

Die Ermittlung der ökologischen Effizienz der Bereitstellungskette von Waldhackgut anhand ausgewählter Fallstudien

Diplomarbeit

Durchgeführt am Department für Wald- und Bodenwissenschaften, Institut für Forsttechnik, an der Universität für Bodenkultur Wien

vorgelegt von

Alfred Riezinger

Betreuer:

Ao.Univ.-Prof. DI Dr. Karl Stampfer

Wien, 2008

Inhaltsverzeichnis

D	anksa	agur	ng	4
K	urzfas	ssur	g	5
Αl	bstrac	ct		6
Ei	inleitu	ıng .		7
	1.1	Inte	ernationale Rahmenbedingungen	7
	1.2	Pro	oblemstellung	7
	1.3	Zie	elsetzung	8
2	Gru	ındla	agen und Methoden zur Ökobilanzierung	9
	2.1	All	gemeine Grundlagen	9
	2.	1.1	Energiesituation in Österreich	9
	2.	1.2	Holzentstehung CO ₂ -Speicherung	. 10
	2.2	Ök	obilanzierungen im Überblick	. 10
	2.3	Ök	obilanz nach EN ISO 14040	. 11
	2.3	3.1	Zieldefinition und Untersuchungsgegenstand	.12
	2.3	3.2	Sachbilanz	14
	2.3	3.3	Wirkungsabschätzung	.15
	2.4	Me	edienübergreifende Umweltbelastungen	. 17
	2.5	De	r "niederländische Vorschlag"	. 18
	2.6	Ök	obilanzierung nach der MAIA	. 18
	2.0	6.1	Rohstoff und Materialinput	.19
	2.0	6.2	Systemgrenzen, Zuordnung und Datenqualität	.20
	2.7	Die	e KEA-Methode	. 20
	2.8	An	wendungsbeispiel einer Ökobilanz nach EN ISO 14040	.21
	2.9	Bio	ologische Produktion	.21
	2.10	Т	echnische Produktion	. 23
	2.	10.1	Zusammenfassung der Sachbilanz der technischen Produktion	24
	2.	10.2	Wirkungsbilanz	.27
	2.11	Ö	Okobilanzierung bei der Waldhackgut-Erzeugung	. 27
	2.12	Т	reibstoffbedarf bei der Bereitstellung	.31
	2.13	Р	roduktivität	. 34
3	Me	thoo	dische Vorgangsweise	. 36

	3.1	•	ut	
	3.2	Out	put	37
	3.3		nsitivitätstests	
4	⊏rg	ebni	S	39
	4.1	1.1	Waldbau	.39
	4.1		Fällen	
	4.1	.3	Rücken	. 40
	4.1	1.4	Hacken	. 41
	4.1	1.5	Transport	.41
		4.1.5	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	
		4.1.5		
	4.1	1.6	Beispiel nach der MAIA-Methode	45
	4.2	Aus	sgewählte Bereitstellungsketten	46
	4.2	2.1	Energieholz aus Durchforstung	46
	4.2	2.2	Schlagrücklass aus Rückung mit Seil im Baumverfahren	48
	4.2	2.3	Rücken mit Forwarder von Schlagrücklass	49
	4.2	2.4	Ergebnis	.49
	4.3	Ser	nsitivitätstests	51
	4.3	3.1	Einfluss der Harvesterproduktivität	51
	4.3	3.2	Einfluss der Hackerproduktivität	52
	4.3	3.3	Einfluss der Transportdistanz	53
	4.3	3.4	Einfluss des Wassergehaltes	54
5	Zus	amn	menfassung	56
6	Anł	nang		. 58
	0.4	D-4	Contact and a second	-0
	6.1	Dei	finitionen	
	6.	1.1	Begriffsdefinitionen und Abkürzungen	58
7	Qu	ellen	verzeichnis	60
	7.1	Lite	eraturverzeichnis	60
	7.2	Que	ellen aus dem Internet	64
	73	Mö	ndliche Mitteilungen	64

Danksagung

Meinen Eltern Alfred und Waltraud danke ich besonders, standen sie immer hinter mir, zeigten schon früh Möglichkeiten eines Werdegangs auf und griffen mir finanziell unter die Arme, damit dieses Studium in diesem Rahmen möglich wurde. Weiters danke ich meiner Großmutter Marie, welche neben der ständigen finanziellen Unterstützung zu Studiumsbeginn noch mit Naturalien dafür sorgte, dass das Eisfach im Studentenheim des weit entfernten Enkels nie leer wurde.

Darüber hinaus danke ich meinen Studienkollegen, mit denen die gemeinsamen Stunden, sei es bei Vorlesungen, Festen und mehrtägigen Exkursionen, immer positiv in Erinnerung bleiben werden. Auch waren es viele, die mit der einen oder anderen ordentlichen Mitschrift aus den Vorlesungen zum Gelingen des Studiums wesentlich beigetragen haben. Besonders danke ich meinem Studienkollegen DI Stefan Spinka, welcher in der Abschlussphase der Diplomarbeit mit EDV-technischem Rat zur Seite stand und auch wichtige Gänge an der Boku für mich durchführte, für die Gegenlesung der Arbeit aus forstfachlicher Sicht.

Auch gilt mein Dank neben den kontaktierten Praktikern, den Mitarbeitern des Instituts für Forsttechnik an der Boku unter der Federführung von Ao. Univ.-Prof DI Dr. Karl Stampfer. Für die lange fachliche Betreuung stand DI Christian Kanzian geduldig zur Seite. Mein Dank dafür.

Weiters danke ich dem Österreichischen Agrarverlag dass es möglich war, ohne Studienabschluss bislang 1,5 Jahre als Fachredakteur in der Fachgruppe Holz zu wirken.

Zu guter Letzt aber ganz besonders danke ich meiner lieben Freundin Veronika Ritter, welche seit nunmehr sieben Jahren an meiner Seite steht und uns 2006 unseren Sohn Jakob schenkte. Sie war es, welche meine knappe zeitliche Verfügbarkeit durch den Beruf und daneben der Diplomarbeit, ertragen musste.

Kurzfassung

Wärme- und Energieproduktion aus Biomasse – Waldhackgut – liegt im Trend. Die ökologische Effizienz bei der Bereitstellung von Waldhackgut ist vielfach ein Thema am Rande. Ein Nachweis dieser wird langfristig im Sinne der Nachhaltigkeit notwendig sein. So wurde auf Basis einer Literaturstudie und Befragung von Experten eine vereinfachte Methode zur Bilanzierung von Energieinput und CO₂-Ausstoß erarbeitet.

Die wichtigsten Eingangsgrößen sind die Graue Energie und der Treibstoffverbrauch. Die Systemgrenzen hängen vom betrachteten Ausgangsmaterial ab. Stammt das Waldhackgut aus Schlagrücklass, so wird erst ab dem Zeitpunkt bilanziert, der speziell für die Bereitstellung von Waldhackgut aufgewendet wird. Das heißt die Prozesse Fällen und Aufarbeiten gehen nicht in die Bilanz ein, sondern werden der Rundholzproduktion zugeordnet. Wird Waldhackgut aus Energieholz produziert werden alle Prozesse von der Holzproduktion bis zum Transport einbezogen.

Handelt es sich um Energieholz, so ist der größte Einflussfaktor die Produktivität des Harvesters gefolgt von der Produktivität des Hackers. Bei Energieholz werden bei den untersuchten Ketten im Durchschnitt 9,6% des Energieinhaltes (Heizwert) bei Hackgut (Wassergehalt 35%) für die Bereitstellung verbraucht sowie 5,4% des gespeicherten CO₂ ausgestoßen. Bei den untersuchten Ketten von Schlagrücklass nach Seilrückung im Baumverfahren wurde das Fällen und Rücken nicht einkalkuliert, wodurch nur 2,4% des Energiegehaltes aufgewendet bzw. 1,6% des gespeicherten CO₂ ausgestoßen werden.

Abstract

Producing energy or heat out of biomass – wooden chips – is up to date. The ecological efficiency of the supply chain of forest-chips is often noticed marginally. A confirmation of this efficiency will be necessary in the long term concerning sustainability. The basis for this paper was a review in literature and interviews of experts. There was created an simplyfied method for calculating the input of energy and the emissions of CO₂.

The most important input factors are the life cycle of the machines and the fuel consumption. The system borders depend on the considered raw material. If the wooden chips derive from forest residues, the bilance starts in the process which is especially operated because of the supply chain for chips. So the processes felling and skidding weren't calculated in the assessment, as they belong to logging. Are the chips made of energy wood, all processes incipient by the production of wood until the transport are included.

Are the chips made from energy wood, the most important factor is the productivity of the harvester, followed by the productivity of the chipper. In the analyzed supply chains of energy wood (water content 35%) 9.6% of the heating value was expended for the supply chain and 5.4% of the retained CO₂ was emitted. In the analyzed supply chains (forest residues, skidding by cable line, whole tree), the production of wood and the felling were excluded, only 2.4% of the energy content was expended and 1.6% of the retained CO₂ was emitted.

Einleitung

1.1 Internationale Rahmenbedingungen

Mit 16.02.2005 trat das Kyoto-Protokoll der Klimarahmenkonvention (UNFCCC) völkerrechtlich in Kraft. Die Industrieländer müssen im Zeitraum von 2008 bis 2012 ihre Emissionen der sechs wichtigsten Treibhausgase, welche als Auslöser der globalen Erwärmung gelten, gegenüber 1990 (für fluorierte Gase 1995) um rund 5% reduzieren. Österreich verpflichtete sich, die Treibhausgasemissionen im Zeitraum von 2008 bis 2012 um 13% gegenüber 1990 zu verringern. Untersuchungen des Umweltbundesamtes zeigen einen Anstieg der Treibhausgase 2003 um 5,9% gegenüber 2002 auf insgesamt 91,6 Millionen Tonnen. Der Ausstoß des wichtigsten Treibhausgases Kohlendioxid (CO₂) erhöhte sich in dieser Periode um 7,4% auf 76,2 Millionen Tonnen. Damit entfernte sich Österreich weiter vom Kyoto-Ziel und lag im Jahr 2003 bereits 16,6% über dem Kyoto-Basisjahr. Obwohl die Produktion nominell um ein Drittel sank, ist seit 1990 der CO₂-Ausstoß der Industrie in Österreich nahezu konstant geblieben. Der Ausstoß im Bereich Verkehr hat sich im gleichen Zeitraum verdoppelt (vgl. Standard, 2007).

Anlässlich des EU-Frühjahrsgipfels am 24. März 2006 definierten die 25 Mitgliedsstaaten im Rahmen der Energiestrategie folgendes Ziel: Der Anteil erneuerbarer Energieträger soll bis 2015 auf 15% gesteigert werden. Bei der Umsetzung soll auch der Biomasse-Aktionsplan (BAP) mit 20 konkreten Maßnahmen für Verkehr, Wärmegewinnung und Stromerzeugung mithelfen (vgl. timberonline.net, 2006).

1.2 Problemstellung

Energie aus Holz liegt im Trend. Der Preis für Pellets und Hackschnitzel steigt stetig an und hat im Herbst 2006 einen (vorläufigen) Höhepunkt erreicht. Dazu beigetragen hat auch die Erzeugung von "grünem Strom" in Biomassekraftwerken (Schmiedhofer, 2007).

"Ohne die Umstellung fossiler Energiesysteme auf CO₂-neutrale Quellen ist Kreislaufwirtschaft nicht möglich. Die Zukunft einer ökonomisch, ökologisch wie auch sozial nachhaltigen Energieversorgung kann daher nur in einem Mehr an Effizienz und erneuerbarer Energie sowie einem Weniger an Kohle, Öl und Gas liegen" (Kopetz, 2007).

Die Steigerung der Ökoeffizienz ist ein globales Anliegen, das es auf die ausführende Ebene der Forstwirtschaft zu transformieren gilt (Knechtle, 1997). Die Umweltverträglichkeit verschiedener Produkte und Verfahren ist in den vergangenen Jahren zu einem Dauerthema geworden. Die Forstund Holzwirtschaft hat aber nur einen geringen Anteil an der gesamten Umweltbelastung (Winkler, 1997). Eine Ökobilanzierung in der Forstwirtschaft zeigt nicht nur die Vorteile im Vergleich zu anderen Branchen auf, sondern hat auch einen internen Nutzen: Oftmals führt sie zur

Kostenreduktion, weil Schwachstellen aufgezeigt werden (vgl. Frühwald, 1995). Upton (1995) stellte ein wachsendes Interesse an ökologischen Gütezeichen vieler forstlicher Produkte fest.

Die erste umfassende Ökobilanz wurde in den 1990er-Jahren für Coca-Cola erstellt (Backhaus, 2002). Eine allgemeine Anleitung zur Erstellung einer Ökobilanz bietet die EN ISO 14040. Die Norm wurde 2006 novelliert. Inhaltlich hat sich in den neuen Normen 14040:2006 und 14044:2006 wenig verändert (Schweinle, 2007). Eine derartig umfangreiche Untersuchung ist aber recht aufwendig und es kann sein, dass diese den Blick auf den Einfluss des eigentlich zu bewertenden Objekts verschleiert (vgl. Götz et al. 2001). Weiters stellt die forstliche Produktion im Gegensatz zu der Produktion eines Plastikbechers oder einer Colaflasche einen Sonderfall dar, da CO₂ während der Produktion gespeichert wird.

In der Literaturstudie wurde keine Methode gefunden, wie mit einfach zu ermittelnden Inputgrößen, die ökologische Effizienz der Bereitstellung von Waldhackgut nach österreichischen Verhältnissen ermittelt werden kann.

1.3 Zielsetzung

In dieser Arbeit soll auf Basis einer Literaturstudie und Expertenbefragungen ein Überblick gegeben werden, welche Verfahren der Ökobilanzierung es gibt. Es wird eine einfache Methode zur Bilanzierung von Energie und CO₂ erarbeitet.

Folgende Kernfragen bezüglich der Bereitstellungskette von Waldhackgut sollen geklärt werden:

- Welche Möglichkeiten der ökologischen Bilanzierung gibt es?
- Wie kann man einfach ermitteln wie viel Energie aufgewendet werden muss und wie viel CO₂ ausgestoßen wird?
- Welche Faktoren beeinflussen die Ökoeffizienz am stärksten?
- Wie umweltfreundlich ist die Energieerzeugung mit Waldhackgut in Abhängigkeit von den Transportdistanzen?

2 Grundlagen und Methoden zur Ökobilanzierung

2.1 Allgemeine Grundlagen

2.1.1 Energiesituation in Österreich

Abbildung 1 stellt den Endenergieeinsatz nach Energieträgern dar. Mit 77% decken fossile Energieträger den Großteil des Energieeinsatzes in Österreich ab, die zum überwiegenden Teil importiert werden. Den größten Anteil an fossilen Energieträgern nehmen die Erdölprodukte mit 43% ein. Erdgas mit 23% und Kohle mit 12% tragen zusammen rund 35% zur Deckung des Primärenergieeinsatzes bei. Der Beitrag von erneuerbaren Energieträgern am gesamten Endenergieeinsatz betrug 2004 300.083 TJ; dies entspricht einem Anteil von 21,6%.

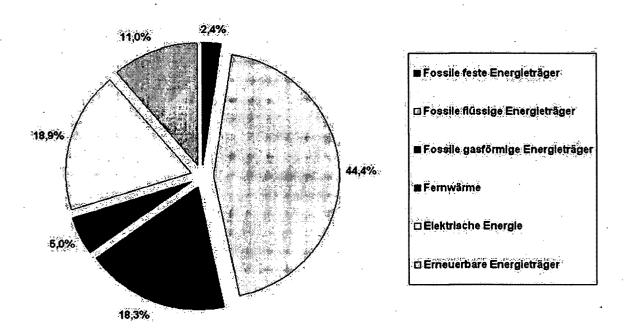


Abbildung 1: Energiesituation in Österreich 2004 (Quelle: Statistik Austria)

2.1.2 Holzentstehung CO₂-Speicherung

Die meisten Pflanzen (ausgenommen Vollschmarotzer) bauen ihre Körpersubstanz aus Kohlendioxid (CO₂), Wasser (H₂O), und verschiedenen Nährstoffen unter Ausnützung der Sonnenenergie auf. Diesen Vorgang nennt man *Photosynthese*. Darunter versteht man allgemein die Bildung organischer Stoffe aus anorganischen Bausteinen mit Hilfe von Lichtenergie (Kull, 2000). Diese Energie wird mit Hilfe lichtabsorbierender Farbstoffe in die Pflanze aufgenommen. Vereinfacht kann die Bildung von Biomasse durch folgende Reaktionsgleichung dargestellt werden (Nettogleichung):

$$6CO_1 + H_2O \xrightarrow{Licht} C_6H_{12}O_6 + 6O_2$$

Die durch die Photosynthese in der Glukose gespeicherte Energie beträgt 16 MJ/kg Biomasse (Kull, 2000; Nultsch, 2001). In einer atro Tonne Holz werden zwischen 1,5 und 1,9 t CO₂ fixiert (Schweinle und Thoroe, 2001; Lineback et al., 1999).

2.2 Ökobilanzierungen im Überblick

Für die Ermittlung der Ökoeffizienz von Waldhackgut kann eine Ökobilanz nach EN ISO 14040 durchgeführt werden. Die zu Grunde liegende Methodik wurde durch Einzelarbeiten in der Schweiz, den Niederlanden und der Bundesrepublik Deutschland in den späten 1980er Jahren entwickelt (Götz et al., 2001). Weiters werden andere bilanzierende Untersuchungen wie nach der MAIA (Schmid-Bleek et al., 1997), eine Methode über medienübergreifende Umweltbelastungen (Götz et al., 2001), die KEA-Methode (VDI-Richtlinie 4600) und ein niederländischer Vorschlag (Breedveld, 2000) vorgestellt.

Das deutsche Umweltbundesamt definiert eine Ökobilanz wie folgt: "Die Ökobilanz ist ein möglichst umfassender Vergleich der Umweltauswirkungen zweier Systeme in der mehrere unterschiedliche Produkte, Produktgruppen, Verfahren oder Verhaltensweisen verglichen werden. Sie dient der Offenlegung von Schwachstellen, der Verbesserung der Umweltverträglichkeit von Produkten, der Entscheidungsfindung bei der Beschaffung, der Förderung umweltfreundlicher Produkte und Verfahren, dem Vergleich alternativer Verhaltensweisen und der Begründung von Handlungsempfehlungen."

Der Zweck von Ökobilanzen liegt in der Bewertung und Erfassung der ökologischen Auswirkungen von Produkten, Arbeitssystemen oder -verfahren sowie Handlungsweisen. Bedingt durch die Energiekrise in den 1970er Jahren haben Analysen des Energieverbrauchs für alternative Betriebsmittel die Forschungsarbeiten vorangetrieben. Neben den USA hat auch Deutschland an diesen Entwicklungsarbeiten Anteil gehabt (vgl. Backhaus, 2002).

2.3 Ökobilanz nach EN ISO 14040

Die Durchführung einer Ökobilanz ist in der EN ISO 14040 in vier Stufen aufgebaut:

- · Zieldefinition und Untersuchungsgegenstand
- · Sachbilanz, dh. Erfassen der Einflüsse des Untersuchungsgegenstandes auf die Umwelt
- Wirkungsabschätzung durch Beschreibung der Auswirkung der ermittelten Einflüsse auf umweltrelevante Sachverhalte
- Bewertung dieser Auswirkungen

Die Festlegung des Ziels und des Untersuchungsrahmens fällt unter die erste Phase einer Ökobilanz. Weiters müssen das zu untersuchende System und die Datenkategorien beschrieben werden. Der Zweck, der Untersuchungsrahmen und die vorgesehene Verwendung beeinflussen die Zielrichtung und die Tiefe der Studie (geografische Ausdehnung, Zeithorizont ...).

Die Phase der Sachbilanz (Life Cycle Inventory, LCI) umfasst die Sammlung der Daten. Laut EN ISO 14040 ist diese im Wesentlichen eine Bestandsaufnahme von Input-/Output-Daten mit Bezug auf das zu untersuchende System. Also werden der Ressourcenverbrauch und Emissionen in Luft, Wasser und Boden ermittelt. In der Sachbilanz erfolgt eine Aufbereitung der Lebensphasen. Weiters werden die einzubeziehenden Kategorien unter Berücksichtigung der Lebensweg-Kriterien wie der Nutzungsdauer, der Verwendung von Sekundärrohstoffen und des Recyclings aufgelistet. Anschließend führt man eine Auswahl der Fluss- und Bestandesgrößen an. Als Ergebnis erhält man eine Matrix der Umweltbelastungen in Mengenangaben, sowie eine Zusammenstellung der qualitativ zu beschreibenden Umweltbelastungen.

Bei der Auswertung der Sachbilanz werden die Umweltwirkungen des untersuchten Systems daher noch nicht bewertet. Diese erfolgt erst in der Wirkungsabschätzung. Die Sachbilanz ist der zentrale Baustein einer Ökobilanz (vgl. FFE, 1999).

2.3.1 Zieldefinition und Untersuchungsgegenstand

Modul: (Lebensphase)

Ein Modul im Produktsystem umfasst einen Einzelprozess (siehe Abbildung 2). Module sind miteinander durch Flüsse von Zwischenprodukten sowie mit anderen Produktsystemen durch Produktflüsse und mit der Umgebung durch Elementarflüsse verbunden. Ein zugeführter Elementarfluss ist z.B. der Treibstoff.

Datenkategorien:

Die erhobenen Daten werden dazu verwendet, Einspeisungs- und Ausstoßmenge eines Moduls zu bestimmen. Die Hauptgruppen, unter denen die Daten eingeordnet werden können, sind:

- Energie-, Ausgangsmaterial-, Hilfsstoff-Input (Treibstoff, Schmiermittel)
- Produkte (Rundholz)
- · Emissionen in Luft, Wasser und Boden

Es können auch weitere Unterteilungen innerhalb der einzelnen Module gemacht werden (CO₂, CO, NO_x...).

Die Daten können entweder an den Produktionsstandorten gesammelt, oder veröffentlichten Quellen entnommen bzw. aus diesen errechnet werden.

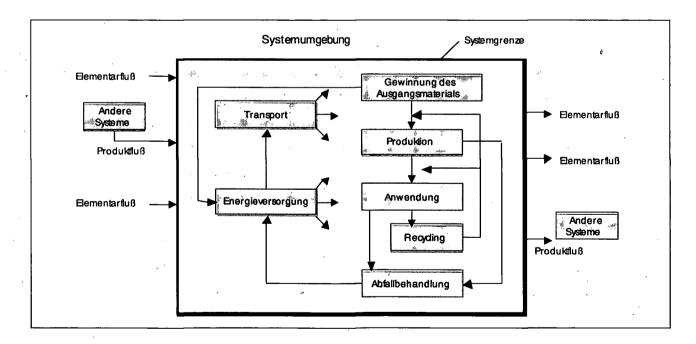


Abbildung 2: Beispiel eines Produktsystems für eine Ökobilanz (nach EN ISO 14041)

Funktion, funktionelle Einheit und Referenzfluss

Die <u>funktionelle Einheit</u> (FE) soll ein Maß für den Nutzen des Produktsystems sein. Der Hauptzweck ist die Festlegung einer Bezugsgröße, auf welche die Einspeisungs- und Ausstoßdaten normiert werden. Beispiele für Bezugsgrößen sind der Schüttraummeter (Srm), die Atro-Tonne Rohholz (atro to) (vgl. Schweinle und Thoroe, 2001), die bewirtschaftete Holzbodenfläche (ha) oder die produktive Arbeitsstunde (vgl. Knechtle, 1997). Die funktionelle Einheit muss messbar sein.

Festlegung der vorläufigen Systemgrenzen

Im Idealfall sollte das Produktsystem so gestaltet werden, dass die Einspeisung und der Ausstoß an den Grenzen Elementarflüsse sind. Meist stehen nicht genügend Zeit und Daten zur Verfügung die Studie derart umfassend zu gestalten. Man muss sich entscheiden, welche Module einbezogen und wie genau diese behandelt werden. In vielen Fällen konkretisiert man die ursprünglichen Systemgrenzen erst im Laufe der Untersuchung.

Es gibt mehrere Lebenswegabschnitte, Module und Flüsse die berücksichtigt werden sollten. Beispiele:

- Material und Energie der wesentlichen Herstellungs- und Verarbeitungsschritte
- Vertrieb, Transport
- Verwendung von Produkten
- · Herstellung von Hilfsstoffen
- · Wartung von Produktionsanlagen

Anforderungen an die Datenqualität

Es hängt vom Ziel und dem Umfang einer Studie ab, wie exakt folgende zusätzliche Anforderungen berücksichtigt werden:

- Genauigkeit (z.B. Varianz der Daten)
- Vollständigkeit (Anteil der Stellen die Daten lieferten an Gesamtanzahl der Stellen)
- Repräsentativität (wie viel der Grundgesamtheit durch meine Datenmenge widergespiegelt wird)

2.3.2 Sachbilanz

Eine Sachbilanz befasst sich mit dem Verfahren der Sammlung und Berechnung von Daten (Abbildung 3). Zuerst ist es notwendig, das Ziel und den Untersuchungsrahmen festzulegen. Bei der Vorbereitung der Datensammlung bietet sich anschließend ein Systemfließbild an, welches alle Lebensphasen und deren Wechselbeziehungen darstellt. In der Datensammlung muss die Beschreibung jedes Moduls dokumentiert werden, um eine doppelte Zählung eines In- oder Outputs zu vermeiden. Im Berechnungsverfahren untersucht man die Daten durch eine vergleichende Untersuchung von z.B. Emissionsfaktoren auf deren Validität. Für jedes Modul muss ein geeigneter Referenzfluss (gemeinsame Einheit) gefunden werden (Bezug auf Modul bzw. funktionelle Einheit). Die Outputdaten errechnet man mit Bezug auf diese Referenzflüsse. Hinsichtlich Relevanz ist es nicht zweckmäßig, jeden Stoff/Energieeingang darzustellen. Nach einer Sensitivitätsanalyse kann man gegebenenfalls die Systemgrenzen verbessern.

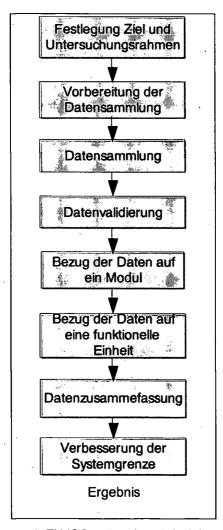


Abbildung 3: Ablauf einer Sachbilanz nach EN ISO 14041 (vereinfacht)

Allokation von Eingang oder Ausstoß

In der Praxis sei es laut Norm selten so, dass ein Betriebsablauf nur einen einzigen Output hat. Umgelegt auf die Holzernte kann man dies so sehen: ein Harvester erzeugt in einer Periode selten nur Energieholz. Waldhackgut zum Beispiel wird oft aus Schlagrücklass, der bei der Rundholzernte anfällt, hergestellt. Eine Zuordnung der Stoffströme ist daher genau zu bedenken. Einige Outputs können teils Koppelprodukte und teils Abfall sein. Da die Stoffströme nur den Produkten zugeordnet werden können, ist es nötig, das Verhältnis von Produkten zu Abfall zu ermitteln. So kalkuliert Grasser (1994) für die Waldhackgutbereitstellung 10% (Holz)Verlust, welcher im Wald verbleibt.

2.3.3 Wirkungsabschätzung

Der dritte Teil einer Ökobilanz nach EN ISO 14040 beinhaltet die Wirkungsabschätzung. Es werden mit den Ergebnissen der Sachbilanz die Umweltwirkungen eines Produktsystems eingeschätzt. Die Ergebnisse werden komprimiert dargestellt und bestimmte Umweltthemen ausgewählt (Wirkungskategorien z.B.: Klimaänderung).

Die Wirkungsbilanz kann bei folgenden Vorgängen verwendet werden:

- Erkennen von Verbesserungsmöglichkeiten eines Produktsystems und Hilfestellung bei Prioritätensetzung
- Verhältnis-Vergleiche von Produktsystemen hinsichtlich gewisser Wirkungen
- Aufzeigen von Umweltthemen (Versauerung, Treibhauseffekt ...)

Die Wirkungsabschätzung liefert eine das ganze System betrachtende Sicht der umweltrelevanten Themen. Die Wirkungsbilanz ordnet die Ergebnisse der Sachbilanz (z.B.: Treibhausgase) Kategorien zu. Es wird für jede Kategorie ein Indikator ermittelt. Die gesammelten Indikatoren geben dann für die jeweiligen Umweltthemen Auskunft.

Beispiel: Die Emission von Treibhausgasen (Ergebnisse aus der Sachbilanz) werden durch die Wirkungskategorie Klimaänderung repräsentiert. Die Verstärkung der Infrarotstrahlung dient als ein Indikator hierfür.

Einige Bestandteile sind für die Wirkungsabschätzung verbindlich. Die Wirkungsabschätzung muss mit anderen Phasen der Ökobilanz abgestimmt werden (siehe Anhang A der ISO 14042).

Abbildung 4 beschreibt das Konzept der Wirkungsindikatoren (Treibhauseffekt) in Bezug auf einen Umweltwirkungsmechanismus. Die Sachbilanzergebnisse (Beispiel CO₂/Srm) werden den Wirkungskategorien (Treibhauseffekt) zugeordnet. Anschließend ermittelt man, wie viel der untersuchte Prozess zur Ozonzerstörung beiträgt (Wirkungsindikator). Der Wirkungsendpunkt beschreibt die Wirkungen des untersuchten Systems auf den Menschen oder die Vegetation.

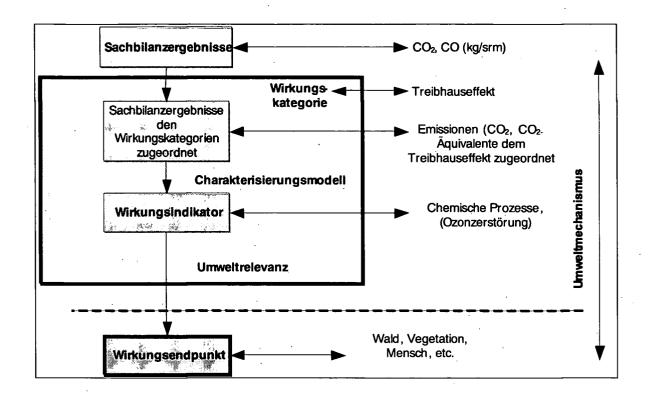


Abbildung 4: Konzept der Wirkungsindikatoren (verändert nach EN ISO 14042)

Um erkennen zu können, ob signifikante Unterschiede zwischen den Ergebnissen vorliegen oder einige vernachlässigbar sind, wird angeraten eine Schwerpunktanalyse (Pareto) oder Fehlerabschätzung und Sensitivitätsanalyse durchzuführen.

2.4 Medienübergreifende Umweltbelastungen

Götz et al. (2001) bewerten mit ihrer Methode medienübergreifende Umweltbelastungen durch bestimmte industrielle Tätigkeiten. Diese Methode weist wesentliche Elemente der Ökobilanz nach EN ISO 14040 auf. Im Vordergrund steht der Vergleich einzelner Techniken, Prozesse oder Prozessabschnitte auf einer Ebene, wo sie gegenseitig austauschbar sind. Es werden nur Parameter betrachtet, in denen sich die Techniken unterscheiden. Als Maßstab dienen:

- die Relevanz der Emissionen der untersuchten Branche und Technik bezogen auf die Gesamtemissionen des Bezugsraums
- der potenzielle Beitrag der untersuchten Technik, eingesetzt in einer bestimmten Anlage an einem fiktiven Standort, ermittelt nach einem Standardausbreitungsszenario in die Umgebungsluft

Der Technikvergleich wird auf relevante Parameter reduziert und (Technik)-Unterschiede quantifiziert. Die Bewertungsmethode ist in einen schematisierten Ablauf untergliedert.

Zunächst werden die zur Verfügung stehenden Techniken ausgewählt und auf ihre Austauschbarkeit gegeneinander hin untersucht, d.h. ob sie für die Betreiber wirklich Alternativen darstellen.

Die zu erwartenden Umweltbelastungen werden in der Identifikation des Medienkonflikts qualitativ bewertet und insbesondere die Unterschiede gegenübergestellt. Es werden Daten zu Schadstoffemissionen, Energie- und Hilfsstoffverbrauch sowie Abfallbeseitigung erhoben.

Die Bilanzergebnisse setzt man mit dem Gesamtenergieverbrauch in einer Region – zum Beispiel anhand von Einwohneräquivalenten – ins Verhältnis. Für die direkten Emissionen wird ein Standardausbreitungsszenario in die Umgebungsluft gezeichnet.

Damit man herausfindet, welche Umweltaspekte relevant sind, werden Schwellenwerte für die bei der branchen- und umgebungsbezogenen Normierung ermittelten Unterschiede zwischen Technikalternativen vorgeschlagen. Angelehnt an die Vorgehensweise bei Ökobilanzen, welche darauf ausgerichtet sind, die Sachbilanzergebnisse möglichst vollständig in Elementarflüssen auszudrücken, erscheint es ratsam, die möglichen Medienkonflikte durch wenige elementare Kategorien auszudrücken.

Empfohlen werden folgende drei Kategorien

- Emissionen in die Luft (direkte Emissionen der Prozesstechnik)
- Emissionen in Gewässer (direkte Emissionen der Prozesstechnik)
- Beanspruchung von natürlichen Ressourcen (energetischer oder stofflicher Aufwand der Prozesstechnik)

2.5 Der "niederländische Vorschlag"

Der als "streamlined LCA" bezeichnete Ansatz zur Ökobilanzierung wurde durch Breedveld (2000) entwickelt. Dieser Vorschlag ("Dutch Approach") deckt sich im Wesentlichen mit der Ökobilanz nach EN ISO 14040. Für die zu bewertenden Techniken werden Sachbilanzen erstellt, wobei der Bilanzrahmen die Technik selbst und die vorgelagerten Prozesse wie zum Beispiel Energievorketten (als Gesamtsystem von der Wiege zur Bahre) umfasst. Die Sachbilanzergebnisse werden anschließend nach einer Standardliste von Wirkungskategorien zusammengefasst. Als abschließende Interpretationshilfe werden die Wirkungsindikatoren-Ergebnisse entsprechend der EN ISO 14042 "normiert". Das Profil der nebeneinander gestellten normierten Umweltwirkungen der einzelnen Techniken soll den Anwender in die Lage versetzen, eine Interpretation hinsichtlich bester verfügbarer Technik (BVT) durchführen zu können (vgl. Götz et al., 2001).

2.6 Ökobilanzierung nach der MAIA

Eine Methode, den Materialverbrauch und die Bewegung aller natürlichen Stoffe zu ermitteln, welche im Laufe des Lebenszykluses "von der Wiege zur Wiege" eines Produktes anfallen, wurde von Schmidt-Bleek et al. (1998) geschaffen. Der Begriff MAIA bedeutet Material-Intensitäts-Analyse. Dabei handelt es sich aber nicht nur um eine Bilanz, sondern auch um eine Philosophie.

Die Ressourcenproduktivität soll gesteigert und so dematerialisiert werden. Um den weltweiten Ressourcenverbrauch zu halbieren, müssten die "alten Industrieländer" diesen auf ein Zehntel des heutigen (Stand Ende 20 Jh.) reduzieren.

Der Materialinput (MI) bezeichnet die Summe aller aufgewendeten natürlichen Rohmaterialien von der Wiege bis zum verfügbaren Werkstoff oder zum dienstleistungsfähigen Produkt. Der Wert wird in Masse pro Masse (to/to, kg/kg) Werkstoff oder Produkt angegeben.

Der ökologische Rucksack ist die sinnbildliche Darstellung der Menge an Ressourcen, die bei der Herstellung, dem Gebrauch und der Entsorgung eines Produktes oder einer Dienstleistung verbraucht werden. Es wird verdeutlicht, welche ökologischen Folgen die Bereitstellung bestimmter Güter verursacht. Die Einheit ist Masse/Masse also to/to. Das Eigengewicht des Werkstoffes oder Produktes selbst wird abgezogen.

Der Materialinput umfasst alles, was an natürlichen Rohmaterialien bewegt und eingesetzt wird, um Sachgüter herzustellen, zu gebrauchen, zu transportieren und zu entsorgen. Dieser wird auf den Nutzen bezogen, den man davon hat, zum Beispiel auf eine Produktive Systemstunde (<u>Material-Input pro Einheit Service – MIPS; vgl. Schmidt-Bleek, 2000). MIPS nimmt Rücksicht darauf, ob mit einem Harvester 1000 oder 10000 fm/J gefällt werden.</u>

Um den ökologischen Rucksack eines Produktes zu ermitteln, werden die erfassten Materialinputs nach fünf Kategorien getrennt ausgewiesen. Die Kategorien werden inklusive enthaltenem Wasser bilanziert. Besteht ein Produkt aus abiotischen und biotischen Materialien, so werden die Eigengewichte jeweils getrennt abgezogen.

Beispiel: Ein Produkt hat 20 kg Eigengewicht (EG), davon 8 kg biotisch und 12 kg abiotisch.

Beispiel Materialinput (MI): biotisch: 10 kg, abiotisch 25 kg => ökologischer Rucksack biotisch 10 - 8 = 2kg, abiotisch 25 - 12 = 13 kg.

Für Güter, welche kein Eigengewicht haben wie Strom oder Wärme, ist der ökologische Rucksack gleich dem Materialinput des ganzen Systems der Erzeugung.

2.6.1 Rohstoff und Materialinput

Alle im untersuchten Produkt oder Prozess enthaltenen Materialien werden kalkuliert und bis auf deren Ursprung (Übergang Ökosphäre – Technosphäre) zurückverfolgt.

- 1.) Abiotische (nicht nachwachsende) Rohstoffe
 - mineralische Rohmaterialien (Erz, Sand, Granit, ...)
 - fossile Energieträger (Erdöl, -gas, Kohle, ...)
 - nicht verwertbare Rohförderung (Rücklass, ...)
 - bewegte Erde (Aushub, Ausbaggerungen, ...)
- 2.) Biotische (nachwachsende) Rohstoffe
 - · Biomasse aus Bewirtschaftung
 - Biomasse aus nicht bewirtschafteten Bereichen
- 3.) Bodenbewegung in der Land- und Forstwirtschaft
 - mechanische Bodenbearbeitung
 - Erosion
- 4.) Wasser
 - Oberflächenwasser
 - Grundwasser
 - Tiefengrundwasser
- 5.) Luft
 - Verbrennung-
 - Chemische Umwandlung

2.6.2 Systemgrenzen, Zuordnung und Datenqualität

Im MIPS-Konzept stehen die anthropogen technischen Einwirkungen auf die Umwelt im Fokus. Daher muss eine klare Systemgrenze zwischen Natur und Technosphäre gezogen werden. Die Systemgrenze auf der Eingangsseite beginnt ab der Entnahme von Massen durch Werkzeuge aus der Natur (z.B. Abbau von Eisenerz). Auf der Ausgangsseite ist die Systemgrenze durch Emissionen während Produktion und Gebrauch sowie die Entsorgung der Stoffe, wenn sie als Abfall wieder in die Natur zurückgelangen, bestimmt. Für die Zuordnung der Eingänge und der ökologischen Rucksäcke auf der Ausstoßseite sind Bestimmungen festgesetzt.

- Bei einem Prozess können als Ausstoß Haupt-, und Nebenprodukte, Reststoffe, Emissionen und Dienstleistungen entstehen.
- Koppelprodukte können in anderen Prozessen als Input eingesetzt werden. Ihre ökologischen Rucksäcke setzen sich aus den Inputmengen, die für die Weiterverarbeitung eingesetzt werden müssen, zusammen.
- Sofern Reststoffe entsorgt werden, ist ihre Eigenmasse im ökologischen Rucksack des Hauptprodukts bereits enthalten. Dazu kommt der MI der Entsorgung.
- Ab dem Ende der Gebrauchsphase wandelt sich jedes Produkt zum Reststoff. Falls diese wiederverwertet werden, bekommen sie den MI des Recyclingvorganges als Rucksack.

Die zur Herstellung eines Produktes oder der Erbringung einer Dienstleistung erforderlichen Rohstoffe werden erfasst. Anschließend werden die Massen der einzelnen enthaltenen Rohstoffe aufgelistet und mit den erhobenen MI-Faktoren multipliziert (Wuppertal-Institut - vgl. Schmidt-Bleek, 1998).

2.7 Die KEA-Methode

Bei der Ermittlung des Kumulierten Energieaufwands (KEA) nach dem Verband Deutscher Ingenieure VDI-Richtlinie 4600 werden alle eingesetzten Primärenergien summiert. Die Software GEMIS (Globales Emissions Modell integrierter Systeme) arbeitet nach diesem System. Der KEA beinhaltet alle energetischen Aufwendungen zur Herstellung Nutzung und Entsorgung von Produkten (Großklos, 2006). Das Ergebnis stellt eine Teilinformation der Sachbilanz dar (Götz et al., 2001). Die Energieeinspeisungen werden nach festen Regeln auf den Primärenergieaufwand bezogen. Der Energieinhalt von Produkten wird berücksichtigt. Der für jeden Schritt berechnete Primärenergieaufwand wird addiert und ergibt den Kennwert KEA für das untersuchte System. Als Instrument zur Umweltbewertung auf einfacher Basis eines Summenparameters bietet der KEA eine vergleichsweise hohe Repräsentanz für Umweltwirkungen. Er deckt von den üblichen Wirkungskategorien im Wesentlichen den Treibhauseffekt, die Versauerung, die Eutrophierung, die Öko- und Humantoxizität und den Verbrauch energetischer Ressourcen ab (vgl. Götz et al., 2001).

2.8 Anwendungsbeispiel einer Ökobilanz nach EN ISO 14040

Schweinle und Thoroe (2001) führen eine Ökobilanzierung der Rundholzproduktion anhand von Erhebungen bei verschiedenen Forstbetrieben durch. Die aufbereiteten Daten wurden mit Hilfe des Programmsystems UMBERTO in eine Ökobilanz überführt. Da die biologische Produktion auch für die Bereitstellung von Waldhackgut dieselbe ist, wird diese Untersuchung näher beschrieben.

In den Betrieben wurden alle Maßnahmen im Erhebungszeitraum, bei denen Primär- und Sekundärenergie eingesetzt wurde, in die Bilanz aufgenommen. Die Autoren wählten einen modularen Ansatz, der die Ökobilanz in die drei Hauptmodule

- · biologische Produktion,
- · technische Produktion und
- Flächennutzung

untergliedert.

2.9 Biologische Produktion

Die Bilanzierung der <u>biologischen Produktion</u> beruht auf einer abgewandelten Photosynthesegleichung. Holz entsteht in dem zu bilanzierenden System durch die Inputgrößen Wasser, Kohlendioxid und Sonnenenergie. Die Outputgrößen sind Holz, charakterisiert durch spezifischen Brennwert und Wassergehalt, Wasser und Sauerstoff.

Die Photosynthese wurde im Hinblick auf die in der Ökobilanzierung zu berücksichtigenden Wirkungskategorien (ISO 14042) zum Ausgangspunkt für die Quantifizierung der Stoffströme gewählt und wie folgt bilanziert:

1851 kg
$$CO_2$$
 + 1082 kg H_2O => 1000 kg Holz + 1392 kg CO_2 + 541 kg H_2O

Der Energieinput bei der Photosynthese wird dem Heizwert, der Wassergehalt dem Wasserinput für die Stoffwechselströme gleichgesetzt. Ein Ergebnis des Moduls biologische Produktion ist in Tabelle 1 ersichtlich. Die Ergebnisse sind auf to atro Rohholz (Rundholz) bezogen.

Tabelle 1: Input und Output bei der biologischen Produktion (nach Schweinle und Thoroe, 2001)

Input

iiiput		
Stoffe und Energie	Menge	
Photosynthese	-	
Kohlendioxid	1852 kg	
Wasser (chem.)	1082 kg	
Energie (Sonnenenergie)	19246 MJ	
Rohholz (Holzfeuchte)	730 kg	

Output

Output	
Stoffe und Energie	Menge
Photosynthese	
Sauerstoff	1392 kg
Wasser (chem)	541 kg
Holz (Produkt)	
Rohholz	1 to
Energie (Brennwert)	19246 MJ
Wasser (Holzfeuchte)	730 kg

2.10 Technische Produktion

Zur Bilanzierung der technischen Produktion werden in den Submodulen neben dem direkten Energieverbrauch pro Maschineneinsatzstunde auch die Vorketten für die Gewinnung und Herstellung der Energieträger (Diesel, Benzin, Strom) in die Bilanz aufgenommen. Die Entsorgung dieser Hilfsstoffe wird nicht berücksichtigt. Die Autoren berechnen diese Werte frei Waldstraße. Transportentfernungen für Rohholz von 50 und 300 km werden modellhaft unterstellt.

Die technische Produktion umfasst:

- Bestandesbegründung (Schlagräumung, Vorwald, Düngung ...)
- Forstschutz (Verbissschutz, Verbesserung des Äsungsangebots)
- Waldpflege (Läuterung, Ästung)
- Holzernte (Fällen, Entasten, Einschneiden, Vermessen, Rücken, ...)
- Wegebau
- Sonstige Betriebsarbeiten (Grenzsicherung, Jagd, Fischerei, Sonstiges

Die Belastungen durch die An- und Abfahrt der Maschinen wurden nicht berücksichtigt. Weiters sind die Vorketten für die Maschinenherstellung und sämtliche Entsorgungen ausgeklammert.

Zur besseren Vergleichbarkeit wurden die Einheiten bei der technischen Produktion auf Srm Fichte umgerechnet. Dabei gelten 500 kg/fm sowie 2,5 Srm/fm.

Für die Bestandesbegründung ergibt sich ein Energiebedarf von max. 2 MJ/Srm und einen CO₂-Ausstoß von 0,1 kg/Srm. Unter Waldpflege summieren die Autoren alle selektiven und schematischen Läuterungen und geben insgesamt mit 2 MJ/Srm einen ähnlich niedrigen Energieinput wie bei der Bestandesbegründung an. Dasselbe gilt für den CO₂-Austoß mit maximal 0,1 kg/Srm.

In drei Betrieben wurde jeweils 3 t/ha kohlensaurer Magnesiumkalk ausgebracht. In einem Modellbetrieb wurde mit Helikopterkalkung bilanziert. Diese Werte werden auf den Hektar bezogen angegeben, da in einem Betrieb der niedrige Einschlag zu nicht vergleichbaren Werten geführt hätte. Die erdgebundene Kalkung mit Schlepper und Forwarder macht ein Drittel des Energieeinsatzes der Helikopterkalkung aus (300 zu 900 MJ/ha). Die Helikopterkalkung ist durch den CO₂-Ausstoß von 72 kg/ha mit hohen Umweltwirkungen verbunden.

Auf Betriebsebene ist der Energieverbrauch für den Forstschutz mit 0,4 MJ/ Srm und der Output von unter 0,2 kg CO₂/Srm gering.

Bei einem Betrieb, in dem auch ein Weg neu- und ausgebaut wurde, schlug sich der Wegebau mit 2 MJ/Srm zu Buche. Bingham (1975) gibt 16 MJ/Srm an, wobei 0,2 kg CO₂/Srm emittiert wurden.

Der Energieverbrauch für sonstige Betriebsarten (Pkw-Fahrten der Waldarbeiter) ist mit max. 1,6 MJ/Srm relativ gering. Die CO₂-Emissionen machen max. 0,1 kg/Srm aus.

Im Abschnitt Verwaltung (Bewirtschaftung des Verwaltungsgebäudes, die An- und Abfahrten der Mitarbeiter und Fahrten der Waldarbeiter zum Arbeitsplatz) ist der Verbrauch im Vergleich zu anderen Produktionsschritten nicht unerheblich. Der Input beträgt 4 bis 12 MJ/Srm sowie der CO₂-Output max. 1,6 kg /Srm.

Die Produktionsabschnitte Fällen und Rücken stellen den Produktionsschritt mit den größten ökobilanziellen Wirkungen dar. In den sieben Betrieben variiert der Energieinput der Holzernte zwischen 42 und 16 MJ/Srm. Der CO₂-Ausstoß lag zwischen 3,4 (vollmechanisiert) und 2,1 kg/Srm (motormanuell).

2.10.1 Zusammenfassung der Sachbilanz der technischen Produktion

Der Gesamtenergieinput bezogen auf den Holzeinschlag lag in den untersuchten Betrieben zwischen 25 und 97 MJ/Srm (Tabelle 2). Den Hauptteil nahmen das Fällen und Rückungen ein.

Tabelle 2: Gegenüberstellung der Untersuchungen von Winkler (1997) sowie Schweinle und Thoroe (2001)

Betriebliche Vorgänge	Winkler (1997) (MJ/Srm)	Anteil am Energieeinsatz	Schweinle und Thoroe (2001) (MJ/Srm)	Anteil am Energieeinsatz
Bestandesbegrün- dung, -pflege, Wegebau	9-36	7-50%	* 5-7	10 - 25
Fällen	8	6-19%	* ² 10-20	* ³ 45 -100
Rücken	19-102	46-86%	\$.0.	
Ferntransport *1	0	0%	10, 70	10, 80
Summe	36-146	100%	25-97	100

Bezieht man die Energieinputs auf den Heizwert von Hackgut mit einem Wasseranteil von 50%, so erhält man für die Werte von Winkler (1997) von 1,6 bis 6,7% sowie für Schweinle und Thoroe (2001) von 1,1 bis 4,4%, welche für die Bereiststellung aufgewendet werden müssen.

^{*1} Bei Schweinle und Thoroe (2001) werden 50 bzw. 300 km Transportdistanz inklusive Leerfahrt berechnet

^{*2} die Autoren kombinieren Fällen und Rücken

Ausgewählte Luftemissionen der Technischen Produktion

In Tabelle 3 werden drei von Schweinle und Thoroe (2001) untersuchte Betriebe angeführt. In der Originalquelle werden alle hier aufgelisteten Emissionen zzgl. Stoffe wie Methan, Partikel, Aldehyde ... aufgelistet (Werte in kg/Srm).

Tabelle 3: Ausgewählte Luftemissionen/Srm bei der technischen Produktion (nach Schweinle und Thoroe (2001))

Betrieb	1	2	3	
Stoff				
CO ₂	4,2	3	4,4	
СО	0,06	0,06	0,18	
Stickoxide	0,04	0,04	0,04	

Die Autoren kalkulierten einen fiktiven Holztransport über 50 bzw. 300 km (22,5 t Ladekapazität) mit einer Leerfahrt. Die pro Fuhre beförderte Holzmenge hängt wesentlich von der Feuchte ab, da mit einer steigenden Feuchte auch das Gewicht höher ist. Für die Bilanzierung wurde für Industrieholz 80% und für Sägerundholz 70% Feuchte unterstellt. Der Energieverbrauch mit 50 MJ/fm ist bei kurzer Entfernung (50 km) nur unwesentlich geringer oder sogar gleich groß wie beim Fällen und Rücken in den untersuchten Betrieben. Bei größerer Transportentfernung (300 km) ist der Energieverbrauch um ein Vielfaches höher als die gesamte forstliche Produktion und erhöht sich auf 350 MJ/fm für Industrieholz und 325 MJ/fm bei Sägerundholz. Friedl et al. (2004) ermittelten als mittlere Distanz vom Wald zur Säge in der Steiermark 56 km und in Oberösterreich/Salzburg 92 km.

Es werden bei einer Transportentfernung von 50 km 8 und bei 300 km 25 kg CO₂/fm emittiert. Diese Ergebnisse zeigen, dass durch die Einsparung von Transportkilometern mehr Energie eingespart werden kann als bei der Optimierung der technischen Produktion (vgl. Schweinle und Thoroe, 2001).

2.10.2 Wirkungsbilanz

Der Treibhauseffekt wird vor allem durch CO₂ und einer Reihe anderer Gase hervorgerufen. Diese tragen unterschiedlich stark zum Treibhauseffekt bei. Der Effekt wird durch die Ermittlung eines Global Warming Potenzials (GWP) für einen Zeitraum von 100 Jahren beschrieben. Die jeweilige Gasmenge (GWP_i) wird mit einem Gewichtungsfaktor (m_i) multipliziert und das Produkt anschließend aufsummiert.

$$GWP = \sum (m_i * GWP_i)$$

Als Beispiel seien Methan mit einem CO₂-Massenäquivalent von 24,5 und Ozon mit einem Wert von 2000 angeführt. So trägt ein Gramm Ozon gleich viel zum Treibhauseffekt bei wie 2 kg CO₂.

Die Werte streuen in den erhobenen Betrieben um 4 kg CO₂-Äquivalente/Srm.

2.11 Ökobilanzierung bei der Waldhackgut-Erzeugung

In der Literatur findet man verschiedene Studien, die sich mit der Quantifizierung von CO₂-Emissionen beschäftigen, die entlang der Bereitstellungskette Waldhackgut entstehen. In der Regel erscheinen diese Emissionen, im Vergleich zum CO₂, welches in der Biomasse gespeichert ist, recht niedrig (vgl. van Belle, 2004). Die Werte aus den Literaturquellen wurden, der besseren Vergleichbarkeit wegen, jeweils auch bezogen auf Heizwert und Srm umgerechnet. Als Referenzgröße dient mit einem Wassergehalt von 35% Fichten-Waldhackgut (Heizwert: 0,652 MWh/Srm), für Laubholz ein Heizwert von 0,909 MWh/Srm bzw. bei Börjesson (1996) speziell für Weide 0,815 MWh/Srm.

Schlamadinger und Marland (1996) entwickelten das GORCAM-Modell (Graz/Oak Ridge Carbon Accounting Model). Es teilt das Ökosystem in verschiedene Abschnitte (Vegetation, Stamm, Abfall, Boden, ...). Es werden die verschiedenen Nutzungsarten und -zeiten der Produkte mitkalkuliert (Produkte mit langer oder kurzer Lebensdauer, Biotreibstoffe ...).

Das Modell CARBAL (Carbon Balance) wurde von Ford-Robertson (1996) entworfen. Es schätzt den CO₂-Ausstoß während Fällen und Rückung in forstlichen Plantagen von Monterey Kiefer (*Pinus radiata*) unter neuseeländischen Bedingungen auf 3% der Menge, die beim Pflanzenwachstum der Plantage absorbiert wird.

Einige Studien quantifizieren die CO₂-Emissionen von ausgewählten Bereitstellungsketten. So vergleicht Winkler (1997) die Emissionen bei der Rückung mit Helikopter, Mobilseilgerät bergab und bergauf und bei einem konventionellen Seilkraneinsatz (Schlittenwinde). Die Emissionen betragen 2,4 bis 10,4 kg CO₂/Srm (3,68 bis 15,9 CO₂/MWh). Die Bereitstellungskette mit Schlittenwinde stößt am wenigsten aus. Hinsichtlich der Ausstoßmenge folgt Mobilseilkran abwärts dann Rückung aufwärts und bei der Helikopterrückung treten die meisten CO₂-Emissionen auf.

Wittkopf (2005) ermittelt aufgrund von Literatur- und Herstellerangaben sowie eigenen Versuchen, CO₂-Emissionen auf Basis des Treibstoffverbrauchs. Seine Werte bewegen sich zwischen 7, kg CO₂/Srm (teilmechanisiert Schlepper mit Rückewagen und vollmechanisiert Forwarder) und 10,7 kg Co₂/Srm (teilmechanisiert Seilschlepper). Der Durchschnitt beträgt 8 kg CO₂/Srm (12,2 kg CO₂/MWh).

Für finnische Verhältnisse erhielten Mälkki et al. (2000) Werte von 4,5 bis 6 kg CO₂/Srm (6,95 bis 9,19 kg CO₂/MWh). Die Studie analysiert Emissionen von Holzernte, Hacken und dem Transport zum Heizwerk. Die Resthölzer (50% Fichte) wurden frisch gehackt oder im Bestand bzw. an der Forststraße zwischengelagert. Die Autoren fanden heraus, dass das die Kette mit Hacken im Bestand mit Mobilhacker, ohne den Prozess des Rückens, weniger Kohlendioxid emittiert als an der Straße mit einem mobilen Großhacker.

Studien über die Produktion von Waldhackgut aus Schlagrücklass sind generell recht unterschiedlich und oft länderspezifisch. Für Österreich inkludierte Jungmeier (1999) in seine Bereitstellungskette Holzernte, Hacken, Lagerung, Trocknen und Transport zum Kraftwerk. Van Belle ermittelte 2004 aus den erhaltenen Werten von Jungmeier einen Ausstoß von 5,6 kg CO₂/Srm (8.6 kg CO₂/MWh).

Börjesson (1996) errechnete, dass bei Holzernte und Transport von Schlagrücklass und Weiden aus Kurzumtrieb in Zentralschweden 2,4 kg CO₂/Srm (3,67 kg CO₂/MWh) emittiert werden. Im Vergleich zu Stroh (Rest der Getreideernte), ist Weide im Kurzumtrieb und Schlagrücklass bei CO₂-Emissionen am niedrigsten (50% der von Ernten aus ständig genütztem Weideland und 10 bis 30% von einjährigem Getreide). Als Energieinput galt in dieser Untersuchung der direkte Verbrauch (Treibstoff und Schmiermittel). Verglichen mit dem Transport per Lkw sind die CO₂-Emissionen des Biomasse-Transports per Traktor 120 bis 140% höher. Bahntransport ist 40 bis 50% und Schiffstransport 70 bis 80% niedriger als Lkw-Transport. Mit der damaligen Technik betragen die CO₂-Emissionen der Produktion von Hackgut aus Weiden von Kurzumtriebsflächen inklusive dem Lkw-Transport von 50 km lediglich 3, 4, bzw. 5% des CO₂-Ausstoßes vom kompletten Kreislauf von Kohle (vgl. Börjesson, 1996).

Forsberg (2000) berechnete verschiedene Bereitstellungsketten von Schlagrücklass (Hacken vs. Bündeln, lokaler vs. Transport über weite Strecken) in Schweden hinsichtlich CO₂-Emissionen. Der CO₂-Ausstoß reicht von 1,4 für die Belieferung eines regionalen Heizwerkes bis 5,2 kg CO₂/Srm bei

Bündelung und Schiffstransport (2,2 bis 7,9 kg/MWh), wobei über die Distanzen keine Hinweise zu finden sind.

Als Standardmodell für die Ermittlung von CO₂-Emissionen pro Primärenergie-Inhalt kann laut van Belle (2004) folgende Funktion verwendet werden:

$ECO_2 = \sum Fc_i t/(Op_i Ec_i')$

ECO₂ sind die CO₂-Emissionen per Primärenergie-Inhalt (kg CO₂/MWh), Fc_i ist der Treibstoffverbrauch für die Zeitspanne i, t ist äquivalent zu CO₂-Emissionen pro Liter fossilem Treibstoff. Op_i ist die Produktivität in der Zeitspanne i (vgl. van Belle, 2004).

Van Belle (2004) machte seine Untersuchungen zum Kohlendioxidausstoß beim Hackvorgang von getrocknetem Schlagrücklass mit einem Anhängehacker von Farmi. Es handelte sich um einen Scheibenhacker mit 2 Messern und einem maximalen Einzug von 25 cm. Angetrieben wurde der Hacker mit einem Renault-Schlepper ARES 566 über Zapfwelle. Bei einer Drehzahl von 2200 rpm erbrachte der Schlepper eine Leistung von 78 kW. Beschickt wurde manuell und stückweise bzw. stammweise. Das Material stammte aus einem 18 jährigen Pappelbestand.

Der Autor untersuchte das Drehmoment abhängig vom Durchmesser des Hackmaterials. Gemessen wurde das Drehmoment, welcher vom Hacker benötigt wird, mittels Vibrometer. Der Schlagrücklass wurde vor dem Hackvorgang gewogen. Anschließend trocknete man das Hackgut und es wurde auf die Produktivität atro to/PSH₁₅ hochgerechnet. Die getrockneten Proben wurden pelletiert und verbrannt. Je niedriger der Durchmesser des zu hackenden Materials war, desto höher war der CO₂-Ausstoß pro MWh.

Mit einem Durchmesser von 4 cm lag die Produktivität bei 567 kg/PSH₁₅. Es wurden 5,9 kg CO₂/Srm Laubholz (6,53 kg CO₂/MWh) durch den Hackvorgang ausgestoßen.

Mit einem Durchmesser des Hackmaterials von 16 cm war ein zehnmal höheres Drehmoment als bei einem Durchmesser von 4 cm notwendig. Die Produktivität war jedoch 20-mal höher. Der Treibstoffverbrauch pro Stunde war doppelt so hoch. Der CO₂-Ausstoß reduzierte sich so auf ein Siebtel (0,91 kg CO₂/MWh, 1 kg CO₂/Srm).

Dünne Durchmesser werden aber praktisch nie alleine, nacheinander, sondern gebündelt verhackt. Daher hat der durchschnittliche Durchmesser der einzelnen Stücke – wenn gebündelt verarbeitet – wahrscheinlich einen weniger starken Einfluss auf den CO₂-Ausstoß (vgl. van Belle, 2004).

Bei verschiedenen Bereitstellungsketten von Waldhackgut aus Fichten- und Birken-Schlagrücklass unter finnischen Verhältnissen entstanden 2,8 bis 4,9 CO₂-Äquivalente/Srm (4,3 bis 7,5 kg CO₂-Äquivalente/MWh). Rücken, Hacken und Transport wurde berücksichtigt. Mit wie vielen Transportkilometern gerechnet wurde, geht nicht hervor. Am wenigsten wurde beim Hacken im

Bestand (kein Rücken), gefolgt vom Hacken an der Straße und schließlich am meisten beim Hacken an einem Zentralen Lagerplatz wegen der steigenden Rückedistanzen ausgestoßen. Die Bereitstellung von Schlagrücklass zur Weiterverwertung als Waldhackgut ist sehr effizient hinsichtlich des Energieverbrauchs. Nur 2-3% der produzierten Energie sind als Energieinput nötig (Wihersaari, 2005).

Wittkopf (2004) ermittelte bei einer Transportentfernung von 15 km zum Heizwerk, dass der Transport der energieintensivste Schritt, gefolgt vom Hacken, Rücken und Fällen ist. Die Energiebilanz fällt sehr positiv aus. Bei Buche und Eiche werden 3% und bei Fichte und Pappel 4% der enthaltenen Energie für die Bereitstellung aufgewendet.

Tabelle 4: Übersicht der verschiedenen Ergebnisse über CO₂-Ausstoß bei Produktion von Waldhackgut.

CO ₂ -Emissionen [kg/MWh]	CO ₂ -Emissionen [kg/Srm]	Erläuterungen	Quelle
		Energieholz	Van Belle (2004) nach Jungmeyer (1999)
11,2 – 16,4	7,3 – 10,7	Energieholz, verschiedene Bereitstellungsketten	Wittkopf (2005)
3,67	2,4	Holzernte und Transport	Börjesson (1996)
7 – 9,2	4,5 – 6	versch. Bewirtschaftungs- Erntemethoden	Mälkki (2000)
2,2 – 7,9	1,4 – 5,2	Hacken vs. Bündeln, untersch. Transportdistanzen	Forsberg (2000)
4,3 bis 7,5 CO₂- Äquivalente	2,8 – 4,9	Rücken, Hacken, Transport Schlagrücklass	Wihersaari (2005)
3,7 – 16	2,4 – 10,4	Rundholz, Seil-, Helikopterrückungen	Winkler (1996)
1,5 – 6,53	1 – 5,9	Hackvorgang	van Belle (2004)

2.12 Treibstoffbedarf bei der Bereitstellung

Der Gesamtenergieverbrauch ist besonders vom Treibstoffverbrauch und der Maschinenproduktivität abhängig. Der Material- bzw. der Energieverbrauch bei der Herstellung und dem Transport der Holzerntemaschinen machen den kleineren Teil aus (vgl. Knechtle, 1997).

Bei der Phase "Use" (Verwendung) machte bei Knechtle (1997) der Energieinput gemessen am Gesamtenergieverbrauch beim Harvester Timberjack 1270 73% und bei der Motorsäge 93% aus.

Für die Phase "Raw Material" (Rohmaterialien) ermittelte Knechtle (1997) bei Forstfahrzeugen einen Anteil am Gesamtenergieinput von 16 bis 20%, bei den untersuchten Maschinen (Harvester) zwischen 12 und 20%. Bei der Motorsäge macht der Anteil nur 2,2% aus. Knechtle (1997) unterstellt beim Harvester, beim Forwarder und beim Skidder jeweils eine Lebensdauer von 8000 PSH 15 und bei der Motorsäge 1200 PMH15.

Der Anteil der Phase "Manufacturing" (Herstellung) am Gesamtenergieverbrauch ist im Lebenszyklus von Holzerntemaschinen je nach untersuchter Maschine nur 2,1% bis 3,4%. Bei der Motorsäge macht die Phase 0,36% aus.

Wie van Belle (2004) feststellt, hängt der Treibstoffbedarf maßgeblich vom Drehmoment und der Drehzahl des Motors ab.

Motorsäge

Eine Motorsäge verbraucht im Durchschnitt 0,3 I/PSH₁₅ Kettenöl und 1,5 I/PSH₁₅ Benzin-Gemisch (vgl. Schweinle und Thoroe, 2001). Der Ölverbrauch wird hier nicht berücksichtigt. Zur Berechnung des Kraftstoffverbrauchs abhängig von der max. Motorleistung und dem Auslastungsfaktor sei auf folgende Formel verwiesen (Pausch, 2002):

Treibstoffverbrauch Motorsäge (I/PSH₁₅) = (-0.0964 + 0.6677 * max. Motorleistung (kW) * 0.5) / 0.9

0,5 = Auslastungsfaktor

0,9 = Dieseläquivalent

Harvester

Als Formel für die Berechnung des Kraftstoffverbrauches eines Harvesters (I/PSH₁₅) führt Pausch (2002) an:

$$Verbrauch/(I/PSH_{15}) = 8,66 + 0,034*max.$$
 Motorleistung (kW)

Schweinle und Thoroe (2001) listen auf, dass Harvester durchschnittlich 0,1 l Motoröl, 0,1 l Hydrauliköl und 0,5 l Kettenschmieröl pro PSH₁₅ verbrauchen. Bei einer Produktivität von 20 Srm/PSH₁₅ sind dies 0,02 l/Srm. (Input: 0,7 MJ/Srm, Output: 0,003 kg CO₂/Srm). Aufgrund dieser niedrigen Menge werden diese Verbräuche in dieser Arbeit nicht berücksichtigt.

Schlepper.

Treibstoffverbrauchs eines Schleppers mit Rückewagen, eines Seilschleppers bzw. eines Zangenschleppers kann über diese Formel geschätzt werden (Löffler, 1991):

Verbrauch (I/PSH₁₅) =
$$0.09 * Motorleistung (PS)$$

Forwarder

Den Treibstoffverbrauch eines Forwarders schätzt Wittkopf (2005) mit folgender Funktion:

Verbrauch (I/PSH₁₅) =
$$1,062 + 0,0786 * Motorleistung (kW)$$

Rundholz-Lkw

Der Treibstoffverbrauch für einen Rundholz-Lkw im beladenen Zustand auf der Forststraße beträgt mit einer Durchschnittsgeschwindigkeit von 20 km/h 60 l/100km (Linko, 2006). Schweinle und Thoroe (2001) führen einen Verbrauchswert von 20 l/PSH₁₅ an. Weiters ist zu beachten, dass für die Bilanzierung eine Leerfahrt wieder in den Wald zurück unterstellt werden soll (vgl. Schweinle und Thoroe, 2001).

Schubboden-Lkw

Als Beispiel für einen Lkw wird der Scania 164 mit 580 PS angeführt. Der Zug besteht aus einer 2 Achs Zugmaschine und einem 3 Achs – Aufleger mit Schubboden. Das Fassungsvolumen beträgt 90 Srm Hackgut. Der Verbrauch wird mit 35 I Diesel/100 km auf der Freilandstraße angegeben (Gaigg, 2006).

Hacker

Liss (1987) gibt unter skandinavischen Bedingungen mit demselben Traktor und Hacker an, dass der Treibstoffverbrauch zwischen 0,8 und 6,9 l/Srm variiert. Der Treibstoffverbrauch eines Aufbauhackers auf einem Lkw beträgt 1 l/Srm (Hakkila, 1989 und Stampfer et al., 1997). In Grasser (1995) beträgt der Treibstoffverbrauch eines Großhackers 1 l/Srm.

Der Treibstoffverbrauch beim Hackvorgang von Waldhackgut ist von den folgenden Faktoren abhängig:

- · Der gewünschten Korngröße,
- · dem Wassergehalt und dem Reinheitsgrad des zu hackenden Materials,
- · der Baumart und der Dimension des Hackmaterials,
- der Lufttemperatur,
- der Art des Hackers und dessen Drehzahl (vgl. Krenn, 2006; Jeitler, 2006; Kressl, 2006; Eschlböck, 2007).

Je niedriger der Wassergehalt ist, desto stärker steigt der Spritverbrauch wegen des härteren Materials, doch der Heizwert des Hackgutes ist höher als bei feuchterem Ausgangsmaterial. Somit ist bereits vor getrocknetes Hackmaterial ökologisch günstiger zu bewerten (Krenn, 2006).

2.13 Produktivität

Stampfer (2001) entwickelte Produktivitätsmodelle für Fällung und Aufarbeitung mit Harvester. Für Radharvester gibt es zahlreiche Zeitbedarfs- und Produktivitätsmodelle, die in ihrem Grundschema aus drei Komponenten bestehen: Einem Modell für die (1) Fortbewegung, (2) für die Baumbearbeitung und (3) für die Unterbrechungen.

Aus der Addition der Systemeffizienz für die Fortbewegung und Bearbeitung kann man über den reziproken Wert die Systemproduktivität berechnen. Die Modelle basieren auf der produktiven Systemzeit ohne Unterbrechungen (PSH₀). Man sollte jedoch Unterbrechungen bis 15 Minuten mit einbeziehen (PSH₁₅). Als Korrekturfaktor wird mit einem Wert von 1,35 multipliziert.

$$HARV\ prod(PSH_{15}) = \frac{60}{k*(effiz_{fort}(PSH_0) + effiz_{bearb}(PSH_0))}$$
 $HARV\ prod(PSH_{15}) \dots Systemproduktivität\ Raupenharvester\ (m^3/PSH_{15})$
 $effiz_{fortbew} \dots Systemeffizienz\ Fortbewegung\ (min/m^3)$
 $effiz_{bearb} \dots Systemeffizienz\ Bearbeitung\ (min/m^3)$
 $k \dots Umrechnungsfaktor\ von\ Zeitbedarf\ PSH_0\ auf\ PSH_{15}$

Hacker

Unterschiedliche Faktoren beeinflussen die Hackerleistung maßgeblich. Daher kann man mit der Nennleistung nach Herstellerangaben nur bedingt auf die tatsächliche erzielbare Leistung im praktischen Einsatz schließen. Die Produktivitäten bewegen sich laut Zeitstudien in Österreich zwischen 43,6 (Schlagrücklass) bis 150 Srm/PSH₁₅ (Rundholz) (Kühmaier et al., 2007).

So können bei einigen Modellen mobiler Groß (Trommel)-hacker bis zu 200 Srm/PSH₁₅ erzeugt werden. Dies trifft aber nur zu, wenn es sich um Starkholz oder Bündel handelt und unter idealen Bedingungen gearbeitet wird (Kanzian, 2005; Krenn, 2006; Preuner, 2006).

Liss (1986) studierte einige dieser Faktoren anhand eines mit einer Schlepper-Zapfwelle angetriebenen Scheibenhackers. Man produzierte Hackgut mit 8 mm Korngröße bei einer Drehzahl von 540 U/min. Die untersuchten Holzarten waren Fichte, Rotföhre und Birke. Der Bloch-Durchmesser beeinflusst in dieser Untersuchung die benötigte Energie am meisten. Je höher der Wassergehalt des zu hackenden Materials war, desto weniger Energie wurde für den Hackvorgang benötigt. Auch hat es einen Einfluss, in welcher Größenklasse Hackgut erzeugt wird. Je größer das erzeugte Hackgut war, desto mehr Energie musste aufgewendet werden. Der Einfluss der Holzart ist geringer. Zu beachten ist hier, dass Arten mit ähnlicher Dichte untersucht wurden.

Spinelli und Hartsough (2001) entwickelten ein Modell zur Berechnung der benötigten Zeit um Hackschnitzel herzustellen. Bei den Untersuchungen wurden Hybridpappeln gehackt. Man verwendete Material aus Durchforstungen, Flussbettreinigungen und Schlagrücklass.

Die Zeit in Minuten (T) um eine Tonne herzustellen sinkt mit höherer Hackerleistung und höherer Größenklasse des Hackguts. Sie erstellten ein Modell, welches das Frischgewicht (GF) und die Nennleistung (LH) des Hackers beinhaltet.

 $T_{(min/to)} = 0.02 + 13.1 \cdot (GF^1 \cdot LH^1) + 566 \cdot LH^1$

3 Methodische Vorgangsweise

Mit Hilfe elektronischer Datenbanken und dem Internet sowie der Universitätsbibliothek wurde die Literaturstudie durchgeführt. Weiters wurden Hackunternehmer, Praktiker und Wissenschafter telefonisch oder per E-mail befragt. Mit Hilfe der Literaturstudie wurde eine einfache Kalkulationsmethode erarbeitet, welche die wesentlichen Bestandteile einer Ökobilanzierung von der Bereitstellung von Waldhackgut berechnet. Der Anwender kann mit der Kenntnis einiger Daten der Bereitstellungskette (Treibstoffverbrauch, Produktivität, Transportkilometer) die ökologische Effizienz berechnen.

3.1 Input

Die Energie (MJ/Srm) der Prozessschritte wird als Input der Bereitstellungskette von Waldhackgut berechnet. Eine <u>Unterscheidung für die Kalkulation wird hinsichtlich des Ausgangsmaterials</u> getroffen:

- Es handelt sich um Waldhackgut aus Schlagrücklass, welcher ansonsten im Wald verbleiben würde. Beispiele sind Wipfel, Äste, unverkäufliche Sortimente und Baumarten. Die Holzernte wird so nicht mit eingerechnet. Der Energieeinsatz muss daher der Rundholzproduktion zugeschlagen werden.
- Es handelt sich um Energierohholz, welches speziell für die thermische Verwertung z. B. bei der Erstdurchforstung in Nadel- und Laubholzbeständen sowie bei waldbaulichen Maßnahmen in Niederwäldern geerntet wird. Hier wird der Prozess Holzernte sowie die technische Produktion mitgerechnet (vgl. Kühmaier et. al, 2007).

Handelt es sich um Energieholz, so wird ein Energieinput von 30 MJ/Srm in Anlehnung an Schweinle und Thoroe (2001) für die technische Holzproduktion ohne Holzernte berücksichtigt. Bei Waldhackgut aus Schlagrücklass wird erst ab dem Prozessschritt, ab dem der Aufwand speziell für die Gewinnung von Hackgut aufgewendet wird (ab Rücken bzw. Hacken) bilanziert.

Aufgrund der Literaturrecherche wird in dieser Arbeit die Graue Energie (Phasen Rohmaterial und Herstellung) als Konstante von 60 MJ/PSH₁₅ für alle Forstmaschinen außer der Motorsäge zugeschlagen. Die graue Energie eines Lkw wird bezogen auf den Srm als vernachlässigbar gesehen und daher nicht berücksichtigt.

Die Treibstoffverbräuche werden in dieser Arbeit pro Srm summiert und anschließend mit einem Heizwert von Fichte bei einem Wassergehalt von 50% (waldfrisch) und 35% (halbes Jahr Trockenzeit) bilanziert. Der Energieinhalt von Diesel wird mit 43,5 MJ/l angenommen. Als Zusatz

wird die Bereitstellung des Treibstoffes als KEV (Kumulierter Energieaufwand) berücksichtigt (Diesel: 16,2%, Benzin auch Gemisch: 22,3%) (GEMIS, 2004). Der Transport (Überstellung) der Maschinen fließt nicht in die Berechnungen mit ein.

Die Phase "End of Life" wird nicht berücksichtigt, da sich der Aufwand für die Entsorgung und eine eventuelle Materialrückgewinnung in etwa aufheben (vgl. Knechtle, 1997).

Über die getroffenen Annahmen wird mit folgenden Formeln der Input berechnet:

Eingang Energie (MJ)=
$$\sum EI_{(Prozesschritte)}$$

Erweiterte Formel:

Eingang Energie (MJ)=
$$\sum VT/Srm_i *EI_{(TS)} *1,B + (60/(Prod_{(srm)}/PSH_{15})$$

El_(MJ)= Energieinput der einzelnen Prozessschritte der Bereitstellungskette.

VT= Treibstoffverbrauch in Litern

B_(MJ) =Kumulierter Energieverbrauch (KEV) für die Bereitstellung von Treibstoff (Quelle GEMIS, 2004)

60/PSH₁₅ (MJ) = Konstante für Graue Energie bei Forstmaschinen (Harvester, Forwarder, Skidder, Hacker)

Mit dieser Formel können auch andere Prozessketten ausgewertet werden.

3.2 Output

Als Output werden die Emissionen des wichtigsten Treibhausgases CO₂ bei den Prozessschritten der Bereitstellungskette berechnet. Will man eine biologisch-technische Produktion wie bei Holz hinsichtlich CO₂-Ausstoßes untersuchen, muss beachtet werden, dass CO₂ im Holz gespeichert wird. Es ist möglich, diese Speicherung als negatives Vorzeichen, als Gutschrift einzusetzen (vgl. Schweinle und Thoroe, 2001). In dieser Arbeit werden aber die Netto Inputs- und Outputs angeführt, da die CO₂-Bilanz ansonsten bei jedem Schritt ständig unter einem negativen Vorzeichen stünde. Handelt es sich um Energieholz wird nach den Ergebnissen von Schweinle und Thoroe (2001) eine CO₂-Emission von 2 kg CO₂/Srm für die technische Produktion veranschlagt.

Der CO₂-Ausstoß wird aus den Kraftstoffverbräuchen berechnet (www.spritmonitor.de): mit 2,33 kg CO₂ pro Liter Benzin und 2,64 kg CO₂ pro Liter Diesel. Der CO₂-Ausstoß für die Bereitstellung des Treibstoffes wird nicht berücksichtigt.

Die Treibstoffverbräuche werden in dieser Arbeit pro Srm summiert und anschließend mit einer gespeicherten CO₂-Menge im Holz bei einem Wassergehalt von 50% (waldfrisch) und 35% (halbes Jahr Trockenzeit) bilanziert. Das Schwindmaß wird nicht berücksichtigt. Das Gewicht eines atro Srm wird mit 150 kg angenommen, in dem 285 kg CO₂ gespeichert sind.

Für detailliertere Emissionsberechnungen sei auf Software wie GEMIS oder ECOINVENT verwiesen.

Auf Basis der Literaturstudie setzt sich der kumulierte CO₂-Ausstoß wie folgt zusammen:

Formel CO2-Ausstoß:

 $A(Kohlendioxid)_{(ka)} = \sum CA_{(Prozesschritte)}$

Erweiterte Formel:

Ausstoß (Kohlendioxid) $_{(ka)} = \sum (VT/Srm_i *CA/I_{(TS)})$

 $CA_{(kg)} = CO_2$ -Ausstoß

3.3 Sensitivitätstests

Sensitivitätsanalysen fragen danach, wie empfindlich Outputgrößen auf Veränderung von Inputgrößen reagieren (Knechtle, 1997). Die Outputgröße ist in diesem Fall der CO₂-Ausstoß. Auch ist hier ersichtlich, wie sich der Energieinput bei unterschiedlichen Eingangsgrößen verändert.

Die Sensitivitätsanalyse wird in vier Schritten durchgeführt (vgl. Hegetschweiler, 1988):

- 1. Auswahl der als unsicher angesehenen Inputgrößen
- 2. Festlegen, in welchem Bereich die Inputgröße variieren kann (±%)
- Berechnung der Outputgröße, indem Inputgrößen verändert werden
- 4. Bewertung, Interpretation

4 Ergebnis

4.1.1 Waldbau

Schweinle und Thoroe (2001) ermittelten für die technische Produktion von Rundholz ohne Fällen und Rücken in untersuchten Deutschen Forstbetrieben einen fossilen Energieeinsatz von 40 bis 120 MJ/to atro Rohholz (10,8 bzw. 32,8 MJ/Srm). In dieser Arbeit wird ein Energieinput von 30 MJ/Srm für die technische Produktion unterstellt. Der CO₂-Ausstoß wird in Anlehnung an Schweinle und Thoroe (2001) mit 2 kg/Srm angenommen.

4.1.2 Fällen

<u>Motorsäge</u>

Wittkopf (2005) führt Ergebnisse hinsichtlich der Produktivität der motormanuellen Holzernte von Feller und Riedelberger (2001) an. Es beschränkt sich auf Fällen und Zopfen. Es wird die Abhängigkeit der geernteten Menge vom BHD (Stück-Masse-Gesetz) berücksichtigt. Bei einem BHD von 10 cm liegt die Produktivität bei 6 Srm/Std GAZ und bei einem BHD von 20 cm bei 16 Srm/Std GAZ. Die Literaturangaben der Produktivität bezogen auf die Einheit Std GAZ werden nicht auf P₄SH₁₅ umgerechnet. Bei den anschließenden Berechnungsbeispielen werden die Produktivitäten immer auf PSH₁₅ bezogen.

Harvester

Ein Harvestereinsatz erlaubt es fast immer, Schlagrücklass als Koppelprodukt auszuhalten. Gewählt wird Holz, das aus Gründen der Qualität, Dimension oder Baumart nicht in die Hauptsortimente passt. Dieses Sortiment kann alternativ auch zur Brennholzproduktion abgegeben werden (Wittkopf, 2005). Die entasteten Hölzer werden an der Rückegasse abgelegt (Feller, 1999). Nach diesem Modell erreicht der Harvester für einen BHD mit 10 cm eine Produktivität von 7 Srm/GAZ und bei einem BHD von 20 cm 35 Srm/GAZ.

Als Beispiel errechnet sich bei einer Produktivität von 10 Srm/PSH₁₅ sowie einem Verbrauch von 12 l/PSH₁₅ ein Wert von 1,2 l/Srm. Dies ergibt einen Energieinput von 67 MJ/Srm und CO₂-Emissionen von 3 kg/Srm.

Zwickaggregat

Als Variante wird anstelle des Harvesterkopfes ein einfacherer Fällkopf mit hydraulischen Klingen eingesetzt (vgl. Affenzeller und Stampfer, 2007). Es können Stämme bis 25 cm gefällt werden.

Dieses Verfahren kann für die Energieholzbereitstellung im Niederwald eingesetzt werden. Die Produktivität (Durchschnitts-BHD 9,36 cm) betrug bei einem Versuch mit Rückung durch Traktor und Krananhänger 4 Srm/PSH₁₅. Der Treibstoffverbrauch wird gleich eines Harvesters angenommen.

4.1.3 Rücken

Schlepper

Für die Rückung nach einer motormanuellen Ernte werden in Österreich meist (landwirtschaftliche) Schlepper eingesetzt. Für die vollmechanisierte Ernte mit dem Harvester kommen Forwarder zum Einsatz.

Dummel und Branz (1986) ermittelten Leistungswerte für das Rücken von Hackholz mit Seilschlepper abhängig vom BHD. Die Lastbildungsmöglichkeit je Fahrt beim Hackmaterial ist aber gering. Vorrückung wurde berücksichtigt. Bei einem BHD von 10 cm war die Produktivität 5 Srm/ Std. GAZ und bei 20 cm 10 Srm/Std GAZ (vgl. Wittkopf, 2005). Der Kraftstoffverbrauch bei Forsttraktoren beim Holztransport ist 50% und bei sonstigen Betriebsarbeiten 70% des Maximalverbrauches. Mit 5 Srm/PSH₁₅ und einem Verbrauch von 5 l/PSH₁₅ ergeben sich für das Rücken mit Seilschlepper ein Energieinput von 50 MJ/Srm sowie ein CO₂-Ausstoß von 2,6 kg/Srm.

Forwarder

Lüthy (1997) entwickelte ein Leistungsmodell abhängig vom BHD. Als Eingangsgrößen wurden ein Rückegassenabstand von 30 m, eine durchschnittliche Rückeentfernung von 200 m, drei Sortimente und eine Nutzungsmenge von 60 fm gewählt (vgl. Wittkopf, 2005). Mit BHD 10 cm transportierte der Forwarder 20 Srm/Std GAZ und mit BHD 10 32 Srm/Std GAZ.

Für das **Rücken von Fichtenkronen** ermittelten Krichbaum et al. (2003) Leistungen bezogen auf den Durchmesser am Kronenfuß. Beim Forwarder lagen die Werte für den Kronenfuß-Durchmesser von 10 cm bei 14 und für Durchmesser 20 cm bei 45 Srm/Std GAZ.

Der Treibstoffverbrauch schwankt bei Versuchen mit zwei Forwarder (Rottne Solid F 12, 122 kW und Ponsse S 10 Caribou, 91 kW) bei Rückedistanzen um 200 m zwischen 0,48 und 0,75 Liter (Drewes und Hittenbeck, 2004). Für Fichte, 50% Wassergehalt, Schüttdichte 270 kg/Srm wäre der Verbrauch 0,13 bzw. 0,27 l/Srm woraus sich ein Energieinput für das Rücken von Fichtenkronen von 6,6 bis 14 MJ/Srm und CO₂-Emissionen von 0,34 bis 0,7 kg/Srm ergeben.

Der durchschnittliche Ölverbrauch mit 0,2 I/PSH₁₅ (Schweinle und Thoroe, 2001) wird ob der Geringfügigkeit nicht berücksichtigt.

4.1.4 Hacken

Die Treibstoffverbräuche quer über einige Modelle sind nach Befragungen pro Srm recht ähnlich.

Die Ergebnisse in Tabelle 5 stammen von telefonischen Befragungen einiger Hackunternehmer, berücksichtigen aber Überstellungen der Hackmaschinen nicht. Der Treibstoffverbrauch pro Schüttraummeter liegt demnach zwischen 0,3 und 1 Liter. Zusammenfassend wird angenommen, dass der Verbrauch beim Hackvorgang durchschnittlich 0,5 l/Srm beträgt. Daraus ergibt sich für den Prozessschritt Hacken bei einer Produktivität von 70 Srm/PSH₁₅ und einem Verbrauch von 35 l/PSH₁₅ ein Energieinput von 26 MJ/Srm und CO₂-Emissionen von 1,3 kg/Srm.

Tabelle 5: Übersicht der Produktivität von Hackern und den Treibstoffverbräuchen pro Schüttraummeter

Ausgangsmaterial	Produktivität (Srm/PSH ₁₅)	Verbrauch (I/Srm)	Hacker	Quelle
Sträucher	40-80	1	mob. Großhacker	Preuner (2006)
Starkholz	max. 200	0,3-0,4	mob. Großhacker	Preuner (2006)
Kronen		0,4-0,6	mob. Großhacker	Krenn (2006)
Ei Rundholz		0,4-0,45	mob. Großhacker	Krenn (2006)
Sträucher (konz.)	21	0,6	Anhängehacker	Jeitler (2006)
Sträucher (n. konz.)	16	0,4	Anhängehacker	Jeitler (2006)

4.1.5 Transport

Aus wirtschaftlichen und ökologischen Gründen gilt es die Transportentfernungen von Biomasse, sei es noch als Rundholz, Schlagrücklass oder fertige Hackschnitzel, möglichst kurz zu halten. Aus ökobilanzieller Sicht können durch kurze Transportentfernungen Emissionen in hohem Maße verringert werden (vgl. Schweinle und Thoroe, 2001).

Man sollte Heizwerke in Waldnähe bauen. Dadurch soll die Logistik sichergestellt werden. Ob stationär oder am Lagerplatz gehackt werden soll, bestimmt der Abnehmer (Stampfer, 2007). Eine optimale Auslastung des Transportes soll angestrebt werden (vgl. Streißelberger, 2003).

4.1.5.1 Transport von Rundholz

Dieser Schritt wird beschrieben, weil es möglich ist, das Hackholz per Rundholz-Lkw zu einem zentralen Lagerplatz oder gleich ins Werk zu transportieren. (Nadel)Rundholz im Wald zu trocknen ist aus phytosanitären Gründen abzulehnen.

Der Rundholztransport erfolgt in Österreich hauptsächlich per Lkw (Linko, 2007). Einige Forstunternehmen bevorzugen den Transport per Bahn, doch müssen im Regelfall bestimmte Entfernungen überschritten werden, damit sich der Bahntransport gegenüber dem Lkw Transport rechnet. Linko (2006) ermittelte, dass – entgegen der landläufigen Meinung – ab einer Distanz von 50 km in der besten Streckenklasse (D) der Eisenbahn, der Rundholz-Transport mit der Bahn billiger, als per Rungen-Lkw ist. Je schlechter die Streckenklasse, je geringer die Zuladung und je länger der Vortransport, desto später rentiert sich der Umschlag per Bahn.

Die Transportkapazität für (Säge)-Rundholz beträgt in Österreich durchschnittlich 25 fm pro Lkw-Zug. Die maximale Nutzlast beträgt je nach Fahrzeug 22 Tonnen (vgl. Streißelberger, 2003).

Werden 25 fm (=63 Srm) über 50 km transportiert und ein Verbrauch von 60 l/100km unterstellt, ergibt sich ein Verbrauch von 0,95 l Diesel/Srm. Ölverbrauch wird nicht berücksichtigt und ein Leerfahrtanteil von 100% unterstellt. Daraus ergibt sich ein Energieinput für diesen Prozessschritt von 48 MJ/Srm sowie CO₂-Emissionen von 2,5 kg/Srm. Für einen gefahrenen Kilometer sind dies 0,0095 l/Srm sowie ein Energieinput von 0,48 MJ/Srm und ein CO₂-Ausstoß von 0,025 kg/Srm. Transportiert man unter denselben Bedingungen das Rundholz und nimmt einen Verbrauch von 35 l/100 km an, so ergeben sich ein Verbrauch von 0,55 l/Srm. Als Energieinput 28 MJ/Srm sowie CO₂-Emissionen von 1,5 kg/Srm. Für einen gefahrenen Kilometer sind dies analog 0,0055 l/Srm, ein Energieinput von 0,28 MJ/Srm und CO₂-Emissionen von 0,014 kg/Srm.

4.1.5.2 Transport von Hackgut, Rinde oder Spänen

Der konzentrierte Schlagrücklass wird an der Forststraße oder an einem zentralen Lagerplatz nach einer Trocknungsphase gehackt und zum Abnehmer transportiert. Wenn Schlagrücklass als Hackgut weiterverarbeitet wird, ist es nicht ratsam, die Wipfel, Äste und Holzstücke mit einem Rungenwagen weit zu transportieren, da das maximale Ladegewicht nicht ausgenützt wird (Linko, 2006). Deswegen wird an der Forststraße der vorkonzentrierte Schlagrücklass nach Abfuhr des Rundholzes gehackt.

Für den Ferntransport von Schüttgut setzt man in Österreich meist Lkw mit Anhänger oder großvolumige Lkw-Sattelzüge ein. Zum Entladen sind die Ladeflächen entweder kippbar oder werden vom Schubboden-System abgelöst. Beim so genannten "walking floor"-System wird das Ladegut durch sich bewegende Metallplatten hinten vom Lkw abgeworfen (vgl. Streißelberger, 2003). Die Transportkapazität dieser Fahrzeuge beträgt bis 100 Srm (www.cargobull.com). Diese Transportmethode eignet sich jedoch – ob der schlechten Manövrierfähigkeit – nicht sehr gut für den Einsatz auf Forststraßen. Ein Schubboden-Lkw bietet sich zum Abtransport von Hackgut an, wenn dieser vom (mobilen Groß)-Hacker direkt beschickt wird (Gaigg, 2006).

Als wichtig gilt es, die Transportlogistik auf die Hackerleistung abzustimmen, um teure Stillstandszeiten von Hacker bzw. Transport zu vermeiden (Krenn, 2006; Gaigg, 2006; Kanzian, 2005).

Kühmaier et al. (2007) identifizierten aufgrund einer Literaturstudie folgende Schwierigkeiten beim Transport von Wald-Energieholz:

- Niedrige Auslastung der Ladekapazität
- Aufwändige Organisation des Transports bei gekoppelten Arbeitssystemen
- Hohe Warte- und Standzeiten bei geschlossenen Bereitstellungsketten
- Ausschluss von Systemen bei schlechter Befahrbarkeit von Forststraßen
- · Erschwertes Hacken bei zu wenig Platz an der Forststraße
- Unrentabilität des Transportes bei weiten Entfernungen

Es eignen sich Lkw mit Wechselcontainer zum Abtransport von Waldhackgut direkt nach dem Hackvorgang. Wechselcontainer oder Abrollcontainer gibt es mit einem Volumen von 10 bis 32 m³ (www.werner-weber.com).

Berechnet man einen Transport vom Hacken nahe einer öffentlichen gut befahrbaren Straße mit einem Schubboden-Lkw (Volumen 90 Srm, Verbrauch 35 l/100km) ergeben sich bei einem Transport über 50 km und einer Leerfahrt ein Verbrauch von 0,39 l Diesel/Srm sowie folglich ein Energieinput von 20 MJ/Srm bzw. CO₂-Emissionen von 1 kg/Srm. (Für einen gefahrenen Kilometer sind dies 0,0039 l Diesel/Srm, ein Energieinput von 0,2 MJ/Srm bzw. CO₂-Emissionen von 0,1 kg/Srm).

Berechnet man einen Transport vom Hacken an der Forststraße im Gebirge per Wechselcontainer mit einem Ladevolumen von 32 Srm und einem Verbrauch von 60 l/100km unter denselben Bedingungen wie oben, erhält man als Verbrauch 1,9 lDiesel/Srm sowie einen Energieinput von 95 MJ/Srm bzw. CO₂-Emissionen von 5 kg/Srm. Für einen gefahrenen Kilometer sind dies ein

Verbrauch von 0,02 l/Srm sowie ein Energieinput von 0,95 MJ/Srm bzw. CO₂-Emissionen von 0,05 kg/Srm.

Zum Transport von Waldhackgut kommen in Österreich auch landwirtschaftliche Schlepper mit Anhänger oder Erntewagen in Betracht. Grund dafür ist die gute Verfügbarkeit. Häufig kommt diese Methode im bäuerlichen Kleinwald zur Belieferung von kleineren Heizanlagen vor. Die Transportkapazität reicht bei speziellen Häckselgutwagen bis zu 25 m³ (Streißelberger, 2003). Der Verbrauch für einen durchschnittlichen Schlepper beträgt 10 l/PSH₁₅ (Schweinle und Thoroe, 2001; Weise, 2001). Bei einer Durchschnittsgeschwindigkeit von 20 km/h (50 l/100km) ergibt dies für einen gefahrenen Kilometer einen Treibstoffverbrauch von 0,02 l/Srm und man erhält einen Energieinput 1 MJ/Srm sowie CO₂-Emissionen von 0,05 kg/Srm. Da eine Leerfahrt unterstellt werden muss, sind die Werte doppelt zu rechnen.

4.1.6 Beispiel nach der MAIA-Methode

In Tabelle 6 wird nach der MAIA-Methode der Materialverbrauch der bei der Herstellung eines Harvesters entsteht, bezogen auf eine Lebensdauer von 8000 Maschinenarbeitsstunden (PSH₁₅), berechnet. So werden 17 kg/PSH₁₅ an abiotischen Materialien sowie 136 l Wasser/PSH₁₅ verbraucht.

Tabelle 6: Materialeinsatz eines Harvesters nach der MAIA-Methode

14.222,51 717,5 160 120 50 30		93 4,7 1 0,8 0,3	Knechtle
160 120 50		0,8 0,3	,
120 50		0,3	
50	*	0,3	
30	1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1	6 8 2 - 4 5 - 4	
	3%-1	0,2	
15.300,01		100	
SH ₁₅			
-	'SH ₁₅	PSH ₁₅	

	MI- Nicht nachwachsend	MI- _{Wasser}		
	(kg/kg)	(kg/kg)		
Stahl (Maschinenbau, Hochofen)	8,14	63,7	Wuppertal	
Gummi	5	0	Leiler	
Kunststoff	6,45	[*] 294,2		
Aluminium (primär)	37	1047,7	Wuppertal	
Glas	2,95	11,6		
Kupfer (primär)	348,47	367,2		
Diesel	1,36	9,7	_	
Summe	409,37	1794,1		

Materialinput Harvesterherstellung

	MI- Nicht nachwachsend	MI- _{Wasser}
	(kg)	(kg)
Stahl (Maschinenbau, Hochofen)	115.771,23	905973,89
Gummi	3587,5	0,00
Kunststoff	1032	47072,00
Aluminium (primär)	4440	125724,00
Glas	147,5	580,00
Kupfer (primär)	10454,1	11016,00
Summe		

MI Harvesterherstellung pro PSH₁₅ (8000)

800	O MI- Nicht nachwachsend	MI- _{Wasser}
	(kg/h)	(kg/h)
Stahl (Maschinenbau, Hochofen)	14,4	7 113,25
Gummi	0,4	5 0,00
Kunststoff	0,1	3 5,88
Aluminium (primär)	0,5	6 15,72
Glas	0,0	0,07
Kupfer (primär)	1,3	1,38
Summe	16.9	<u>136,30</u>

4.2 Ausgewählte Bereitstellungsketten

4.2.1 Energieholz aus Durchforstung

Bei diesem Verfahren wird Energieholz aus einer Durchforstung genutzt. Neben dem ausgeformten Energieholz werden zusätzlich die Wipfel der Bäume verwendet. Astmaterial bleibt zur Verminderung des Nährstoffentzuges im Bestand (vgl. Kühmaier et al., 2007).

Verfahrensbeschreibung

Ein Harvester fällt und arbeitet die Stämme zu vier Meter langen Blochen auf. Der mittlere BHD beträgt 13 cm. Das Entnahmeprozent liegt bei 50%. Das Material wird mit einem Forwarder zu einem 250 m entfernten Lagerplatz an der Forststraße gerückt. Nach einer Trocknungsphase wird das Material gehackt und mit Schubboden-Lkw zum 30 km entfernten Werk transportiert. Der Wassergehalt beträgt 50%. Die Treibstoffverbräuche stammen aus Literaturquellen.

Ergebnis

Somit ergibt sich bei der vorgeschlagenen Bereitstellungskette ein Treibstoffverbrauch von 3,6 l/Srm. Daraus resultieren ein Energieinput von 227 MJ/Srm und ein CO₂-Ausstoß von 11,5 kg/Srm. Handelt es sich um Holz mit 50% Wassergehalt so werden 10,3% des Energieinhaltes für die Bereitstellung aufgewendet und 7,3% des gespeicherten Kohlendioxides ausgestoßen. Ist das Holz auf 35% Wassergehalt abgetrocknet, steigt der Heizwert und die Schüttdichte sinkt. Daher werden 9,7% des Energieinputs aufgewendet und 5,4% des gespeicherten CO₂ ausgestoßen (Siehe Tabelle 7).

Tabelle 7: Ergebnisse der Bereitstellungskette Energieholz aus Durchforstung

	Verbr. (I/PSH ₁₅)	Prod. (Srm/PSH ₁₅)	Verbr. (I/100km)	Ausl.	Ladevol. (Srm)	Distanz (km)	Verbr. (I/Srm)	El (MJ/Srm)	Anteil (%)	CO₂-Emi (kg/Srm)	Antell (%)
Waldbau								30,00	13	2	17
Fällen	12	8		1,0			1,50	83,32	37	3,96	34
Rücken	10	9		1,0			1,11	. 62,83	28	2,93	26
Hacken	35	50	*	1,0			0,70	36,58	16	- 1,85	16
Transpt		-	35	0,5	75	30	0,28	14,15	6	0,74	6
			•			Summen	3,59	226,89	.100	11,48	100
										· HW	CO₂-Fix (kg/Srm)
								50% WG		2196,00	158
								Diff		1969,11	146,52
			•					in%		10.33	7.27
					•					2347,20	213
								35%WG		2120,31	201,52
					,			in%		<u>9,67</u>	<u>5,39</u>

Variante Fällen mit Zwickaggregat

Da der Treibstoffverbrauch gleich eines Forwarders ist, wird hier nur der Fällvorgang gesondert betrachtet. Der Fällvorgang ist wegen der geringeren Produktivität mit 54% am energieintensivsten. Mit 51% Anteil ist der CO₂-Ausstoß dieses Schrittes am höchsten. Bei Waldhackgut mit 50% Wassergehalt werden 14,1% des Heizwertes für die Bereitstellung aufgebracht und 9,8% des gespeicherten CO₂ ausgestoßen. Bei Waldhackgut mit 35% Wassergehalt werden 13,2% des Heizwertes für die Bereitstellung aufgebracht und 7,2% des gespeicherten CO₂ ausgestoßen.

4.2.2 Schlagrücklass aus Rückung mit Seil im Baumverfahren

Der Anteil der durch die Verwendung als Energieholz zusätzlich anfallenden Holzmenge im Rahmen der Rundholzbereitstellung liegt bei Kanzian et al. (2006) zwischen 6 und 26% bezogen auf den Rundholzanfall. Kanzian (2005) ermittelt für nadelholzdominierte Bestände einen Wert zwischen 10 bis 15%. Kühmaier et. al (2007) zitieren Hakkila (2004) welcher in einer finnischen Studie die Schlagabraummenge bei Fichte und Kiefer in der Durchforstung mit 20 bis 30% und in der Endnutzung mit 4 bis 5% bestimmte.

Verfahrensbeschreibung

Bei der Ernte mit Seil und Prozessor im Baumverfahren wird der Schlagrücklass an der Forststraße zwischengelagert. Da der Schlagrücklass ohnehin an der Straße verbleiben würde, wird der Waldbau, Fäll- und Rück-, Entastaufwand der Holzernte zugerechnet. Nach der Trocknungsphase wird das Material mit einem Großhacker direkt in einen Container gehackt. Der Transport erfolgt mit Container-Lkw in Wechselfahrweise. Bei der Nutzung im Baumverfahren ist dies das am häufigsten angewandte Verfahren (vgl. Rohrmoser und Stampfer, 2003).

Ergebnis

Da durch die Trocknungszeit die Nadeln weitgehend abgefallen sind, wird mit dem gleichen Heizwert bzw. Gewicht /atro to gerechnet wie bei Energierohholz. Da es sich um einen Standort im Seilgelände handelt wird ein höherer Spritverbrauch (Teilstrecke = Forststraße) von 50 l/100 km unterstellt. Bei einer Produktivität von 50 Srm/PSH₁₅. verbraucht der Hacker 35 l/PSH₁₅. Transportiert wird auf eine Distanz von 30 km. Somit kumuliert der Treibstoffbedarf auf 2,8 l/Srm. Der El/Srm beträgt 56,8 MJ. Emittiert werden 2,9 kg CO₂/Srm. Der prozentuelle Anteil der Bereitstellungsenergie am Energieinhalt beträgt 2,6% (WG = 50%) bzw. 2,4% (WG = 35%). Der CO₂-Ausstoß beträgt 1,8% bzw. 1,6% der gespeicherten Menge (siehe Tabelle 8).

Tabelle 8: Ergebnisse für Schlagrücklass aus Rückung mit Seil im Baumverfahren

	Verbr.	Prod.	Verbr.	Ausl.	Ladevol.	Distanz	Verbr	EI .	Anteil	00 Fml (len/Com)	Anteil
	(I/PSH ₁₅)	(Srm/PSH ₁₅)	(l/100km)	Ausi.	(Srm)	(km)	(I/Srm)	(MJ/Srm)	(%)	CO ₂ -Emi (kg/Srm)	(%)
Hacken	35	50		1,0			0,70	36,58	64	1,85	64
Transpt			50	0,5	75	30	0,40	20,22	36	1,06	36
	`		•			Summen	2,78	56,80	100	2,90	100
	. *								•	HW	CO₂-Fix (kg/Srm)
								50% WG		2196,00	158
						٠,		Diff		2139,20	155,10
			•		•			in%		<u>2,59</u>	<u>1.84</u>
				•						2347,20	213
								35%WG		2290,40	210,10
								in%		2.42	1.36

4.2.3 Rücken mit Forwarder von Schlagrücklass

Verfahrensbeschreibung

Nach dem Fällen und Rücken des Rundholzes wird der Schlagrücklass mit Forwarder oder Schlepper und Krananhänger an die Forststraße gerückt und konzentriert, anschließend nach Abtrocknung mit einem mobilen Großhacker gehackt und mit einem Schüttgut-Lkw (75 m³) abtransportiert. In Anlehnung an zwei Versuche (Wittkopf, 2005; Kanzian et al., 2006) wird der Energieinput und der CO₂-Ausstoß berechnet. Leider fehlen Angaben hinsichtlich der Produktivität des Forwarders beim Rücken von Schlagrücklass beim Versuch. Wittkopf (2005) gibt als Produktivität mit einem Krananhänger mit Kronenholz bei einem Kronenfuß von 10 cm 7,8 Srm/Std GAZ, von 15 cm 16,4 Srm/Std. GAZ und von 20 cm 25,1 Srm/Std GAZ an.

Kanzian et al. (2006) zitieren die ÖNORM M 7132, welche für das Sortiment "Knüppel, Äste, Reisig geschichtet" eine Ladedichte von 0,9 Srm/rm angeben. Nach Patzak (1981) und Frey (1996) hat in Kanzian et al. (2006) Schlagrücklass eine Ladedichte von 0,2 und 0,25 Srm/rm.

4.2.4 Ergebnis

Angenommen wird eine Rückeleistung von 15 Srm/PSH₁₅. Bei einer Produktivität von 50 Srm/PSH₁₅ verbraucht der Hacker 35 I/PSH₁₅. Transportiert wird mit einem Lkw mit 75 Srm Fassungsvolumen auf eine Distanz von 30 km.

Der Energieinput ist 88 MJ/Srm und der CO₂-Ausstoß 4,35 kg/Srm. Bei Hackgut mit 50% Wassergehalt sind dies 4% des Heizwertes sowie 2,8% des gespeicherten CO₂. Bei einem Wassergehalt von 35% sind es 3,8% des Heizwertes sowie 2,0% des gespeicherten CO₂/Srm welche für die Bereitstellung anfallen.

Tabelle 9: Ergebnis Rücken mit Forwarder von Schlagrücklass

	Verbr. (I/PSH ₁₅)	Prod. (Srm/PSH ₁₅)	Verbr. (l/100km)	Ausl.	Ladevol. (Srm)	Distanz (km)	Verbr. (I/Srm)	El (MJ/Srm)	Anteil (%)	CO ₂ -Emi (kg/Srm)	Anteil (%)
Rücken	10	15		1,0			0,67	37,70	43	1,76	40
Hacken	35	50		1,0			0,70	36,58	41	1,85	43
Transpt			35	0,5	75	30	0,28	14,15	16	0,74	17
						Summen	1,65	88,43	100	4,35	100
										HW	CO₂-Fix (kg/Srm)
								50% WG		2196,00	158
								Diff		2107,57	153,65
								in%	-	4,03	2.75
						•				2347,20	213
								35%WG		2258,77	208,65
								in%		3.77	2,04

Der Energieinput der drei untersuchten Bereitstellungsketten von Waldhackgut ist in Abbildung 5 und der CO₂-Ausstoß in Abbildung 6 dargestellt. Beachtet werden muss, dass es sich bei der ersten Kette um Energieholz handelt, der Waldbau und die Fällung also mit eingerechnet werden.

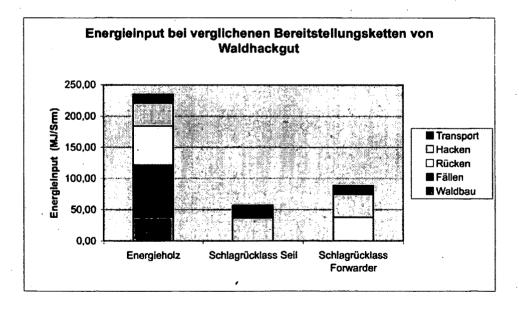


Abbildung 5: Vergleich der Bereitstellungsketten hinsichtlich Energieinput (MJ/Srm)

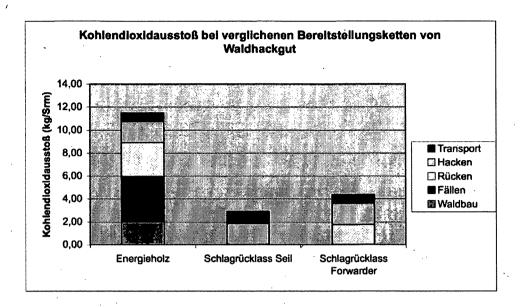


Abbildung 6: Vergleich der Bereitstellungsketten hinsichtlich des CO₂-Ausstoßes (kg/Srm)

4.3 Sensitivitätstests

Im Folgenden werden Inputgrößen der verschiedenen Bereitstellungsketten verändert, um deren Auswirkungen auf das Endergebnis zu testen.

4.3.1 Einfluss der Harvesterproduktivität

Die Produktivität bei der Fällung mit Harvester wird in Tabelle 10 beschrieben. Als mittlere Produktivität werden 15 Srm/PSH₁₅ bei gleich bleibendem Treibstoffverbrauch von 12 l/PSH₁₅ angenommen. Der Energieinput streut so zwischen 27,0 und 80,9 MJ/Srm und der CO₂-Ausstoß von 1,4 bis 4,2 kg/Srm. Da sich der Verbrauch je Produktivität ändert, kann der Anwender mit selbst erhobenen Werten analysieren.

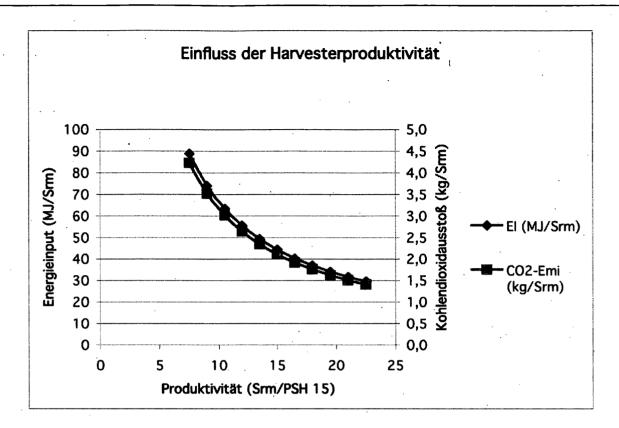


Abbildung 7: Einfluss der Harvesterproduktivität auf Energieinput und CO₂-Ausstoß

4.3.2 Einfluss der Hackerproduktivität

Wie bereits angesprochen hängt die Produktivität des Hackers von einigen Faktoren ab. In Abbildung 8 wird eine Produktivität von 100 Srm bei gleich bleibendem Verbrauch von 50 l/PSH₁₅ unterstellt. Auch hier ist der Verbrauch/PSH₁₅ bei unterschiedlicher Drehzahl veränderlich, sodass erst eine genaue Datenerhebung Aufschluss geben. Unter diesen Annahmen streuen die EI-Werte bei einer Produktion von 50 bis 150 Srm/PSH₁₅ von 17,3 bis 51,8 MJ/Srm. Der CO₂-Ausstoß bewegt sich zwischen 0,88 und 2,64 kg/Srm.

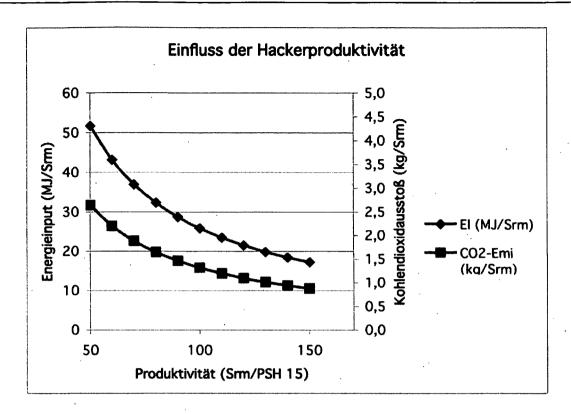


Abbildung 8: Einfluss der veränderten Hackerproduktivität

4.3.3 Einfluss der Transportdistanz

In Abbildung 9 wird mit einem Schüttgut-Lkw auf einer höherrangigen Straße (Freilandstraße) gefahren, wo ein Verbrauch von 35 l/100km anfällt. Das Ladevolumen beträgt 90 Srm. Bei Distanzen von 25 bis 75 km streut der Energieinput zwischen 9,8 MJ/Srm und 29,5 MJ/Srm inklusive einem 100%-igen Leerfahrtanteil. Der CO₂-Ausstoß schwankt zwischen 0,5 und 1,5 kg/Srm.

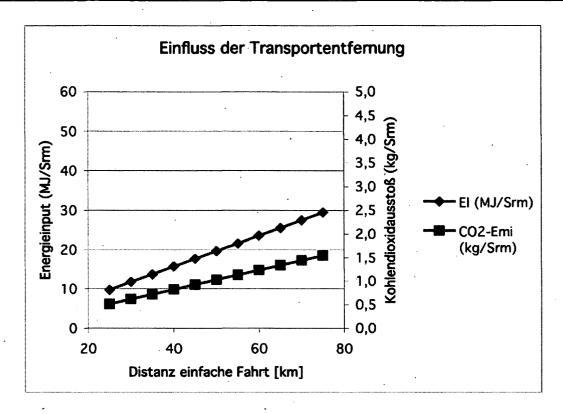


Abbildung 9: Einfluss der veränderten Transportdistanz des Hackguts per Schubboden-Lkw

4.3.4 Einfluss des Wassergehaltes

Die Auswirkungen auf den Energieinput bzw. Kohlendioxidausstoß bei einer Änderung des Wassergehaltes werden bei einer angenommenen Ladekapazität von 22 to, einer Distanz von 30 km und einem Verbrauch von 35 l/100km untersucht. Durch eine Änderung des Wassergehaltes ergeben sich unterschiedliche Schüttdichten und in weiterer Folge unterschiedliche Ladevolumina.

Die unterstellten Wassergehalte von Fichte reichen von 40% bis 60%. So könnten von 65 bis 98 Srm transportiert werden. Würden wie in den oberen Beispielen ein Wassergehalt von 35% angenommen, so könnte die Ladekapazität von 22 to wegen der beschränkten Lkw-Volumens nicht ausgeschöpft werden. Der Energieinput bewegt sich von 10,8 bis 16,2 MJ/Srm. CO₂-Ausstoß schwankt zwischen 0,6 bis 0,9 kg CO₂/Srm.

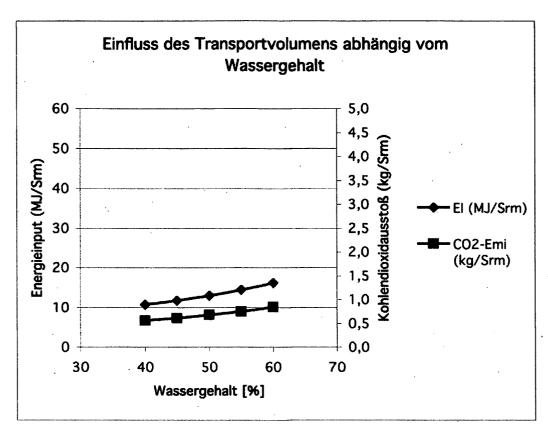


Abbildung 10: Ergebnisse mit unterschiedlichem Wassergehalt des Hackguts und somit verändertem Maximalladevolumen

5 Zusammenfassung

Die Steigerung der Ökoeffizienz gilt als globales Anliegen. Eine Ökobilanzierung nach der EN ISO 14040 durchzuführen ist aber aufwendig. Eine Ökobilanzierung in der Forstwirtschaft zeigt nicht nur die Vorteile im Vergleich zu anderen Branchen auf. Sie hat auch den Nutzen, dass durch das Aufzeigen von Schwachstellen Kosten gespart werden können.

Eine Methode, mit der vereinfachte Ökobilanzen für die Bereitstellung von Waldhackgut erstellt werden können, wurde erarbeitet. Die Methode kann für die Anwendung auf beliebige Holzerntekette übertragen werden.

Auf Basis der Literaturstudie und der Befragung von Experten galt es die wichtigsten Eingangsgrößen zu finden. Diese sind demnach die Graue Energie und der Treibstoffverbrauch. In Bezug auf die Graue Energie ist zu beachten, ob es sich um Energieholz oder Schlagrücklass handelt. Bei erstem werden der Waldbau mit einer Konstante von 30 MJ/Srm, sowie das Fällen mit eingerechnet. Für die eingesetzten Maschinen wird eine Graue Energie von 60 MJ/PSH 15 berücksichtigt und als konstant unterstellt.

Stammt das Waldhackgut aus Schlagrücklass, der sonst im Wald verblieben wäre, so wird erst ab dem Zeitpunkt bilanziert, der speziell für die Bereitstellung von Waldhackgut aufgewendet wird (Rücken und Konzentrieren bzw. Hacken).

Handelt es sich um Energieholz, so ist der größte Einflussfaktor die Produktivität des Harvesters. Mit dem hier unterstellten gleich bleibenden Treibstoffverbrauch von 12 l/PSH₁₅ und bei einer Produktivität von 7,5 bis 22,5 Srm/PSH₁₅ bewegt sich der Energieinput von 89 bis 30 MJ/Srm. Der CO₂-Ausstoß beginnt bei der niedrigen Produktivität bei 4,2 und verringert sich auf 1,4 kg/Srm.

Ähnlich gestaltet sich die Situation beim Prozess Hacken. Bei einem Verbrauch von 35 I/PSH₁₅ und einer Produktivität von 50 bis 150 Srm/PSH₁₅ sinkt der Energieinput im gleichen Verhältnis von 52 auf 17 MJ/Srm. Der CO₂-Ausstoß beginnt bei niedriger Produktivität bei 2,6 und verringert sich auf 0,9 kg/Srm.

Beim Transport nehmen der Energieinput und der CO₂-Austoß mit der Distanz linear zu. Bei einem Leerfahrtanteil von 100% steigt der Energieinput von 10 auf 30 MJ/Srm bei einer Distanz von 25 bis 75 km. Ein Treibstoffverbrauch von 35 l/100km wurde dabei für den Lkw angenommen. Der CO₂-Ausstoß erhöht sich analog von 0,5 auf 1,5 kg CO₂/Srm. Steigender Wassergehalt des Hackguts verschlechtert die Bilanz. Bei einem Wassergehalt von 40% und einem möglichen Transportvolumen von 98 Srm bei einer Nutzlast von 22 to , beträgt der Energieinput 11 MJ/Srm und der CO₂-Ausstoß 0,6 kg/Srm. Einem Wassergehalt von 60% reduziert das mögliche

Transportvolumen auf 65 Srm. Der Energieinput beträgt dann 16 MJ/Srm sowie der CO₂-Ausstoß 0,9 kg/Srm.

Es wäre wünschenswert wenn in Hinkunft bei Studien mehrere Inputdaten zu Produktivitäten und Treibstoffverbräuchen gezielt erfasst werden, damit man die Dynamik und die Zusammenhänge besser abbilden kann.

6 Anhang

6.1 Definitionen

6.1.1 Begriffsdefinitionen und Abkürzungen

Biomasse: Biomasse ist die Gesamtheit aller lebenden, toten und zersetzten Organismen und der von ihnen stammenden Substanz (Brockhaus, 1997). Biomasse stellt gespeicherte Sonnenenergie dar, die im Zuge der Photosynthese von Pflanzen erzeugt wurde.

Endenergie: Derjenige Teil der Primärenergie, welcher dem Verbraucher, nach Abzug von Transport- und Umwandlungsverlusten, zur Verfügung steht.

Energiehackgut: Hackgut, das zur energetischen Nutzung bestimmt ist.

Energieholz: Holz, das zur Energieerzeugung (Wärme und elektrischer Strom) thermisch verwertet wird. Die Unterscheidung erfolgt in Energierohholz und Schlagrücklass.

Energierohholz: Gefälltes, entwipfeltes und entastetes Holz, mit oder ohne Rinde, auch abgelängt und gespalten, jedoch nicht weiter bearbeitet und behandelt, zum Zweck der Energieerzeugung bereitgestellt.

GAZ: Gesamte Arbeitszeit setzt sich zusammen aus Reiner Arbeitszeit (RAZ) und Allgemeinen Zeiten (AZ). Die Allgemeinen Zeiten setzen sich aus Rüstzeit, sachlicher Verteilzeit, Erholzeit und persönlich bedingter Verweilzeit zusammen und hängen im Gegensatz zur RAZ nicht in unmittelbarer Verbindung mit der Arbeitsaufgabe. Für allgemeine Zeiten werden 20% zur RAZ zugeschlagen (vgl. Wittkopf, 2005)

Graue Energie: Unter diesem Ausdruck versteht man die Energie, die einer Maschine zugeführt wird, bevor sie das erste Produkt herstellt.

Hackgut: Maschinell zerkleinertes Holz mit oder ohne Rinde, unterteilt in Fein-, Mittel- und Grobhackgut.

Hackholz: In manipulierbare Längen eingekürztes, (grob-)entastetes Derb- und/oder Reisholz, das zur Hackguterzeugung bestimmt ist.

MAS: Maschinenarbeitsstunde = PSH₀. Produktive Arbeitszeit. Alle jene Arbeitstätigkeiten die ausschließlich dem Arbeitsfortschritt dienen

PSHo: siehe MAS

PSH₁₅: Produktive Systemstunde inklusive Unterbrechungen kleiner 15 Minuten [h] (Stampfer, 2002).

Primärenergie: Energie, die mit den natürlich vorkommenden Energieformen oder Energieträgern zur Verfügung steht. Beispiele: fossile Energie, Biomasse, Wind- Wasserkraft.

Prozessenergie: Prozessenergie ist die Energie, die während der Laufzeit der Maschine kontinuierlich oder periodisch genutzt wird.

Rohholz: Sägerundholz

Sägehackgut: Hackgut das aus Holz mit oder ohne Rinde mit Hackmaschinen oder Zerspanern vorwiegend aus den äußeren Rundholzzonen meist in Sägewerken oder holzverarbeitenden Betrieben erzeugt wurde.

Sekundärenergie: Durch einen mit Verlusten behafteten Umwandlungsprozess aus der Primärenergie entstandene Energie. Beispiele: Elektrischer Strom, Heizöl, Fernwärme.

Schlagrücklass: Im Zuge der Holzernte anfallendes Ast- und Wipfelmaterial

Schüttdichte: Quotient aus der Masse eines lose gefüllten Schüttraummeters und seinem Volumen einschließlich aller Hohlräume, bezogen auf einen bestimmten Wassergehalt.

Treibhausgase: sind gasförmige Stoffe, die zum Treibhauseffekt (globale Erwärmung) beitragen und einen natürlichen als auch einen vom Menschen verursachten Grund haben. Die wichtigsten (künstlichen) T. sind CO₂, Methan, Lachgas, FKW, FCKW, Schwefelhexafluorid.

Waldhackgut (WHG): Hackgut, das aus Hackholz mit Hackmaschinen meist im Wald erzeugt wurde.

7 Quellenverzeichnis

7.1 Literaturverzeichnis

- AFFENZELLER, G. STAMPFER, K. (2007): Energieholzbereitstellung mit Traktor und Krananhänger mit Fallbeilklingenaggregat. Fallstudie im Auftrag des Kooperationsabkommens Forst-Holz-Papier. Institut für Forsttechnik, Boku, Wien
- BACKHAUS, G (2002): "Forsttechnische Ökobilanz ein Diagnose-Instrument", Forst & Technik 11/2002,
- BINGHAM, (1975): In: Grasser (1994) (Kein Zugang zu Literaturverzeichnis)
- BÖRJESSON, P.I.I. (1996): Emissions of CO₂ from Biomass production and transportation in agriculture and Forestry, Energy Conversion Management, 1996; 37:1235-40.
- BREEDVELD, L. (2000): A dutch Approach to the European Directive on Integrated Pollution Prevention and Control: Using LCA for the Integrated Assessment of Technologies, J. Ind. Ecol. 4 (2) (2000); In: Götz et al. (2001)
- DREWES D. HITTENBECK J. (2004): Zur Messung des Treibstoffverbrauchs bei Forstmaschinen in Forst und Technik, 8/2005
- DUMMEL, K. BRANZ, H. (1986): Holzernteverfahren Vergleichende Erhebung und Beurteilung der Holzernteverfahren in der Forstwirtschaft in der BRD. Schriftenreihe des Bundesministeriums für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten. Reihe A, Heft 333, Landwirtschaftsverlag Münster; In: Wittkopf (2005)
- FELLER, S. RIEDLBERGER, M. (2001): Hackschnitzelbereitstellung mit dem Timberchipper.
 Forst und Technik Nr. 4
- FFE (Forschungsstelle für Energiewirtschaft), (1999): Ökobilanzierung mit Hilfe der KEA-Datenbank, Praxistest, München
- FORSBERG, G. (2000): Biomass Energy Transport: analysis of bioenergy transport chains unsing life cycle inventory method. Biomass and Bioenergy 19 2000 17 30
- FORD-ROBERTSON, JB. (1996): Estimating the net carbon balance of the forest industry in New Zealand. Biomass and Bioenergy, Vol. 10 Ausgabe.(1) S. 7-10
- FRIEDL, K. KANZIAN, C STAMPFER, K (2004): Netzwerk Holz, Endbericht.

 Kooperationsabkommen Forst-Platte-Papier (FPP), Fachverband der Holzindustrie
 Österreichs, Institut für Forsttechnik, Boku, Wien
- FRÜHWALD, A. (1995): Life-Cycle Analysis A Challenge For Forestry, Introduction,
 Proceedings of the International Workshop organised by the European Forest
 Institute and the Federal Research Centre for Forestry and Forest Products,
 Hamburg, S. 10

- GEMIS, (Globales Emissions-Moddell Integrierter Systeme) (2004): Ergebnisse der Version 4.2, www.oeko.de
- GÖTZ, R. et al, (2001): Medienübergreifende Bewertung von Umweltbelastungen durch bestimmte industrielle Tätigkeiten. Forschungsvorhaben Nr. 298 94 312, im Auftrag des Deutschen Umweltbundesamtes
- GRASSER, C. (1994): Ökoinventare für Energiesysteme, Teil IX, Holz, Grundlagen für den ökologischen Vergleich von Energiesystemen und den Einbezug von Energiesystemen in Ökobilanzen für die Schweiz, Schlussbericht des NEFF/BEWgeförderten Projektes "Umweltbelastung der End- und Nutzenergiebereitstellung", ETH Zürich
- GROKLOS, M. (2006): Kumulierter Energieaufwand und CO₂-Emissionsfaktoren verschiedener Energieträger und -versorgungen, Informationsschrift, Institut Wohnen und Umwelt
- HAKKILA, P. (1989): Utilisation of Residual Forest Biomass. Springer Verlag, Berlin
- HEGETSCHWEILER, T. (1988): Grundlagen zur Kosten- und Investitionsberechnung bei der mittelfristigen nutzungsplanung des Frostbetriebs. Diss. ETH Zürich Nr. 8480; In: Knechtle, (1997)
- JUNGMEIER G., CANELLA, L., SPITZER, J., STIGLBRUNNER, R. (1999): Treibhausgasbilanz der Bioenergie. Vergleich der Treibhausgasemissionen aus Bioenergie-Systemen und fossilen Energiesystemen, Endbericht Joanneum Research, Graz
- KANZIAN, C. (2005): Bereitstellung von Waldhackgut. Verfahren Energieholzbündel im Gebirge. Bericht des Instituts für Forsttechnik, Boku, Wien
- KANZIAN, C. FENZ, B. HOLZLEITNER, F. STAMPFER, K. (2006): Waldhackguterzeugung aus Schlagrücklass, Fallbeispiele im Laub- und Nadelholz, Kooperationsabkommen FPP, Institut für Forsttechnik, Boku, Wien
- KNECHTLE, N. (1997): Materialprofile von Holzerntesystemen, Analyse ausgewählter Beispiele als Grundlage für ein forsttechisches Ökoinventar, Dipl. ETH Zürich
- KOPETZ, H. (2007): Presseaussendung ÖBV, anl. Nachhaltigkeitskongress CN
- KÜHMAIER, M., KANZIAN, C., HOLZLEITNER, F., STAMPFER, K. (2007):
 Wertschöpfungskette Waldhackgut. Optimierung von Ernte, Transport und Logistik.
 Projektstudie im Auftrag von BMLFUW, Land Niederösterreich, Stadt Wien und ÖBf
 AG. Institut für Forsttechnik, Department für Wald und Bodenwissenschaften,
 Universität für Bodenkultur, Wien, 283 S.
- KULL, U. (2000): Grundriss der Allgemeinen Botanik, Spektrum Verlag, Berlin

- KRICHBAUM, C. WITTKOPF, S. BAUDISCH, C. (2003): Kalkulationshilfen zur Energieholzbereitstellung für Waldbesitzer. Unveröffentlichter Abschlussbericht zum Projekt V 55 des Kuratorium für Forstliche Forschung, Freising; In: Wittkopf (2005)
- LINEBACK, N. et al. (1999): Does CO₂-combustion of biomass residue for energy really matter? Climate research, Inter Research, Vol. 13: 221 229
- LISS, JE. (1986), methods used by self-employment forest owners for harvesting fuel chips, Arbeit in schwedischer Sprache; In: van Belle (2004)
- LISS, JE. (1987): Power requirement and energy consumption in fuel-chip production using a tractor mounted chipper, Arbeit in schwedischer Sprache; In: van Belle (2004)
- LÖFFLER, H. (1991): Forstliche Verfahrenstechnik, Holzernte. 2. Auflage. Lehrstuhl für Forstliche Arbeitswissenschaft und Angewandte Informatik. München
- LÜTHY (1997): (keine näheren Angaben); In: Wittkopf (2004)
- MÄLKKI, H. VIRTANEN, Y. (2001): Selected emissions and eficiencies of energy systems based on logging and sawmill residues; Biomass and Bioenergy, 2003 Vol. (24), Ausgabe 4-5, S 321-327
- NULTSCH, W. (2001): Allgemeine Botanik, 11. Auflage, Verlag Thieme, Stuttgart
- PAUSCH, R. (2002): Ein Systemansatz zur Untersuchung von Zusammenhängen zwischen Waldstruktur, Arbeitsvolumina und Kosten der technischen und biologischen Produktion in Forstrevieren ost- und nordbayrischer Mittelgebirge, Dissertation TU München;
- SCHMIEDHOFER J. (2007): In: Forstzeitung 08/07, Österreichischer Agrarverlag, Leopoldsdorf/Wien
- SCHLAMADINGER B, MARLAND G (1996): Role of forest and bioenergy strategies in the global carbon cycle. Biomass and Bioenergy 1996; 10 (5,6), 275 300
- SCHMID-BLEEK, F. et al. (1998): MAIA, Einführung in die Material Intensitäts-Analyse nach dem MIPS-Konzept. Birkhäuser Verlag, Basel
- SCHMID-BLEEK, F. (1998): Das MIPS-Konzept. Weniger Naturverbrauch mehr Lebensqualität durch Faktor 10. Droemer Verlag, München
- SCHWEINLE, J. THOROE, C. (2001): Vergleichende Ökobilanzierung der Rundholzproduktion in verschiedenen Forstbetrieben, Mitteilungen der Bundesforschungsanstalt für Forst- und Holzwirtschaft, Hamburg
- SPINELLI, R. HARTSOUGH, B. (2001): A survey of Italian chipping operations, Biomass and Bioenergy 2001. Volume 21, Issue 6, December 2001, Pages 433-444

- STAMPFER, E. STAMPFER, K. TRZESNIOWSKI, A: (1997) Rationalisierung der Bereitstellung von Waldhackgut, Schriftenreihe der Forschung im Verbund Bd. 29
- STAMPFER, E. (2007): In: Holzkurier, 22, 2007, Österreichischer Agrarverlag, Leopoldsdorf/Wien
- STAMPFER, K. (2001): Harvester Leistungsdaten MHT Robin, Neuson 11002 HV, Impex Königstiger Untersuchungsergebnisse aus Aufnahmen bei Geländeneigungen von 20-60%. FPP, Wien. In Stampfer (2002)
- STAMPFER, K. (2002): Optimierung von Holzerntesystemen im Gebirge, Habilitationsschrift, Boku, Wien
- STANDARD vom 28. November 2007 S. 24.
- STREIßELBERGER, J. (2003): Optimierung der Bereistellungskette von Waldhackgut, EWLOG-Umsetzung-Rohstoffforschung, ÖBf-Consulting, Boku, Agrar Plus
- UPTON, C. (1995): Life-Cycle Analysis A Challenge For Forestry, Life-Cycle Analysis in the context of forestry Eco-Labelling, Proceedings of the International Workshop organised by the European Forest Institute and the Federal Research Centre for Forestry and Forest Products, Hamburg, S. 25
- VAN BELLE, J.F. (2004): A model to estimate fossil CO₂ emissions during the harvesting of forest residues for energy with an application on the case of chipping. Biomass and Bioenergy, 30 (2006)
- WITTKOPF, S. (2005): Bereitstellung von Hackgut zur thermischen Verwertung durch Forstbetriebe in Bayern, Dissertation, TU München
- WINKLER, C. (1997): Vorstudie Ökoinventare von Holzerntesystemen, ETHZ-D-WAHO Forstliches Ingenierurwesen, ETH-Zürich
- WEISE, G. (2001): Lkw- und Containereinsatz. KTBL-Workshop "Landwirtschaftliche Transporte" Berlin. Veröffentlichung auf www.ktbl.de; In: Wittkopf 2004
- ZIMMER, B. SCHWAIGER, H. (2001): A Comparison of fuel consumption and greenhouse gas emissions from forest operations in Europe, EFI Discussion Paper 10

7.2 Quellen aus dem Internet

http://www.bus-und-bahn-im-griff.de

http://www.deutschesfachbuch.de

http://www.cargobull.com

http://www.spritmonitor.de/de/berechnung co2 ausstoss.html

www.timber-online.net

www.umweltbundesamt.at

www.werner-weber.com

7.3 Mündliche Mitteilungen

ESCHLBÖCK, M. (2007)

GAIGG, P. (2006)

JEITLER, R. (2006)

KRENN, J. (2006)

KRESSL, F. (2006)

LEILER, W. (2006)

LINKO, F. (2007)

PREUNER, T. (2006)

SCHWEINLE, J. (2007)