächen, in Laubholzjungbeständen und in Energieholzplantagen.
Vollbaumverfahren führen zu einem signifikanten Entzug von Nährstoffen. Darüber hinaus ist beim fehlenden Anlegen einer „Reisigmatratze“ von einem gesteigerten Risiko von Bodenschäden auszugehen. Um Bestandesschäden zu vermeiden, sollten gerade die Maßnahmen in jungen Waldbeständen außerhalb der Saftzeit stattfinden. Der Zeitpunkt des Eingriffs hat wesentlichen Einfluss auf das Risiko von Bestandesschäden und die Qualität des erzeugten Hackgutes.
Bezüglich der Wahl des Aggregattyps, der Trägermaschine und des Arbeitsverfahrens kann kein Patentrezept ausgegeben werden. Wechselnde Hiebseigenschaften wie Brusthöhendurchmesser oder Eingriffsstärke beeinflussen die Produktivitäts- und Kostenwerte sehr stark und sind dementsprechend zu berücksichtigen.
Die derzeitige Situation der Bereitstellungslogistik bietet Verbesserungspotenzial und verursacht teilweise unnötige Kosten und Qualitätsverluste. EDV gestützte Lagermanagementsysteme sind vorhanden und könnten einen Beitrag zur Optimierung leisten.

Die Produktentwicklung im Bereich der Forsttechnik zeigt eindeutig die zunehmende Bedeutung der Energieholzbereitstellung auf. Innovation heißt dabei nicht zwangsläufig Verbesserung des Status-quo. Dennoch sollte die dynamische Entwicklung auf dem Sektor der Biomasselogistik von den Akteuren in der Bereitstellungskette verfolgt werden.

Die Bereitstellung von Waldhackschnitzeln verfügt bereits heute über eine sehr hohe Energieeffizienz. Eine Erhöhung der Produktivität führt auch zu einer Verbesserung der Energiebilanzen. Transporte verschlechtern die Energiebilanzen. Je größer die Entfernung umso höher der Energieverbrauch, diese Aussage stimmt nur dann, wenn das Transportmittel dasselbe ist. In der Regel werden aber für größere Entfernungen leistungsfähigere Transportsysteme eingesetzt. Brennstoffqualität und Wassergehalt haben einen großen Einfluss auf die Ökobilanz, er ist sehr viel größer als derjenige der Bereitstellungslogistik. Unsachgemäße Lagerung der Waldhackschnitzel führt sehr schnell zu hohen Verlusten und zu deutlich schlechteren Energiebilanzen.

Wärmegeführte Biomasseheiz(kraft)werke haben bessere Gesamtwirkungsgrade als stromgeführte und damit auch eine bessere Ökobilanz. Der Wirkungsgrad der Feuerungsanlage beeinflusst die Ökobilanz ebenfalls sehr viel stärker als die Bereitstellungskette. Die zukünftig steigende Nachfrage nach Energie aus regenerativen Quellen kann zu Verschiebungen der Anteile der stofflichen und energetischen Nutzung von Holz führen. Die höchstmögliche Effizienz durch die kaskadische Nutzung des Holzes ist anzustreben. Die staatliche Förderung der Nutzung von Waldhackschnitzeln ist zu hinterfragen.

9 Verzeichnisse

9.1 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Projektaufbau mit den einzelnen Arbeitsmodulen 9
Abbildung 2: Umfragebeteiligung nach Biomasse-Nennleistung 13
Abbildung 3: Beispiel für eine Prozesskette zur Bereitstellung von Waldhackschnitzeln 14
Abbildung 4: Ausgewählte Modellregion der geförderten Biomasseheiz(kraft)werke in Bayern (Quelle: RÖDER et al. 2008, S.75, verändert) 14
Abbildung 5: Anteile der eingesetzten Biomasse 16
Abbildung 6: Anteile der eingesetzten Biomasse bei verschiedenen Heiz(kraft)werksgrößen 17
Abbildung 7: Preise für Waldhackschnitzel in Abhängigkeit von der Heiz(kraft)werksgröße im Jahr 2006 18
Abbildung 8: Preise für Waldhackschnitzel in Abhängigkeit der eingesetzten Rohstoffmenge im Jahr 2006 19
Abbildung 9: Minimum, Mittelwert und Maximum der Waldhackschnitzelpreise in Abhängigkeit von der Heiz(kraft)werksgröße (Erhebungsjahr 2006) 19
Abbildung 10: Minimum, Mittelwert und Maximum für Sägenebenprodukte in Abhängigkeit von der Heiz(kraft)werksgröße (Erhebungsjahr 2006) 20
Abbildung 11: Anteile der Lieferanten für Waldhackschnitzel nach Heiz(kraft)werksgröße 24
Abbildung 12: Anzahl der erfassten Abrechnungsmethoden für Biomasse nach Heiz(kraft)werksgröße 26
Abbildung 13: Gesamt-Anfall an Asche (Rost- und Filterasche) nach Heizwerksgröße 27
Abbildung 14: Verwertungs- und Entsorgungswege von Rostasche nach Heizwerksgröße 28
Abbildung 15: Prozesskette Waldhackschnitzelversorgung des BMHW B 31
Abbildung 16: Prozesskette Waldhackschnitzelversorgung des BMHW D 32
Abbildung 17: Prozesskette Waldhackschnitzelversorgung des BMHKW F 33
Abbildung 18: Prozesskette Waldhackschnitzelversorgung des BMHKW I 34
Abbildung 19: Beispiel für eine UMT- Aufnahmemaske bei einer Zeitstudie über die Holzernte mit einem Sammelaggregat. 52
Abbildung 20: Farbcode zur Markierung und Zuweisung des Brusthöhendurchmessers 54
Abbildung 21: Definition der Arbeitszeiten 55
Abbildung 22: NaarvaGrip 1500- 40e (links), ABAB 350 (mitte) und Bracke C 16.a (rechts) als Beispiele für Energieholzaggregate mit Sammelfunktion. 56
Abbildung 23: Kürzen der Bäume im „Einzelbaumverfahren“ 57
Abbildung 24: Trennschnitt am Stammfuß beim Verfahren „Fällen und Bündeln“ 58
Abbildung 25: Abtrennen der Krone beim „Krone-Stamm-Verfahren“ 59
Abbildung 26: Neuson 8002 mit NaarvaGrip 1500-40e beim Fällen und Bündeln 59
Abbildung 27: Bestandesmarkierungen beim Versuch Ingolstadt 61
Abbildung 28: Durchmesserverteilung des ausscheidenden Bestandes (Ingolstadt) 61
Abbildung 29: Übersichtskarte Versuchsfläche Ingolstadt 62
Abbildung 30: Anteile der Ablaufabschnitte beim Fällen im Versuch Ingolstadt 64
Abbildung 31: Zeitbedarfsmodell für den Prozessschritt Fällen und Vorkonzentrieren beim Versuch Ingolstadt 65
Abbildung 32: Verteilung der Bündelvorgänge mit dem NaarvaGrip 1500-40e. 66
Abbildung 33: Anteile der Ablaufabschnitte beim Rücken im Versuch Ingolstadt. 67
Abbildung 34: Anteile der Ablaufabschnitte beim Hacken im Versuch Ingolstadt. 67
Abbildung 35: Unterteilung der reinen Hackereinsatzzeit in einzelne Ablaufabschnitte 68
Abbildung 36: Versuchsfläche in Zusmarshausen. Als Maßstab dient ein Besenstil (links) bzw. ein Mobiltelefon (rechts). 70
Abbildung 37: Eco Log 550 C mit ABAB 250 Energieholzaggregat im Versuchseinsatz. 71
Abbildung 38: Schematische Darstellung des Pflegeingriffs beim Versuch Zusmarshausen 72
Abbildung 39: Anteile der Ablaufabschnitte beim Versuch Zusmarshausen mit dem Sammelaggregat ABAB 250 73
Abbildung 40: Zeitbedarfsmodell für das Fällen und Vorkonzentrieren beim Versuch Zusmarshausen 74
Abbildung 41: Eco Log 554 BCT mit ABAB Carrier im Versuchseinsatz bei der Rückung von Fichtenkronen (links). Auf Stützfüßen abgestellter Spezialaufbau ABAB Carrier (rechts). 76
Abbildung 42: UMT- Aufnahmemaske für die Zeitstudie über die Carrier-Rückung 77
Abbildung 43: Anteile der Ablaufabschnitte bei der Rückung mit Rungenkorb und Carrier in % der Gesamtarbeitszeit. 80

Abbildung 44: Vergleich des Zeitbedarfs je Fuhre in Abhängigkeit von der Aufbauvariante 80
Abbildung 45: Vergleich der fuhrenweise Produktivität in Abhängigkeit von der Aufbauvariante..... 81
Abbildung 46: Abdeckung des Schlagabraumes mit Walki Energy Spezialpapier 83
Abbildung 47: Ergebnisse der Wassergehaltsproben während der Lagerung zwischen November 2008 und Mai 2009..... 84
Abbildung 48: Witterungsdaten der Klimastation Sonthofen im Untersuchungszeitraum; Quelle: LWF Bayern 85
Abbildung 49: Schematischer Aufbau von MHG Bioenergy..... 87
Abbildung 50: Menüansicht „Projekt“ in MHG Bioenergy..... 88
Abbildung 51: Kartenanwendung im MHG Bioenergy Menü - Darstellung eines Lagers (4-1) mit mehreren Poltern (hellgrüne Punkte), der Hiebsfläche (grüne Fläche) , Wendemöglichkeiten (Pfeil) und Abstellplätze für Lkw-Anhänger (PP) 89
Abbildung 52 : MHG Bioenergy Software für Mobiltelefon: Funktion „Bild einfügen“ (links). Menüansicht der Importdatei eines per Mobiltelefon erfassten Lagers (rechts). 89
Abbildung 53: Harvesteraggregat mit Sammelarm; links: Waratah, rechts: SP..... 94
Abbildung 54: Zusammenhang von Heizwert, Brennwert und Energiemenge in einem kg Holztrockenmasse bei unterschiedlichem Wassergehalt (Kaltschmitt und Hartmann 2001, S.:262) 106
Abbildung 55: Theoretischer Ansatz zur Berechnung der Input- und Outputströme zur Bildung von Holz durch die Bäume (aus ZIMMER und WEGENER 1996)..... 109
Abbildung 56: Beispiele für Bündelaggregate: links auf einem Forwarder (Quelle: FIBERPAC 2009), rechts auf einem Lkw montiert wie bei WITTKOPF (2004) eingesetzt. 112
Abbildung 57: Beispiele für unterschiedlich leistungsfähige mobile Hacker: links an einem Schlepper angehängt (www.mus-max.at; 30.06.2009), rechts auf einem Lkw montiert (www.haeckselzug.de; 30.06.2009). 112
Abbildung 58: Beispiel einer möglichen Variante für ein Holzlogistikzentrum mit stationärem Hacker (nach Gronalt et.al. 2005) 113
Abbildung 59: Relative Häufigkeit der bei Stichproben ermittelten Wassergehalte (N=160) in Hackschnitzeln (RATHKE 2009) 116
Abbildung 60: Beispiele für unterschiedliche Anhängersysteme zum Transport von Hackschnitzeln mittels Schlepper (www.prilu.at; www.holzrueckung-huettler.at, 30.06.2009)..... 117
Abbildung 61: Beispiele für unterschiedliche Container-Systeme zum Transport von Hackschnitzeln 117
Abbildung 62: Beispiele für Spezialfahrzeuge mit Kran und Greifer, die auch auf der Waldstrasse eingesetzt werden können (www.riedler.com; 30.06.2009)..... 118
Abbildung 63: Beispiele für Hackschnitzel Lastzug mit dreiachsigem Anhänger und Sattelschlepper mit Schubboden (www.riedler.com) 119
Abbildung 64: Spezifischer Energieverbrauch für den Transport von Waldhackschnitzeln mittels Schlepper (15m³-Anhänger) in kWh pro MWh Energieinhalt dargestellt für verschiedene Wassergehalte und Dieselverbräuche pro Stunde in Abhängigkeit von der Entfernung. 120
Abbildung 65: Spezifischer Energieverbrauch für den Transport von Waldhackschnitzeln für verschiedene Transportmittel in kWh pro MWh in Abhängigkeit von der Entfernung. 121
Abbildung 66: Modernes und leistungsfähiges Logistik-System für Biomassehackschnitzel (www.innofreight.com; 30.06.2009) 122
Abbildung 67: Prozentualer Anteil der Heiz- und Heizkraftwerke in der Modellregion am Brennstoffbedarf (Waldhackschnitzel) in Abhängigkeit von der Größenklasse. 123
Abbildung 68: Prozentuale Erhöhung der Ernteentzüge in einem Fichten-Altbestand bei unterschiedlicher Nutzungsintensität an der Waldklimastation Ebersberg (KÖLLING et al. 2007). 125
Abbildung 69: Einsatz von Primärenergie für die gemischten Waldhackschnitzel-Sortimente in den einzelnen Szenarien in kWh pro MWh (Hackschnitzel) dargestellt für die wesentlichen Prozesse. Deutlich wird der Einfluss des Wassergehaltes. 130
Abbildung 70: Einsatz von Primärenergie für die gemischten Waldhackschnitzel-Sortimente in den einzelnen Szenarien in kWh pro MWh (Hackschnitzel) dargestellt für die wesentlichen Prozesse. Besonders deutlich wird der Einfluss der Holzarten. 131
Abbildung 71: Einsatz von Primärenergie [kWh/MWh] für die Variante „ungünstig“ inklusiv der Beiträge der einzelnen Sortimentsanteile..... 132
Abbildung 72: Einsatz von Primärenergie [kWh/MWh] für die Variante „günstig“ inklusiv der Beiträge der einzelnen Sortimentsanteile..... 133
Abbildung 73: Einsatz von Primärenergie [kWh] pro MWh bereitgestellter Brennstoff (MIX-50%) für das Szenario „Kleinprivatwald – Waldrestholz“. Dargestellt sind auch die im Holz gespeicherte, technisch nutzbare Sonnenenergie (H_u) sowie die Verluste durch Lagerung. Der Wirkungsgrad des Kraftwerkes wurde mit 80% angenommen. 135

Abbildung 74: Einsatz von Primärenergie [kWh] pro MWh bereitgestellter Brennstoff (NH-50%) für das Szenario „Kleinprivatwald – Waldrestholz“. Dargestellt sind auch die im Holz gespeicherte, technisch nutzbare Sonnenenergie (H_u) sowie die Verluste durch Lagerung. Der Wirkungsgrad des Kraftwerkes wurde mit 80% angenommen. 136
Abbildung 75: Einsatz von Primärenergie [kWh] pro MWh bereitgestellter Brennstoff (MIX-30%) für das Szenario „Profi – mit Holzlogistik-Zenztrum“. Dargestellt sind auch die im Holz gespeicherte, technisch nutzbare Sonnenenergie (H_u) sowie die Verluste durch Lagerung. Der Wirkungsgrad des Kraftwerkes wurde mit 80% angenommen. 136
Abbildung 76: Einsatz von Primärenergie [kWh] pro MWh bereitgestellter Brennstoff (MIX-50%) für das hoch mechanisierte Szenario „Feller-Buncher - Vollbaumnutzung“. Dargestellt sind auch die im Holz gespeicherte, technisch nutzbare Sonnenenergie (H_u) sowie die Verluste durch Lagerung. Der Wirkungsgrad des Kraftwerkes wurde mit 80% angenommen. 137
Abbildung 77: Treibhauspotenzial (GWP100) dargestellt für das Szenario „Kleinprivatwald— Waldrestholz“. Bei der Verbrennung von Holz wird der im Holz festgelegte Kohlenstoff wieder freigesetzt, allerdings substituiert die Energie aus Biomasse diejenige aus fossilen Energieträgern (Heizöl) 139
Abbildung 78: Treibhauspotenzial (GWP100) dargestellt für das Szenario „Kleinprivatwald— Waldrestholz“. Bei der Verbrennung von Holz wird der im Holz festgelegte Kohlenstoff wieder freigesetzt, allerdings substituiert die Energie aus Biomasse diejenige aus fossilen Energieträgern (Heizöl) 140

9.2 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Biomasseheiz(kraft)werke der ausgewählten Modellregion 15
Tabelle 2: Entwicklung der Waldhackschnitzelpreise (Mittelwerte)..... 21
Tabelle 3: Preise für Waldhackschnitzel in Abhängigkeit von Heiz(kraft)werksgröße und Anbieter..... 22
Tabelle 4: Preise für Sägenebenprodukte in Abhängigkeit von Heiz(kraft)werksgröße und Anbieter .. 23
Tabelle 5: Transportentfernungen für Waldhackschnitzel in Abhängigkeit von Heiz(kraft)werksgröße und Anbieter 25
Tabelle 6: Kosten für die Entsorgung der Holzasche nach Heizwerk-Größenklassen 29
Tabelle 7: Zusammenstellung der wichtigsten Probleme für das eigene Heiz(kraft)werk 29
Tabelle 8: Zusammenstellung der wichtigsten Probleme für den Energieholzmarkt Bayern..... 30
Tabelle 9: Zusammenstellung der Verbesserungsmöglichkeiten / Empfehlungen 30
Tabelle 10: Im Rahmen des Workshops gesammelte Schwachstellen, gegliedert nach Prozessschritten 41
Tabelle 11: Lösungsansätze für verschiedene Verbesserungspotenziale..... 43
Tabelle 12: Auswahl wichtiger Schwächen der Prozesskette „Versorgung mit Waldhackschnitzel“ 45
Tabelle 13: Kosten bei der Bereitstellung von Waldhackschnitzel frei Heizwerk für verschiedene Logistikketten nach Wittkopf (2005) 46
Tabelle 14: Kosten der Bereitstellung von Waldhackschnitzel in Baden-Württemberg (€ / Srm) nach TEXTOR et al. 2008 46
Tabelle 15: Technische Details der Maschinentechnik im Versuch Ingolstadt 60
Tabelle 16: Bestandesdaten des Versuchsbestandes 61
Tabelle 17: Kosten der einzelnen Prozessschritte beim Versuch Ingolstadt 68
Tabelle 18: Bestandes- und Hiebsdaten der Versuchsfläche in Zusmarshausen 70
Tabelle 19: Technische Details der eingesetzten Maschinentechnik im Versuch Zusmarshausen 71
Tabelle 20: Produktivität für Fällen und Vorkonzentrieren in der Studie Zusmarshausen..... 74
Tabelle 21: Produktivität für das Rücken in der Studie Zusmarshausen 75
Tabelle 22: Kalkulierte Kosten je Prozessschritt bei der Fallstudie Zusmarshausen..... 75
Tabelle 23: Technische Details des Forwarders Eco Log 554 BCT sowie des ABAB Carriers. 78
Tabelle 24: Bestandesdaten in zwei Versuchsorten beim Carriereinsatz..... 78
Tabelle 25: Fuhrgewichte in Abhängigkeit von Fahrer und Aufbauvariante. 81
Tabelle 26: Szenariokalkulation der Kostensituation beim Einsatz von Walki Energy..... 86
Tabelle 27: Potenzielle Vorteile beim Einsatz von MHG Bioenergy..... 90
Tabelle 28: Fragestellungen des Workshops 101
Tabelle 29: Heizwerte in Abhängigkeit vom Wassergehalt der Hackschnitzel bezogen auf die Gesamtmasse sowie die darin enthaltene Trockenmasse für Nadel- und Laubholz (WITTKOPF 2005, S. 29) 107
Tabelle 30: Sachbilanz des Submoduls "Biologische Produktion"; alle Werte beziehen sich auf eine Tonne absolut trockenes [t_{atro}] Holz..... 109
Tabelle 31: Darstellung der Volumina [Srm] sowie der Kohlendioxid-Inputs im Modul „biologische Produktion“ bezogen auf jeweils einen Heizwert von einer MWh. 110
Tabelle 32: Wassergehaltsklassen von Hackschnitzeln und deren Lagerfähigkeit (nach ÖNORM M 7133) 114
Tabelle 33: Zusammenhang zwischen dem Wassergehalt bei der Einlagerung, dem Lagerungsort und dem Substanzabbau bei der Lagerung von Hackschnitzeln (nach WEBENAU et al. 1999; In: GOLSER et al. 2005) 115
Tabelle 34: Einsatz von Primärenergie in den einzelnen Szenarien in Prozent de im jeweiligen Hackschnitzel-Sortiment enthaltenen nutzbaren Energie (H_u)..... 129

9.3 Literaturverzeichnis

ACHILLES, E. (2009): Realisierung von kommunalen Biomasseheizwerken - Betreibermodelle, Planungsschritte, Problembereiche und Erfolgsfaktoren. Diplomarbeit am Lehrstuhl für Forstliche Arbeitswissenschaft und Angewandte Informatik. Freising, 2008.

AFFENZELLER, G.; STAMPFER, K.(2007): Energieholzbereitstellung mit Traktor und Krananhänger mit Fallbeilklingenaggregat. Fallstudie im Forstbetrieb Fürst Esterhàzy'sche Privatstiftung Lockenhaus. Projektbericht, Institut für Forsttechnik BOKU Wien, 2007.

AFFENZELLER, G.; STAMPFER, K. (2008): Energieholzbereitstellung mit Forwarder und Fäller-Sammler Moipu 400E. Fallstudie im Forstbetrieb Fürst Esterhàzy'sche Privatstiftung Lockenhaus. Projektbericht, Institut für Forsttechnik BOKU Wien, 2008.

AHBE, S.; BRAUNSCHWEIG, A. MÜLLER-WENK, R. (1990): Methodik für Ökobilanzen auf der Basis ökologischer Optimierung. Bern: Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (Hrsg.), Schriftenreihe Umwelt Nr. 133.

BAHN (2007): Kennzahlen und Fakten zur Nachhaltigkeit 2007. Berlin: Deutsche Bahn AG; www.db.de.

BAUDISCH, C. (2008): Planung und Gründung eines Heizkraftwerks: Welche Herausforderungen gibt es zu meistern?. Vortrag im Rahmen der Fortbildungsveranstaltung "Hackschnitzel: Bereitstellung und thermische Verwertung in Großanlagen" der Bay. Forstverwaltung am 25.04.2008, Kelheim.

BAUER, J.; VON BODELSCHWINGH, E. (2003): Verbesserung des Informationsflusses in der Holzerntekette durch den Einsatz der Logistiksoftware „GeoMail". Abschlussbericht zum Projekt ST 135. Lehrstuhl für Forstliche Arbeitswissenschaft und Angewandte Informatik der TU München. Freising, 2003.

BAYERISCHEN STAATSFORSTEN (2008a): Grundsätze zur Bereitstellung von Energieholz. Regensburg, http://www.baysf.de/uploads/media/Merkblatt_Energieholzbereitstellung.pdf.

BAYERISCHEN STAATSFORSTEN (2008b): Grundsätze zur Lagerung von Waldhackschnitzeln. Regensburg, http://www.baysf.de/uploads/media/Merkblatt_Lagerung_von_Waldhackschnitzel.pdf.

BEREKOVEN, L.; ECKERT, W.; ELLENRIEDER, P. (1991): Marktforschung: Methodische Grundlagen und praktische Anwendung. 5. Auflage. Verlag Gabler, Wiesbaden.

BETZ, M.; COEN, D.; DEIMLING, S.; KREIßLIG, J. (2002): Thermische Verwertung von Holzprodukten – Inputabhängige Modellierung der End-of-Life Prozesse von Holz. Abschlussbericht. 117 Seiten.

BMU (2009a): Entwicklung der erneuerbaren Energien in Deutschland im Jahr 2008. Daten des Bundesumweltministeriums zur Entwicklung der erneuerbaren Energien in Deutschland im Jahr 2008. Zahlen auf der Grundlage der Angaben der Arbeitsgruppe Erneuerbare Energien-Statistik (AGEE-Stat).

BMU (2009b): Nationaler Biomasseaktionsplan für Deutschland. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU). www.bmu.de.

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

BÖHM,T.; HARTMANN, H. (2004): Wassergehalt von Holzbrennstoffen - Ein Vergleich von (Schnell-) Bestimmungsmethoden. Tagungsband 13. Symposium „Energie aus Biomasse", Kloster Banz. S. 252 – 257.

BÖNING, J.A. (1995): Methoden betrieblicher Ökobilanzierung. Marburg: Metropolis Vlg, Hochschulschriften Band 16, 314 S.

BRAUNSCHWEIG, A.; MÜLLER-WENK, R. (1993): Ökobilanzen für Unternehmungen. In: Schaltegger, S. und Kubat, R. (1994): Das Handwörterbuch der Ökobilanzierung. Basel: WWZ-Studie Nr. 45

BROKMEIER, H.(2007): Fällersammleraggregate in der Nadelschwachholzernte. Forst & Technik 12/2007.

BURGER, F.: SOMMER, W.: Von der Pappel bis zum Hackschnitzel – Moderne Erntetechnik für Energiewälder. LWFaktuell Nr.39, S.4-6, 2003.

C.A.R.M.E.N.2 e.V. (2006): Demonstrationsprojekte der energetischen Biomassenutzung in Bayern (Stand 01.08.2006), *http://www.carmen-ev.de/dt/energie/beispielprojekte/pro_ener.html*.

CREMER, T.: Bereitstellung von Holzhackschnitzeln durch die Forstwirtschaft. Produktivitätsmodelle als Entscheidungsgrundlage über Verfahren und Aushaltungsvarianten, entwickelt auf der Basis einer Metaanalyse. Dissertation an der Fakultät für Forst- und Umweltwissenschaften der Albert-Ludwig-Universität, Freiburg, 2008. 199 S.

EBERHARDINGER, A. (2007): Schwarze Zahlen in der Schwachholzernte? Forst & Technik 5/2007. S.14-18.

ENGLISCH, M. (2007): Ökologische Grenzen der Biomassenutzung in Wäldern. BFW-Praxisinformation 13: 8 – 10. zitiert nach: www.waldwissen.net (15.06.2009)

FACHAGENTUR NACHWACHSENDE ROHSTOFFE e.V (FNR) (2006): Marktanalyse Nachwachsende Rohstoffe. Gülzow, 1. Auflage, 575 S.

FACHAGENTUR NACHWACHSENDE ROHSTOFFE e.V (FNR) (2007): Leitfaden Bioenergie – Planung, Betrieb und Wirtschaftlichkeit von Bioenergieanlagen 4. Auflage, Gülzow; 353 S.

FEDRAU, S. (2000): Erstellung einer Sachbilanz für das Forstamt Kempten. München: Diplomarbeit, Holzforschung München der Technischen Universität München.

FER (1982): Richtlinien für die mittel- und langfristige Forstbetriebsplanung in der Bayerischen Staatsforstverwaltung. Forsteinrichtungsrichtlinien (FER). Bayerisches Staatsministerium für Ernährung Landwirtschaft und Forsten.

FIBERPAC (2009): http://www.fiberpac.se/ (gesehen am 25.06.2009).

FORBRIG, A.: Konzeption und Anwendung eines Informationssystems über Forstmaschinen auf der Grundlage von Maschinenbuchführung, Leistungsnachweisen und technischen Daten. KWF-Bericht Nr. 29/2000, Groß-Umstadt.

FRISCHKNECHT,R.; HOFSTETTER, P.; KNOEPFEL, I.; DONES, R.; ZOLLINGER, E. (1995): Ökoinventare für Energiesysteme - Grundlagen für den ökologischen Vergleich von Energiesystemen und den Einbezug von Energiesystemen in Ökobilanzen für die Schweiz. Bern: Bundesamt für Energiewirtschaft (Hrsg.).

GABRIEL, O. (2003): Mit Rückezug und Fällgreifer in die Durchforstung. Forst & Technik 10/2003.

GOLSER, M.; PICHLER, W. und HADER, F. (2005): Energieholztrocknung. Endbericht (HFA-Nr.: F1887/04). Wien: Holzforschung Austria, 138 Seiten.

GRONALT, M.; ZIMMER, B.; RAUCH, P. und PETUTSCHNIGG, A. (2005): Holz-Logistik-Zentrum Salzburg. Unveröffentlichte Studie im Auftrag des Holzclusters Salzburg, 76 Seiten.

GUBA, E. (2008): Energieholzgewinnung aus Laubholzbeständen. Tagungsführer zur 15. KWF-Tagung 2008 in Schmallenberg.

HAKKILA, P. (2004): Developing technology for large-scale production of forest chips. Wood EnergyTechnology Programme, VTT Processes. Technology Programme Report 6/2004, Helsinki.

HARTMANN, H.; REISINGER, K.; THUNEKE, K.; HÖLDRICH, A.; ROßMANN, P. (2007): Handbuch Bioenergie-Kleinanlagen. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR), Gülzow. 2. Auflage, 224 S.

HAUGG, W. (2008): Bestandesbeschreibung einer Fichtennaturverjüngung.Waldbauworkshop Jungbestandspflege der Bayerischen Staatsforsten. Ottobeuren, 29.07.2008.

HILLEBRAND, K.; NURMI, J. (2001): Storage alternatives affect fuelwood properties of Norway Spruce logging residues. New Zealand KJournal of Forest Science 31.p. 289-297.

IFEU-INSTITUT (2007): Datenprojekt Transport. Projektbericht im Rahmen des Forschungsvorhabens FKZ01RN0401; 43 Seiten.

IPCC (2007): Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. In: SOLOMON, S., D. QIN, M. MANNING, Z. CHEN, M. MARQUIS, K.B. AVERYT, M. TIGNOR and H.L. MILLER (eds.). Cambridge: Cambridge University Press, 996 Seiten.

JIRJIS, R.; LEHTIKANGAS, P. (1993): Fuel Quality and Dry Matter Loss during Storage of Logging Residues in a Windrow. Swedish University of Agricultural Sciences, Department of Forest Products, Report No 236.

JUNGBLUTH, N.; FRISCHKNECHT, R.; FAIST, M. (2002): Ökobilanz für die Stromerzeugung aus Holzbrennstoffen und Altholz. Schlussbericht des Projektes 41458; Bundesamt für Energie, Bern (CH), 69 Seiten.

KALTSCHMITT, M. und HARTMANN, H. (2001): Energie aus Biomasse. Grundlagen, Techniken und Verfahren. Berlin: Springer Verlag, 770 Seiten. ISBN 3-540-64853-4.

KANZIAN, C. (2005): Bereitstellung von Waldhackgut – Verfahren Energieholzbündel im Gebirge. Bericht, Institut für Forsttechnik, Universität für Bodenkultur Wien. 36 S.

KANZIAN, C.; KÜHMAIER, M.; HOLZLEITNER, F; STAMPFER, K. (2008): Wertschöpfungskette Waldhackgut. Optimierung von Ernte, Transport und Logistik. Projektstudie Universität für Bodenkultur, Wien. 283 S.

KNECHTLE, N. (2007): Materialprofile von Holzerntesystemen – Analyse ausgewählter Beispiele als Grundlage für ein forsttechnisches Ökoinventar. ETH Zürich, Department für Wald- und Holzforschung, 65 Seiten.

KÖLLING, C.; GÖTTLEIN, A.; ROTHE, A. (2007): Energieholz nachhaltig nutzen. LWFaktuell Nr. 61, S. 32-36.

KÖLLING, C.; STETTER, U. (2008): Holzasche – Abfall oder Rohstoff? LWFaktuell Nr. 63, S. 54-56.

KRAMER, H. (1980): Biologische, technische und wirtschaftliche Aspekte der Jungbestandspflege. Schriften der Forstl. Fakultät der Universität Göttingen und der Niedersächsichen Forstl. Versuchsanstalt, Band 67.

KRAPF G. (2009): Qualität zahlt sich aus – Konzeption und Ausführung von Biomasseheizwerken“ in „Die Landwirtschaft als Energieerzeuger, KTBL-Tagung vom 4. bis 5. Mai 2009 in Osnabrück“; Darmstadt; Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. (KTBL); 316 S.

KUTSCHINSKI (2004), M.: Durchforstung im schwachen bis mittelstarken Laubholz mit Fällgreifer am Tragschlepper. Tagungsführer der 14. KWF Tagung 2004, S. 68-70.

LAITILA, J.; ASIKAINEN, A.: Energy wood logging from early thinnings by harwarder method. Finnish Forest Research Institute, Joensuu Research Centre, 2005.

LEMM, R.; REICHSTEINER, D.; EBERHARD, H.; LEUZINGER, T.; THEES, O. (2006): Dynamische Polterverwaltung zur Verbesserung der Logistik vom Waldholzlager ins Werk. Final report. Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL, Abteilung Management Waldnutzung.

LIEBHERR (2009): Produktbeschreibung von Radladern; www.liebherr.com (gesehen am 02.07.2009)

NEUGEBAUER, G. (2005): Hackschnitzellogistik bei staatlich geförderten Biomasseheiz(kraft)werken in Bayern – Umfrage 2004. Interner Abschlußbericht der Bayerischen Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft (LWF), Freising, 12 S.

NEUGEBAUER, G.; WITTKOPF, S.; BAUDISCH, C.; GÜNSCHE, F. (2005): Hackschnitzel auf dem Vormarsch: Umfrage bei bayerischen Biomasseheizwerken – Material und Kosten. LWF aktuell 48, Freising, 2005.

NORDIC COUNCIL OF MINISTERS (1992): Product Life Cycle Assessment - Principles and methodology. Environmental reports in the Nord-series, NORD 1992:9; 288 S.

NORDIC COUNCIL OF MINISTERS (1995): Nordic Guidelines on Life-Cycle Assessment. Environmental reports in the Nord-series, NORD 1995:20; 222 S.

NUSSBAUMER, T. (2002): Holzpellets und Pelletheizungen. Schweizer Bau-Dokumentation (56) 101, Teil 2b.

OHRNER, G.(1999): Arbeitsverfahren für die Pflege in der Fichte. LWF-Wissen Nr. 20. Freising, 1999.

PATZAK, W. (1984a): Bereitstellung forstlicher Biomasse. Teil I. Bereitstellung forstlicher Biomasse aus Erstdurchforstung in Fichten- und Kiefernbeständen. Forschungsbericht (C O 76). Bundesministerium für Forschung und Technologie. Lehrstuhl für Forstliche Arbeitswissenschaft und Verfahrenstechnik der Universität München. 288 S.

PATZAK, W. (1984b): Bereitstellung forstlicher Biomasse. Teil II. Untersuchungen von Systemen zur Bereitstellung forstlicher Biomasse auf der Grundlage einer Analyse des Schrifttums. Forschungsbericht (C O 76). Bundesministerium für Forschung und Technologie. Lehrstuhl für Forstliche Arbeitswissenschaft und Verfahrenstechnik der Universität München. 249 S.

PAUSCH, R. (2005): Ein System-Ansatz zur Darstellung des Zusammenhangs zwischen Waldstruktur, Arbeitsvolumen und Kosten in naturnahen Wäldern Bayerns. Dissertation am Lehrstuhl für Forstliche Arbeitswissenschaft und Angewandte Informatik, Freising. Forstliche Forschungsberichte München, Heft 199: 300 S.

PETERS, H. (2007): Umweltschonende Ölsorten in der Waldarbeit. LWFaktuell Nr. 59. zitiert nach: www.waldwissen.net (15.06.2009)

PRETZSCH, H. (2005): Buchenwachstum im Rein- und Mischbestand. Vortrag 2. Bayerischen Waldbesitzertages. Freising, 2005.

RATHKE, J. (2009): Machbarkeitsstudie zur technischen Trocknung von Energiehackschnitzeln. Diplomarbeit am Studiengang „Holztechnik & Holzwirtschaft“ der FH Salzburg.

REFA (1976): Anleitung für forstliche Arbeitsstudien. Datenermittlung, Arbeitsgestaltung. Verband für Arbeitsstudien – REFA – e.V. 107 S.

RÖDER, H.; STEINBEIS, E.; BORCHERT, H.; WELLHAUSEN, K.; MAI, W.; KOLLERT, W.; JENTSCH, A.; WOEST, A.; WEBER-BLASCHKE, G.; FIEDLER, S. (2008): Cluster Forst und Holz in Bayern. Ergebnisse der Clusterstudie 2008. Abschlussbericht. Freising, 180 S.

RÖDL, A. (2008): Ökobilanzierung der Holzproduktion im Kurzumtrieb. Arbeitsbericht Nr. 03/2008; Hamburg: vTI – Institut für Ökonomie der Forst- und Holzwirtschaft, 82 Seiten.

ROHRMOSER, C.: STAMPFER, K.: Effiziente Waldhackgutbereitstellung. Österreichische Forstzeitung 114, 10; 2003.

ROHRMOSER, C.; STAMPFER, K.: Optimierung der Bereitstellungskette Waldhackgut. EWLOG-Umsetzung-Rohstoffforschung. Agrar Plus GmbH 2003.

ROTHENEDER, E.; HANDLER, F. (2006a): Moderne Hackgutlogistik - Lieferung just in time; Tagungsband "Landtechnik im Alpenraum" vom 10. - 11. Mai 2006 in Feldkirch, FAT-Schriftenreihe Nr. 68, Seite 143 – 155.

ROTHENEDER, E., HANDLER, F. (2006b): Moderne Hackschnitzellogistik - Lieferung per Überladewagen; Wald und Holz, Heft 11/2006, Seite 53 – 56.

SCHNECKENER (2009): Persönliche Mitteilung zu Treibstoffverbrauch von verschiedenen Hacker; Petershagen: Jenz GmbH.

SCHNELL, R.; HILL, P; ESSER, E. (1995): Methoden der empirischen Sozialforschung. 5. Auflage. München, Wien: Oldenburg Verlag, 506 S.

SCHOLZ, V.; IDLER, C.; DARIES, W.; EGERT, J. (2005): Schimmelpilzentwicklung und Verluste bei der Lagerung von Holzhackschnitzeln. Holz als Roh- und Werkstoff 63: 449-455.

SCHULER, U. (2006): Ermittlung und Analyse von Kosten- und Leistungskennwerten eines Fäller-Sammlers bei der Pflege von Mittelwäldern zur Bereitstellung von Energieholz. Diplomarbeit an der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg 2006.

SCHWAIGER, H.; ZIMMER, B. (2001): A Comparison of Fuel Consumption and Greenhouse Gas Emissions from Forest Operations in Europe. Joensuu/Finland: EFI Discussion Paper No.:10. ISBN: 952-9844-92-1; S.: 33-55.

SCHWEINLE, J. (1996): Analyse und Bewertung der forstlichen Produktion als Grundlage für weiterführende forst- und holzwirtschaftliche Produktlinien-Analysen. Hamburg: Max Wiedebusch Kommiss.-Verl., 123 S. = Mitt. Bundesforschungsanst. Forst- Holzwirtsch., Hamburg, Nr. 184.

SCHWEINLE, J.; THOROE, C. (1997): Zur Ökobilanzierung der Rohholzproduktion in Deutschland. Forstarchiv, 52, 5: 110-116.

SETAC (1993): Guidelines for Life-Cycle Assessment: A code of practice, Edition 1.Workshop vom 31.3.1993 in Sesembra, Portugal.

SIKANEN, L.; ASIKAINEN, A.; LEHIKOINEN, M. (2004): Transport control of forest fuels by fleet manager, mobile terminals and GPS. Biomass and Bioenergy 28(2), S. 183-191.

SPINELLI, R.; HARTSOUGH, B.; OWENDE, P.; WARD, S. (2002): Productivity and Cost of Mechanized Whole-Tree Harvesting of Fast-Growing Eucalypt Stands. International Journal of Forest Engineering; July 2002.

STAHL, E.; DOETSCH, P. (2008): Qualität und Verwertungsmöglichkeiten von Holzaschen aus naturbelassenen Hölzern. Umweltchem.Ökotox, 20, S.: 1-9.

TEXTOR, B.; SAUTER, U.H.; DEINES, T. (2008) Qualitätsmanagement Holzheizwerke: Standards für die professionelle Energieholznutzung. In: AFZ - Der Wald 18/2008, s. 977-980.

TFZ (2007): Liste der vom TFZ geförderten Biomasseheizwerke (Einzelfallentscheidungen) (Stand 01.01.2007), http://www.tfz.bayern.de/foerderung/15925/bmh_6124.pdf.

TFZ (2008): Entwicklung der Brennstoffpreise. http://www.tfz.bayern.de/festbrennstoffe/17387.

TFZ (2009): Zitat zur Einspeisevergütung nach EEG (2009) nach der Internatseite des TFZ (http://www.tfz.bayern.de/biokraftstoffe/31857/; gesehen am 01.06.2009).

UBA (1992): Umweltbundesamt (Hrsg.) Ökobilanzen für Produkte, Bedeutung – Sachstand - Perspektiven. Berlin: Umweltbundesamt-Texte 38/92.

UBA (1995a): Umweltbundesamt (Hrsg.) Methodik der produktbezogenen Ökobilanzen - Wirkungsbilanz und Bewertung. Berlin: Umweltbundesamt-Texte 23/95.

UBA (1995b): Umweltbundesamt (Hrsg.) Standardberichtsbogen für produktbezogene Ökobilanzen. Berlin: Umweltbundesamt-Texte 24/95.

VON BODELSCHWINGH (2006): Analyse der Rundholzlogistik in der Deutschen Forst- und Holzwirtschaft – Ansätze für ein übergreifendes Supply Chain Management. Dissertation am Lehrstuhl für Forstliche Arbeitswissenschaft und Angewandte Informatik der TU München.

WEBENAU, B.; KRAUSENBOECK, B.; GÖLDNER, A. (1999): Teilmechanisierte Bereitstellung, Lagerung und logistik von waldhackschnitzeln. Freising: LWF-Bericht, 105 Seiten.

WEGENER G., ZIMMER, B., FRÜHWALD, A., SCHARAI-RAD, M. (1997): Ökobilanzen Holz. Fakten lesen, verstehen und Handeln. Informationsdienst Holz, Deutsche Gesellschaft für Holzforschung (Herausgeber), München.

WEGENER, G.; FRÜHWALD, A. (1994): Das CO2-Minderungspotential durch Holznutzung. Holz als Energieträger. Energiewirtschaftliche Tagesfragen "et", Nr. 7, 421-425.

WEGENER, G.; ZIMMER, B. (2001): Wald und Holz als Kohlenstoffspeicher und Energieträger: Chancen und Wege für die Forst- und Holzwirtschaft. In: Schulte, A. et al. (Hrsg.): Weltforstwirtschaft nach Kyoto: Wald und Holz als Kohlenstoffspeicher und regenerativer Energieträger. Aachen: Shaker Vlg. ISBN 3-8265-8641-7; S.: 113-122.

WEGENER, G.; ZIMMER, B.; BERGER, G.; SCHEIBENPFLUG, B. (2004): Analyse der Transportketten von Holz, Holzwerkstoffen und Restholzsortimenten als Grundlage für produktbezogene Ökobilanzen. Abschlussbericht, Bonn: Holzabsatzfonds; 37 Seiten.

WINDISCH, J. (2008): Supply chain management applications for forest fuel recovery in the Finnish and German work environment. Diplomarbeit am Lehrstuhl für Forstliche Arbeitswissenschaft und Angewandte Informatik, Freising.

WINKLER, C. (1997): Vorstudie – Ökoinventare von Holzerntesystemen. Interner Bericht Nr. 8; ETH Zürich, Department für Wald- und Holzforschung, 26 Seiten.

WITTKOPF, S. (2005): Bereitstellung von Hackgut für die thermische Verwertung durch Forstbetriebe in Bayern. Forstliche Forschungsberichte 200/2005, München, 208 S.

WITZLINGER, M. (2002): Ökologische und ökonomische Betrachtung von Holzpellets. Diplomarbeit am Studiengang Holztechnik & Holzwirtschaft der FH Salzburg.

ZAHN, B. (2006): Erprobung eines Forwarders mit Fällgreifer zur Ernte von Energieholz sowie Untersuchung verschiedener Zerkleinerungs- und Transportvarianten von Hackgut. Diplomarbeit an der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg.

ZIANIS, D.; MUUKKONEN, P.; MÄKIPÄÄ, R.; MENCUCCINI, M. (2005): Biomass and stem volume equations for tree species in Europe. Silva Fennica, Monographs 4.

ZIMMER, B.; BERGER, G.; WEGENER, G.; SCHEIBENPFLUG, B. (2004): Analyse der Transportketten – Die Transporte in der Holzwirtschaft. Holz-Bildung-Forschung 56, 4: S.:12-13.

ZIMMER, B.; KAIRI, M. (2001): LCA of Laminated Veneer Lumber - Finnforest Study. In: European Commisson (Ed.) COST Action E9 "Life Cycle Assessment on Forestry and Forest Products. Brussel: EUR 19858; S.: 89-100.

ZIMMER, B.; WEGENER, G. (1996): Stoff- und Energieflüsse vom Forst zum Sägewerk. Holz Roh-Werkst. 54, 4: 217-223.

ZIMMER, B.; WEGENER, G. (2001): Ökobilanzierung: Methode zur Quantifizierung der Kohlenstoff-Speicherpotenziale von Holzprodukten über deren Lebensweg In: Schulte, A. et al. (Hrsg.): Weltforstwirtschaft nach Kyoto: Wald und Holz als Kohlenstoffspeicher und regenerativer Energieträger. Aachen: Shaker Vlg. ISBN 3-8265-8641-7; S.: 149-163.

ZIMMERMANN, S.; HALLENBARTER, D.; LANDOLT, W.; GENENGER, M.; BRUNNER, I. (2002): Wirkung von Holzasche auf Waldboden, Baumwurzeln und Baumphysiologie. Holzasche: Zurück in den Wald? - Wald Holz 83, 11: 41-44. zitiert nach: www.waldwissen.net (15.06.2009).

ZIMMERMANN, St.; BUNDT, M. (2000): Holzasche aus Energiefeuerungen: Recycling oder Dumping? Inf.bl.Forsch.bereich Landsch. 46: S1-4. ISSN 1422-9277.

10 Anhang

10.1 Beispiel einer Maschinenkostenkalkulation:

Raupenharvester Neuson 8002 mit NaarvaGrip 1500-40e *

A) BASISDATEN						
1. Anschaffungskosten	Maschine	115.000	115.000	115.000	115.000	115.000
	Aggregat 1500-40e	22.500	22.500	22.500	22.500	22.500
	Summe	**137.500**	**137.500**	**137.500**	**137.500**	**137.500**
2. Normale Nutzungsdauer	H in MAS	15000	15000	15000	15000	15000
3. Veraltungszeit	N in Jahren	10	10	10	10	10
4. jährliche Auslastung	**J in MAS/a**	**1000**	**1300**	**1600**	**2000**	**2300**
5. Auslastungsschwelle	Sw in MAS/a	1500	1500	1500	1500	1500
6. Kalkulationszinsfuß	p in %	5	5	5	5	5
7. Faktor für Verzinsungsbasis	f	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
8. Restwert Maschine (nach Forbrig, 2000, S. 123)	R in €	13.750	13.750	13.750	13.750	13.750
9. Reparatur- und Wart.kost.faktor	r	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7
10. Kraftstoff	Verbr. l/MAS	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5
	Kosten €/l	0,9072	0,9072	0,9072	0,9072	0,9072
11. Schmiermittel (nach Forbrig, 2000, S. 126)	Schmiermittelfaktor	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1
12. Personalkosten	Maschinenführerlohn	13,5	13,5	13,5	13,5	13,5
	Nebenkostenzuschlag %	120	120	120	120	120
	Sonstige Stunden	1,17	1,17	1,17	1,17	1,17
	Anzahl (eff.)	1	1	1	1	1
13. Versicherungsprämie (Auskunft vom Maschinenvertrieb 2,15% des Neupreises)						
	€ / a	2.956	2.956	2.956	2.956	2.956
14. Sonstige Organisations- und Verwaltungskosten (Einsatzplanung, PKW+Spesen, Vorfinanzierung [ohne Umsetzkosten])						
	€ / a	20.000	20.000	20.000	20.000	20.000

B) KALKULATION						
1. Fixkosten (unveränderlich)						
	1.1 Zinsen	4,13	3,17	2,58	2,06	1,79
	1.2 Versicherung	2,96	2,27	1,85	1,48	1,29
	1.3 Steuern	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	1.4 Unterstellkosten	20,00	15,38	12,50	10,00	8,70
	Zw.Summe	27,08	20,83	16,93	13,54	11,77
2.Teilfixe Kosten (bedingt veränderlich)						
	2.1 Abschreibung	12,38	9,52	8,25	8,25	8,25
	2.2 Reparaturkosten	9,63	7,40	6,42	6,42	6,42
	Zw.Summe	22,00	16,92	14,67	14,67	14,67
3. Variable Kosten (voll veränderlich)						
	3.1 Treibstoff	6,80	6,80	6,80	6,80	6,80
	3.2 Schmiermittel	0,68	0,68	0,68	0,68	0,68
	Zw.Summe	7,48	7,48	7,48	7,48	7,48
4. Summe Sachkosten						
		56,57	45,24	39,08	35,69	33,93
5. Personalkosten						
	5.1 Maschinenführer	34,75	34,75	34,75	34,75	34,75
	5.2 Hilfskräfte	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Zw.Summe	34,75	34,75	34,75	34,75	34,75
8. Gesamtkosten je MAS		**91,31**	**79,99**	**73,83**	**70,44**	**68,67**

*Die jeweiligen Einzelpositionen sind Nettowerte

10.2 Fragebogen zur Umfrage bei den Biomasseheiz(kraft)werken

Abschnitt I: Basisdaten zu Ihrem Biomasseheiz(kraft)werk

1. In welchem Regierungsbezirk liegt Ihr Biomasseheiz(kraft)werk?

.....

2.1 Wie hoch ist die installierte Leistung bei Ihrem Biomasseheiz(kraft)werk?

	Gesamtleistung	Biomassekessel	
Installierte Leistung	.....	.....	(kW)

2.2 Welche thermische und elektrische Energiemenge wurde 2006 bei Ihrem Biomasseheiz(kraft)werk tatsächlich produziert?

	Gesamtenergie	Biomassekessel	
Thermische Energie	.....	.....	(MWh)
Elektrische Energie	.....	.....	(MWh)

3. In welchem Jahr ging Ihr Biomasseheiz(kraft)werk in Betrieb? .....

4. Ist Ihr Biomasseheiz(kraft)werk ein eigenständiger Betrieb?

❑ Ja ❑ Nein

Wenn nein, mit welcher Unternehmung ist Ihr Biomasseheiz(kraft)werk kombiniert?

.....

5. Wie viele Mitarbeiter (einschl. Betriebsleiter) beschäftigen Sie (Mitarbeiter auf Ganztagesstellen gerechnet)?

Verwaltungspersonal: ..... Technisches Personal: .....

Abschnitt II: Brennstoff-Eigenschaften

6. Wie hoch war der Biomassebedarf Ihres Heiz(kraft)werkes im Jahr 2006?
(Wassergehalt = Gewicht Wasser/Gewicht Frischmasse; atro = absolut trocken)

❑ in Schüttraummeter (SRm): ..... (SRm)

❑ bzw. in Tonnen (t): ..... (t) ❑ atro
❑ Wassergehalt ≈ 30 %
❑ Wassergehalt .....

7. Die eingesetzte Biomasse setzte sich im Jahr 2006 zusammen aus:

Waldhackschnitzel ..... %

Sägenebenprodukte (z. B. Sägespäne, Hackschnitzel, Rinde, Schwarten) ..... %

Flurholz (Landschaftspflege- und Straßenpflegematerial) ..... %

Altholz ..... %

Sonstige Biomasse; z. B. .... %

8. Wie erfolgt die Abrechnung der Biomasse?

❑ nach Volumen (SRm) und Wassergehalt ❑ nach Volumen (SRm)

❑ nach Gewicht (t) und Wassergehalt ❑ nach Gewicht (t)

❑ nach produzierter Wärme (MWh)

Die Fragen 9 bis 12 beziehen sich nur auf Waldhackschnitzel. Wenn Sie keine Waldhackschnitzel verwenden bitte weiter mit Frage 13!

9. Welche Qualitätsanforderungen an den Brennstoff Waldhackschnitzel haben Sie?

.....

.....

10. Wird für Waldhackschnitzel mit höherem Wassergehalt weniger bezahlt?

❑ Ja ❑ Nein

Wenn ja, wie staffeln sich die Preise?

.....

.....

11. Zu welchen Anteilen setzen sich die verwendeten Waldhackschnitzel aus Nadel- und Laubholz zusammen?

Nadelholz ..... % Laubholz ..... %

12. Wenn Sie den Wassergehalt der Hackschnitzel bestimmen, welches Gerät bzw. welche Methode benutzen Sie dazu?

.....

Sind Sie mit der derzeitigen Bestimmungsmethode des Wassergehalts zufrieden?

Ja ❑ Nein ❑

Abschnitt III: Lieferung / Versorgung

13. Von welchen Anbietern bezogen Sie 2006 wie viel Biomasse? Welche Preise haben Sie 2006 dafür bezahlt? Welche durchschnittlichen Transportentfernungen lagen vor?

	Anbieter	Menge			Preis in € #		Transport-entfernung (im ∅)
		SRm	Tonne atro	MWh	zum Jahresanfang	zum Jahresende	km
Waldhack-schnitzel	Eigene Produktion*						
	Forstlicher Zusammen-schluss (WBV / FBG)						
	Privatwaldbesitzer						
	Staatswald						
	Kommunalwald						
	Forstunternehmen						
	Handelsunternehmen						
	Sonstige:						
Sägeneben-produkte	Eigene Produktion*						
	Sägewerke						
	Handelsunternehmen						
	Sonstige:						
Altholz	Handelsunternehmer						
	Sonstige:						
Flurholz	Eigene Produktion*						
	Sonstige:						
Sonstige Biomasse	Eigene Produktion*						
	Sonstige:						

* Die Biomasse fällt im eigenen Werk an (bitte Entstehungskosten angeben)

Wenn Sie die Preise zum Jahresanfang bzw. Jahresende nicht angeben können, bitte Durchschnittspreise (∅) angeben

14. Falls Sie Sägenebenprodukte und/oder Waldhackschnitzel verwenden, woher beziehen Sie diesen Brennstoff?

	Anteile in % der Gesamtmenge	
	Sägenebenprodukte	**Waldhackschnitzel**
Aus dem Bereich des Regierungsbezirkes		
Aus Bayern Regierungsbezirk(e):		
Aus Deutschland (ohne Bayern) Bundesland:		
Importe aus Österreich		
Importe aus Tschechien		
Importe aus anderen Ländern Land:		
Unbekannt		

15.1 Haben Sie einen/mehrere langfristige(n) Liefervertrag(-verträge) über Waldhackschnitzel abgeschlossen?

❑ Ja ❑ Nein

Wenn Ja, mit wem?

	Laufzeit des Vertrags in Monaten		Laufzeit des Vertrags in Monaten
❑ Forstunternehmer	.....	❑ Privatwaldbesitzer	.....
❑ Handelsunternehmer	.....	❑ Staatswald	.....
❑ Waldbesitzervereinigungen	.....	❑ Kommunalwald	.....
❑ Sonstige, z. B.	.....		

15.2 Wie hoch ist der Anteil der vertraglich gebundenen Brennstoffe?

Waldhackschnitzel	..... %	Altholz	..... %
Sägenebenprodukte	..... %	Sonstiges:	..... %

15.3 Welchen Preis zahlen Sie für vertraglich gebundene Waldhackschnitzel? .....

Welchen Preis zahlen Sie für vertraglich ungebundene Waldhackschnitzel? .....

16. Wenn Sie Preisanpassungsklauseln verwenden, an welche Indices sind diese gebunden?

Index	**Anteil in %**	**Quelle**
Heizöl		
Gas		
Fernwärme		
Spreißel-Schwarten		
Sonstige(s):		

Abschnitt IV: Asche

17. Wie viel Asche fällt in Ihrem Biomasseheiz(kraft)werk jährlich an?

Rostasche in Tonnen: ..... (t)

Filterasche in Tonnen: ..... (t)

18.1 Wie erfolgt die Entsorgung bzw. die Verwertung der Asche?

.....

.....

18.2 Welche Kosten bzw. Erlöse entstehen Ihnen dadurch?

Kosten (-) bzw. Erlöse (+) in Euro pro Tonne (€/t) bei Rostasche: ..... (€/t)

Kosten (-) bzw. Erlöse (+) in Euro pro Tonne (€/t) bei Filterasche: ..... (€/t)

Abschnitt V: Einschätzung Energieholzmarkt / Ausblick

19. Planen Sie in den nächsten 3 Jahren in eine Erweiterung Ihres Biomasseheiz(kraft)werkes zu investieren?

❑ Ja ❑ Nein

Wenn ja, um wie viel wird die Leistungskapazität steigen?

Thermische Leistung: Steigerung um ..... % bzw. ..... kW

Elektrische Leistung: Steigerung um ..... % bzw. ..... kW

20.1 Wo sehen Sie momentan die drängendsten Probleme für Ihr Biomasseheiz(kraft)werk?

.....
.....

20.2 Wo sehen Sie momentan die drängendsten Probleme für den Energieholzmarkt in Bayern?

.....
.....

21. Was könnte bzw. sollte konkret zur Verbesserung der Situation getan werden? Welche umsetzbaren Empfehlungen würden Sie geben?

.....

.....

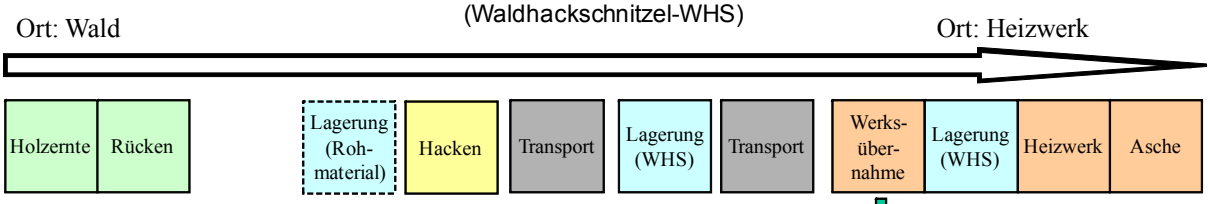
Vielen Dank für Ihre Mitarbeit!!!

10.3 Darstellung der innerhalb der Modellregion erfassten Prozessketten

Im Folgenden sind die neun erfassten Prozessketten der Versorgung der Biomasseheiz(kraft)werke mit Waldhackschnitzeln in anonymisierter Form beschrieben.

Prozesskette BMHW A

(Waldhackschnitzel-WHS)



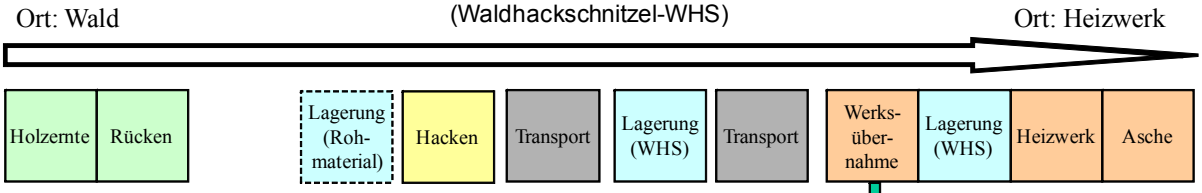
Organisiert und durchgeführt von einem landwirtschaftlichen Dienstleister/Forstunternehmer (Hackerunternehmer) im Auftrag einer WBV (Ausnahme: Rücken des Holzes; hierfür beauftragt Hacker A einen anderen Forstunternehmer). Die WBV ist Vertragspartner des Heizwerkes.

Abrechnung durch das Heizwerk nach Wärmemenge mit der WBV (diese vergütet dann den Hackerunternehmen), Betrieb des Kessels durch den Hausmeister von A. Die Asche wird durch den WHS-Lieferanten (Hacker-unternehmen) übernommen.

Schnittstelle: Anforderung der Waldhackschnitzel durch den Hausmeister von BMHW A, Lieferung der WHS innerhalb von 3 Tagen durch den Hackerunternehmen direkt in den Lager-Bunker.

Prozesskette BMHW B

(Waldhackschnitzel-WHS)



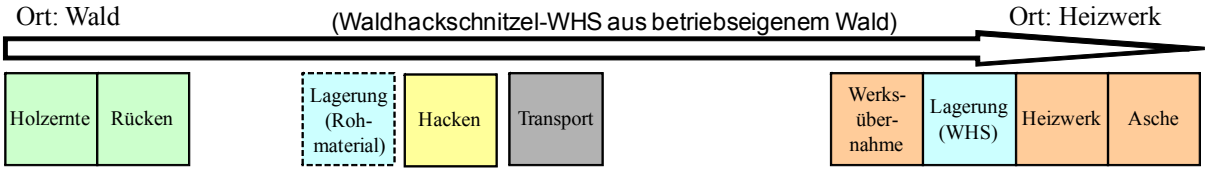
Holzernte bis Transport ins Heizwerk: Organisiert und durchgeführt von einer Liefergemeinschaft. Die Liefergemeinschaft besteht aus 7 Waldbauern/Landwirten, die alle im Gemeindegebiet ansässig sind.
Koordinierend und als Zwischenglied tritt ein Vertreter eines überregionalen Stromanbieters (Dienstleister) auf. Dies hat den Vorteil, dass das Heizwerk nur einen Ansprechpartner hat, der letztlich den Einsatz der Liefergemeinschaft koordiniert.

Abrechnung durch das Heizwerk nach Gewicht und Wassergehalt über Dienstleister, Betrieb des Kessels durch einen Mitarbeiter von BMHW B. Ein Wartungs-vertrag besteht mit dem Kesselhersteller außerdem existiert ein Service-Vertrag mit dem Dienstleister über bestimmte Dienstleistungen (z. B. 24 h Störservice). Die Asche wird durch die WHS-Lieferanten übernommen und verwertet.

Schnittstelle: Telefonische Anforderung der Waldhackschnitzel durch den Mitarbeiter von BMHW B bei dem Vertreter des Dienstleisters. Dieser beauftragt nach einem festen Turnus die Mitglieder der Liefergemeinschaft.
Die Lieferung der WHS erfolgt innerhalb von 1 bis 2 Tagen durch die Liefergemeinschaft mittels Schlepper und landwirtschaftlichem Hänger direkt in den Lager-Bunker. Bei der Anlieferung wird mit Hilfe Waage und Einstechsonde das Gewicht und der Wassergehalt des Hackgutes ermittelt.

Prozesskette BMHW C

(Waldhackschnitzel-WHS aus betriebseigenem Wald)



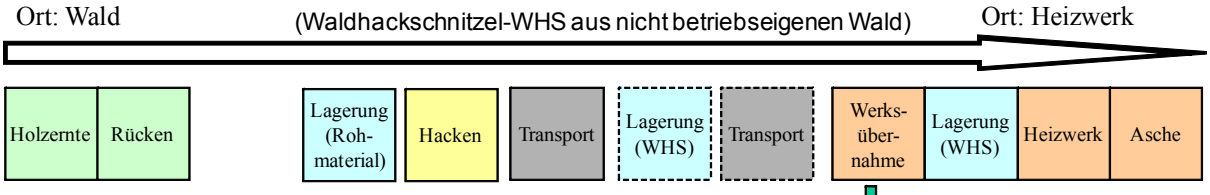
40 % des Brennmaterials werden durch den betriebseigenen Wald sichergestellt. Dabei übernimmt der Landwirtschaftsmeister die Organisation und Durchführung der gesamten Prozesskette vom Wald bis zum Heizwerk in Absprache mit Mitarbeitern von BMHW C . Der Landwirtschaftsmeister ist angestellt an der Organisation (kirchliche Stiftung mit landwirtschaftlichem Betrieb), die das Heizwerk C zur Wärmeversorgung der Betriebsgebäude betreibt. Die Holzernte erfolgt motormanuell, die Rückung mittels betriebseigenem Schlepper. Das Rohmaterial wird dann bis zum Hacken auf Ackerflächen zwischengelagert (Winter bis Juli/August). Lediglich das Hacken wird an den Maschinenring bzw. Hackerunternehmer vergeben, da kein betriebseigener Hacker vorhanden ist.
Nach dem Hacken wird das Material direkt mittels landwirtschaftlichem Schlepper und LKW bzw. mit einem LKW des beauftragten Unternehmers ins Heizwerk gefahren. Eine erneute Zwischenlagerung erfolgt nicht.

Übernahme der WHS durch den Landwirtschaftsmeister
Abrechnung durch das Heizwerk nach Wassergehalt und Volumen.
Betrieb des Kessels durch den Landwirtschaftsmeister. Die Wartung erfolgt durch den betriebseigenen Heizung-Lüftung-Sanitär-Trupp. Die Asche wird durch eine Entsorgungsfirma in Absprache mit dem Landwirtschaftsmeister abgeholt und deponiert.

Abgesehen von Modul „Hacken“ befindet sich die ganze Prozesskette in einer Hand, dadurch entstehen keine Schnittstellenprobleme. Außerdem kann das Heizwerk auch in „Notzeiten“ seinen Bedarf über gewisse Zeit aus dem eigenen Wald decken.

Prozesskette BMHW C

(Waldhackschnitzel-WHS aus nicht betriebseigenen Wald)



Organisiert und durchgeführt von der WBV (evtl. Aufträge an Forstunternehmer) oder durch Landwirte. Eingeschlagen wird das Holz im Winter, die Zwischenlagerung (Acker, Fahrsilo) dauert bis Juli/August, dann wird gehackt.
Das Hacken erfolgt entweder durch den Hacker des Maschinenrings oder durch Unternehmer.
Nach dem Hacken wird das Hackgut entweder gleich mittels LKW (Forstunternehmer) oder mit Schleppern und landwirtschaftlichen Hängern ins Heizwerk gebracht oder noch einmal zwischengelagert bis es benötigt wird bzw. bis das Fahrsilo leergeräumt werden muss.

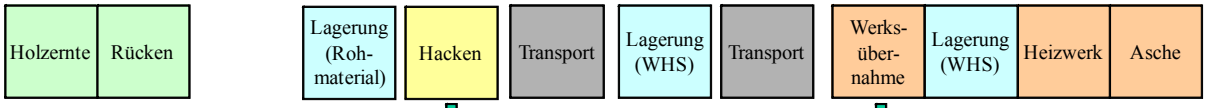
Abrechnung durch das Heizwerk nach Wassergehalt und Volumen.
Prozessschritte Heizwerk und Asche wie bei Bereitstellungskette von WHS aus betriebseigenem Wald

Schnittstelle: Anforderung der Waldhackschnitzel durch Mitarbeiter von BMHW C bzw. Lieferanten bieten WHS an, wenn z. B. die Fahrsilos leergeräumt werden müssen. Absprache Anlieferungstermin mindestens 1 Woche vorher. Übernahme der WHS am Heizwerk durch den Landwirtschaftsmeister

Prozesskette BMHW D

(Waldhackschnitzel-WHS)

Ort: Wald → Ort: Heizwerk



1. Holzernte, Rückung und Lagerung des Rohmaterials durch Waldbauern. Ernte erfolgt motormanuell im Winter, Rückung mit Schlepper und Rückewagen. Kronenmaterial wird für das Hacken gesondert gelagert, Lagerung bis zum Sommer.

2. WBV vermittelt dem Waldbesitzer einen örtlichen Forstunternehmer (oder Maschinenring => motormanuelle Ernte). Holzernte, Rückung und Lagerung des Rohmaterials erfolgen durch Forstunternehmer. Holzernte meist mit Harvester im Winter, Rückung mit Forwarder oder Forstspezialschlepper mit Rückewagen. Das Kronenmaterial wird den Waldbesitzern abgekauft und extra gelagert (Lagerung bis zum Sommer). Das Kronenmaterial wird örtlichen Hackerunternehmern verkauft.

Hacker auf Anfrage Waldbauer / Forstunter-nehmer. Einweisung des Hackers durch diese. Hacken des Kronenmaterials durch örtliche Hacker-unternehmer (insgesamt 3 Stück) direkt in das Transport-fahrzeug.

1. Abfuhr des Hackgutes durch Waldbauern mit Schlepper und Hänger und Zwischenlagerung in Hallen, Fahrsilos, Verschlägen oder offenen Lagerplätzen.
2. Abfuhr durch Hackerunternehmer und Zwischenlagerung (Halle, offener Lagerplatz). Bei feuchtem Material evtl. direkt Verkauf nach BMHKW I

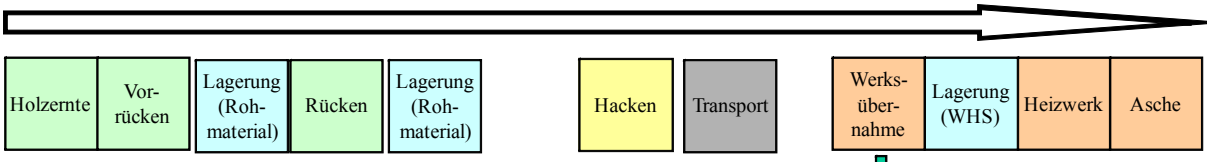
Abrechnung durch das Heizwerk nach Wassergehalt und Gewicht, der Betrieb des Kessels erfolgt durch den Heizwart.
Die Asche wird durch den WHS-Lieferanten, Kommandit und Unternehmer übernommen.

Schnittstelle: Anforderung der Waldhackschnitzel durch den Heizwart, Lieferung der WHS innerhalb von 2 Tagen durch die Kommanditisten (Waldbauern, Unternehmer)

Prozesskette BMHW E

(Waldhackschnitzel-WHS)

Ort: Wald → Ort: Heizwerk



Die Gesellschafter schlagen motormanuell ein und rücken selbst mit Schlepper und Rückewagen bis zur Rückgasse vor. Dort verbleibt das Kronen-/Durchforstungsmaterial bis zum Frühjahr/Sommer, ehe es vom Gesellschafter zu Lager-/Hackerplätzen gebracht wird. Der bestellte Hacker fährt mehrere Gesellschafter nacheinander an. Der Transport der Hackschnitzel ins Werk wird durch die Gesellschafter mit landwirtschaftlichen Schleppern + Hänger selbst durchgeführt.
Analog ist es auch möglich, das Hackerunternehmer von Waldbesitzern bzw. Forstunternehmern (Ausstattung: Harvester/Forwarder/Forstspezialschlepper) Reststücke und Kronenmaterial günstig aufkaufen, hacken und dann an das Heizwerk weiter verkaufen. Der Transport erfolgt dann meist mit unternehmereigenen Fahrzeugen.

Zusätzlich wird gehacktes Restholz (Altholz) von einem zertifizierten Unternehmen frei Werk geliefert.
Daneben werden noch kleinere Mengen an SNP (Sägewerk, Schreinerei) sowie Landschaftspflegematerial (Gemeinde, Kleinanlieferer) bereitgestellt. Die Lieferung erfolgt hierbei frei Werk.
Das Heizwerk nimmt aber auch Hackschnitzel vom Kirchenwald/(Staatsforst) (Käferbefall) an. Für den Kirchenwald wird durch das Heizwerk auch der Hacker und der Transport organisiert.

Abrechnung durch das Heizwerk nach Volumen und Wassergehalt. Die Gesellschafter haben eigene Kontingente. Der Betrieb des Kessels erfolgt durch einen speziellen Geschäftsführer „Heizwerkstechnik und Werksübernahme“. Zusätzlich gibt es noch zwei weitere Geschäftsführer für die Bereiche „Verwaltung und Leitungsnetz“. Die Asche wird durch ein Unternehmen kostenpflichtig entsorgt.

Schnittstelle: Lieferanten kippen die Hackschnitzel in die Halle und geben den Lieferschein (Volumen) ab. In der Regel wird beim Abkippen der Wassergehalt beprobt (Einstechsonde).

Prozesskette BMHKW F

(Waldhackschnitzel-WHS)

Ort: Wald → Ort: Heizkraftwerk

1. Organisiert und durchgeführt von den Waldbauern (48 Kommanditisten) Motormanuelle Holzernte, Rückung mit Schlepper. Zwischenlagerung des Rohmaterials im Wald für einige Monate.
2. WBV: Rohmaterial stammt hauptsächlich aus Pflegeverträgen. Durchführung durch Lohnunternehmern im Auftrag der WBV.
3. Forstunternehmer: Holzernte und Rückung durch den Forstunternehmer.

Zusätzlich liefert die Gemeinde bzw. der Landkreis geringe Mengen an Landschaftspflegematerial („Ernte“, Hacken, Transport und Werksübernahme in einem Schritt ohne Unterbrechung).

Das Hacken wird durch die Waldbauern in Teams organisiert. Hierzu werden Hackerunternehmer beauftragt (davon 1 Hauptunternehmer mit 2 Großhackern und 70 % Anteil). Der Transport zum Werk erfolgt im Anschluss an das Hacken durch den Hackerunternehmer bzw. in Eigenregie durch die Waldbauern (Kommanditisten) mit Hilfe landwirtschaftlicher Schlepper.

Wird nur sehr selten durchgeführt und wenn, dann nur durch Waldbauern.

Abrechnung durch das Heizkraftwerk nach Gewicht und Wassergehalt (Pandis-Tonne), Lagerhaltung, Betrieb des Kessels und Störungsdienst durch den Geschäftsführer bzw. 400 € - Kraft.
Die Rostasche wird durch einen Forstunternehmer entsorgt (Beimischung zum Kompost). Die Filterasche wird als Bergversatz entsorgt.

Schnittstelle: Anlieferung der WHS nach Absprache (meist telefonisch). Lieferung direkt in die Lagerhalle bzw. auf den Lagerplatz. Zuvor muss allerdings eine befahrbare Waage in ca. 1 km Entfernung vom Werk angefahren werden. WHS werden vom Geschäftsführer bzw. von den 400 € - Kräften übernommen. Beim Abkippen der WHS wird der Wassergehalt bestimmt.

Prozesskette BMHW G

(Waldhackschnitzel-WHS)

Ort: Wald → Ort: Heizwerk

WBV organisiert Einschlag und Rückung, dabei existieren zwei Varianten:
1. Holzernte und Rückung durch Forstunternehmer mittels Harvester und Forwarder. Zu hackendes Material wird an LKW-befahrbarer Forststraße oder an Flurwegen außerhalb des Waldes gelagert.
2. Motormanuelle Holzernte durch die Waldbauern /Landwirte. Rückung des Materials an Forststraße oder Flurwege wird ebenfalls durch diese durchgeführt.

WBV organisiert die gesamte Produktionskette von der Holzernte bis hin zur Werksübernahme. WBV besitzt einen Generalbrennstoffliefervertrag über WHS mit dem BMHW G.

Beim Hacken existieren zwei Varianten:
1. WBV organisiert Großhacker, Hacker fährt dann verschiedene Lagerorte an und hackt das Material direkt in das Transportmittel. Hackerunternehmer bringt das Material dann meist direkt ins BMH(K)W.
2. Waldbauern können sich WBV-eigenen handbeschickten Kleinhacker mieten, Waldbauern sorgen dann selbst für den Transport.

Wird nur selten durchgeführt. Lagerung der Hackschnitzel in Fahrsilos der Landwirte oder bei Hackerunternehmern. Zwischenlagerung dient der Qualitätsverbesserung (Winterzuschlag für Material < 25 % Wassergehalt) und der Pufferung bei Brennstoffmangel. Transport übernehmen Waldbauern bzw. Hackerunternehmer.

Abrechnung durch das Heizwerk nach Gewicht und Wassergehalt (Pandis-Tonne), Lagerhaltung, Betrieb des Kessels und Störungsdienst durch den Geschäftsführer, 400 € - Kraft bzw. Wartungsdienst. Die Rost- und Flugasche wird durch ein Entsorgungs-unternehmen entsorgt.

Schnittstelle: Anlieferung der WHS nach Absprache. Lieferung direkt in die Lagerhalle. Abrechnung erfolgt mittlerweile nach Gewicht und Wassergehalt, früher wurde nach der Wärmemenge abgerechnet.

SNP-Material wird in kleineren Mengen von örtlichen Sägewerken geliefert („Billigmacher“). SNP-Produkte fallen aber in Zukunft weg, da nur noch NaWaRo-konforme Brennstoffe (EEG-Bonus) verheizt werden dürfen. Kommune, Landkreis und Bund liefern in geringen Mengen Landschaftspflegematerial („Billigmacher“).

Prozesskette BMHW H

(Waldhackschnitzel-WHS)

Ort: Wald → Ort: Heiz(kraft)werk

Organisiert und durchgeführt von der FBG bzw. deren Mitglieder. Die FBG besitzt auch einen eigenen Hacker, so dass die gesamte Kette ohne Unterbrechung in einer Hand liegt. Derzeit liefert die FBG und ihre Mitglieder ca. 20 % des jährlichen Biomassebedarfs.

Der Rest wird von Handelsunternehmern (3 bis 4 Stammlieferanten) und zu kleinen Anteilen von einem Sägewerk geliefert.

Abrechnung durch das Heizwerk nach Gewicht und Wassergehalt. WHS werden in einer Lagerhalle gelagert. Maschinenring-Mitarbeiter beschickt den Bunker mittels Teleskopradlader. Technischer Betrieb der Anlage durch einen ausgebildeten Kesselwärter (Subunternehmer).
Die Ascheentsorgung wird von einem Entsorgungsunternehmen durchgeführt (Deponierung).

Schnittstelle: Anlieferung der Waldhackschnitzel durch die FBG-Mitglieder in Absprache mit dem Maschinenring-Mitarbeiter, Lieferung direkt in die Lagerhalle und Übernahme durch Maschinenring-Mitarbeiter.

Prozesskette BMHKW I

(Waldhackschnitzel-WHS)

Ort: Wald → Ort: Heizkraftwerk

Organisiert und durchgeführt durch Forstunternehmer mit Harvester/Forwarder in Absprache mit den Waldbesitzern bzw. FBGs. Kronenmaterial und rotfaule Stücke als Kopplungsprodukt zur „normalen" Holzernte. Information durch Forstunternehmer an BMHKW über Anfall an Brennmaterial.

2. Möglichkeit: Holzernte/Rückung durch Waldbesitzer/FBG.

Schnittstelle: Kronen/rotfaule Stücke werden an der LKW-befahrbaren Waldstraße zwischengelagert (durch Forstunternehmer) bzw. durch werkseigene LKW an geeigneten Orten vorkonzentriert. Forstunternehmer weist BMHKW in Örtlichkeit ein.

BMHKW organisiert und beauftragt Hackerunternehmer und dessen Einsatz. Dieser hackt Kronen und rotfaule Stücke. Abtransport der WHS durch werkseigene LKW (Abroll-Container), evtl. durch Spedition, Schlepper mit Hänger, Unternehmer-LKW.

Einweisung der Hackerunternehmer durch BMHKW.

Entfällt in der Regel (Ausnahme bei 2 WBV im fränkischen Bereich).

Schnittstelle: Übernahme der WHS am Werk. Wiegen der Fahrzeuge beim Werkseingang (geeichte Waage) und Probenentnahme für Darrmethode. Abrechnung der angelieferten Biomasse über Gewicht und Wassergehalt (Abrechnungsbasis ist t atro).

Lagerung der WHS in Halle Lagerdauer max. 1 Woche. Betrieb der Anlage durch betriebseigenes Personal (u. a. Kraftwerksmeister).

Schnittstelle: Abholung der Asche durch externe Firma in Absprache mit dem BMHKW.

Weitere Varianten: Anlieferung der WHS durch Handelsunternehmer oder Waldbesitzer, Anlieferung von Hackschnitzeln aus Landschaftspflegematerial.
Weitere Varianten existieren im fränkischen und schwäbischen Raum.