

Transportketten forstlicher Biomasse – Stand der Technik und Innovationen

Ulrich J. Wolfsmayr
Peter Rauch

Universität für Bodenkultur Wien, Institut für Produktionswirtschaft und Logistik (AT)
Universität für Bodenkultur Wien, Institut für Produktionswirtschaft und Logistik (AT)*

Primary forest fuel transport chains – state of the art and innovations

Transport modes available for primary forest fuel are truck, train and ship, while truck transport is predominant. Primary forest fuel requires an initial road transport in most of the cases. The comparison of different transport modes shows that distance-variable costs are highest for truck transport and lower for train and ship. However, because the very high transshipment costs must be compensated, long transport distances are required for train and ship to become more profitable than the road. The allocation of the comminution process determines the form of transported material and is, therefore, crucial for the whole supply system. According to that, transport chains are classified and explained from a practical point of view.

Keywords: primary forest fuel, biomass, bioenergy, transportation, logistics
doi: 10.3188/szf.2013.0365

* Feistmantelstrasse 4, AT-1180 Wien, E-Mail peter.rauch@boku.ac.at

Forstliche Biomasse beziehungsweise Energieholz wird zurzeit in erster Linie mit dem Lastkraftwagen (LKW) transportiert. Dem gegenüber stehen Transportmöglichkeiten der Binnenschifffahrt und insbesondere des Schienenverkehrs, durch die Energieverbrauch, CO₂-Emissionen und Kosten reduziert werden können. Dieser Artikel stellt die wichtigsten Transportketten – vom Wald zum Werk – systematisch dar und beleuchtet die Verkehrsträger Strasse, Schiene und Wasserstrasse bezüglich ihrer Eignung für den Holzbiomasetransport. Darüber hinaus werden aktuelle Entwicklungen vorgestellt und die Eignung verschiedener Transportketten unter klein strukturierten Waldbesitzverhältnissen sowie im Gebirgswald diskutiert.

Forstliche Biomasse

Biomasse ist jede Substanz biologischen Ursprungs, in Bezug auf den Wald also die gesamte biogene Masse an Bäumen mit ihren Wurzeln, Stämmen, Blättern wie auch die Masse aller weiteren Pflanzen, Tiere und Pilze. In der Forstwirtschaft wird der Begriff Biomasse üblicherweise nur zur Beschreibung jener Teile, die energetisch genutzt werden, verwendet. Konkret handelt es sich vor allem um Nebenprodukte der forstlichen Hauptnutzung und spezielle Sortimente, wie Schlagabraum, Astmaterial, Wipfel, Anschnitte, Bruchholz, Wurzelstöcke

und schwaches Rundholz (z.B. aus Durchforstungen) sowie Rundholz, das weder für die Säge noch für die Holzindustrie geeignet ist. In der Praxis werden die Begriffe Biomasse, forstliche Biomasse, Waldbiomasse, Holzbiomasse und Energieholz in der Regel synonym verwendet. In der Schweiz wird im Bereich der Forst- und Holzwirtschaft meistens von Energieholz gesprochen. (Holz-)Biomasse und Energieholz umfassen zusätzlich eine Reihe von Sortimenten, die nicht im Wald entstehen: Holz aus Kurzumtriebsflächen, Strauch-, Baum- und Grünschnitt von Gärten und kommunalen Flächen sowie diverse Materialien aus der Landwirtschaft, die eine energetische Nutzung zulassen. Zusätzlich findet auch Altholz als sekundärer Rohstoff stellenweise Eingang in Biomasseheiz(kraft)werke.

Eine Klassifizierung fester Biobrennstoffe findet sich in der Norm EN 14961-1:2010, die holzartige Biomasse in Wald- und Plantagenholz sowie anderes erntefrisches Holz, Industrie-Restholz sowie Gebrauchtholz gliedert. Ersteres ist aus forstlicher Sicht relevant und wird wiederum unterteilt in Vollbäume ohne Wurzeln, Vollbäume mit Wurzeln, Stammholz, Waldrestholz, Stümpfe/Wurzeln, Rinde, sortiertes Holz, das nicht aus dem Forst kommt, sowie Mischungen der vorangehenden sieben Kategorien (EN 14961-1:2010).

Energieholz wird in erster Linie zur Produktion von Wärme eingesetzt, daneben wird in Heizkraftwerken auch Strom produziert. In der Schweiz



Abb 1 Ein Chipper-Chip-Truck im Einsatz. Foto: Raffaele Spinelli

werden aus Holz 25 682 MW Wärme und 905 MW Strom erzeugt, wobei die Elektrizitätsproduktion aus Holz in den letzten zehn Jahren deutlich gestiegen ist (Kaufmann 2013). Bei Kleinf Feuerungen, die einzelne Wohnobjekte beheizen, kommen Stückholz, Hackgut und Pellets zum Einsatz. Letztere sind Presslinge aus Nebenprodukten der Sägeindustrie und werden hier nicht behandelt, ebenso wenig wie das Stückholz. Heizwerke für Nah- und Fernwärme setzen meist Hackgut ein, wobei die Materialanforderungen, insbesondere an die Grössenverteilung und den Feuchtegehalt, auf die jeweilige Feuerung abzustimmen sind. Grosse Werke haben Feuerungssysteme, die relativ feuchtes Gut akzeptieren, und bei grossen Rostfeuerungen wird auch Grobanteil im Hackgut toleriert. Die Analyse und Optimierung von Transportketten ist vor allem bei grossen Abnehmern wirtschaftlich interessant, so beziehen sich die in der Folge dargestellten Transportketten vorwiegend auf die Versorgung von grösseren Heizwerken oder Biomassehöfen (Letztere erlauben auch die Distribution an Kleinstverbraucher) mit Hackgut.

Transportketten forstlicher Biomasse: Systematik

Energieholz muss vor Eingang in den jeweiligen Energiegewinnungsprozess zerkleinert werden –

unabhängig davon, ob es sich um eine landwirtschaftliche Hackgutheizung oder ein Bioenergiekraftwerk mit grosser Leistung handelt. Der Ort, an dem die Zerkleinerung stattfindet, bestimmt die Art des zu transportierenden Sortiments und ist ausschlaggebend für die gesamte Bereitstellungslogistik sowie für die damit verbundenen Bereitstellungskosten (Farr & Atkins 2010, Laitila 2008). Dementsprechend basiert die nachfolgende Systematik der Energieholz-Transportketten auf der Art des transportierten Materials und dem Ort, an dem die Zerkleinerung stattfindet. Tabelle 1 gibt einen Überblick über diese Systematik.

Kette 1: Hacken im Bestand

Hier wird Energieholz gleich im Bestand in Behälter gehackt und zur Forststrasse gerückt, wobei entweder eine Maschine (Chip-Harvester) oder eine Kombination aus zwei Maschinen (Chip-Harvester und Chip-Bin-Forwarder) zum Einsatz kommen. Um eine Vortrocknung zu ermöglichen, ist es in Dänemark üblich, das Material zwischen Fällen und Hacken für eine gewisse Zeit im Bestand liegen zu lassen (Talbot & Suadicani 2005, Suadicani 2003). An der Forststrasse wird das Hackgut auf LKW umgeschlagen, für den weiteren Strassentransport werden beispielsweise Abrollcontainer (ACTS) eingesetzt. In Dänemark ist das Hacken im Bestand eine gängige Methode (Talbot & Suadicani 2005, Suadicani 2003), in geringem Umfang auch in Finnland (Kärhä 2011) sowie in Italien in ebenen Plantagen mit Hybrid-Pappeln und Kiefern (Spinelli & Hartsough 2001). Das Hacken im Bestand hat in der Schweiz praktisch keine Bedeutung.

Kette 2: Hacken auf der Forststrasse

Meist kommen mobile Hacker zum Einsatzort, und es wird entweder direkt in LKW oder auf den Boden gehackt. Daneben gibt es auch das System der kombinierten Chipper-Chip-Trucks für kleine Mengen, mit dem Nachteil des geringeren Ladevo-

Kette	Ort, an dem die Zerkleinerung stattfindet resp. Bündel gebildet werden				Transportiertes Sortiment	
	Bestand	Forststrasse	Terminal	Werk	Transport 1	Transport 2
1	Hacken				Hackgut	
2		Hacken			Hackgut	
3			Hacken		Unzerkleinertes Holz	Hackgut
4				Hacken	Unzerkleinertes Holz	
5	Bündeln	Bündeln	Hacken		Bündel	Hackgut
6	Bündeln	Bündeln		Hacken	Bündel	
7	Bündeln			Hacken	Kombinierte Bündel aus Industrie- und Energieholz	
8		Verdichten		Hacken	Unzerkleinerter Schlagabraum, verdichtete Beladung	
9				Hacken	Rundholz mit Rinde/Rundholz mit Ästen und Rinde	

Tab 1 Systematik der Transportketten forstlicher Biomasse. Bündeln im Bestand ist v.a. in Nordeuropa üblich, in Mitteleuropa wird eher an der Waldstrasse gebündelt (bei Seilkranseinsatz).



Abb 2 Radlader werden für den werksinternen Transport oder für das Verladen von Hackgut in den Terminals eingesetzt. Foto: Ulrich J. Wolfsmayr

lumens (Kärhä 2011; Abbildung 1). Das Hacken von diversen Energieholzsortimenten direkt auf der Forststrasse ist weit verbreitet und ist mit zahlreichen anwendungsbezogenen Forschungsarbeiten dokumentiert sowie analysiert worden: für Nordeuropa (z.B. Ranta & Rinne 2006, Kärhä 2011), Mitteleuropa (z.B. Spinelli et al 2007, Stampfer & Kanzian 2006) sowie Nordamerika (z.B. Mahmudi & Flynn 2006) und Japan (z.B. Yoshioka et al 2006). Circa 70% der in Finnland jährlich erzeugten Menge an Energieholz wird auf der Forststrasse gehackt (Ranta & Rinne 2006). In Österreich werden ungefähr zwei Drittel des Energieholzes an der Forststrasse gehackt und per LKW direkt zu den Abnehmern gebracht (Rauch & Gronalt 2011). Wenn der LKW direkt über den Auswurfarm des Hackers beladen wird, führt die enge Verzahnung der Prozesse dazu, dass sich Verzögerungen stark auf die Wirtschaftlichkeit der Bereitstellungskette auswirken. Eine Vorkonzentration von Energieholz auf zentralen Hackplätzen sowie die Entkoppelung der Prozesse Hacken und Transport können dieses Problem lösen. Letzteres ist speziell im Gebirgswald unumgänglich, da häufig nicht ausreichend Platz vorhanden ist, um Hacker und LKW nebeneinander zu positionieren (Stampfer & Kanzian 2006). Findet die Beladung unabhängig vom Hacken statt, wird das Gut auf die Forststrasse gehackt, und die LKW sind mit einem Ladekran ausgestattet (Ranta & Rinne 2006). Vor dem Hacken kann das Material zur Trocknung gelagert werden.

Kette 3: Hacken in einem Terminal

Terminals für Energieholz kommen in einer Versorgungskette als Umschlags- und Lagerplatz zum Einsatz, wobei sie sich in Umschlagsmenge, Lagergrösse, Transportmodi und Ausstattung unterscheiden. Im Gegensatz zum Sammelplatz im Wald muss eine ganzjährige Befahrbarkeit gegeben sein. Wird ein Terminal zum Glied in einer Transport-

kette, so ergeben sich zwei Transportläufe, die in Tabelle 1 als Transport 1 und Transport 2 bezeichnet sind. Während Transport 1 fast immer auf der Strasse durchgeführt wird, kann man sich bei Transport 2 auch der Schiene oder der Wasserstrasse bedienen. Ist der Terminal der Ort, an dem das Gut zerkleinert wird, so sind die Sortimente für Transport 1 entweder unzerkleinertes Energieholz oder – im selteneren Fall – Energieholzbündel. In den Terminals werden leistungsfähige mobile Hacker, die im Bedarfsfall geordert werden, oder stationäre Hacker eingesetzt; Letztere haben die Vorteile grösserer Produktivität, kürzerer Rüstzeiten und höherer Hackschnitzelqualität (Asikainen 1998, Ranta & Rinne 2006). Qualitätsanforderungen an das Hacken sind glatte Schnittflächen, gleichmässige Grössenverteilung sowie wenig Fein- und Grobanteile. Wurzelstöcke werden mittels schwerer Hammer- oder Schlagmühlen zerkleinert (Kärhä 2011), hier spricht man von Schredderholz und gibt von Holzhackschnitzeln abweichende Spezifikationen an (EN 14961-1:2010).

Wird das Energieholz unzerkleinert und ungebündelt über grössere Strecken transportiert, ergeben sich aufgrund der geringen Ladedichte grosse Transportvolumen – ein wesentlicher wirtschaftlicher Nachteil bei einem längeren Vortransport.

Kette 4: Hacken am Heiz(kraft)werksstandort

Das unzerkleinerte Gut wird zumeist auf der Strasse zum Heiz(kraft)werksstandort transportiert. Für die dort eingesetzten stationären Hacker gilt das bereits Erwähnte. An Standorten der Holzindustrie kann der Hacker auch zur Produktion von Industriehackgut für die stoffliche Verwertung in der Papier- oder Plattenproduktion verwendet werden, die hohe Auslastung steigert die Wirtschaftlichkeit des Hackprozesses. Der werksinterne Transport erfolgt meist mit Radladern (Abbildung 2) oder Stetigförderern (z.B. Förderbänder).

Ketten 5 und 6: Bündeln, danach Hacken im Terminal oder Werk

Das Bündeln von Energieholz erfolgt in Nordeuropa im Bestand (Kärhä & Vartiamaäki 2006, Johansson et al 2006, Jylhä & Laitila 2007, Eriksson & Gustavsson 2010), in Mitteleuropa hingegen an der Forststrasse vornehmlich nach Rückung des Holzes im Vollbaumverfahren mit Seilkran und anschließender Prozessaufarbeitung (Spinelli & Magagnotti 2009). In der Praxis ist der Bündler-Einsatz in Mitteleuropa bescheiden. Zum Hacken im Terminal oder Kraftwerk gilt das bereits Erwähnte mit der Einschränkung, dass Bündel nur mit leistungsstarken Hackern zerkleinert werden können. Der Strassentransport ist grundsätzlich mit Rungen-LKW möglich, allerdings können herabfallende Teile zu Problemen im Strassenverkehr führen (Johansson et al 2006).

Kette 7: Kombinierte Bündel

Kombinierte Bündel enthalten sowohl Industrieholz als auch Energieholz und werden mit Runge-LKW zu Papierfabriken transportiert. Nach der Entrindungstrommel wird das Schleifholz (Faserholz) der weiteren Verarbeitung zugeführt und das restliche Material am Standort energetisch verwertet. Der Vorteil besteht in der Versorgung der Papierindustrie mit Energieholz bei gleichzeitiger Sicherung der Industrieholzversorgung (Kärhä et al 2011, Jylhä 2004, Jylhä & Laitila 2007). Eine finnische Pilotstudie belegt für dieses Bereitstellungssystem Kosteneinsparungen im Vergleich zu getrennten Transportketten (Kärhä et al 2010).

Kette 8: Verdichtung nach der Beladung des Transportfahrzeuges

In der Schweiz wird aktuell ein 5-Achs-LKW mit robustem Behälteraufbau eingesetzt, in dem Schlagabraum und kommunaler Grünschnitt hydraulisch verdichtet und zum Biomassekraftwerk Domat/Ems geliefert werden, wo die Zerkleinerung erfolgt. Der Prototyp hat ein Eigengewicht von 27 t und ein zulässiges Gesamtgewicht von 41 t (Abbildung 3).¹ Während Bündel annähernd wie Rundholz umgeschlagen werden können und auch eine Zwischenlagerung (samt Trocknung) erlauben, ist dies bei diesem System nicht möglich.

Kette 9: Energieholz als Teil eines anderen Sortiments

Die Entrindung im Sägewerk und anschließende energetische Verwertung der Rinde ist das gängigste Beispiel für Transportketten, bei denen das Energieholz Teil eines anderen Sortiments ist. In Mitteleuropa unbekannt ist eine Alternative aus Skandinavien, die «tree section method», bei der ganze

Stammabschnitte samt Ästen zur Papierfabrik gebracht werden, um Äste und Rinde getrennt vom Stammholz energetisch zu nutzen (Angus-Hankin et al 1995, Jylhä 2004, Björheden 2001).

Transportmodi für forstliche Biomasse

Die Gesamttransportkosten setzen sich zusammen aus 1) distanzabhängigen und 2) distanzunabhängigen Kosten (z.B. Be- und Entladung). Der Anteil der distanzunabhängigen Kosten an den Gesamttransportkosten sinkt mit steigender Entfernung. Strassentransport hat die höchsten distanzabhängigen Kosten, Schienen- und insbesondere Wasserstrassentransport haben wesentlich geringere distanzabhängige Kosten (Searcy et al 2007). Bei kurzen Distanzen (<100 km), wenn keine Schienen- und Hafeninfrastuktur zur Verfügung steht, wenn Flexibilität gefordert ist oder wenn das Energieholz in kleinen Mengen und räumlich dispers anfällt, wird vor allem der Strassentransport eingesetzt (Hamelinck et al 2005, Mahmudi & Flynn 2006). Auch bei Entfernungen bis 200 km wird mangels wirtschaftlicher multimodaler Transportlösungen der Energieholztransport überwiegend mittels LKW abgewickelt (Rauch et al, unveröffentlicht).² Unter multimodalem Transport wird die Güterbeförderung unter Verwendung von mindestens zwei verschiedenen Transportmodi (z.B. Strasse, Schiene, Wasserstrasse) verstanden. Im ungehackten Zustand ist der Transport von Energieholz aufgrund der geringen Ladedichte nur bis zu 50 km wirtschaftlich kompetitiv.

Für einen wirtschaftlichen Schienentransport muss die Entfernung jedenfalls 100 km betragen, für den Schiffstransport werden Strecken von 800 km angegeben, um mit geringen distanzabhängigen Kosten die hohen distanzunabhängigen Kosten kompensieren zu können (Hamelinck et al 2005, Searcy et al 2007). Nichtsdestotrotz beeinflussen zahlreiche Faktoren – zum Beispiel die Sortimentseigenschaften (unzerkleinert, gehackt, gebündelt), der Feuchtegehalt, die Transportmenge – die wirtschaftlich sinnvolle Transportdistanz. Daher müssen Entscheidungen im Einzelfall getroffen werden (Junginger et al 2001, Gronalt & Rauch 2007).

Strassentransport

Energieholz wird fast immer mit dem LKW aus dem Wald abtransportiert, da die geografische Verteilung und Erschliessung der Wälder nichts anderes zulässt (Allen et al 1998). Für lokale Transporte wer-



Abb 3 Ein neu entwickelter und in Graubünden im Einsatz stehender Biomasse-Transporter.
Foto: Candinas SA

1 www.candinas.ch/einsatz/biomasse-energie und www.dolluppenau.com/produkte/holztransport-fahrzeuge/doll-energy (3.9.2013).

2 RAUCH P, ROSTECK A, GRONALT M, PALM D (2008) Design eines Biomasse-Versorgungsnetzwerkes für die EVN AG. Projektbericht. Wien: Univ Bodenkultur, unveröffentlicht.



Abb 4 Sattelzug mit Schubboden. Foto: Waldverband Steiermark

den auch landwirtschaftliche Gespanne eingesetzt, bei grösseren Entfernungen (ab 50 km Transportdistanz) ist der Einsatz von Sattelzügen empfehlenswert (Spinelli & Hartsough 2001). Die eingeschränkte Befahrbarkeit vieler Forststrassen begrenzt besonders im Alpenraum den ansonsten wirtschaftlich vorteilhaften Einsatz von Sattelzügen mit Schubboden (Abbildung 4). Um das zulässige Ladungsgewicht tunlichst auszunutzen, soll die Schüttdichte möglichst hoch sein, was bei Hackgut beispielsweise durch die Beschleunigung im Hackerauswurf oder geringfügiges Anheben und Fallenlassen von ACTS-Containern erreicht wird (Talbot & Suadicani 2006). ACTS-Container auf LKW mit Hakengerät haben den Nachteil der hohen Eigengewichte (zwei bis drei Tonnen höhere Eigengewichte im Vergleich zum Standard-LKW; Spinelli & Hartsough 2001). Es besteht auch die Möglichkeit, Container als Transportmittel und als Behälter für die Trocknung zu verwenden. Zur Trocknung wird Warmluft, zum Beispiel aus Abwärme von Biogasanlagen, eingesetzt, wobei manche Systeme hierzu mit einem perforierten Zwischenboden ausgestattet sind, während andere einen zentralen, perforierten Zuluftschacht aufweisen (Mobiltrockner).³

Schienentransport

Der Schienentransport von Energieholz verursacht geringe kilometerabhängige Kosten und erlaubt es, längere Transportdistanzen zu überbrücken. Verkehrsprobleme, Lärm und Abgase durch LKW-Transport in Ballungsräumen werden reduziert, und unter Verwendung von Strom aus erneuerbaren

Quellen sind die klimarelevanten CO₂-Emissionen beim Bahntransport wesentlich geringer.

Für den zumeist notwendigen Vortransport auf der Strasse entstehen Umschlagkosten, die in der Regel erst ab einer Entfernung von 200 km durch geringere distanzabhängige Kosten kompensiert werden (Tahvanainen & Anttila 2011). Madlener & Bachhiesl (2007) stellen in der Beschreibung des Waldbiomasse-Kraftwerks in Simmering (Wien) mit 66 MW Feuerungsleistung fest, dass der multimodale Transport (Strasse und Schiene) ab einer Entfernung von 96 km den geringeren Energieeinsatz beziehungsweise ab 250 km die geringeren Kosten aufweist. Für ein Kraftwerk in Basel (30 MW) ist der Schienentransport ab 100 km konkurrenzfähig (Madlener & Vögtli 2008), während für ein Fallbeispiel in Nordamerika die zusätzlichen Umschlagkosten für den Schienentransport von Waldhackgut erst ab 145 km kompensiert werden (Mahmudi & Flynn 2006). Das finnische Biomasse-Kraftwerk «Alholmens Kraft» (240 MW) bezieht Energieholz aus einem Umkreis von 200 km, mit einem Haupttransport auf der Schiene und einem Vortransport von maximal 30 km im Umkreis der Verladegleise, wobei ein wesentlicher Teil in Form von Bündeln angeliefert wird (Eriksson & Gustavsson 2010).

In Schweden haben 6 von 44 Biomassekraftwerken über 100 GWh einen direkten Schienenanschluss, 20 haben Gleiszugang in der näheren Umgebung, wodurch multimodale Transporte (LKW–Bahn–LKW) notwendig sind (Skogforsk 2010). In Österreich sind eines der grössten Hemmnisse für den Einsatz multimodaler Biomasse-Transportketten die entweder zu kurzen oder überhaupt fehlenden Entlademöglichkeiten an den Kraftwerksstandorten. Ausserdem gibt es in Österreich – im Gegensatz zu Nordeuropa – auch keine grossen Holzterminals oder Umschlaganlagen, die es erlauben würden, Ganzzüge von 650 Metern Länge zu beladen (Wolfsmayr et al, unveröffentlicht).⁴

Schiffstransport

Der Transport auf der Wasserstrasse weist geringe kilometerabhängige Kosten und einen geringen Energieeinsatz pro Tonnenkilometer auf, wobei die Transporteffizienz mit zunehmender Schiffsgrösse steigt (Hamelinck et al 2005). Die Umschlagkosten sind jedoch im Vergleich mit Strasse oder Schiene beträchtlich höher, daher ist der Schiffs-transport nur über längere Distanzen wirtschaftlich (Searcy et al 2007). Grosse Umschlagsflächen im Hafen sind nötig, da die Ganzschiffs-ladungen beim Eintreffen des Schiffes in kürzester Zeit gelöscht werden

³ www.ibt-kraemer.de (3.9.2013).

⁴ WOLFSMAYR UJ, RAUCH P, GRONALT M (2013) Endbericht Intermodales Transportsystem Holzbiomasse. Wien: Univ Bodenkultur, unveröffentlicht.



Abb 5 Drehentladestapler beim Entladen eines Wood Tainer. Foto: Innofreight

müssen. Im Gegensatz zu Deutschland und Österreich hat der Schiffstransport in der Schweiz kaum Potenzial.

Multimodale Transportketten

Innovationspotenziale zur Etablierung multimodaler Transportketten bestehen vor allem in der Verbesserung des Umschlags und der Etablierung von Bahnterminals. So sind vereinzelt Schüttgutcontainer im Einsatz, die vor allem bei der Entladung mit Drehentladestapler (Abbildung 5) eine hohe Effizienz und Arbeitssicherheit aufweisen, wobei auch

die Verwiegung integriert ist. Da die Eckabmasse dem ISO-Standardcontainer entsprechen, können die gängigen Eisenbahnwaggons eingesetzt werden, ebenso ist die Stapelbarkeit gegeben. Insbesondere bei grossen Abnehmern ist ein zunehmender Einsatz dieses Systems festzustellen, besonders im Bereich der Holzindustrie, die solche Container (Wood Tainer XXL)⁵ auch für den unimodalen Schienentransport von Industriehackgut für die Zellstoff- und Plattenerzeugung einsetzt (Wolfsmayr et al, unveröffentlicht). Bei multimodalen Transportketten, bei denen das Energieholz auf Bahn oder Schiff umgeschlagen wird, erfolgt der Vorlauf vom Wald zum Umschlagsplatz fast immer als Strassentransport.

Energieholzterminals

Terminals dienen dem Ausgleich des saisonal variierenden Brennstoffbedarfes eines Heizkraftwerks und der witterungsbedingt von kurzfristigen Lieferstopps geprägten Versorgung aus dem Wald (z.B. wenn extremer Regen oder Schneefall das Waldlager unzugänglich machen; Rauch & Gronalt 2011) und ermöglichen den effizienten Einsatz leistungsfähiger Hacker. Ein Terminal ist auch nötig, wenn das Lager am Heizkraftwerksstandort zu klein ist.

Neben Lagerung und Umschlag kann in einem Terminal auch das Hacken erfolgen, ebenso wie die Verwiegung und die Feuchtegehaltsbestimmung.

⁵ www.innofreight.ch/_innofreight/2_produkte/WoodTainer-XXL.php (3.9.2013).



Abb 6 Bahnterminal in Stockaryd, Schweden: Auf dem Verladegleis können Ganzzüge mit 700 m Länge beladen werden. Foto: Peter Rauch

Befindet sich das Heizkraftwerk in der Nähe von bewohntem Gebiet, so kann, um Lärm- und Staubbelastigung zu vermeiden, sämtliches Material bereits im Terminal gehackt werden (Asikainen et al 2001). In Österreich gibt es aber auch auf Terminals stationäre Hacker, die schalldicht umhaust sind (Rauch & Gronalt 2011).

Terminals dienen als Umschlagpunkte für mehrgliedrigen Transport, sowohl unimodal als auch multimodal. Für die rasche Be- und Entladung bei Bahn- und Schiffstransport müssen Lager und Umschlagskapazität gross genug sein (Rauch & Gronalt 2011).

Die Entscheidung für die Errichtung eines Terminals basiert auf einer Kosten-Nutzen-Abwägung zwischen zusätzlichen Kosten für Infrastruktur und Umschlag und sinkenden Kosten für Hacken und Transport aufgrund von Skaleneffekten (Asikainen et al 2001), wobei das Kostenreduktionspotenzial von der jeweiligen Bereitstellungskette abhängig ist (Rauch & Gronalt 2010). In diese Entscheidung müssen auch Transportverfahren, -volumen und -gewicht einbezogen werden.

Industrielle Terminals greifen auf bestehende Infrastruktur zurück, profitieren von Skaleneffekten und ermöglichen geringe Kosten pro umgeschlagener Einheit (Ranta & Rinne 2006, Rauch & Gronalt 2010). Ein leistungsstarker, stationärer Hacker wird vor allem zur Hackgutproduktion für die Papier- und Plattenherstellung eingesetzt, und bei freier Kapazität wird Energieholz zerkleinert (Rauch & Gronalt 2011). Für das Biomasse-Kraftwerk Simmering (Wien) wurde ein eigenständiger Industrieterminal errichtet, der über multimodale Verkehrsanbindung (Strasse, Schiene, Wasserstrasse), stationären Hacker und Einrichtungen zur Verwiegung, Feuchtemessung und Abrechnung verfügt (Madlener & Bachhiesl 2007).

In Finnland und Schweden wird Biomasse zur energetischen Nutzung vermehrt über Bahnterminals umgeschlagen, wobei das Energieholz zuerst gehackt, dann auf festem Untergrund gelagert und per Radlader in Schüttgutcontainer verladen wird (Abbildung 1). Einige dieser Bahnterminals wurden in den letzten Jahren in Nordeuropa eingerichtet, um die aufgrund von ausserordentlichen Sturmereignissen angefallenen Schadholzmengen abtransportieren zu können (Abbildung 6). Diese Terminals

sind Umschlagpunkte für den multimodalen Langstreckentransport, wobei Transport 1 (wie oben definiert) – vom Wald zum Terminal – immer auf der Strasse erfolgt und für Transport 2 der Bahntransport zur Verfügung steht. Für den effizienten Umschlag stehen ein oder zwei Verladegleise zur Verfügung, die es erlauben, Ganzzüge abzufertigen.

Regionale Terminals dienen dem Umschlag von Holz aus nahe liegenden Wäldern, verfügen lediglich über einfachste Infrastruktur (oft nur unbefestigte Lagerflächen) und sind im Gegensatz zum Waldlager unabhängig von Wettereinflüssen ganzjährig verfügbar. Die Lagermöglichkeit beschränkt sich auf wenige tausend Festmeter Holz, daher werden mobile Hacker (LKW-Aufbauten) eingesetzt. Verglichen mit dem Bedarf von Biomasse-Kraftwerken ist der Lagerbestand relativ gering, ebenso sind die Skaleneffekte beim Hacken und beim Transport gering, dafür sind die Infrastrukturkosten niedrig. Zusätzlich gibt es die Möglichkeit, landwirtschaftliche Infrastruktur, namentlich Umschlagseinrichtungen für Zuckerrüben, für Energieholz zu nutzen, wobei asphaltierte Lagerflächen und eine Brückenwaage zur Verfügung stehen (Rauch & Gronalt 2011).

Biomassenhöfe können als regionale Terminals im weitesten Sinne bezeichnet werden. Im Gegensatz zu den anderen Terminals werden hier auch andere Sortimente für die energetische Nutzung bereitgestellt, allen voran Scheitholz und Qualitätshackgut. Der Fokus liegt auf der Versorgung des lokalen Marktes, es werden sowohl Kleinstmengen für Endverbraucher als auch Hackgut für Heizwerke bereitgestellt, wobei Hacken und Lagerhaltung auf dem Biomassenhof stattfinden (Metschina 2012).

Transportkosten und -preise

Tabelle 2 zeigt die durchschnittlichen Marktpreise für die zwei in der forstlichen Praxis gängigsten Transportketten. Die angegebenen Preise basieren auf im österreichischen Alpenraum gewonnenen Praxiserfahrungen⁶ und können abhängig von Materialbeschaffenheit (Durchmesser, Astigkeit, Laubholzanteil usw.), vom zu hackenden Volumen, von

⁶ Mündliche Mitteilung vom 12.8.2013 von M. Handlos, Waldverband Steiermark.

Bereitstellungskette	Preise (EUR/Srm)			
	Vollmechanisierte Fällung und Rückung	Vortransport zum Terminal	Hacken	Strassentransport (75 km, 90-m ³ -Schubboden-LKW)
Hacken an der Forststrasse	6.20	–	4.30	3.30
Hacken in regionalem Terminal (mobiler Hacker)	6.20	3.00	2.30	3.30

Tab 2 Aktuelle Bereitstellungspreise für die zwei typischen Transportketten im österreichischen Alpenraum.

Quelle: M. Handlos, mündl. Mitteilung

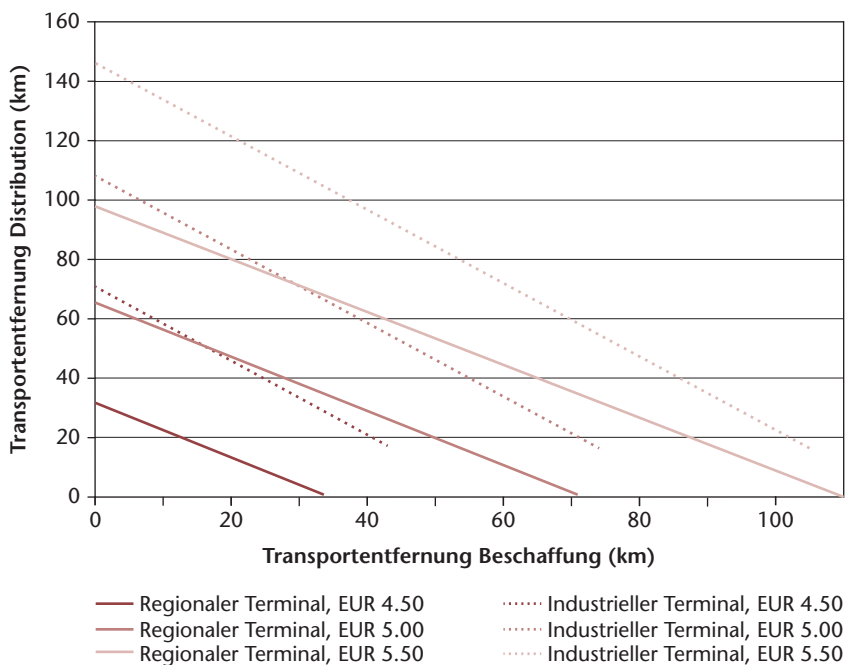


Abb 7 Gegenüberstellung möglicher Transportentfernungen beim Einsatz eines regionalen Terminals mit mobilem Hacker bzw. eines industriellen Terminals mit stationärem Hacker (Synergie zur Holzindustrie). Die Isolinien zeigen die Summe der Systemkosten für Be- und Entladen, Transporte und Hacken. Sie enden dort, wo für die vorgegebenen Systemkosten die Entfernungen nicht mehr erhöht werden können. Quelle: Gronalt & Rauch (2007; verändert). Ein regionaler Terminal kann beispielsweise zu Systemkosten von EUR 5.– Holz aus einer Entfernung von 50 km beschaffen, im Terminal hacken und das Waldhackgut zu einem 20 km entfernt liegenden Abnehmer transportieren.

den räumlichen Gegebenheiten am Hackort, der eingesetzten Hackertechnologie, den Transportfahrzeugen, der Erfahrung des Personals etc. in der forstlichen Praxis stark variieren.

Zur Auswahl optimaler Terminalstandorte haben Gronalt & Rauch (2007) die Systemkosten verglichen. Anhand der abgeleiteten Systemkosten-Isolinien können für unterschiedliche Terminaltypen und variierende Systemkosten die entsprechenden Transportentfernungen für die Beschaffung von unzerkleinertem Energieholz aus dem Wald einerseits und für die Distribution des Hackgutes andererseits ermittelt werden. In Abbildung 7 werden mögliche Transportentfernungen beim Einsatz eines regionalen Terminals mit mobilem Hacker beziehungsweise eines industriellen Terminals mit Synergie zur Holzindustrie gegenübergestellt. Die Isolinien zeigen die Summe der Systemkosten pro Srm (ohne Holzerntekosten).

Diskussion, Fazit und Ausblick

Beim Transport von Energieholz überwiegt der unimodale Transport auf der Strasse, einerseits weil für den Transport aus dem Wald zumeist nur der Strassentransport möglich ist und andererseits weil die meisten Energieholztransporte im lokalen und regionalen Raum durchgeführt werden. Speziell für weitere Strecken würde sich aber ein multimodaler

Transport, bei dem die grösste Entfernung auf der Schiene zurückgelegt wird, als wirtschaftlich und ökologisch sinnvolle Alternative anbieten. Allerdings besteht derzeit in der Schweiz und in Österreich der Trend, dass sich die Bahn in ländlichen Regionen aus der Fläche zurückzieht und Verladebahnhöfe aus Rentabilitätsgründen schliesst.

Ein weiterer Trend ist der Einsatz von Containern, die für Drehentladung konzipiert sind und in ihren Massen dem ISO-Standardcontainer entsprechen – im Gegensatz zu ACTS-Containern ist ein derartiges System (Wood Tainer XXL) für den Ferntransport grosser Volumina und die Integration in multimodale Transportketten geeignet. Innovationspotenzial bei Transportbehältern zeigen auch der der Mobiltrockner oder der LKW-Aufbau zur Materialverdichtung (Abbildung 3); dieser wird in der Schweiz aktuell als Prototyp getestet.

Viele Transportketten wurden in nordischen Ländern entwickelt und sind für Schweizer Verhältnisse kaum adaptierbar, da sie oft erst bei hohen Volumina wirtschaftlich effizient werden, wofür wiederum grosse Kahlhiebsflächen unabdingbar sind. Deshalb sind etwa bei klein strukturiertem Waldbesitz sowie bei Nutzungen im Steilhang Transportketten mit Bündeln kaum geeignet. Das Hacken im Bestand erfordert grosse, befahrbare Schlagflächen, während im Gebirgswald unter Rücksichtnahme auf die Schutzwirkung und die Sicherung der anschliessenden Verjüngung vor allem kleinflächig genutzt wird. Selbst das in Nachbarländern mit ähnlichen Waldbesitzstrukturen sehr häufig eingesetzte Verfahren mit einem Grosshacker an der Forststrasse kann im Gebirgswald aufgrund schmaler Strassen oft nicht angewendet werden. ■

Eingereicht: 4. Juni 2013, akzeptiert (mit Review): 30. September 2013

Literatur

- ALLEN J, BROWNE M, HUNTER A, BOYD J, PALMER H (1998) Logistics management and costs of biomass fuel supply. *Int J Phys Distrib Logist Manage* 28: 463–477.
- ANGUS-HANKIN C, STOKES B, TWADDLE A (1995) The transportation of fuelwood from forest to facility. *Biomass Bioenergy* 9: 191–203.
- ASIKAINEN A (1998) Chipping terminal logistics. *Scand J For Res* 13: 386–392.
- ASIKAINEN A, RANTA T, LAITILA J (2001) Large-scale forest fuel procurement. In: Pelkonen P, Hakkila P, Karjalainen T, Schlamadinger B, editors. *Woody biomass as an energy source*. Joensuu: European Forest Institute, Proc 39. pp. 73–78.
- BJÖRHEDEN R (2001) Learning curves in tree section hauling in Central Sweden. *Int J For Eng* 12: 9–18.
- ERIKSSON L, GUSTAVSSON L (2010) Comparative analysis of wood chips and bundles. Costs, carbon dioxide emissions, dry-matter losses and allergic reactions. *Biomass Bioenergy* 34: 82–90.
- FARR AK, ATKINS D (2010) Fuel supply planning for small-scale biomass heating systems. *West J Appl For* 25: 18–21.
- GRONALT M, RAUCH P (2007) Designing a regional forest fuel supply network. *Biomass Bioenergy* 31: 393–402.

- HAMELINCK CN, SUURS RAA, FAAIJ APC (2005)** International bio-energy transport costs and energy balance. *Biomass Bioenergy* 29: 114–134.
- JOHANSSON J, LISS JE, GULLBERG T, BJÖRHEDEN R (2006)** Transport and handling of forest energy bundles – advantages and problems. *Biomass Bioenergy* 30: 334–341.
- JUNGINGER M, FAAIJ A, VAN DEN BROEK R, KOOPMANS A, HULSCHER W (2001)** Fuel supply strategies for large-scale bio-energy projects in developing countries. Electricity generation from agricultural and forest residues in Northeastern Thailand. *Biomass Bioenergy* 21: 259–275.
- JYLHÄ P (2004)** Feasibility of an adapted tree section method for integrated harvesting of pulpwood and energy wood in early thinning of Scots Pine. *Int J For Eng* 15: 35–42.
- JYLHÄ P, LAITILA J (2007)** Energy wood and pulpwood harvesting from young stands using a prototype whole-tree bundler. *Silva Fenn* 41: 763–779.
- KÄRHÄ K (2011)** Industrial supply chains and production machinery of forest chips in Finland. *Biomass Bioenergy* 35: 3404–3413.
- KÄRHÄ K, JYLHÄ P, LAITILA J (2011)** Integrated procurement of pulpwood and energy wood from early thinnings using whole-tree bundling. *Biomass Bioenergy* 35: 3389–3396.
- KÄRHÄ K, VARTIAMÄKI T (2006)** Productivity and costs of slash bundling in Nordic conditions. *Biomass Bioenergy* 30: 1043–1052.
- KAUFMANN U (2013)** Schweizerische Statistik der erneuerbaren Energien, Ausgabe 2012. Bern: Bundesamt Energie. 27 p.
- LAITILA J (2008)** Harvesting technology and the cost of fuel chips from early thinnings. *Silva Fenn* 42: 267–283.
- MADLENER R, BACHHIESL M (2007)** Socio-economic drivers of large urban biomass cogeneration: Sustainable energy supply for Austria's capital Vienna. *Energy Policy* 35: 1075–1087.
- MADLENER R, VÖGTLI S (2008)** Diffusion of bioenergy in urban areas: A socio-economic analysis of the Swiss wood-fired cogeneration plant in Basel. *Biomass Bioenergy* 32: 815–828.
- MAHMUDI H, FLYNN P (2006)** Rail vs truck transport of biomass. *Appl Biochem Biotech* 129: 88–103.
- METSCHINA C (2012)** Der Bedarf und die nachhaltige Vermarktung der festen, holzartigen Biomasse zur energetischen Verwendung in bäuerlichen Biomasse-Nahwärmanlagen am Beispiel des Aufbaus von regionalen Biomassehöfen unter Berücksichtigung geopolitischer und ethischer Rahmenbedingungen in der Steiermark. Graz: Karl-Franzens-Univ, Dissertation. 223 p.
- RANTA T, RINNE S (2006)** The profitability of transporting uncommuted raw materials in Finland. *Biomass Bioenergy* 30: 231–237.
- RAUCH P, GRONALT M (2010)** The terminal location problem in a cooperative forest fuel supply network. *Int J For Eng* 21: 32–40.
- RAUCH P, GRONALT M (2011)** The effects of rising energy costs and transportation mode mix on forest fuel procurement costs. *Biomass Bioenergy* 35: 690–699.
- SEARCY E, FLYNN P, GHAFoori E, KUMAR A (2007)** The relative cost of biomass energy transport. *Appl Biochem Biotech* 137–140: 639–652.
- SKOGFORSK (2010)** Skogen – en växande energikälla, Sammanfattande rapport från Effektivare Skogsbränslesystem 2007–2010. Uppsala: Skogforsk. 109 p.
- SPINELLI R, HARTSOUGH B (2001)** A survey of Italian chipping operations. *Biomass Bioenergy* 21: 433–444.
- SPINELLI R, MAGAGNOTTI N (2009)** Logging residue bundling at the roadside in mountain operations. *Scand J For Res* 24: 173–181.
- SPINELLI R, NATI C, MAGAGNOTTI N (2007)** Recovering logging residue: experiences from the Italian Eastern Alps. *Croatian J For Eng* 28: 1–9.
- STAMPFER K, KANZIAN C (2006)** Current state and development possibilities of wood chip supply chains in Austria. *Croatian J For Eng* 27: 135–145.
- SUADICANI K (2003)** Production of fuel chips in a 50-year old Norway spruce stand. *Biomass Bioenergy* 25: 35–43.
- TAHVANAINEN T, ANTTILA P (2011)** Supply chain cost analysis of long-distance transportation of energy wood in Finland. *Biomass Bioenergy* 35: 3360–3375.
- TALBOT B, SUADICANI K (2005)** Analysis of two simulated in-field chipping and extraction systems in Spruce thinnings. *Biosyst Eng* 91: 283–292.
- TALBOT B, SUADICANI K (2006)** Road transport of forest chips: containers vs. bulk trailers. *For Stud* 45: 11–22.
- YOSHIOKA T, ARUGA K, NITAMI T, SAKAI H, KOBAYASHI H (2006)** A case study on the costs and the fuel consumption of harvesting, transporting, and chipping chains for logging residues in Japan. *Biomass Bioenergy* 30: 342–348.

Transportketten forstlicher Biomasse – Stand der Technik und Innovationen

Energieholz wird auf der Strasse, der Schiene und auf Wasserstrassen transportiert, wobei der Strassentransport deutlich überwiegt. In den meisten Fällen erfolgt die erste Etappe des Energieholztransports auf der Strasse. Der Vergleich der verschiedenen Transportmodi zeigt, dass die distanzabhängigen Kosten beim Strassentransport am höchsten sind. Da jedoch die Umschlagkosten, die für den Schifftransport noch höher sind als für den Bahntransport, kompensiert werden müssen, ergeben sich entsprechend grosse Entfernungen, ab denen die Schiene oder die Wasserstrasse günstiger sind. Der Ort, an dem die Zerkleinerung stattfindet, bestimmt das zu transportierende Sortiment und ist ausschlaggebend für die Bereitstellungslogistik sowie für die damit verbundenen Bereitstellungskosten. Dementsprechend werden in diesem Beitrag Transportketten klassifiziert und aus praktischer Sicht bewertet.

Chaîne de transport de la biomasse forestière – techniques actuelles et innovations

Le bois-énergie est transporté par route, par rail et par voie navigable. Le transport par route domine largement. Dans la majorité des cas, la première étape du transport du bois-énergie se fait par route. La comparaison des différentes méthodes de transport démontre que les coûts relatifs à la distance sont plus élevés pour le transport par route que pour les autres méthodes. Etant donné qu'il faut compenser les coûts de chargement/déchargement, qui sont encore plus élevés pour le transport par bateau que par rail, les distances à partir desquelles le bateau ou le rail devient plus avantageux sont par conséquent élevées. Le lieu de déchetage définit l'assortiment qui sera transporté et sera déterminant pour la logistique d'approvisionnement et les coûts qui lui sont liés. Par conséquent, cette contribution classifie et évalue de manière pragmatique les chaînes de transport.