



Fakultät Wissenschaftszentrum Weihenstephan für Ernährung, Landnutzung und Umwelt  
Lehrstuhl für Holzwissenschaft

**Holznutzung in Kaskaden: Ansätze zur Potentialanalyse und zur  
Weiterentwicklung der ökobilanziellen Bewertung**

**Karin Höglmeier**

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

Doktors der Forstwissenschaft (Dr. rer. silv.)

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr. Michael Suda

Prüfer der Dissertation:

1. Univ.-Prof. Dr. Klaus Richter
2. apl. Prof. Dr. Gabriele Weber-Blaschke
3. Univ.-Prof. Dr. Stefanie Hellweg  
(Eidgenössische Technische Hochschule Zürich,  
Schweiz)

Die Dissertation wurde am 05.05.2015 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät Wissenschaftszentrum Weihenstephan für Ernährung, Landnutzung und Umwelt am 08.09.2015 angenommen.



## Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei allen bedanken, die mich während meiner Promotion mit ihrem Fachwissen, ihrer Zeit, ihrer Geduld, aber auch ihrem Zuspruch und ihrem Humor unterstützt haben.

Prof. Dr. Klaus Richter danke ich für die Betreuung der Promotion und die Leitung des zugrundeliegenden Forschungsprojektes. Er stand mir immer als Ansprechpartner zur Verfügung und hat die Arbeit mit neuen Perspektiven und Anregungen bereichert. Prof. Dr. Gabriele Weber-Blaschke danke ich sehr herzlich für die zahlreichen Gespräche und Diskussionen sowie ihre Anregungen zur Ausrichtung der Dissertation. Sie hatte immer ein offenes Ohr, einen hilfreichen Ratschlag und ein motivierendes Wort.

Allen Freisinger Kollegen, besonders Christel Lubenau und Christian Wolf, sei herzlich gedankt: Für die angenehme Arbeitsatmosphäre, für entspannende Kaffeepausen, für zahlreiche Gespräche über Methoden und Ergebnisse und auch für gelegentliches gemeinsames Leiden.

Den Münchner Holzforschern danke ich für die zwar seltene, aber umso freundlichere Aufnahme in ihren Kreis.

Ein Dank gebührt auch dem Team des Lehrstuhls für Ökologisches Systemdesign der ETH Zürich für die warmherzige Aufnahme. Besonders danken möchte ich Dr. Bernhard Steubing für die erfolgreiche Zusammenarbeit und Prof. Dr. Stefanie Hellweg für ihre Bereitschaft, sich als Gutachterin für meine Dissertation zu Verfügung zu stellen.

Außerdem bedanke ich mich bei der Bayerischen Forstverwaltung, die mir die Möglichkeit zur Arbeit an der Holzforschung München eröffnet hat.

Ganz besonders danke ich meiner Familie, vor allem meinen Eltern Hildegard und Hermann, für die liebevolle Unterstützung während dieser Arbeit und auch während meines Studiums. Diese Arbeit ist auch eure.



## Kurzfassung

Die Nutzung von Ressourcen in Kaskaden wird oft als Möglichkeit gesehen, um die Umweltwirkungen der Produktion von Gütern und Dienstleistungen zu verringern und die Effizienz zu steigern. Kaskadennutzung ist die aufeinander folgende, mehrmalige Verwertung derselben Einheit einer Ressource zur Herstellung von Materialien, gefolgt von einer abschließenden energetischen Nutzung.

Bisher fehlt jedoch für den Rohstoff Holz eine fundierte Ermittlung der für eine Kaskadennutzung grundsätzlich geeigneten Altholzpotentiale, ebenso wie eine umfassende Untersuchung, ob Kaskadennutzung im Vergleich zur Nutzung von Primärressourcen tatsächlich umweltfreundlicher und ressourcenschonender ist. Vor diesem Hintergrund spannt die vorliegende Arbeit einen Bogen vom Rohstoffangebot bis zur umfassenden ökologischen Bewertung auf der Ebene einzelner Nutzungswege, sowie erstmals auch auf Ebene eines regionalen Gesamtsystems der Holznutzung. Zusätzlich zur Quantifizierung verschiedener Umwelteffekte der Kaskadennutzung werden methodische Herangehensweisen überprüft und weiterentwickelt, um Effekte der Kaskadennutzung besser abbilden zu können.

In einem ersten Schritt wird eine Potentialanalyse von Altholz aus Gebäudeabbrüchen durchgeführt. Das entwickelte bottom-up-Vorgehen verschneidet Materialinventardaten spezifischer Gebäude mit statistischen Kennwerten des bayerischen Gebäudebestands und liefert so detaillierte Informationen zu Art, Qualität und Menge des im aktuellen Bestand enthaltenen Holzes. Darauf aufbauend wird das beim Abbruch der Gebäude jährlich anfallende Altholz nicht nur quantifiziert sondern erstmalig auch dessen Potential für eine Sekundärnutzung analysiert. Als wichtigstes Ergebnis zeigte sich, dass knapp die Hälfte des Altholzes aufgrund großer Dimensionen und eines hohen Anteils von Vollholzprodukten für höherwertige stoffliche Nutzungen in Kaskaden geeignet ist.

Um die Umwelteffekte der Kaskadennutzung zu erfassen, wurden zwei unterschiedliche Ansätze verfolgt: In einem ersten Ansatz werden Ökobilanzen verschiedener Altholzkaskaden sowie funktionsgleicher Produkte aus Frischholz und Nicht-Holz-Rohstoffen erstellt und die ermittelten Umweltwirkungen verglichen. Die zahlreichen untersuchten Varianten zeigen, dass Kaskadennutzung meist die Umweltwirkungen reduziert. Jedoch hängt die Höhe der Vorteile von den gewählten Vergleichsprodukten und der Effizienz der Energiegewinnung aus Altholz ab. Zudem konnte erstmals gezeigt werden, dass die addierten Materialverluste durch die mehrfache Nutzung des Holzes in Kaskaden das Ergebnis stark beeinflussen und höhere Verluste dazu führen, dass eine Nutzung in Kaskaden aus Umweltsicht ungünstig wird.

Um erstmals auch indirekte Effekte außerhalb der eigentlichen Kaskade sowie den Einfluss eines begrenzten Holzaufkommens bei der Bewertung mit zu berücksichtigen, wurde in einem zweiten Ansatz die Kaskadennutzung in ein optimierbares, ökobilanz-basiertes Stoffflussmodell der Holznutzung in Bayern integriert. Dieser neu entwickelte Ansatz ermöglichte es, neben Umweltwirkungen auch Auswirkungen auf die Effizienz der Holznutzung abzubilden.

## Abstract

Cascading is the concept of successional utilization of a resource in multiple material and energy applications in order to increase the utilization efficiency and to reduce potentially harmful impacts on the environment by resource use and subsequent production processes. Yet, up to now neither an extensive study regarding potentially available amounts of suitable waste wood nor an assessment of possible environmental benefits have been carried out. The aim of this thesis is to close this gap by investigating suitable methodological approaches and providing the necessary information for a well-founded assessment of wood cascading.

In a first step, the assessment of potentials for cascading of recovered wood focuses on wood from building deconstruction. By combining material inventories of Bavarian buildings with statistical data of the building stock and its development, detailed information about the amount and type of wood incorporated in the stock is derived. Additionally, the resulting annual waste wood flow is quantified and for the first time also assessed in regard to the inherent potential for a high-value secondary utilization in cascades. The main outcomes indicate that nearly half of the waste wood originating from the building stock could potentially be utilized for material applications. Large dimensions and a considerable share of solid wood enable the use in high-quality applications such as floorboards or furniture. Waste wood from building deconstruction is especially suitable for an extended utilization in cascades, yet requires collection and sorting aimed at the future secondary applications.

To evaluate the effects of wood cascading on environmental impacts of wood utilization, two different approaches have been developed for this thesis: In a first approach, the environmental impacts of exemplary wood cascades are calculated with the method of life cycle assessment (LCA) and compared to those of functionally equivalent products from primary wood and non-renewable resources as well as the direct incineration of the waste wood. For most scenarios, cascading reduced the considered environmental impacts compared to direct waste wood incineration and production of equivalent products from alternative resources. However, reduction potentials are limited and in parts strongly influenced by the system expansion applied. The extent of the assumed wood losses by collection and sorting during the cascade proved to have a considerable influence on the results.

In a second approach, an LCA-based material flow model based on wood utilization in Bavaria has been developed to also assess potential environmental benefits of cascading in the scope of the overall wood utilization system while taking the effects of a limited wood supply into account. This novel approach enabled to also assess indirect effects of cascading which occur outside the cascade as such and effects on the efficiency of wood utilization.

## Inhaltsverzeichnis

<b>Inhaltsverzeichnis .....</b>	<b>VII</b>
<b>Abbildungsverzeichnis .....</b>	<b>IX</b>
<b>Tabellenverzeichnis .....</b>	<b>IX</b>
<b>1 Einleitung .....</b>	<b>1</b>
<b>2 Stand des Wissens.....</b>	<b>4</b>
2.1 Altholz als Sekundärrohstoff.....	4
2.1.1 Altholz im europäischen Kontext .....	4
2.1.2 Altholznutzung in Deutschland .....	4
2.2 Kaskadennutzung von Ressourcen.....	6
2.2.1 Das Konzept der Kaskadennutzung.....	6
2.2.2 Kaskadennutzung von Holz in der Praxis.....	8
2.3 Der Gebäudebestand als Quelle von Altholz für eine Kaskadennutzung .....	10
2.4 Ökobilanzen der Kaskadennutzung von Holz .....	11
2.4.1 Mehrprodukt-Systeme und Recycling in Ökobilanzen .....	11
2.4.2 Umweltbewertung von Verwertungsoptionen von Altholz mit und ohne Kaskadennutzung.....	14
<b>3 Forschungsziele .....</b>	<b>18</b>
<b>4 Übersicht der Teilarbeiten .....</b>	<b>20</b>
4.1 Veröffentlichung 1: Potentials for cascading of recovered wood from building deconstruction – a case study for south-east Germany.....	20
4.2 Veröffentlichung 2: Utilization of recovered wood in cascades versus utilization of primary wood – a comparison with life cycle assessment using system expansion.....	21
4.3 Veröffentlichung 3: Evaluation of wood cascading.....	22
4.4 Veröffentlichung 4: LCA-based optimization of wood utilization under special consideration of a cascading use of wood .....	23
<b>5 Material und Methoden .....</b>	<b>24</b>
5.1 Kaskadenpotentiale: Der Gebäudebestand als Quelle hochwertigen Altholzes (Veröffentlichung 1) .....	24

5.2	Ökobilanzielle Bewertung von Altholznutzung in Kaskaden (Veröffentlichungen 2, 3 und 4).....	25
5.2.1	Grundlagen.....	25
5.2.2	Funktionale Einheit.....	25
5.2.3	Bilanzgrenzen des Kaskadensystems.....	26
5.2.4	Wirkungsabschätzung.....	27
5.2.5	Datenquellen.....	28
5.3	Optimierung der Holznutzung unter Berücksichtigung von Kaskadennutzung (Veröffentlichung 4).....	28
<b>6</b>	<b>Ergebnisse und Diskussion.....</b>	<b>31</b>
6.1	Altholz aus dem Gebäudebestand als Ressourcenpotential für eine Holznutzung in Kaskaden (Veröffentlichung 1).....	31
6.1.1	Holz im Gebäudebestand.....	31
6.1.2	Quantifizierung und Charakterisierung des Altholzflusses aus dem Bestand.....	32
6.1.3	Eignung der Analyse zur Abschätzung von Kaskadenpotentialen.....	34
6.2	Ökobilanzielle Bewertung von Kaskadennutzung (Veröffentlichungen 2 und 3).....	35
6.2.1	Altholzkaskaden im Vergleich mit Frischholz- und Nicht-Holz-Produkten.....	35
6.2.2	Methodische Diskussion.....	38
6.3	Auswirkungen kaskadischer Holznutzung auf das Gesamtsystem der Holzverwendung (Veröffentlichung 4).....	40
6.3.1	Einfluss der Kaskadennutzung auf Umweltwirkungen.....	40
6.3.2	Einfluss der Kaskadennutzung auf Holzflüsse.....	42
6.3.3	Eignung des Systemmodells zur Bewertung von Kaskadeneffekten.....	43
<b>7</b>	<b>Synthese und Ausblick.....</b>	<b>45</b>
7.1	Synthese und Schlussfolgerungen.....	45
7.2	Ausblick.....	49
<b>8</b>	<b>Literatur.....</b>	<b>51</b>
<b>9</b>	<b>Publikationsliste.....</b>	<b>62</b>
<b>10</b>	<b>Veröffentlichungen.....</b>	<b>64</b>



## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Konzept der Kaskadennutzung von Holz.....	7
Abbildung 2: Methodik zur Ermittlung des Altholzpentials aus Gebäudeabbrüchen in Bayern. ...	24
Abbildung 3: Altholz-Kaskadensystem mit zwei stofflichen Nutzungen im Vergleich zur direkten energetischen Verwertung des Altholzes unter Anwendung der Methode der Systemraumerweiterung. ....	26
Abbildung 4: Ökobilanz-System der Kaskadennutzung von Altholz mit drei stofflichen Nutzungen. ....	27
Abbildung 5: Stofffluss-Modell zur Untersuchung der Effekte von Kaskadennutzung in einem an Bayern angelehnten Holznutzungssystem.....	29
Abbildung 6: Qualitätsverteilung und Nutzungspotential von Altholz aus Gebäudeabbrüchen im Jahr 2011 in Bayern. ....	33
Abbildung 7: Ausgewählte Umweltwirkungen der Holznutzung in Bayern ohne (oben) und mit (unten) Berücksichtigung von Substitutionseffekten.. ....	41

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Holz in Gebäuden – ein Vergleich verschiedener Studien.....	31
--	----



## 1 Einleitung

Abnehmende Reserven und gleichzeitig steigende Preise der konventionellen Ressourcen (BMW 2015) führen zu einer gesteigerten Bedeutung erneuerbarer Rohstoffe, vor allem für die Energieerzeugung. In Deutschland wurde diese Entwicklung durch die Förderinstrumente des Erneuerbaren Energien Gesetzes (EEG) seit dem Jahr 2000, das feste Einspeisevergütungen für Strom aus regenerativen Energiequellen garantiert, weiter unterstützt. Aber auch private Haushalte, deren Energiekosten seit Jahren nahezu kontinuierlich ansteigen (BMW 2015), verwenden immer häufiger nachwachsende Rohstoffe, vor allem Holz, zur Wärmeerzeugung.

Neben dem zunehmenden Bewusstsein für die Potentiale nachwachsender Rohstoffe rückt jedoch auch die Effizienz der Nutzung der vorhandenen Ressourcen ins Bewusstsein von Politik und Wissenschaft. Auf europäischer Ebene wird eine Steigerung der Ressourceneffizienz als probates Mittel im Kampf gegen den Klimawandel und zur Verminderung schädlicher Umweltwirkungen der Ressourcennutzung angesehen (Europäische Kommission 2010). Auch auf nationaler Ebene sollen, durch eine Verdoppelung der Ressourcenproduktivität bis zum Jahr 2020, Herstellungsprozesse umweltfreundlicher gestaltet und so der Ressourcenverknappung begegnet werden (BMU 2002 & 2012).

Trotz dieser Bestrebungen nimmt in Europa die Nachfrage nach Holz im Laufe der letzten Jahre vor dem Hintergrund steigender Preise für fossile Energieträger kontinuierlich zu (Mantau et al. 2010). Dieser Trend wird auch mittelfristig anhalten. So prognostizieren Mantau et al. (2010), dass je nach Szenario im Zeitraum zwischen 2018 und 2030 die Situation eintritt, dass europaweit die Nachfrage nach Holzrohstoffen deren Angebot übersteigt. Diese Entwicklung bestätigt auch die EFSOS II-Studie (UNECE/FAO 2011). Die Konkurrenz um Holz, vor allem im Bereich der Industrie(rest)holz-Sortimente, schlägt sich in steigenden Holzpreisen nieder (Härtl & Knoke 2014, Schwarzbauer & Stern 2010). Eine mögliche Strategie, um dieser Entwicklung zu begegnen, ist die Mobilisierung bisher noch ungenutzter Holzsortimente, wie beispielsweise Holz aus der Landschaftspflege oder aus Kurzumtriebsplantagen auf landwirtschaftlichen Minderertragsflächen. In Bayern, dem regionalen Bezug dieser Dissertation, wurde auch der meist kleinteilig strukturierte Privatwald als potentielle Quelle zusätzlichen Holzes identifiziert, da zumindest die offiziell erfassten Holzentnahmemengen auf diesen Flächen oft deutlich unter dem Holzzuwachs liegen und folglich eine Steigerung der Erntemengen nachhaltig möglich erscheint. Es zeigt sich jedoch, dass trotz erheblicher Anstrengungen, auch von Seiten der staatlichen und privaten Beratungsorganisationen, nur eine geringe Menge des vermuteten Holzpotentials mobilisiert werden konnte.

Eine weitere Möglichkeit, der zunehmenden Konkurrenz um Rohstoffe im Allgemeinen und um Holz im Besonderen zu begegnen, setzt statt auf der Angebotsseite auf der Verwendungsseite an. Das Konzept der Kaskadennutzung soll dazu beitragen, vorhandene Ressourcen effizienter zu verwerten, da mehr Nutzen pro Rohstoffeinheit entsteht (BMU 2012, Europäische Kommission 2011). Unter Kaskadennutzung versteht man eine sequentielle, mehrmalige Verwertung einer

Ressource. Insbesondere biogene Rohstoffe, allen voran Holz, eignen sich grundsätzlich für eine Kaskadennutzung, da sich an die mehrmalige stoffliche Verwertung eine energetische Nutzung anschließen kann. In der „Forest Strategy“ der Europäischen Union (Europäische Kommission 2013) wird die Kaskadennutzung daher auch als Option herausgestellt, die eine effiziente Nutzung der Ressourcen des Waldes, das heißt eine Minimierung der Umweltwirkungen bei gleichzeitiger Erhöhung der Wertschöpfung, ermöglicht. Diese positive Einschätzung wird auch von einer Reihe weiterer Studien bestätigt (Arnold et al. 2009 a&b, EPEA 2009, Gärtner et al. 2013, UBA 2014b, Wern et al. 2014). Dem gegenüber stehen aber auch Äußerungen, insbesondere auch aus der Praxis, die vor zu hohen Erwartungen im Hinblick auf positive Effekte der Kaskadennutzung warnen. Vor allem ein gesetzlich verankerter Vorzug der Kaskadennutzung vor der energetischen Nutzung wird kritisch gesehen, da dadurch eine Verknappung der energetisch nutzbaren Holzmengen befürchtet wird (European Biomass Association et al. 2013, Osterburg et al. 2014).

Trotz der hohen Erwartungen, die in eine Holznutzung in Kaskaden gesetzt werden, fehlten zum Zeitpunkt der Initiierung dieser Arbeit umfassende wissenschaftliche Untersuchungen der Effekte einer Kaskadennutzung, insbesondere auf die Umweltwirkungen und die Effizienz der Holznutzung. Zudem existieren zwar Erhebungen der Altholzmengen (Friedrich et al. 2012, Mantau et al. 2012), die potentiell für eine Kaskadennutzung zur Verfügung stünden. Für eine Abschätzung der tatsächlichen stofflichen Verwertungsmöglichkeiten des Altholzes sind jedoch nicht nur die anfallende Menge, sondern auch weitere Merkmale wie die Art des Altholzes, die Teilegrößen, der Erhaltungszustand und eventuelle Verunreinigungen mit Störstoffen von essentieller Bedeutung. Hierzu lagen ebenfalls keine ausreichenden Informationen vor.

Die Arbeit verfolgt das Ziel, diese Lücken zu schließen und dabei Methoden zu entwickeln und zu überprüfen, um einerseits das Mengenpotential für eine Holznutzung in Kaskaden abzuschätzen, und andererseits eine fundierte Bewertung der Umweltwirkungen vorzunehmen. In einem ersten Schritt wird daher eine Potentialanalyse von Altholz, das aus dem Gebäudebestand anfällt, durchgeführt. Der entwickelte bottom-up-Ansatz verschneidet Materialinventardaten spezifischer Gebäude mit statistischen Kennwerten des bayerischen Gebäudebestands und liefert so detaillierte Informationen zu Art und Menge des im aktuellen Bestand enthaltenen Holzes. Zudem wird erstmalig das beim Abbruch der Gebäude jährlich anfallende Altholz nicht nur quantifiziert, sondern auch mit Blick auf das Potential für eine Sekundärnutzung analysiert. Darauf aufbauend werden die Effekte einer Holznutzung in Kaskaden auf verschiedene Umweltwirkungen analysiert. Mit umfassenden Ökobilanzen nach ISO 14040 (DIN 2006a) werden verschiedene Holzkaskaden untersucht und mit alternativen Holz- und Nicht-Holz-Produkten verglichen. Dabei stehen zum einen die direkten Kaskadeneffekte und zum anderen Effekte der Substitution von Nicht-Holz-Produkten im Zentrum der Betrachtung. Um auch die zunehmende Nachfrage nach, und Konkurrenz um Holz ausreichend abzubilden und eventuell auftretende Verschiebungseffekte der Holzsortimentsnutzung außerhalb der untersuchten linearen Kaskadennutzungen zu erfassen, wurde ein Ökobilanz-basiertes, optimierbares Stoffstrommodell der bayerischen Holznutzung entwickelt. Es berücksichtigt die begrenzte Verfügbarkeit von Holz und stellt der vorhandenen Menge eine realistische Nachfrage nach Materialien und Energie aus Holz gegenüber. Mit diesem

neuen Ansatz können die Effekte der Kaskadennutzung auf Ebene des Gesamtsystems untersucht werden. Neben den Umweltwirkungen der Holznutzung erfasst die Studie erstmals auch Auswirkungen der Kaskadennutzung auf die Holzflüsse und die Effizienz der Holznutzung auf regionaler Ebene.

Insgesamt ergibt sich ein fundiertes Bild der Möglichkeiten und ökologischen Effekte einer Holznutzung in Kaskaden sowie eine Bewertung der Eignung der entwickelten methodischen Ansätze.

## 2 Stand des Wissens

### 2.1 Altholz als Sekundärrohstoff

#### 2.1.1 Altholz im europäischen Kontext

Aufkommen, Behandlung und Verwertung des Sekundärrohstoffs Altholz unterscheiden sich innerhalb Europas von Land zu Land stark. Von 2002 bis 2007 war es daher Ziel der COST Action E31, das Altholzmanagement auf europäischer Ebene zu verbessern, sowie die Einführung einheitlicher technischer, ökologischer und ökonomischer Standards zu unterstützen (Gallis 2007). Eine Umfrage unter den Projektteilnehmern ergab für die berücksichtigten 20 europäischen Länder einen Altholzanfall von 29,6 Mio. Tonnen (Merl et al. 2007). Da lediglich die Daten aus Deutschland, Österreich und den Niederlanden aus wissenschaftlichen Erhebungen stammen, handelt es sich bei dieser Menge um einen groben Schätzwert. In der EUwood-Studie führten Mantau et al. (2010) diese Daten mit weiteren Statistiken zusammen, um für die EU27-Länder eine verlässliche Schätzung der Altholzmenge zu erhalten. Diese wird für das Jahr 2010 mit etwa 50 Millionen Kubikmeter angegeben. Die Pro-Kopf-Beiträge verringern sich dabei stark von Nord/West nach Süd/Ost. Etwa ein Drittel dieser Menge wird derzeit nicht verwertet, sondern deponiert, obwohl die einzelnen Länder zur Umsetzung der Abfallrahmenrichtlinie der EU (Europäischer Rat 1999) anspruchsvolle Reduktionsziele definiert haben. Die verwertete Menge fließt zu annähernd gleichen Teilen in die Holzwerkstoffindustrie und in die Energieproduktion (Mantau et al. 2010). Dieselbe Studie geht davon aus, dass in den Ländern der Europäischen Union bis zum Jahr 2030 je nach Szenario der Altholzanfall um 12 bis 30 % steigt. Bei gleichzeitig angenommenen sinkenden Deponierungsraten steht in Zukunft deutlich mehr Altholz für eine Verwertung zur Verfügung und kann dazu beitragen, die steigende Nachfrage nach Holz für energetische aber auch stoffliche Verwendungen (UNECE/FAO 2011) zu bedienen. Vor diesem Hintergrund hatte das WoodWisdomNet-Projekt *DEMOWOOD* das Ziel, die stoffliche Verwertung von Altholz in Europa zu unterstützen und dadurch ökologische und ökonomische Parameter positiv zu beeinflussen (Deroubaix 2014). Insbesondere wurden auf europäischer Ebene Möglichkeiten ausgelotet, um Altholz in größerem Umfang bei der Papierproduktion, in Spanplatten und auch energetisch zu nutzen.

#### 2.1.2 Altholznutzung in Deutschland

In Deutschland wird der Umgang mit Altholz durch das Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG) (Deutsche Bundesregierung 2012) und die Altholzverordnung (Deutsche Bundesregierung 2003) geregelt. Letztere schreibt die Sortierung des Altholzes in verschiedene Sortierklassen vor und legt fest, welcher Verwertung das Altholz der jeweiligen Klasse zugeführt werden darf. Für eine stoffliche Verwertung kommen demnach die Klassen A I bis A III in Frage, Holz der Klasse A III jedoch nur nach einer vorangehenden Aufbereitung zur Entfernung von Lacken und Beschichtungen. Die Deponierung von Altholz ist seit 2003 in Deutschland verboten (Deutsche

Bundesregierung 2003), so dass für eine rechtskonforme Entsorgung nur die energetische oder stoffliche Verwertung in Frage kommt. Die Abfallhierarchie des §6 KrWG priorisiert eine Wiederverwendung bzw. ein Recycling gegenüber der energetischen Verwertung. Die Unterstützung der energetischen Verwertung von Altholz durch das Erneuerbare Energien Gesetz im Rahmen von erhöhten Einspeisevergütungen steht der Umsetzung der vorgeschriebenen Abfallhierarchie in der Praxis jedoch entgegen.

Eine Umfrage von Mantau et al. (2012) ergab für das Jahr 2010 einen Gesamtanfall von 6,3 Mio. Tonnen Altholz, das in deutschen Verwertungsbetrieben behandelt wurde. Zusätzlich kann von jährlich etwa 3 Mio. Tonnen ausgegangen werden, die nicht im Altholzverwertungssystem erfasst werden, sondern mit dem Hausmüll oder in Einzelfeuerungsanlagen verbrannt werden (Weimar & Mantau 2012). Vorangegangene Vollerhebungen in den Jahren 2001 und 2006 wiesen Marktvolumina von 5,6 bzw. 5,9 Mio. Tonnen Altholz aus (Mantau & Weimar 2003, Weimar & Mantau 2008). Für das Bundesland Bayern wurde die gewerblich erfasste Altholzmenge für die Energieholzmarktberichte der Bayerischen Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft erhoben. Im Jahr 2010 fiel demnach eine Menge von 1,07 Mio. Tonnen an (Friedrich et al. 2012). Die Folgeerhebung im Jahr 2012 ergab ein Volumen von 1,14 Mio. Tonnen (Gaggermeier et al. 2014) und somit keinen statistisch signifikanten Anstieg.

Keine der genannten Studien macht Aussagen zur Qualität oder Herkunft des anfallenden Altholzes. Gemäß Lang (2004) trägt der Bausektor mit 33 % am meisten zur Gesamtmenge des Altholzes in Deutschland bei. Dieser Anteil umfasst neben Holz aus Gebäudeabbrüchen und Renovierungen auch Bauholz, das bei der Errichtung von Gebäuden, etwa als Schalungsholz, anfällt. Weitere wichtige Quellen sind Verpackungen und die Holzanteile des Siedlungsabfalls. Eine Studie im Auftrag des Umweltbundesamtes (Müller-Langer et al. 2007) beziffert den Anteil von Bauabfällen am Altholz mit 44 %, und somit deutlich höher als die Studie von Lang (2004). Oft sind Berechnungen und Abschätzungen von Altholzmengen und -qualitäten und insbesondere der Vergleich verschiedener Studien mit Unsicherheiten behaftet. Dies liegt vor allem an unterschiedlichen Definitionen des zugrundeliegenden Altholzbegriffs und an der abweichenden Berücksichtigung von Teilströmen wie beispielsweise Im- und Exporte oder innerbetrieblich verwertete Mengen. Statistische Erhebungen der Verteilung des anfallenden Altholzes auf die Qualitätsklassen der Altholzverordnung sind nicht zu finden. Müller-Langer et al. (2007) nehmen für das Jahr 2003 eine Abschätzung der Anteile vor. Demnach tragen die potentiell stofflich verwertbaren Sortimente der Klassen A I und A II 81 % bei. Auf die Klassen A III und A IV entfallen 19 %. Van Benthem et al. (2007) erhielten aus einer Umfrage bei Altholzverwertern folgende Aufteilung: 52 % des Altholzes fallen in die Klassen A I und A II, 48 % in die Klassen A III und A IV. Keine der Studien erhebt Informationen zur Qualität, die über eine Sortierung in die Klassen der Altholzverordnung hinausgehen. Dies kann daran liegen, dass derzeit die Verwertungssituation in Deutschland von dem in den Studien aufgezeigten stofflichen Verwertungspotential deutlich abweicht. Mantau et al. (2012) ermitteln für das Jahr 2010 einen Anteil von 78 %, der an Endnutzer zur energetischen Verwertung fließt. Dem gegenüber stehen 21 %, die stofflich verwertet werden. In erster Linie wird dieses Holz zur Herstellung von Spanplatten eingesetzt. Ähnlich stellt sich die

Situation für das Jahr 2012 in Bayern dar (Gaggermeier et al. 2012). Abzüglich des zum Export bestimmten Anteils, werden 26 % stofflich genutzt und 74 % zur Energiegewinnung verbrannt. Dennoch sind detaillierte Informationen hinsichtlich der Art (Vollholz, Holzwerkstoffe) und auch der Teilegröße des anfallenden Altholzes wichtig, um zu wissen, ob Potential für einen Ausbau der Kaskadennutzung vorhanden ist. Dies ist auch eine Voraussetzung, um gegebenenfalls einen gesetzlichen Vorrang der stofflichen Holznutzung zu verankern.

## **2.2 Kaskadennutzung von Ressourcen**

### **2.2.1 Das Konzept der Kaskadennutzung**

Das Konzept der Ressourcennutzung in Kaskaden wurde erstmals wissenschaftlich von Sirkin & ten Houten (1994) beschrieben. Sie verstehen darunter eine „Methode zur Optimierung der Ressourcennutzung durch eine mehrmalige, aufeinanderfolgende Nutzung der verbleibenden Ressourcenqualität eines bereits genutzten Rohstoffes“ (eigene Übersetzung). Eine allgemein gültige Definition des Begriffs existiert nicht. Jedoch wurden für eine Reihe von Untersuchungen zur Kaskadennutzung von Biomasse eigene Begriffsklärungen vorgenommen (Arnold et al. 2009a, Dornburg 2004, Essel et al. 2014, Fraanje 1997b, Gärtner et al. 2013, Keegan et al. 2013, UBA 2014b). Sie haben gemeinsam, dass sie unter Kaskadennutzung die sequentielle Nutzung einer Ressourceneinheit für unterschiedliche Produkte und Funktionen verstehen. Auf diese mehrmalige stoffliche Nutzung folgt eine abschließende energetische Verwertung oder im Ausnahmefall die Nutzung in Bioraffinerien (Abbildung 1). Nicht abgedeckt vom Begriff der Nutzungskaskade ist in der Regel die Verwendung von Koppelprodukten, die simultan in Produktionsprozessen anfallen.

Essel et al. (2014) unterscheiden in ihrem Diskussions-Papier zur Vorbereitung einer umfassenden Definition der Kaskadennutzung einstufige von mehrstufigen Kaskaden und beziehen sich dabei auf die Anzahl der stofflichen Nutzungen. Ob es sich bei der sogenannten „einstufigen Kaskade“ bereits um eine Kaskadennutzung im engeren Sinn handelt, kann zumindest bezweifelt werden. Angesichts des Deponieverbotes in Deutschland und der dadurch bedingten nahezu vollständigen energetischen Verwertung des Altholzes, würde bei Anwendung dieser Definition jedes stofflich genutzte Holz (das nicht bereits als Frischholz zur Energiegewinnung genutzt wird) letztendlich in Kaskaden verwendet. Im Sinne der Intention, mit welcher das Konzept der Kaskadennutzung oft genannt wird, nämlich den Gesamtnutzen pro Ressourceneinheit zu erhöhen und die Effizienz der Nutzung zu steigern (BMELV 2010, BMU 2012, Europäische Kommission 2013), erscheinen einstufige Kaskaden jedoch nicht ausreichend. Folglich wird auch bei den hier vorgestellten Untersuchungen unter Kaskadennutzung eine Abfolge von mindestens zwei stofflichen Nutzungen verstanden. Zur Definition einer „stoffliche Nutzung“ regen Essel et al. (2014) die Unterscheidung von Endprodukten („final products“) und allgemeiner stofflicher Nutzung („material use“) an. Dies geschieht vor dem Hintergrund, dass die Produktionsprozesse der Holzindustrie eine Vielzahl von Neben- und Zwischenprodukten hervorbringen. Als Stufe einer Kaskade sollten jedoch nur diejenigen Produkte verstanden werden, die das abschließende Ziel des Produktionsprozesses



darstellen und für den Verbraucher einen Nutzen entfalten. Eine solche Unterscheidung könnte dann Bedeutung erlangen, wenn die Kaskadennutzung in Zukunft durch finanzielle Anreizsysteme unterstützt würde und festgelegt werden müsste, welche Nutzungen als Kaskadenstufe zu werten sind.

In dieser Arbeit wird eine Nutzungskaskade als mindestens zweimalige stoffliche Nutzung, gefolgt von einer energetischen Verwertung, verstanden. Eine stoffliche oder energetische Nutzung, und damit eine weitere Kaskadenstufe, ist dann erreicht, wenn ein für Endverbraucher nutzbares Produkt, wie beispielsweise Spanplatten oder Strom, entstanden ist. Aufbereitetes Altholz ist im Sinne dieses Verständnisses kein Produkt, sondern der Rohstoff für eine weitere Kaskadenstufe.

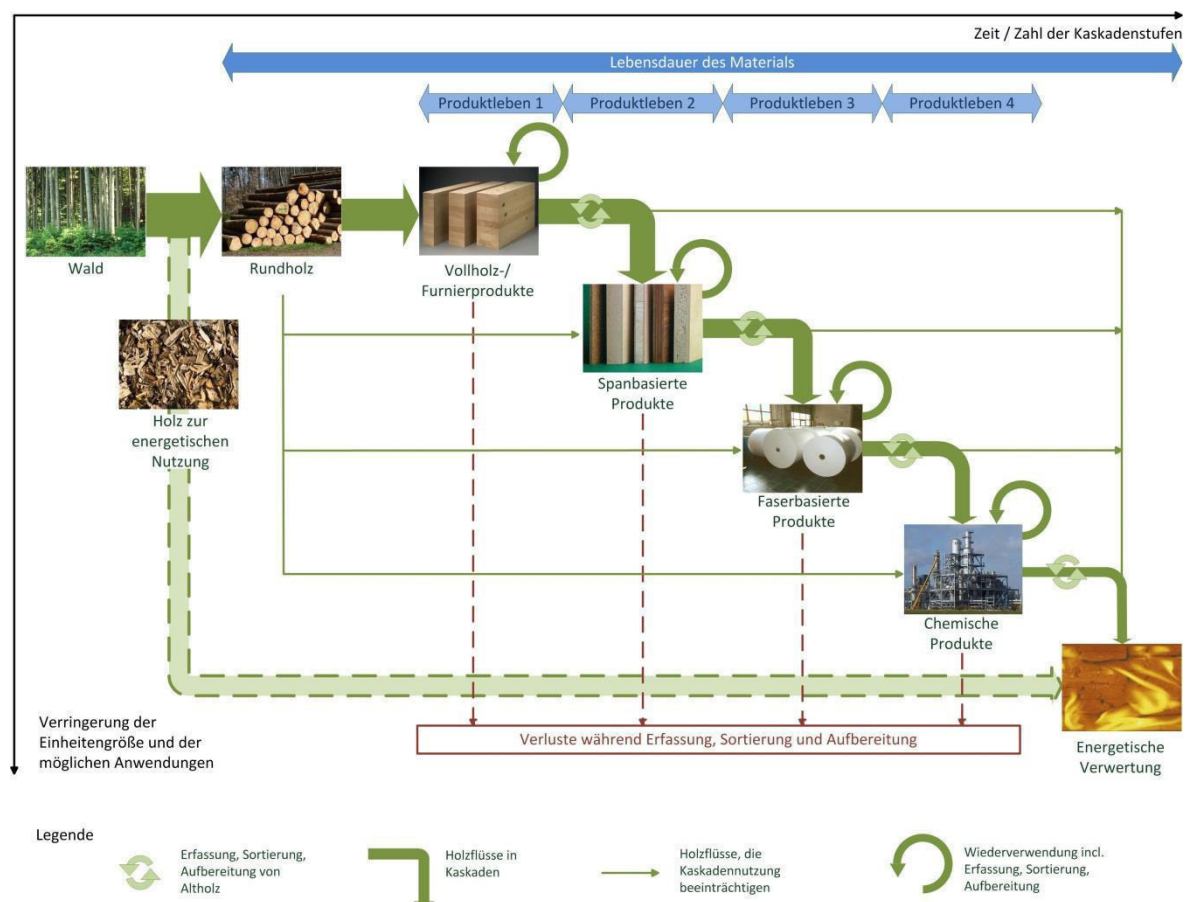


Abbildung 1: Konzept der Kaskadennutzung von Holz (verändert aus Höglmeier et al. accept.).

Insbesondere im legislativen Bereich wird Kaskadennutzung als probates Konzept zur Steigerung der Effizienz der Ressourcennutzung und damit einhergehend einer Einsparung von knappen Primärmaterialien bei gleichbleibenden oder sogar sinkenden Umweltwirkungen durch die Produktion und damit verbundene Prozesse gesehen (BMU 2012, Europäische Kommission 2011 & 2013). Oft fehlen jedoch Angaben, wie die Effizienz der Nutzung mess- und bewertbar gemacht werden soll und wie sich folglich die Kaskadennutzung konkret auswirken soll. Generell kann aber davon ausgegangen werden, dass in der Regel gedanklich ein mengenbasierter Ansatz zugrunde

liegt und die angestrebte Steigerung der Ressourceneffizienz folglich mit der auch von der Europäischen Kommission (2010) genannten einfachen Formel der „[...] Herstellung von Mehr aus Weniger [...]“ (eigene Übersetzung) ausgedrückt werden kann. Für nicht brennbare Produkte, die andernfalls nach einer einmaligen Nutzung deponiert würden, ist dieser Ansatz gegebenenfalls ausreichend, da hier tatsächlich jede zusätzliche Verwertung zu einer Zunahme des Gesamtnutzens je Rohstoffeinheit führt. Eine solche vereinfachte Betrachtung wird multifunktionellen Ressourcen wie Holz, die sowohl stofflich als auch energetisch genutzt werden können, jedoch nicht zwangsläufig gerecht. Zwar steigt auch hier mit jeder zusätzlichen stofflichen Verwendung der generierte stoffliche Gesamtnutzen, d. h. die Menge an Produkten, die aus einer Einheit eines Rohstoffs entsteht. Dies kann durch „Kaskaden-Faktoren“ für Produkte oder Sektoren (Mantau 2014) abgebildet werden, die die Zahl der verschiedenen Nutzungen pro eingesetzter Holzeinheit quantifizieren. Gleichzeitig werden aber mögliche positive Substitutionseffekte einer energetischen Nutzung durch den Ersatz fossiler Energieträger entweder in die Zukunft verschoben oder auch ganz verhindert. Letzteres ist vor allem für die Holzmenge der Fall, die durch Verluste während der verschiedenen stofflichen Nutzungen am Ende nicht mehr für eine energetische Nutzung zur Verfügung steht. Dies sollte bei einer umfassenden Bewertung der Kaskadennutzung von Holz berücksichtigt werden.

### **2.2.2 Kaskadennutzung von Holz in der Praxis**

Die tatsächliche Nutzung von Altholz in Kaskaden wird in Deutschland durch Vorgaben der Altholzverordnung beeinflusst. Insbesondere das Deponieverbot für Altholz führt de facto dazu, dass nahezu jedes Holz früher oder später energetisch verwertet wird. Entweder in (Heiz-)Kraftwerken, die Altholz als Brennstoff nutzen, oder als Bestandteil des Hausmülls, der in Anlagen verbrannt wird, die in der Regel ebenfalls Strom- oder Nutzwärme produzieren. Mindestens die von Essel et al. (2014) definierte einstufige Kaskade wird folglich für die gesamte initial stofflich genutzte Holzmenge umgesetzt. Nicht quantifizierbar ist derzeit die Holzmenge, die dauerhaft der Nutzung entzogen wird, beispielsweise durch Verluste bei Produktions- oder Aufbereitungsprozessen, während des Transports oder durch illegale Deponierung. Eine Kaskadennutzung im Sinne des in dieser Arbeit verwendeten Verständnisses des Begriffs, also eine Abfolge von mindestens zwei stofflichen Nutzungen, findet in Deutschland nur bedingt statt. Wenn man davon ausgeht, dass zurzeit rund 50 % des Rundholzes stofflich genutzt wird (Friedrich et al. 2012) und daraus rund 60 % Hauptprodukte wie Schnittholz oder Holzwerkstoffe entstehen (Döring & Mantau 2012), wovon nach dem Gebrauch wiederum ca. 20 % stofflich genutzt werden (Mantau et al. 2012), werden nur etwa 6 % des Holzes in Kaskaden genutzt. Auch wenn die beschriebene Situation im Vergleich zu der in einigen anderen europäischen Ländern (v. a. Süd/Ost-Europa und Großbritannien (Mantau et al. 2010)) positiv erscheint, da dort teilweise noch ein erheblicher Anteil des Altholzes deponiert wird, besteht dennoch eine Diskrepanz zwischen den gemäß der durchschnittlichen Qualitätsverteilung des Altholzes potentiell stofflich nutzbaren Mengen (Müller-Langer et al. 2007) und der tatsächlich stattfindenden Kaskadennutzung.

Die Verwendung von Altholz zur Herstellung von Spanplatten, insbesondere in der Mittelschicht, ist die einzige mengenmäßig und ökonomisch bedeutsame stoffliche Nutzung in Deutschland. Andere technisch mögliche Verwendungen im Bereich der Holzwerkstoffherstellung sind derzeit nicht realisiert. Erbreich (2004) untersuchte und bestätigte die grundsätzliche Eignung von Altholz als Rohstoff zur Herstellung von Mitteldichten Faserplatten (MDF). Technische Versuche mit einem zweistufigen Verfahren zeigten, dass auch Oriented Strand Board (OSB) potentiell aus Altholz hergestellt werden könnte (Loth & Hanheide 2004). Obwohl es in den vergangenen Jahren in Mitteleuropa aufgrund der steigenden energetischen Holznutzung zunehmend zu Konkurrenz um die traditionell zur Holzwerkstoffherstellung genutzten Sortimente kam (Carus et al. 2010, Härtl & Knoke 2014), scheint die Versorgungssicherheit mit Frischholz noch in einem Maße gegeben zu sein, dass sich die Integration von Altholz als Rohstoff, die sicherlich eine Reihe von prozesstechnischen Anpassungen erfordert, trotz dessen niedrigeren Preises (noch) nicht lohnt. So wurde auch eine bei einem deutschen Spanplattenhersteller betriebene Anlage, die einen Aufschluss von gebrauchten Spanplatten mit dem mechanisch-thermohydrolytischen, sogenannten WKI-Verfahren ermöglichte (Marutzky 2006), nach weniger als 10 Jahren wieder geschlossen.

Auch ein „Upcycling“, also eine Inwertsetzung von Altholz durch die Herstellung hochwertiger Produkte, findet in Deutschland nur in sehr geringem Umfang statt, beispielsweise bei der Herstellung individueller Möbel und Deko-Elemente aus Altholz. Denkbare Produkte, die einer potentiell größeren Nachfrage gegenüberstehen könnten, sind Bodendielen aus Altholzbalken und die Verleimung von Altholz zu größeren Einheiten, analog zur Herstellung von Brettschichtholz. Letzteres wird derzeit in einem aktuellen WoodWisdomNet-Projekt technisch, ökonomisch und ökologisch untersucht (CaReWood 2014). Eine Wiederverwendung von Altholz, d. h. eine nochmalige Nutzung für den gleichen Zweck, findet lediglich in kleinem Umfang mit Altmöbeln statt. Der Wiederverwendung von Altholz in größerem Umfang steht derzeit jedoch auch die Altholzverordnung entgegen. Deren Anhang III ordnet jegliches Altholz aus einer konstruktiven, d. h. lasttragenden Verwendung (z. B. Balken) im Regelfall der Klasse A IV zu und schließt eine stoffliche Verwertung oder Wiederverwendung dadurch grundsätzlich aus. Die zusätzlich zur Verwendung in der Holzwerkstoffherstellung in der Verordnung genannten stofflichen Nutzungsmöglichkeiten, nämlich die Gewinnung von Synthesegas und die Herstellung von Aktivkohle bzw. Industrieholzkohle, haben keine praktische Bedeutung.

Es kann festgestellt werden, dass die technischen und organisatorischen Voraussetzungen für eine Kaskadennutzung von Holz in Deutschland vorhanden sind. Dazu trägt auch das effiziente Sammel- und Erfassungssystem über lokale Wertstoffhöfe oder eine regelmäßige Haussammlung bei. Dennoch konnte sich eine Kaskadennutzung bisher nicht in größerem Umfang durchsetzen, was nicht zuletzt auch mit den Anreizen für eine energetische Nutzung durch die Einspeisevergütungen des EEG zusammenhängt (UBA 2014b).

### 2.3 Der Gebäudebestand als Quelle von Altholz für eine Kaskadennutzung

Unter dem Eindruck abnehmender Vorräte primärer Ressourcen und eines gleichzeitigen Anstiegs des weltweiten Verbrauchs von Rohstoffen, rückt die technische Umwelt, und hier in erster Linie der Gebäudebestand, als zukünftige Ressourcenquelle immer mehr in den Fokus von Politik und Wissenschaft (Bringezu 2012, Lichtensteiger & Bacchini 2008, Müller 2006, Ratajczak et al. 2015). Fast 60 % der in Deutschland im Jahr 2007 angefallenen Abfallmenge stammt aus dem Baubereich. Knapp 90 % dieser Menge kommt für eine Verwertung in Frage (Bilitewski et al. 2009). Aufgrund ihrer Mengendominanz sind derzeit vor allem die mineralischen Anteile des Gebäudebestandes von Interesse. Jedoch hat auch Holz einen Anteil von 19 % an den Bau- und Abbruchabfällen (Bilitewski et al. 2009). Angesichts des großen Beitrags von Holz aus dem Baubereich zum Altholzanfall in Deutschland (siehe Kap. 2.1.2) sind verlässliche Informationen zu Mengen und vor allem Qualitäten dieses Stoffflusses wichtig, um eine möglichst hochwertige Sekundärnutzung und potentiell mit Baustoffrecycling in Verbindung stehende Umweltvorteile (Carpenter et al. 2013, Coelho & Brito 2012, Schiller et al. 2010, Thormark 2001) zu realisieren. Bisher fehlt jedoch vor allem die Qualitätsansprache in den einschlägigen Studien.

Ausgangspunkt für eine Abschätzung und Bewertung der aus dem Gebäudebestand fließenden Stoffströme können die aktuell im Bestand enthaltenen Stoffe und Ressourcen sein (Müller 2006, Van der Voet et al. 2002). Studien, die sich mit Stoffflüssen auf der Ebene des Gebäudebestands einer Stadt oder Region auseinandersetzen, sind relativ häufig (Baudirektion Kanton Zürich 2010, Bringezu 2012, Rubli & Schneider 2007, Weber-Blaschke et al. 2005, Wittmer & Lichtensteiger 2007). Aufgrund des geringen Beitrags zum gesamten Materialportfolio fehlen jedoch in der Regel detailliertere Informationen zu Art und Menge des im Gebäudebestand enthaltenen Holzes. Basierend auf unterschiedlichen methodischen Ansätzen wurden bisher Holz mengen im Baubestand der Niederlande, Japans und der Stadt Wien erhoben (Fraanje 1999, Merl 2005, Weng & Yashiro 2003). Andere Studien fokussieren nur auf einen Teil des Gebäudebestandes oder spezifische Holzprodukte (Sianchuk et al. 2012). Kroth et al. (1991) und Mantau et al. (2013) ermittelten Werte der Mengen und der Verwendung des im deutschen Gebäudebestand enthaltenen Holzes. Kroth et al. (1991) benennen den Holzinhalt von konventionell erstellten Ein- und Zweifamilienhäusern mit  $26 \text{ m}^3$  pro  $1.000 \text{ m}^3$  umbautem Raum. Die neuere Studie (Mantau et al. 2013) kommt zu einem Wert von  $27 \text{ m}^3$ . Häuser in Holzbauweise enthalten in beiden Studien deutlich mehr Holz, auch wenn sich die absoluten Werte unterscheiden:  $60 \text{ m}^3$  werden bei Kroth et al. (1991) ermittelt,  $126 \text{ m}^3$  bei Mantau et al. (2013). Im Durchschnitt enthalten Einfamilienhäuser  $42 \text{ m}^3$  Holz pro  $1.000 \text{ m}^3$  Rauminhalt. Dies bestätigt auch den von Weber-Blaschke et al. (2006a/b) ermittelten Wert von  $37 \text{ m}^3$  pro  $1.000 \text{ m}^3$  Rauminhalt für Einfamilienhäuser. Wohngebäude enthalten gemäß beider Studien pro Volumen des umbauten Raumes deutlich mehr Holz als Nichtwohngebäude. Über alle Gebäudetypen (Wohn- und Nichtwohngebäude) hinweg, geben Mantau et al. (2013) einen Holzinhalt von  $15 \text{ m}^3$  pro  $1.000 \text{ m}^3$  Rauminhalt an. Kroth et al. (1991) nennen keinen aggregierten Mittelwert. Der Hauptanteil des Holzes findet im konstruktiven Bereich Verwendung. Mantau et al. (2013) spezifizieren dies weiter nach Gewerken: Dach und Wärmedämmung, sowie bei Holzbauweise Wände und Decken sind die Haupteinsatzbereiche von

Holz in Wohngebäuden. Eine eventuelle Kaskadennutzung von Holz aus dem Bauwesen sollte daher auch auf diese Sortimente fokussieren.

Untersuchungen, die zusätzlich zur Menge des aus dem Gebäudebestand fließenden Holzes auch weitergehende Informationen zu Qualität, Teilegröße oder Erhaltungszustand erheben, existieren so gut wie nicht. Nur Merl (2007) ermittelte neben den Holzmengen im Bestand der Stadt Wien auch den aktuellen (Jahr 2001) und zukünftigen (Jahr 2101) Holzfluss aus dem Bestand, aufgeteilt nach den Abmessungen der anfallenden Hölzer. Ein Großteil (62 %) entfällt auf Hölzer mit größeren Abmessungen, 28 % sind Bretter, 10 % Hölzer mit kleinen Abmessungen. Ratajczak et al. (2015) ermittelten das in Polen jährlich aus dem Baubereich anfallende Altholz. Eine weitere Qualitätsansprache, die auch eventuell auftretende Verunreinigungen während der Nutzung mit einbezieht und es dadurch ermöglicht, potentielle Sekundärnutzungen abzuschätzen, erfolgt jedoch in beiden Studien nicht. Eine solche ist für eine Untersuchung, ob sich Holz aus dem Gebäudebestand für eine Nutzung in Kaskaden eignet, jedoch sehr wichtig. Insbesondere, wenn das Altholz zukünftig für hochwertigere Anwendungen als die Herstellung von span- oder faserbasierten Werkstoffen genutzt werden soll, sind verlässliche Informationen zur anfallenden Menge, Größe und Qualität der Hölzer nötig (Meinschmidt et al. 2013). Die Bewertung der Qualität sollte mit Blick auf die zukünftigen Verwertungsmöglichkeiten erfolgen. Dies wurde bisher in keiner der Studien durchgeführt.

Nach der Veröffentlichung der Untersuchungsergebnisse zu Altholzflüssen aus dem bayerischen Gebäudebestand, die Teil dieser Dissertation ist (Höglmeier et al. 2013), ermittelte Sakaguchi (2014) für ein spezifisches finnisches Holzgebäude das Potential des beim Abbruch anfallenden Altholzes für eine Nutzung in Kaskaden. Er fand grundsätzlich ein hohes stoffliches Verwertungspotential, das weniger durch die Verwendung des Holzes im Gebäude, sondern mehr durch das Vorgehen beim Abbruch und das Gebäudedesign beeinflusst wurde.

## **2.4 Ökobilanzen der Kaskadennutzung von Holz**

### **2.4.1 Mehrprodukt-Systeme und Recycling in Ökobilanzen**

Seit ihrer Entstehung in den 70er Jahren des vergangenen Jahrhunderts wurde die Ökobilanz als Methode zur Bewertung von Umweltwirkungen kontinuierlich weiter entwickelt. Wurden zu Beginn nur Stoff- und Energieströme erfasst, existiert heute ein umfassendes Set an teilweise konkurrierenden Indikatoren zur Bewertung einer Vielzahl von potentiellen Einwirkungen auf die Umwelt und die menschliche Gesundheit. Die Grundlagen der Methode sind in den Normen ISO 14040 (DIN 2006a) und ISO 14044 (DIN 2006b) zusammengestellt. Zusätzlich enthält die Norm DIN EN 16760 „Biobasierte Produkte – Ökobilanzen“ (DIN 2014) unter anderem Aussagen zum Umgang mit biogenem Kohlenstoff. Generell wird die Methodik der Ökobilanz in dieser Arbeit als bekannt vorausgesetzt und auf die einschlägige Fachliteratur verwiesen (Curran 2012, Guinée 2002, Klöpffer & Grahl 2012).

Grundsätzlich handelt es sich bei der Ökobilanz um eine Betrachtung der Umweltwirkungen eines Produktsystems. Dabei wird in der Regel der gesamte Lebensweg von der Rohstoffgewinnung und -erzeugung über die Energieerzeugung und Materialherstellung bis zur Anwendung, Abfallbehandlung und endgültigen Beseitigung berücksichtigt („cradle-to-grave“). Die Nutzungsphase der Produkte wird jedoch in der Praxis oft von der Betrachtung ausgeschlossen, da verlässliche Daten hierzu nicht oder nur unter großem Aufwand zu erheben sind. Auch in den Ökobilanzen dieser Arbeit liegt die Nutzungsphase außerhalb der Systemgrenze.

Zum Vergleich zweier Produktsysteme mit der Methode der Ökobilanz müssen beide den gleichen Nutzen, also die gleiche Summe von Produkten oder (Dienst-)Leistungen, bereitstellen. Die Quantifizierung des Nutzens erfolgt über die sogenannte „funktionelle Einheit“. Die Festlegung der funktionellen Einheit und damit des Systemnutzens ist oft problemlos möglich, wenn ein Einzelprodukt im Fokus der ökobilanziellen Betrachtung steht. Eine Ressourcennutzung in Kaskaden führt jedoch in der Regel zu einem relativ komplexen System, das die Lebenszyklen mehrerer Produkte, dazwischenliegende Erfassungs- und Aufbereitungsschritte und das abschließende Lebensende der Ressource umfasst. Um eine Kaskadennutzung mit alternativen Ressourcennutzungen zu vergleichen, muss dennoch gewährleistet sein, dass beide Systeme in ihrer Summe die gleichen Produkte und damit den gleichen Nutzen bereitstellen und folglich auch der Gesamtnutzen beider Systeme identisch ist. Die Norm ISO 14044 (DIN 2006b) führt mehrere Herangehensweisen auf, um eine Vergleichbarkeit solcher Multi-Output-Systeme zu ermöglichen. Die Reihung in der Norm stellt dabei explizit auch eine Wertung der Methoden dar. Die Allokation, also das Aufteilen der entstehenden Umweltwirkungen auf die verschiedenen Produkte nach physikalischen oder ökonomischen Gewichtungsverfahren, soll demnach vermieden werden. Dieses Verfahren bietet sich dennoch vor allem für Systeme an, die zusätzlich zu einem Hauptprodukt weitere Nebenprodukte bereitstellen. Im Falle der Kaskadennutzung stehen jedoch alle anfallenden Produkte gleichermaßen im Fokus und sind Teil des Gesamtnutzens des Systems.

Die Fragestellung des Umgangs mit Mehr-Funktions-Systemen wurde auch in einer Reihe von Studien adressiert, die sich mit Recycling in Abfallwirtschaftssystemen beschäftigen (Ekvall 1999, Finnveden 1999, Heijungs & Guinée 2007, Jungmeier et al. 2002). Hier stellt sich vor allem die Frage, wie die Entsorgung eines Abfalls mit der Verwertung desselben Abfalls als Sekundärressource verglichen werden kann. Obwohl der Fokus in der hier vorgestellten Arbeit nicht primär abfallwirtschaftlich ist, sind die Herausforderungen dennoch ähnlich. Die Norm ISO 14044 nennt als zu bevorzugende Herangehensweise die Erweiterung der Systeme um diejenigen Funktionen (Produkte), die im jeweils komplementären Produktsystem zusätzlich oder in größerer Menge bereitgestellt werden.

Es gibt jedoch auch Autoren, die die Systemraumerweiterung, sowie auch deren Umkehr, die Vergabe von Gutschriften für vermiedene Umweltwirkungen, kritisch betrachten. Heijungs & Guinée (2007) merken an, dass die subjektive Auswahl der Prozesse, die für die Systemraumerweiterung oder zur Vergabe von Gutschriften genutzt werden, ausschlaggebend dafür ist, dass die Ergebnisse der Bewertung von Abfallwirtschaftssystemen oft stark abweichen

oder sogar widersprüchlich sind. Sie schlagen daher vor, Mehr-Produkt-Systeme aufzuteilen und die entstehenden Umweltwirkungen zu allozieren. Ein weiterer Kritikpunkt ist die Tatsache, dass bei Systemraumerweiterungen nicht auf eines der Produkte des Systems fokussiert werden kann und dies zu einem Informationsverlust im Hinblick auf die einzelnen Produkt-Lebenszyklen und den damit in Verbindung stehenden Umweltwirkungen führen kann (Ekvall 1999, Finnveden 1999).

Eine Systemraumerweiterung ermöglicht es jedoch, die Allokation von Umweltwirkungen zu vermeiden, die ebenso einen nicht unerheblichen Einfluss auf das Ergebnis haben kann, etwa über die Wahl der Allokationsmethode (Finnveden 1999, Ekvall 1999, Jungmeier et al. 2002, Werner et al. 2007). Eine Systemraumerweiterung kann auch dann am besten geeignet sein, wenn nicht ein Produkt im Fokus der Untersuchung steht, sondern eine Kombination mehrerer Produkte (Finnveden et al. 2009). Da dies bei der Kaskadennutzung der Fall ist, erscheint unter Berücksichtigung der dargestellten Fakten die Systemraumerweiterung als probate Methode zur Umweltbewertung der Kaskadennutzung und wird deshalb in dieser Arbeit auch angewendet.

Für die ökobilanzielle Abbildung von Recycling, und dabei vor allem den Einsatz von Sekundärmaterialien in Produkten, existieren verschiedene Allokationsansätze, die Frischknecht (2010) analysiert und gegenübergestellt hat. Sie unterscheiden sich bezüglich des zugrundeliegenden Verständnisses von Nachhaltigkeit und der Berücksichtigung von Risiken. Der „recycled content“-Ansatz berücksichtigt den Anteil der sekundären Rohstoffe bei der Produktherstellung. Diese treten in der Regel ohne Belastungen in das Ökobilanz-System ein, da Umweltwirkungen der Gewinnung und Verarbeitung von Primärrohstoffen vollständig dem Vorgänger-Produkt zugeschlagen werden. Der „avoided burden“-Ansatz ist eine in die Zukunft gerichtete Betrachtung. Es werden Annahmen zum Umgang mit dem Produkt an dessen Lebensende getroffen (z. B. Recycling, Wiederverwendung) und basierend darauf die Umweltwirkungen der Herstellung mittels Gutschriften reduziert. Beide Ansätze können als konform mit ISO 14040 und 14044 gesehen werden. Wie Werner & Richter (2000) und Frischknecht (2010) gezeigt haben, können sich jedoch sowohl die Ökobilanz-Inventare als auch die Bewertung der Umweltwirkungen bei Anwendung der beiden Ansätze deutlich unterscheiden. Rüter & Diederichs (2012) haben bei der Erstellung der Produkt-Ökobilanzen für Holzprodukte in Deutschland im Fall von Altholzverwendung den „recycled content“-Ansatz verwendet. Die Metallindustrie favorisiert hingegen den „avoided burden“-Ansatz (Atherthon 2007, Dubreuil et al. 2010), obwohl kritische Stimmen sowohl die Höhe der angesetzten Recyclingraten als auch die Gleichwertigkeit der Qualität von Primär- und Sekundärstahl anzweifeln (McMillan et al. 2012). Ansätze, wie der von Gala et al. (2015) vorgestellte, die Qualitätsunterschiede zwischen Primär- und Sekundärrohstoffen sowie den Markt für Sekundärmaterialien bei der Berechnung der Gutschriften berücksichtigen, können dazu beitragen, die Akzeptanz des „avoided burden“-Ansatzes zu verbessern.

## **2.4.2 Umweltbewertung von Verwertungsoptionen von Altholz mit und ohne Kaskadennutzung**

Es existieren nur wenige Arbeiten, die die Kaskadennutzung von Holz oder zumindest ein mehrmaliges Recycling mit der Methode der Ökobilanz (LCA) untersuchen (Gärtner et al. 2013, Kim & Song 2014, UBA 2014b). Aus diesem Grund wird die Übersicht der einschlägigen Arbeiten um Studien und Untersuchungen erweitert, die die Umweltwirkungen einer Kaskadennutzung von Holz im Fokus haben, jedoch andere Methoden und Indikatoren anwenden. Darüber hinaus werden Ökobilanz-Studien berücksichtigt, die stoffliche und energetische Verwertungsoptionen von Altholz umfassen.

### **Umweltwirkungen der Kaskadennutzung**

Fraanje (1997a&b) publizierte die ersten Veröffentlichungen, die sich mit der Kaskadennutzung von Biomasse beschäftigen. Er untersuchte sowohl für Kiefernholz als auch für Hanf und Schilfgras die Auswirkungen einer Kaskadennutzung auf den Bedarf an Primärrohstoffen in den Niederlanden. Er kam zu dem Ergebnis, dass durch Kaskadennutzung größere Einsparungen möglich sind, und dass dadurch die Dauer der Nutzung einer Rohstoffeinheit deutlich verlängert werden kann. Dornburg & Faaij (2005) verglichen kaskadische Nutzungsketten mit Pappelholz aus Kurzumtriebsplantagen und berücksichtigten ökonomische Parameter und die Entstehung von CO<sub>2</sub>-Emissionen. Sowohl die Emissionen pro Hektar als auch die CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten konnten durch Kaskadennutzung gesenkt werden. Sathre & Gustavsson (2006) analysierten die Energie- und Kohlenstoffbilanzen kaskadischer Holznutzung unter Berücksichtigung von Substitutionseffekten, direkten Kaskadeneffekten und Effekten veränderter Landnutzung durch Kaskadennutzung. Kaskadennutzung konnte die Bilanzen positiv beeinflussen, insbesondere durch eine sinkende Nachfrage nach Nichtholzprodukten (Substitution) und durch Energieeinsparungen im Zusammenhang mit der kaskadischen Nutzung (direkte Kaskadeneffekte). Diese Effekte treten besonders stark auf, wenn ein begrenztes Angebot von Frischholz angenommen wird. Sikkema et al. (2013) untersuchten die Auswirkungen der Implementierung der Kaskadennutzung in Kanada auf die Treibhausgasemissionen der Holznutzung. Sie verglichen die Ergebnisse mit dem Basisszenario des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), welches eine unmittelbare energetische Nutzung des geernteten Holzes und somit eine sofortige Freisetzung des im Holz gespeicherten Kohlenstoffs annimmt. Die Studie kam zu dem Ergebnis, dass eine merkliche Reduktion der Treibhausgasfreisetzung möglich ist. Sie berücksichtigte aber keine direkten Kaskadeneffekte, wie beispielsweise Unterschiede in Produktionsprozessen durch die Nutzung von Altholz statt Frischholz. Werner et al. (2010) untersuchten den Effekt verschiedener Nutzungsvarianten auf die Treibhausgasbilanz des gesamten Holznutzungssystems vom Wald bis zur abschließenden energetischen Nutzung mithilfe eines modell-basierten Ansatzes. Kaskadennutzung stand nicht im Fokus der Untersuchung, erwies sich aber mit der Prämisse der Treibhausgas-Reduktion als effizienteste Nutzungsmöglichkeit des geernteten Holzes. Osterburg et al. (2013) empfehlen in einem politikorientierten Bericht des Thünen-Instituts ebenfalls einen Ausbau der Kaskadennutzung als effiziente Handlungsoption zur Verbesserung der CO<sub>2</sub>-Bilanz



des Sektors Forst und Holz. Bergeron (2014) untersuchte die Übereinstimmung der Effekte des derzeitigen Altholzmanagements in der Schweiz mit nationalen politischen Vorgaben. Die untersuchten Kaskadenszenarien wiesen dabei, unter Berücksichtigung von Kohlenstoffspeicherung und Substitutionseffekten, stets höhere Potentiale zur Reduktion von Treibhausgasen auf als die Vergleichsszenarien, die von einer direkten energetischen Verwendung ausgingen. Demgegenüber bezweifelt Knauf (2015) in seinem Diskussionsbeitrag, dass eine Nutzung von Altholz in Kaskaden nennenswerte Umweltvorteile bedingt. Er argumentiert, dass aufgrund der steigenden Nachfrage nach Holz zur Energieerzeugung, das durch eine verstärkte stoffliche Altholznutzung freiwerdende Frischholz energetisch genutzt würde, und keine oder nur geringe positive Netto-Effekte auftreten würden. Eine praktische Untersuchung dieser Argumentation ist in der Veröffentlichung nicht enthalten.

### **Ökobilanzierung der Kaskadennutzung von Holz**

Gärtner et al. (2013) veröffentlichten eine der wenigen Studien, die eine Kaskadennutzung nicht nur anhand einzelner Indikatoren, wie beispielsweise Treibhausgas-Emissionen betrachten, sondern zur Bewertung die Methode der Ökobilanz und damit ein weiter gefasstes Set an Indikatoren heranziehen. Sie untersuchten für das Bundesland Saarland ausgehend von Waldholz die Holznutzung in Kaskaden. Einzelne Kaskadenwege wurden anhand der kumulativen Substitutionswirkung der entstehenden Produkte verglichen. Zusätzlich zu diesem Input-basierten Ansatz untersucht die Studie die Umweltwirkungen der Kaskadennutzung auch mithilfe von Nutzenkörben, die ein definiertes, bereitzustellendes Produktportfolio enthielten, und sowohl mit Kaskadenprodukten als auch mit Substitutionsprodukten gefüllt wurden. Der überwiegende Teil der untersuchten Kaskaden zeigte im Vergleich zu ausgewählten Substitutionsprodukten niedrigere Umweltwirkungen in den meisten Wirkungskategorien der Ökobilanz. Insbesondere die Berücksichtigung von höherwertigen Produkten in den Kaskaden (v. a. verleimtes Altholz) erwies sich als positiv, da die angenommene Substitution von Baustahl relativ große Umweltvorteile bedingt. Eine vom Deutschen Umweltbundesamt veröffentlichte Studie (UBA 2014b) identifizierte die vermiedene Beanspruchung primärer Ressourcen als einen der Hauptvorteile der Kaskadennutzung. Jedoch kommen die Autoren auch zu dem Schluss, dass die Ökobilanz, als produkt- bzw. output-fixierte Methode, nicht optimal geeignet ist, um die Auswirkungen der Holznutzung in Kaskaden auf der Seite der Inputs (Holzbedarf) abzubilden, und deshalb Effekte auf die Nutzungseffizienz nur unzureichend erfasst werden können.

Die von Gärtner et al. (2013) untersuchten Kaskaden beginnen mit Waldholz als erstem Holzrohstoff. Deshalb kann die abfallwirtschaftlich orientierte Frage, ob Kaskadennutzung die zu bevorzugende Verwertungsalternative für vorhandenes Altholz ist, nicht beantwortet werden. Zudem beinhalten die Vergleichssysteme in der Regel fossile und mineralische Produkte, so dass die gefundenen Vorteile der Kaskadennutzung in erster Linie auf Substitutionseffekte zurück zu führen sind. Die Höhe der direkten Kaskadeneffekte, wie beispielsweise geringere Umweltwirkungen der Bereitstellung von Sekundärmaterialien im Vergleich zu Primärrohstoffen (Sathre & Gustavsson 2006), wird ebenfalls nicht separat abgebildet. Beide Fragestellungen sind

jedoch relevant um festzustellen, ob sich nach einer erstmaligen stofflichen Nutzung aus Umweltsicht eine weitere stoffliche Nutzung und damit eine Kaskadennutzung anschließen sollte, und werden deshalb in dieser Arbeit gezielt untersucht und beantwortet.

### **Vergleichende Ökobilanzen von Altholzverwertungsoptionen**

Neben Studien, die eine Bewertung der Kaskadennutzung zum Ziel haben, sind für die vorliegende Arbeit auch Ökobilanz-Studien von Interesse, die das Konzept der Kaskadennutzung nicht direkt behandeln, jedoch entweder die in den Kaskaden integrierten Holzprodukte oder andere Verwertungsmöglichkeiten von Altholz untersuchen.

Als Ergebnis der COST Action E9 veröffentlichten Jungmeier et al. (2001) Empfehlungen zum Umgang mit abfallwirtschaftlichen Fragestellungen in Bezug auf Holz in Ökobilanzen. Sie berichten, dass neben der Herstellungsphase vor allem die angenommene Verwertung oder Entsorgung das Ergebnis einer vergleichenden, den kompletten Lebenszyklus umfassenden Bilanz beeinflusst. Dies wurde auch in anderen Studien bestätigt (Börjesson & Gustavsson 2000, Doodoo et al. 2009, Sandin et al. 2014). Jungmeier et al. (2001) empfehlen daher, mindestens zwei verschiedene Optionen in einer vergleichenden Ökobilanz zu berücksichtigen. In seiner Dissertation untersuchte Speckels (2001) die Umweltwirkungen verschiedener Verwertungsmöglichkeiten von Altholz. Er berücksichtigte sowohl eine stoffliche Nutzung des Altholzes als Rohstoff zur Spanplattenherstellung als auch die energetische Verwertung in verschiedenen (Heiz-)Kraftwerkstypen. Der Vergleich der Verwertungsoptionen wurde mittels einer Systemraumerweiterung basierend auf einer Mischung von Substitutionsprodukten aus Frischholz (Spanplatten) und fossilen Rohstoffen (Energie) durchgeführt. Zusätzlich zog er auch die Deponierung von Altholz in die Bewertung mit ein. Aufgrund der geänderten Gesetzeslage ist die Betrachtung dieser Verwertungsoption jedoch mittlerweile obsolet geworden. Kim & Song (2014) vergleichen ebenfalls den Einsatz von Altholz zur Spanplattenproduktion mit der energetischen Nutzung und wenden eine Systemraumerweiterung an. Im Gegensatz zu anderen Studien berücksichtigen sie Effekte der zeitweiligen Kohlenstoffspeicherung. Durch die angenommene, unrealistisch hohe Zahl von Recyclingzyklen (>15 Spanplattenzyklen) beeinflusst die Kohlenstoffspeicherung das Vergleichsergebnis in der Wirkungskategorie GWP (Klimaänderung) stark. Das Recycling schneidet dadurch deutlich besser ab als die direkte energetische Nutzung des Altholzes. Einen ähnlichen Vergleich stellen Rivela et al. (2006) an. Sie untersuchen verschiedene Verwertungsoptionen von Spanplatten aus temporärer Messearchitektur in Spanien. Unter Anwendung einer Systemraumerweiterung mit Spanplatten aus Frischholz und fossiler Energie erscheint die Nutzung des Altholzes zur Spanplattenproduktion aus Umweltsicht vorteilhaft. Lediglich in der Kategorie „Fossil Fuels“ führt die Systemraumerweiterung mit auf fossilen Rohstoffen basierenden Produkten dazu, dass das stoffliche Recycling deutlich schlechter abschneidet. Diesen Effekt stellte bereits Speckels (2001) fest.

Die vorgestellten Untersuchungen berücksichtigen nur Spanplatten als derzeit wichtigstes Altholzprodukt. Es bleibt offen, ob der Einsatz von Altholz in alternativen Produkten zu bevorzugen

ist, die gegebenenfalls aufgrund nicht enthaltener Klebstoffe geringere Umweltwirkungen verursachen oder höhere Substitutionseffekte ermöglichen. Alle vorgestellten Studien untersuchen spezifische Nutzungswege der Ressource Holz. Dies hat zur Folge, dass Effekte, die nicht direkt im Zusammenhang mit der betrachteten Produktion auftreten, nicht berücksichtigt werden können. Insbesondere die Auswirkungen von Sortimentsverschiebungen oder einer eventuell steigenden Effizienz der Nutzung durch mehrmalige stoffliche Holznutzung bleiben größtenteils unberücksichtigt, sind für eine fundierte Bewertung jedoch essentiell.

### 3 Forschungsziele

Hauptziel der Arbeit ist es, Ansätze für eine umfassende ökologische Bewertung der Holzkaskadennutzung und deren Effekt auf die Effizienz der Holznutzung zu entwickeln und anzuwenden. Um die Relevanz der Ergebnisse einer solchen Bewertung abschätzen zu können, ist eine Erhebung des vorhandenen Rohstoffpotentials für eine Kaskadennutzung von Vorteil. Dabei sind zum einen die anfallenden Altholzmengen von Interesse. Mehr noch ist jedoch die Eignung des Altholzes für spezifische Verwertungsoptionen ausschlaggebend. Diese wird durch die Art des Materials (Massivholz, Holzwerkstoff, Holz-Verbund-Werkstoff), aber auch durch die Größe der Holzteile und eventuelle Verunreinigungen mit Störstoffen (Metalle, Farben oder Imprägnier- und Holzschutzmittel) beeinflusst. Daher ist es ein erstes Teilziel der Arbeit, eine Methode zu entwickeln und anzuwenden, um diese bisher nicht verfügbaren Informationen für die Studienregion Bayern bereitzustellen. Die Untersuchung fokussiert auf Holz aus Gebäudeabbrüchen, da hier aufgrund der oftmals großen Dimensionen der Holzteile hochwertige Verwertungen oder sogar eine Wiederverwendung denkbar sind.

Die darauf folgende ökologische Bewertung der Kaskadennutzung mit der Methode der Ökobilanz stellt Altholz als Ausgangsmaterial in den Mittelpunkt. Die positiven Effekte einer stofflichen Nutzung von Frischholz gegenüber der energetischen Nutzung sind bekannt. Ob das nach der ersten stofflichen Nutzung anfallende Altholz weiteren stofflichen Nutzungen und damit einer Kaskadennutzung zugeführt werden sollte, ist jedoch aus Umweltsicht noch nicht ausreichend untersucht. Insbesondere die Quantifizierung direkter Effekte der Kaskadennutzung im Gegensatz zu Effekten einer Produktsubstitution, ist für eine aus ökologischer Sicht vorteilhafte Altholznutzung wichtig, bisher jedoch nicht erfolgt. Dies wird in der vorliegenden Arbeit durch den Vergleich von Altholzkaskaden mit funktionsgleichen Frischholzprodukten ermöglicht. Um zusätzlich auch Substitutionseffekte zu berücksichtigen, werden Kaskadennutzungen mit funktionsgleichen fossilen und mineralischen Produkten verglichen und dabei auch die Effekte von Materialverlusten während der Kaskaden erstmals integriert. Um die Alternativen zu vergleichen, wird die Methode der Systemraumerweiterung nach ISO 14044 angewendet und dabei auch ihre Eignung zur Bewertung von Kaskadennutzungssystemen in Ökobilanzen beurteilt.

Die vergleichenden Ökobilanzen spezifischer Kaskadennutzungen können jedoch eine Reihe von Effekten der Kaskadennutzung nur bedingt abbilden. So kann davon ausgegangen werden, dass durch eine weitergehende Implementierung der Kaskadennutzung Verschiebungseffekte bei der Verwendung der verschiedenen Holz- und Industrierestholz-Sortimente auftreten, die eine Veränderung der Umweltwirkungen der Holznutzung zur Folge haben können. Ebenso kann die begrenzte Verfügbarkeit von Frischholz und die Höhe der Nachfrage nach Holzprodukten in den Einzelkaskaden nicht direkt berücksichtigt werden. Um diese Aspekte und eventuelle weitere, außerhalb der eigentlichen Nutzungskaskade auftretende Umwelteffekte der Kaskadennutzung zu erfassen, ist ein Untersuchungsansatz notwendig, der alle in einer Region auftretenden Holznutzungen, inklusive einer möglichen Kaskadennutzung, berücksichtigt. Deshalb wurde ein ökobilanz-basiertes Stoffflussmodell entwickelt, das die Holznutzung der Studienregion vom Wald

bis zur endgültigen energetischen Nutzung vereinfacht abbildet. In Verbindung mit einer algebraischen Optimierung können so die genannten Aspekte erfasst und zudem auch Auswirkungen der Kaskadennutzung auf die Effizienz der Holznutzung ermittelt werden.

Aufgrund der beschriebenen Forschungslücken stehen in dieser Arbeit die folgenden übergeordneten Forschungsfragen im Mittelpunkt. Detailliertere Fragestellungen können den einzelnen Veröffentlichungen (Kapitel 10) entnommen werden.

1. Welches Potential für eine hochwertige Sekundärnutzung in Kaskaden stellt das aus dem Gebäudebestand anfallende Altholz dar und mit welcher Methode kann es ermittelt werden?
2. Können Umweltwirkungen durch eine Nutzung von Holz in Kaskaden im Vergleich zu alternativen Holz- und Nicht-Holz-Produkten und zur direkten energetischen Nutzung des Holzes verringert werden?
3. Welche technologischen, organisatorischen und methodischen Aspekte beeinflussen die ökobilanzielle Bewertung der Kaskadennutzung?
4. Wie beeinflusst Kaskadennutzung die derzeitige Holznutzung im Hinblick auf entstehende Umweltwirkungen und die Nutzungseffizienz?

Die vorliegende Arbeit spannt somit einen Bogen vom Rohstoffangebot bis zur umfassenden ökologischen Bewertung auf der Ebene einzelner Nutzungswege sowie erstmals auch auf Ebene eines regionalen Gesamtsystems der Holznutzung. Zusätzlich zur Quantifizierung verschiedener Umwelteffekte der Kaskadennutzung werden methodische Herangehensweisen überprüft und weiterentwickelt, um Effekte der Kaskadennutzung besser abbilden zu können.

## 4 Übersicht der Teilarbeiten

### 4.1 Veröffentlichung 1: *Potentials for cascading of recovered wood from building deconstruction – a case study for south-east Germany*

Karin Höglmeier, Gabriele Weber-Blaschke, Klaus Richter

2013, Resources Conservation and Recycling, Ausgabe 78, Seiten 81–91

#### **Zusammenfassung**

Aufgrund der abnehmenden Verfügbarkeit primärer Ressourcen werden sekundäre Ressourcen immer wichtiger. Insbesondere die Infrastruktur und hier vor allem der Gebäudebestand stellen eine bisher noch ungenutzte Quelle mit großem Potential dar. Jedoch fehlen für viele im Gebäudebestand enthaltene Ressourcen verlässliche Informationen zu verfügbaren Mengen und insbesondere deren Qualität, die eine zielgerichtete Nutzbarmachung erst ermöglichen.

Diese Lücke schließt die Studie für die Ressource Holz. Die dazu entwickelte Methode verknüpft Baustoff-Inventardaten von exemplarischen Wohn- und Nichtwohngebäuden mit Statistiken zur Entwicklung des bayerischen Gebäudebestandes. Sie ermöglicht es, neben Menge und Verwendung von Holz im Baubestand erstmals auch Mengen und qualitätsbestimmende Merkmale des aus dem Gebäudebestand fließenden Altholzes zu analysieren. Dadurch werden fehlende Informationen zur Beurteilung der Eignung dieses Altholzes für eine hochwertige stoffliche Folgenutzung in Kaskaden bereitgestellt.

Es wurde gezeigt, dass substantielle Mengen des Altholzes aus dem Gebäudebestand für eine Kaskadennutzung geeignet sind: 26 % dieses Holzes kann potentiell einer Wiederverwendung im Baubereich zufließen und fast ebenso viel kann anderweitig stofflich verwertet werden. Dies ist deutlich mehr als bisher stofflich verwertet wird und zeigt das bisher ungenutzte Potential von Holz aus Gebäudeabbrüchen für eine stoffliche Verwertung und Nutzung in Kaskaden. Die entwickelte Methode erwies sich als geeignet, um das Holzpotential des Gebäudebestands zu erfassen und kann potentiell auch auf andere Ressourcen übertragen werden.

#### **Eigenbeitrag**

Karin Höglmeier entwickelte den Forschungsansatz basierend auf früheren Ansätzen von Gabriele Weber-Blaschke, führte die gesamte Datenrecherche und -auswertung durch und verfasste den Artikel. Gabriele Weber-Blaschke und Klaus Richter leiteten das Forschungsprojekt, gaben Vorschläge zur Datenaufbereitung sowie zu Inhalten und Struktur des Artikels und redigierten den Artikel.

## **4.2 Veröffentlichung 2: *Utilization of recovered wood in cascades versus utilization of primary wood – a comparison with life cycle assessment using system expansion***

Karin Höglmeier, Gabriele Weber-Blaschke, Klaus Richter

2014, International Journal of Life Cycle Assessment, Jahrgang 19, Ausgabe 10, Seiten 1755-1766

### **Zusammenfassung**

Das Konzept der Kaskadennutzung wird angesichts einer steigenden Nachfrage nach Rohstoffen auch für die Nutzung nachwachsender Rohstoffe wie Holz zunehmend propagiert.

Die Studie untersucht, ob eine Kaskadennutzung von Altholz geringere Umweltwirkungen verursacht als die Herstellung von funktionsgleichen Produkten aus Frischholz. Dazu werden umfassende Ökobilanzen von Altholzkaskaden und Vergleichsprodukten aus Primärholz erstellt und die resultierenden Umweltwirkungen mit der Methode der Systemraumerweiterung verglichen. Dieser Ansatz bildet erstmals isoliert die direkten Umwelteffekte der Kaskadennutzung ab, da die Ergebnisse nicht durch Effekte der Substitution von Nicht-Holz- durch Holz-Produkte überlagert werden. Substitutionseffekte sind auch bei einer Holznutzung ohne Kaskaden zu erzielen und folglich nicht direkt durch Kaskadennutzung bedingt. Eine Sensitivitätsanalyse untersucht, ob technologische und organisatorische Änderungen im Kaskadensystem die Ergebnisse entscheidend beeinflussen.

Kaskadennutzung führt zu geringeren Umweltwirkungen als Frischholznutzung, vor allem beim Indikator „Landnutzung“ und dem Bedarf erneuerbarer Primärenergie. Wenn zur Systemraumerweiterung fossile Energieträger verwendet werden, kann Kaskadennutzung die Umweltwirkungen jedoch nicht verringern. Die Sensitivitätsanalysen zeigen, dass die Ergebnisse des Vergleichs robust gegenüber der Mehrzahl der untersuchten Variationen sind. Lediglich die Effizienz der Verbrennung des Altholzes zur Energiegewinnung nach der stofflichen Nutzung kann das relative Abschneiden der Kaskadennutzung beeinflussen.

Die Arbeit zeigt, dass durch direkte Kaskadeneffekte die Umweltwirkungen der Herstellung von Holzprodukten reduziert werden, jedoch nur in begrenztem Umfang.

### **Eigenbeitrag**

Karin Höglmeier konzipierte die zugrundeliegende Forschung, erstellte die Ökobilanzen und verfasste den Artikel. Gabriele Weber-Blaschke und Klaus Richter begleiteten die Forschungsarbeit mit Diskussionen, gaben Vorschläge zu Inhalten und Struktur des Artikels und lasen Korrektur.

### **4.3 Veröffentlichung 3: *Evaluation of wood cascading***

Karin Höglmeier, Gabriele Weber-Blaschke, Klaus Richter

In: Dewulf J, Alvarenga R, Meester S de (Hrsg) Sustainability Assessment of Renewables-Based Products: Methods and Case Studies. Wiley, Chichester (akzeptiertes Manuskript)

#### **Zusammenfassung**

Das Buchkapitel stellt das Konzept der Kaskadennutzung von Holz und die Möglichkeiten der Umweltbewertung mit der Methode der Ökobilanz vor. Darauf aufbauend werden Aspekte wie die Effekte der Kohlenstoffspeicherung im Holz und Auswirkungen von Kaskadennutzung auf die Effizienz der Holznutzung beleuchtet. Ein möglicher Einfluss von zukünftigen technologischen Veränderungen und Änderungen in der Zusammensetzung des Energiemixes auf die Ergebnisse des ökobilanziellen Vergleichs werden diskutiert.

Die vorgestellte Fallstudie vergleicht zwei verschiedene kaskadische Nutzungen von Altholz mit der direkten energetischen Verwertung des Altholzes und determiniert so die aus Umweltsicht beste Verwertungsalternative. Die Systemraumerweiterung zur Herstellung der Nutzengleichheit der Verwertungsalternativen wird sowohl mit Produkten und Energie aus Frischholz als auch auf Basis von nicht-nachwachsenden Rohstoffen modelliert, so dass auch Substitutionseffekte in die Bewertung einfließen. Darüber hinaus wird der Einfluss der Länge der Kaskaden und erstmals auch der Effizienz der Wiedererfassung des Altholzes nach jeder stofflichen Nutzung auf das Vergleichsergebnis untersucht. Dazu werden unterschiedlich lange Kaskaden modelliert und die Quote der Altholzerfassung auf 85 % reduziert.

Für eine Mehrzahl der berücksichtigten Wirkungskategorien stellt die Kaskadennutzung die Variante mit den geringeren Umweltwirkungen dar. Vor allem die Effizienz der Wiedererfassung des Altholzes erwies sich als wichtiger Einflussfaktor, der bisher unberücksichtigt blieb. Dies unterstreicht, dass auch bei der Nutzung nachwachsender Rohstoffe versucht werden muss, Prozesse noch effizienter zu gestalten, um das volle Potential der Umweltvorteile zu erhalten.

#### **Eigenbeitrag**

Karin Höglmeier erstellte die gesamten Ökobilanzen und konzipierte und verfasste das Buchkapitel. Gabriele Weber-Blaschke und Klaus Richter regten die methodische Fallstudie an, gaben Vorschläge zu Konzeption und Inhalten des Kapitels und redigierten das Manuskript.



#### **4.4 Veröffentlichung 4: *LCA-based optimization of wood utilization under special consideration of a cascading use of wood***

Karin Höglmeier<sup>1</sup>, Bernhard Steubing<sup>2</sup>, Gabriele Weber-Blaschke<sup>1</sup>, Klaus Richter<sup>1</sup>  
2015, Journal of Environmental Management, Ausgabe 152, Seiten 158-170

<sup>1</sup> Technische Universität München, Lehrstuhl für Holzwissenschaft

<sup>2</sup> Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, Lehrstuhl für Ökologisches Systemdesign

##### **Zusammenfassung**

Ziel dieser Studie ist es, Umwelt-Effekte der Kaskadennutzung auf der Ebene des Gesamtsystems der Holznutzung zu quantifizieren. Dadurch können im Gegensatz zur Betrachtung einzelner, linearer Kaskadennutzungen auch indirekte Effekte, etwa durch veränderte Holzflüsse oder Effizienzsteigerungen, berücksichtigt werden. Hierzu wird in einem neu entwickelten Ansatz ein Stoffflussmodell der aktuellen stofflichen und energetischen Holznutzung in Bayern mit einer algebraischen Optimierung verknüpft. Das Modell beinhaltet Ökobilanz-Ergebnisse aller Prozesse der Holznutzung und Produktherstellung, vom Wald bis zur abschließenden energetischen Nutzung. Es berücksichtigt außerdem die begrenzte Verfügbarkeit von Holz und stellt der jährlich im Studiengebiet vorhandenen Menge eine realistische Nachfrage nach Materialien und Energie gegenüber. Das Modell berücksichtigt die Wirkungskategorie Klimaänderung und die Emission von Feinstaub, sowie den Indikator „landwirtschaftliche Landnutzung“ und einen weiteren Indikator, der eine größere Zahl an Umweltwirkungen aggregiert.

Durch den Vergleich von Szenarien mit und ohne Kaskadennutzung kann die Auswirkung von Kaskadennutzung auf die Höhe der Umweltwirkungen des Systems und auf die Holznutzung, etwa die Sortimentsverteilung, festgestellt werden. Dies erlaubt auch Rückschlüsse darauf, wie Kaskadennutzung die Effizienz der Holznutzung beeinflusst.

Die Ergebnisse zeigen, dass in einem System mit Kaskadennutzung die nachgefragten Materialien und Energiemengen mit geringeren Umweltwirkungen und aus weniger Frischholz bereitgestellt werden können. Es kann gefolgert werden, dass Kaskadennutzung dazu beitragen kann, Holznutzung sowohl umweltfreundlicher als auch effizienter zu gestalten.

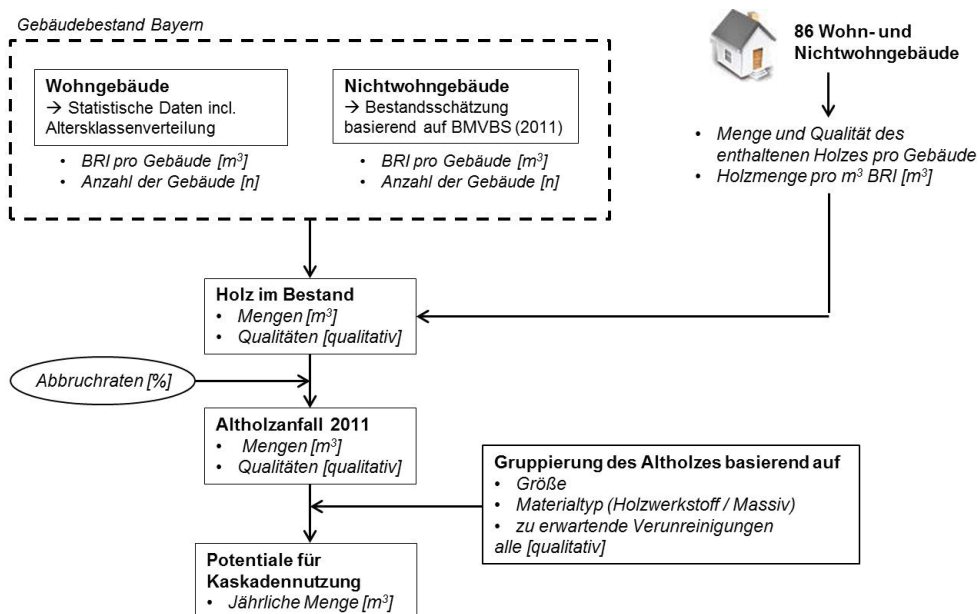
##### **Eigenbeitrag**

Karin Höglmeier entwickelte die Forschungsidee, erstellte die Ökobilanzen, erhob alle sonstigen Daten des Modells, entwickelte den Modell-Aufbau und verfasste den Artikel. Die Modellierung erfolgte gemeinsam mit Bernhard Steubing. Bernhard Steubing, Gabriele Weber-Blaschke und Klaus Richter gaben Vorschläge zur Umsetzung des Forschungsansatzes und redigierten das Manuskript.

## 5 Material und Methoden

### 5.1 Kaskadenpotentiale: Der Gebäudebestand als Quelle hochwertiges Altholzes (Veröffentlichung 1)

Um das Potential für eine Kaskadennutzung von Altholz aus Gebäudeabbrüchen zu ermitteln, wurde ein bottom-up-Ansatz mit Daten des Baukosteninformationszentrums der Deutschen Architektenkammer gewählt (BKI 2011). Inventardaten sämtlicher hölzerner Bauteile von 86 in Bayern zwischen 1948 und 2011 gebauten Wohn- und Nichtwohngebäuden wurden ausgewertet und daraus mittels statistischer Neubau- und Abbruchzahlen die im bayerischen Gebäudebestand verbaute Holzmenge ermittelt sowie der resultierende Altholzfall aus Abbrüchen für das Jahr 2011 quantitativ und qualitativ erfasst (Abbildung 2).



**Abbildung 2: Methodik zur Ermittlung des Altholzpotentials aus Gebäudeabbrüchen in Bayern (verändert aus Höglmeier et al. 2013). BRI: Bruttorauminhalt.**

Da nur für Wohngebäude ausreichende Datenzeitreihen vorhanden waren, musste der aktuelle Bestand der Nichtwohngebäude in Bayern mittels einer Studie des Bundesverkehrsministeriums geschätzt werden (BMVBS 2011). Der Gebäudebestand wurde über den Bruttorauminhalt und die Altersklassenverteilung der Gebäude charakterisiert. Letztere konnte aus der Studie des Bundesverkehrsministeriums nicht entnommen werden, so dass die Holz mengen in Nichtwohngebäuden nicht altersklassengestaffelt berechnet werden konnten. Durch die Kombination der Kennwerte der Beispielgebäude mit den statistischen Bestandswerten wurde die Holzmenge im bayerischen Gebäudebestand im Jahr 2011 ermittelt. Mit statistischen Abbruchraten wurde daraus der zu erwartende jährliche Altholzfluss abgeleitet. Um die Potentiale für eine folgende kaskadische Nutzung zu ermitteln, wurde das anfallende Altholz basierend auf der Verwendung im Gebäude hinsichtlich der Faktoren Größe, Materialtyp und zu erwartenden Verunreinigungen analysiert und einer der Qualitätsklassen der Altholzverordnung zugeordnet.

## **5.2 Ökobilanzielle Bewertung von Altholznutzung in Kaskaden (Veröffentlichungen 2, 3 und 4)**

### **5.2.1 Grundlagen**

Die den Veröffentlichungen 2 (Höglmeier et al. 2014) und 3 (Höglmeier et al. accept.) zugrundeliegenden Ökobilanzen bewerten spezifische Kaskadennutzungen indem sie die entstehenden Umweltwirkungen mit denen funktionsgleicher, aus Frischholz und nicht-nachwachsenden Rohstoffen hergestellten Produkt-Systemen vergleichen. Im Falle der Veröffentlichung 3 enthält das Vergleichssystem zusätzlich noch die Energiemenge, die durch eine direkte energetische Nutzung des Altholzes entsteht. Hier liegt der Fokus auf dem Vergleich verschiedener Nutzungsoptionen einer fixen Menge Altholz (Kaskade vs. sofortige energetische Verwertung). In der Veröffentlichung 2 (Höglmeier et al. 2014) enthält das Vergleichssystem nur Frischholz-Produkte, da die Untersuchung die Quantifizierung direkter Kaskadeneffekte zum Ziel hat. Substitutionseffekte sollten daher nicht berücksichtigt werden. Im Rahmen der Studien werden der Einfluss der Effizienz der Altholzerfassung mittels verringerten Erfassungsraten und der Einfluss der Zahl der Kaskadenstufe auf das Ergebnis der Systemvergleiche untersucht. Darüber hinaus werden verschiedene Arten der Energiegewinnung aus Altholz, der Einfluss der Transportentfernung und von weiteren technischen Parametern evaluiert.

### **5.2.2 Funktionale Einheit**

Als funktionale Einheit des Systemvergleichs diene das Portfolio der im Zuge der Kaskadennutzung entstehenden Altholz-Produkte. Mit einer Systemraumerweiterung auf Basis von Frischholzprodukten (Veröffentlichungen 2 und 3) oder Nicht-Holz-Produkten (Veröffentlichung 3) wurde erreicht, dass beide Systeme den gleichen Nutzen generieren. Eine Methode der Systemraumerweiterung, die speziell für den Vergleich von Abfallverwertungssystemen entwickelt wurde, ist der „Nutzenkorb“ (Fleischer 1994, Fleischer & Schmidt 1996). Sie wurde in beiden Veröffentlichungen angewendet. Abbildung 3 stellt eine solche Systemraumerweiterung für ein exemplarisches Altholz-Kaskadensystem dar. Die Produkte, die im jeweiligen Nutzenkorb nicht oder nicht in ausreichender Menge aus Altholz bereitgestellt werden können, werden entweder aus Frischholz oder aus fossilen bzw. mineralischen Rohstoffen hergestellt. Die Menge der Produkte (Materialien oder Energie) im Nutzenkorb wird durch die maximale Menge definiert, die bei einer der zu vergleichenden Varianten produziert wird. Die kumulativen Umweltwirkungen der nutzengleichen Systeme können dadurch direkt verglichen und die Varianten bewertet werden.

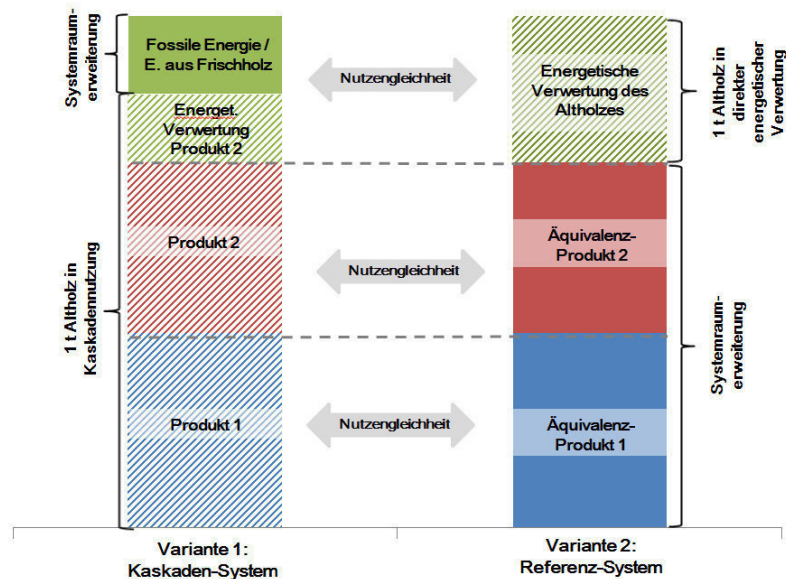


Abbildung 3: Altholz-Kaskadensystem mit zwei stofflichen Nutzungen im Vergleich zur direkten energetischen Verwertung des Altholzes unter Anwendung der Methode der Systemraumerweiterung.

### 5.2.3 Bilanzgrenzen des Kaskadensystems

Das Altholz tritt in das Ökobilanzsystem ohne Belastungen aus dem vorhergehenden Produktleben ein. Diese Vorgehensweise ist in Übereinstimmung mit anderen Ökobilanzen, die für Altholzprodukte erstellt wurden (Rüter & Diederichs 2012, Diederichs 2014) und berücksichtigt, dass die Sammlung und Aufbereitung von Altholz aufgrund der einschlägigen gesetzlichen Vorgaben des Kreislaufwirtschaftsgesetzes und der Altholzverordnung, unabhängig von einer folgenden stofflichen Verwertung, immer bis zu dem Zustand zu erfolgen hat, der Voraussetzung für eine energetische Nutzung ist. Die bei diesen Prozessen entstehenden Umweltwirkungen sind deshalb ursächlich dem Vorprodukt zuzurechnen. Lediglich zusätzliche, durch die stoffliche Nutzung bedingte Aufwendungen, wie beispielsweise ein weiterer Transport oder eine zusätzliche Sortierung, werden berücksichtigt. Somit stellt der Zeitpunkt des Erreichens des „end-of-waste“-Status die vordere zeitliche Bilanzgrenze des Systems der Kaskadennutzung dar. Es endet mit der energetischen Nutzung des verbleibenden Altholzes nach der letzten stofflichen Nutzung (Abbildung 4). Alle dazwischen liegenden, durch die Produktherstellung, Transporte sowie Sammlung und Aufbereitung bedingten Aufwendungen, werden in den Ökobilanzen erfasst. Da ab dem Zeitpunkt des erstmaligen Eintritts des Altholzes ins System alle Produktlebenszyklen bis zur finalen energetischen Verwertung des Holzes Bestandteil des Ökobilanzsystems sind, stellt sich die oft schwierige Frage des Umgangs mit Recycling in Ökobilanzen (s. a. Kap. 2.4.1) in der vorliegenden Studie nur für den Zeitpunkt des Systembeginns. Wie beschrieben, wurde dabei analog zu anderen deutschen Altholz-Ökobilanzen der „recycled content“-Ansatz (Frischknecht 2010) verwendet. Die Ökobilanzen der Frischholz- oder Nicht-Holz-Vergleichsprodukte wurden ebenfalls als „cradle-to-grave“-Betrachtungen (ohne Berücksichtigung der Nutzungsphase) modelliert.

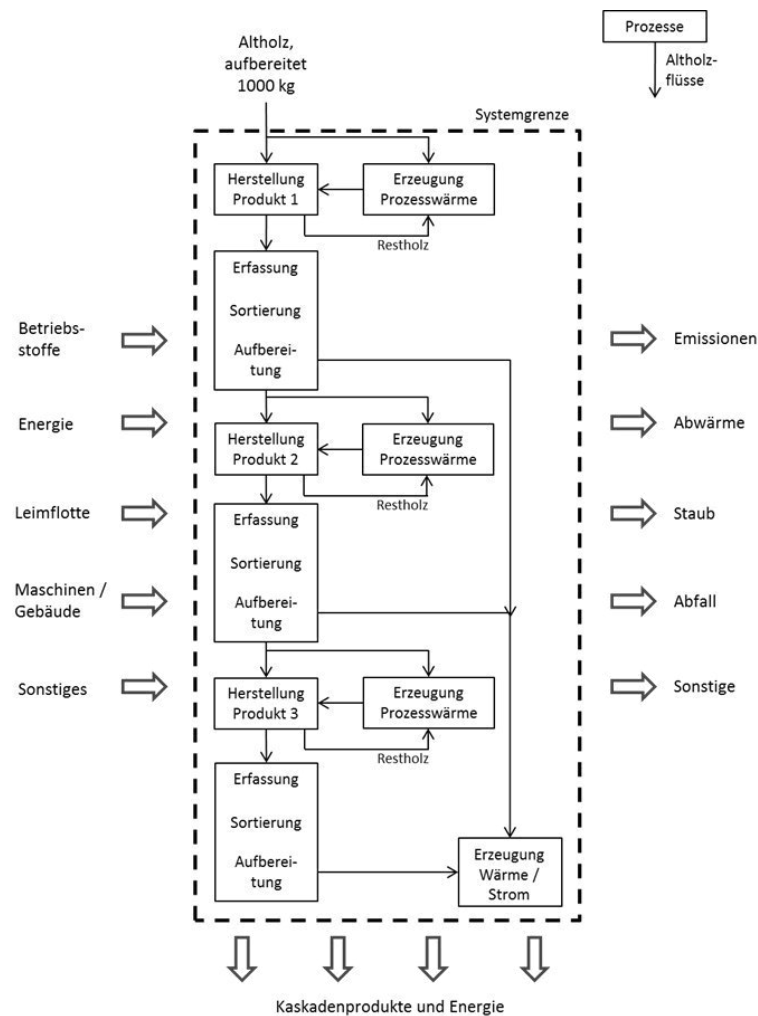


Abbildung 4: Ökobilanz-System der Kaskadennutzung von Altholz mit drei stofflichen Nutzungen.

## 5.2.4 Wirkungsabschätzung

Die berücksichtigten Wirkungskategorien werden in den jeweiligen Veröffentlichungen näher spezifiziert. Die Wirkungskategorie Klimaänderung wurde in jeder der Teilstudien untersucht. Wie und ob biogener Kohlenstoff bei der Quantifizierung dieser Umweltwirkung einbezogen werden soll, wird derzeit wissenschaftlich diskutiert (Brandão et al. 2013, Dias et al. 2009, Levasseur 2012, Marland et al. 2010, Pawelzik et al. 2013). In den Untersuchungen dieser Arbeit wird biogenes Kohlendioxid nicht berücksichtigt, da bei der Betrachtung des kompletten Lebenszyklus von Holzprodukten, wie im Falle dieser Studie, der während des Baumwachstums gebundene Kohlenstoff bei der Verbrennung am Produktlebensende wieder frei wird und deshalb unter Annahme einer mengennachhaltigen Forstwirtschaft keinen Einfluss auf das Ergebnis der Ökobilanz hat. Zudem ist die konsistente Modellierung der Aufnahmen und Abgaben biogenen Kohlenstoffs in komplexen Ökobilanz-Systemen, wie dem einer kaskadischen Holznutzung, relativ schwierig und dadurch die Gefahr einer systematischen Verzerrung des Ergebnisses durch eventuelle Inkonsistenzen zwischen Kohlenstoffaufnahme und -freisetzung gegeben.

### 5.2.5 Datenquellen

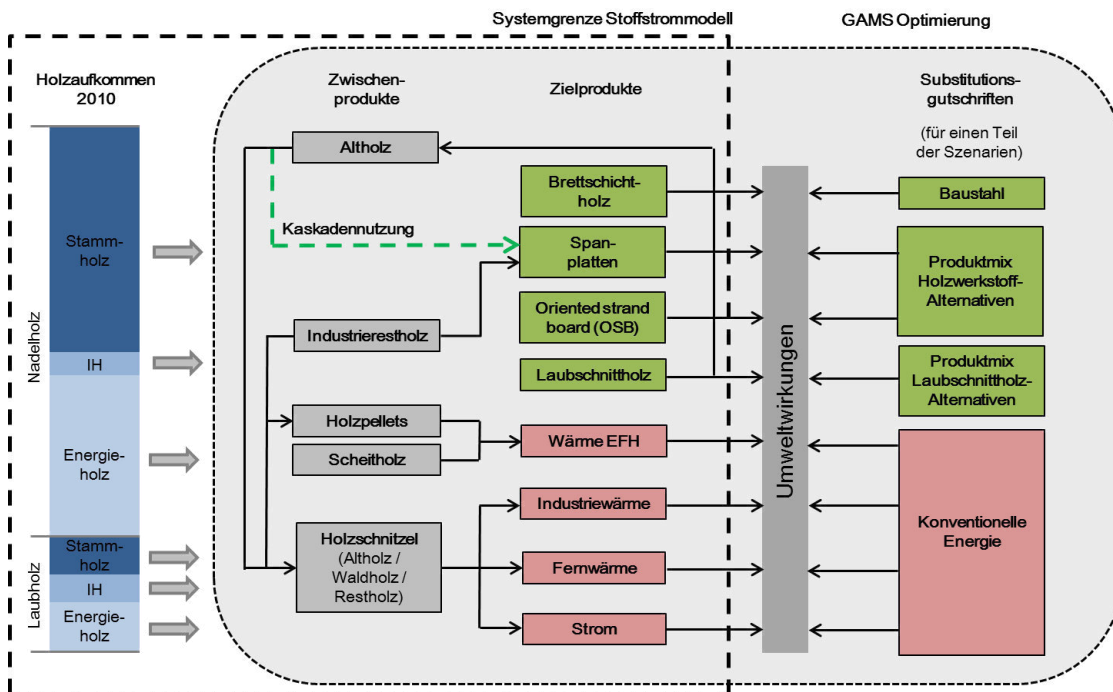
Sämtliche Ökobilanzen dieser Arbeit wurden mit der Software GaBi 6 (PE International 2014) modelliert. Wenn nicht anderweitig spezifiziert, wurde die Datenbank ecoinvent 2.2 verwendet (Frischknecht & Jungbluth 2007). Die Holzprodukte wurden auf Basis der Durchschnittsinventare für Deutschland (Rüter & Diederichs 2012) modelliert und wo nötig Anpassungen, insbesondere des Energiebedarfs und Holzinputs, vorgenommen, um die Substitution von Frischholz durch Altholz abzubilden (siehe dazu auch die „Supplementary Information“ zu Veröffentlichung 4 (Höglmeier et al. 2015)). Die Ökobilanzmodelle der Altholzaufbereitung basieren auf Primärdaten von zwei süddeutschen Altholzfirmen. Daten der Nicht-Holz-Substitutionsprodukte (stofflich und energetisch) sind ebenfalls aus der Datenbank ecoinvent 2.2 entnommen.

## 5.3 Optimierung der Holznutzung unter Berücksichtigung von Kaskadennutzung (Veröffentlichung 4)

Anhand eines Stoffstrommodells, das auf der aktuellen bayerischen Holznutzung basiert und Ökobilanz-Ergebnisse für alle Prozesse vom Wald bis zur finalen energetischen Verwertung beinhaltet, werden erstmalig Effekte von Kaskadennutzung auf Umweltwirkungen und Holzverwendung auf der Ebene eines umfassenden regionalen Nutzungssystems untersucht. Im Gegensatz zur Betrachtung linearer Nutzungskaskaden, ermöglicht diese Herangehensweise auch Aussagen zur Effizienz der Verwendung der begrenzt verfügbaren Ressource Holz und berücksichtigt indirekte Effekte, die außerhalb der eigentlichen Nutzungskaskade, etwa durch Sortimentsverschiebungen, auftreten. Das Stoffflussmodell wird mit dem algebraischen Optimierungsprogramm GAMS (GAMS Development Corporation 2013) kombiniert, um für verschiedene Wirkungskategorien die jeweils optimale Holznutzung festzustellen. Durch den Vergleich von Szenarien mit und ohne Kaskadennutzung kann deren Effekt auf das Holznutzungssystem untersucht werden. Das Modell enthält die in der Studienregion Bayern bedeutenden stofflichen und energetischen Holzprodukte, inklusive nötiger Vor- und Zwischenprodukte (Abbildung 5). Um potentielle Holzverwendungen möglichst umfassend abzubilden, wurde mit Oriented Strand Board (OSB) auch ein nicht in Bayern hergestelltes Produkt in das Modell aufgenommen. Entstehendes Industrierestholz und Altholz aus der Aufbereitung der Holzprodukte nach ihrer Nutzung werden ebenfalls im Modell berücksichtigt.

Das jährliche bayerische Holzaufkommen, aufgeteilt auf die Sortimente Stammholz, Industrieholz und Energieholz (jeweils Nadel- und Laubholz), ist eine Eingangsgröße des Modells. Die Mengen stammen aus Modellierungen mit dem Forest Optimizer YAFO (Härtl & Knoke 2014) und repräsentieren das Jahr 2010. Papier- und Zellstoffproduktion wurden nicht im Modell abgebildet, da dieser Industriezweig eine Kaskadennutzung bereits weitgehend in die Prozesse integriert hat (Peche et al. 2011) und zudem keine nennenswerten Stoffflüsse zu anderen im Modell abgebildeten Holznutzungen auftreten.

Kaskadennutzung wurde in das Modell integriert, indem Spanplatten entweder aus Waldholz, aus Industrierestholz, aus Altholz oder aus einem Mix dieser Sortimente hergestellt werden konnten. Die alternative Verwertung für das anfallende Altholz war eine Verbrennung zur Energiegewinnung. Die Möglichkeit der stofflichen Nutzung des Altholzes (Kaskadennutzung) konnte im Modell unterdrückt werden, so dass anfallendes Altholz nur energetisch genutzt werden konnte.



**Abbildung 5: Stofffluss-Modell zur Untersuchung der Effekte von Kaskadennutzung in einem an Bayern angelehnten Holznutzungssystem. EFH: Einfamilienhaus; IH: Industrieholz.**

Um die Realität so akkurat wie möglich abzubilden und belastbare Aussagen zu ermöglichen, wurden für die vier stofflichen und vier energetischen Zielprodukte (Abbildung 5, Mitte) Mindestmengen definiert, die grundsätzlich bereitgestellt werden mussten. Diese Mengen wurden aus der Holzbilanz von Friedrich et al. (2012) abgeleitet.

In einem Teil der Modellierungen wurde der Effekt der Substitution von fossil basierten Produkten durch Holzprodukte integriert, indem für die bereitgestellten Holzprodukte die potentiell vermiedenen Umweltwirkungen der substituierten, konventionellen Produkte in Form von Gütschriften berücksichtigt wurden. Die Auswahl der Substitutionsprodukte orientierte sich an gängigen Anwendungen der Holzprodukte und den dafür üblichen fossilen bzw. mineralischen Alternativen. Für die plattenförmigen Holzwerkstoffe (Spanplatte, OSB) wurde ein Mix aus Gipsplatten und Möbeln aus Glas und Metall als Substitutionsprodukt angenommen, um deren hauptsächliche Verwendung im Möbelbau (~70 %) und im Bausektor (~20 %) (Mantau & Bilitewski 2010) zu repräsentieren. Zielgröße der Optimierung waren die gesamten, summierten Umweltwirkungen des Systems. Diese errechneten sich aus den summierten Umweltwirkungen der Prozesse der Holznutzung abzüglich der durch die Substitution ermöglichten Umweltvorteile.

In einem zweiten Modellansatz wurden keine Substitutionsgutschriften berücksichtigt. Dadurch sollte zum einen der Einfluss von teilweise subjektiv gewählten Substitutionsprodukten auf die Ergebnisse und damit deren Belastbarkeit untersucht werden. Zum anderen erlaubte dieser Ansatz eine erste Quantifizierung des Einflusses der Kaskadennutzung auf die Effizienz der Holzverwendung. Da keine Gutschriften vergeben werden, wird, bedingt durch das im Modell vorgegebene Ziel der Minimierung der Umweltwirkungen, nur die festgesetzte jeweilige Mindestmenge der Zielprodukte produziert. Falls die dazu notwendige Frischholzmenge in den Szenarien mit Kaskadennutzung geringer ist als in den Vergleichsszenarien, kann dies als Indikator für eine effizientere Holzverwendung gesehen werden.



## 6 Ergebnisse und Diskussion

### 6.1 Altholz aus dem Gebäudebestand als Ressourcenpotential für eine Holznutzung in Kaskaden (Veröffentlichung 1)

#### 6.1.1 Holz im Gebäudebestand

Für die Erfassung von Holz im Gebäudebestand sind vor allem Wohngebäude relevant. Obwohl sich in Bayern nahezu ein Drittel des gesamten umbauten Raums in Nichtwohngebäuden befindet, sind 92 % des Holzes im Wohngebäudebestand enthalten (Höglmeier et al. 2013), da hier die enthaltenen Holzmengen pro Raumeinheit deutlich höher sind (Tabelle 1). Ein Großteil des Holzes ist im Rohbau enthalten, insbesondere im Bereich des Daches und eventueller Wandkonstruktionen aus Holz. Das bestätigen auch die Untersuchungen von Mantau et al. (2013). Bei diesem Holz handelt es sich häufig um massive Holzbauteile in größeren Dimensionen, die für hochwertige Sekundäranwendungen geeignet und deshalb für eine kaskadische Nutzung von Bedeutung sind. Aufgrund unterschiedlicher Erhebungsmethoden ist ein Vergleich der Werte mit anderen Studien nur eingeschränkt möglich, jedoch können Tendenzen verglichen werden. Der deutliche Unterschied zwischen Wohn- und Nichtwohngebäuden, ebenso wie die ermittelten absoluten Werte, werden auch durch andere Untersuchungen für Deutschland bestätigt (Tabelle 1). Lichtensteiger & Baccini (2008) ermittelten eine durchschnittliche verbaute Holzmengen von 31,5 Tonnen Holz pro Wohngebäude in der Schweiz. Dies entspricht etwa 60 m<sup>3</sup> und liegt somit deutlich über den für Deutschland in verschiedenen Studien genannten Werten.

**Tabelle 1: Holz in Gebäuden – ein Vergleich verschiedener Studien (BRI: Bruttorauminhalt).**

Verfasser	Höglmeier et al. (2013)				Kroth et al. (1991)	BDZ (2009)	Mantau et al. (2013)	Weber-Blaschke et al. (2006a/b)
Region/Land	Bayern				Bayern	Deutschland	Deutschland	Bayern
	[m <sup>3</sup> /Gebäude]	[m <sup>3</sup> /1.000 m <sup>3</sup> BRI]				[m <sup>3</sup> /1.000 m <sup>3</sup> BRI]		[m <sup>3</sup> /Gebäude]
	Gesamt	Rohbau	Gesamt	Rohbau				
<b>Wohngebäude</b>	30,2	21,1	25,8	18,0	21,0	--	27,5	37
<b>Nichtwohngebäude</b>	19,4	12,7	4,7	3,1	12,0	5,4	6,7	--
<b>Gebäudebestand</b>	28,9	20,1	18,9	13,2	--	--	15,3	--

Von der Verwendung des Holzes im Gebäude kann aufgrund der Bautradition auf vorhandene Verunreinigungen geschlossen werden. Störstoffe sind zusammen mit der Art des Holzes und der Bauteilgröße ausschlaggebende Faktoren für die Eignung für potentielle Verwertungen, wurden in bisherigen Studien jedoch nicht berücksichtigt. Um diese Lücke in der vorliegenden Studie zu schließen, wurden die in den Inventaren enthaltenen Holzprodukte verschiedenen Bauteilgruppen und damit Verwendungsbereichen zugeordnet, um darauf aufbauend eine Abschätzung der Verunreinigungen und schlussendlich der Sekundärnutzungspotentiale zu ermöglichen. Mengenmäßig kommt den tragenden Bauteilen mit 34 % die größte Bedeutung zu, gefolgt von Brettern und Bohlen mit 29 %. Verleimte Holzbauteile (Brettschichtholz, Brettsperrholz) erlangten in den letzten Jahrzehnten eine zunehmende Bedeutung. Im Jahr 1957 betrug die Gesamtproduktion in Deutschland nur 5.000 m<sup>3</sup> (Wiegand 2012), eine vernachlässigbare Größe im Vergleich zum

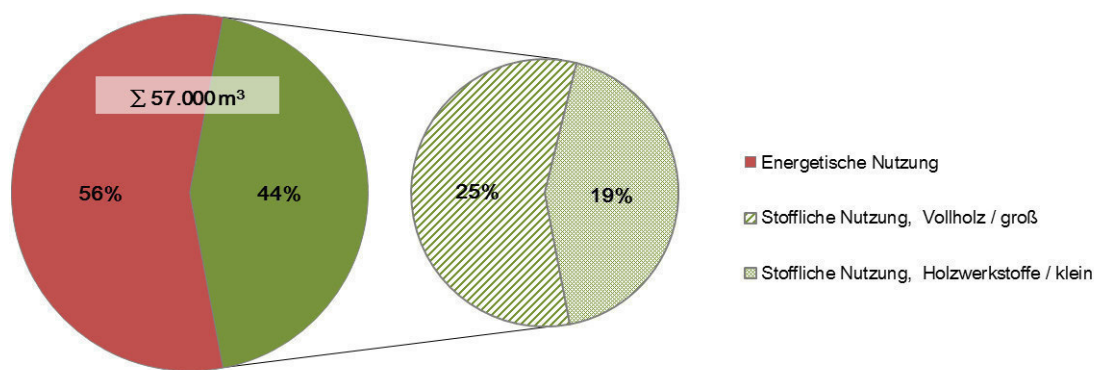
derzeitigen Produktionsvolumen von etwa 500.000 m<sup>3</sup> pro Jahr. Daher kann davon ausgegangen werden, dass dieses Holz in Gebäuden, die vor 1960 gebaut wurden, keine Rolle spielt, jedoch in Zukunft in zunehmenden Mengen im Abbruchholz enthalten sein wird.

### **6.1.2 Quantifizierung und Charakterisierung des Altholzflusses aus dem Bestand**

Unter Annahme einer statistisch belegten, durchschnittlichen jährlichen Abbruchrate von 0,06 % des Gebäudebestandes, fielen im Jahr 2011 in Bayern 57.000 m<sup>3</sup> Altholz aus Gebäudeabbrüchen an und standen für Sekundärverwendungen zur Verfügung (Abbildung 6). Gaggermeier et al. (2014) ermittelten für das Jahr 2012 eine Gesamtmenge von 1,14 Mio. Tonnen Altholz in Bayern. Lang (2004) beziffert den Beitrag des Bausektors zur anfallenden Altholzmenge für Deutschland mit 30 %, bezogen auf das Gewicht. Dieser Wert beinhaltet jedoch auch Bauabfälle und Holz aus Renovierungen. Dennoch ergibt sich eine erhebliche Diskrepanz zu der in dieser Studie ermittelten Menge. Eine mögliche Ursache kann eine Differenz zwischen den statistisch erfassten und den realen Abbruchraten sein. So konnte in einer Studie für das Bundesland Hessen (Sautter 2004) eine im Vergleich zur amtlichen Statistik um den Faktor 4 höhere reale Abbruchrate ermittelt werden. Nimmt man für das Studiengebiet Bayern einen ähnlichen Zusammenhang an, würde sich auch der ermittelte Altholzfluss aus Gebäudeabbrüchen vervierfachen. Die Mengendiskrepanz kann jedoch auch dadurch nur zum Teil erklärt werden. Insgesamt bestätigt sich die allgemein hohe Unsicherheit der Informationen bezüglich Herkunft und Qualitätsverteilung von Altholz.

Voraussetzung für eine effektive Kaskadennutzung ist Altholz hoher Qualität, d. h. sauberes, relativ homogenes und möglichst groß dimensioniertes Material. Je früher in einer potentiellen Nutzungskaskade (vgl. Abbildung 1) das Altholz erstmals eingesetzt wird, desto höher ist die Zahl der theoretisch möglichen Folgenutzungen, da die Qualität und damit die Verwendungsmöglichkeiten des Holzes in der Regel mit jedem Kaskadenschritt abnehmen. Für eine kaskadische Nutzung besonders geeignet sind daher vor allem größere, in der Regel als tragende Bauteile genutzte Massivhölzer (Brettschichtholz, Balken, etc.) die keine Störstoffe bzw. Verunreinigungen aufweisen. Massivhölzer kleinerer Dimension sowie Holzwerkstoffe können ebenso stofflich genutzt werden, sind jedoch in der Regel hinsichtlich ihrer Verwendungsmöglichkeiten deutlich eingeschränkter. 25 % des in der Potentialstudie quantifizierten Altholzes entfällt auf Massivholz (inkl. Leimholz) in größeren Dimensionen (Abbildung 6). Neben einer Wiederverwendung als tragende Bauteile, sind auch der Einsatz im Innenausbau oder die Herstellung von Brettern und Bohlen potentiell mögliche Verwertungsoptionen als erste Stufe einer Kaskade. Derzeit steht dieser Nutzung jedoch noch die deutsche Altholzverordnung entgegen, die jegliches Altholz aus tragenden Verwendungen automatisch der Klasse IV zuteilt und damit eine stoffliche Verwertung dieser hochwertigen Altholzfraktion faktisch unmöglich macht. Eine Anpassung der Altholzverordnung sollte eine stoffliche Nutzung dieses Holzes daher nicht mehr grundsätzlich ausschließen. Auch angesichts der deutlich verbesserten Möglichkeiten der maschinellen Altholzsortierung (Meinlschmidt et al.

2013) erscheint eine solche Novellierung sinnvoll, um die Verwertungspotentiale voll ausschöpfen zu können. Die verbleibenden 19 % des stofflich nutzbaren Altholzes eignen sich als Rohstoff für die Span- und Faserplattenherstellung. Die Qualitätszuordnung des Holzes erfolgte in der vorliegenden Studie unter Annahme der geringstmöglichen Beeinträchtigung durch Verunreinigungen. Daher muss davon ausgegangen werden, dass derzeit die realen stofflich nutzbaren Anteile niedriger sind als die in der Potentialabschätzung ermittelten Werte. Entwicklungen der Bautechnik und die Anpassung der DIN 68800-3 (DIN 2012), die die vorbeugende Verwendung von Holzschutzmitteln im Gebäudeinneren reduzieren, werden sich zukünftig jedoch positiv auf die potentiellen Altholzmengen für eine stoffliche Verwertung auswirken.



**Abbildung 6: Qualitätsverteilung und Nutzungspotential von Altholz aus Gebäudeabbrüchen im Jahr 2011 in Bayern.**

Um die Relevanz der ermittelten Holzmengen für eine mögliche Kaskadennutzung in Bayern besser einschätzen zu können, wurde eine Szenario-Analyse mit verschiedenen Abbruchraten durchgeführt. Da es sich bei Spanplatten um den derzeit einzigen mengenmäßig bedeutsamen stofflichen Einsatz von Altholz handelt, und sie darüber hinaus auch der einzige in Bayern hergestellte plattenförmige Holzwerkstoff sind, wurde dieses Produkt zur Referenzierung herangezogen. Die bayerische Spanplattenproduktion hatte im Jahr 2010 einen Rohstoffbedarf von 750.000 Tonnen Holz (Friedrich et al. 2012). Je nach angenommenem Szenario könnte durch die stoffliche Verwertung von geeignetem Altholz aus Gebäudeabbrüchen zwischen geringen 3 % und 83 % des jährlich in Bayern in der Spanplattenproduktion verwendeten Frischholzes ersetzt werden (Höglmeier et al. 2013). Derzeit werden etwa 30 % des Rohstoffbedarfs durch Altholz gedeckt. Holz aus Gebäudeabbrüchen kann also, wenn man realistische Gebäudelebensdauern annimmt, nur einen geringen Beitrag zur Rohstoffversorgung der Spanplattenindustrie leisten. Da die Abbruchraten von Gebäuden in Bayern seit den 1990er Jahren kontinuierlich abnehmen, kann auch in der Zukunft nicht von einem Anstieg auf ein Niveau ausgegangen werden, welches diese Situation signifikant ändert. Umso mehr sollte daher das Potential für höherwertige Verwendungen, das aufgrund der oft auftretenden größeren Dimensionen in Bauabbruchholz steckt, konsequent genutzt werden. Voraussetzung dafür ist jedoch ein sorgfältiger und geplanter Rückbau der

Gebäude, der eine sinnvolle Trennung der Baustoffe unter Berücksichtigung späterer Verwertungs- und Recyclingoptionen möglich macht.

Die Untersuchung liefert nur Daten für das Jahr 2011. Es kann jedoch davon ausgegangen werden, dass Ansätze wie ein „Design for recycling“, wo schon bei der Produktentwicklung die späteren Recyclingmöglichkeiten berücksichtigt und optimiert werden, in der Zukunft die Potentiale für eine Kaskadennutzung weiter erhöhen könnten. Ebenso wird die steigende Holzbauquote mittelfristig zu einer Erhöhung der anfallenden Altholzmengen aus Gebäudeabbrüchen führen.

### **6.1.3 Eignung der Analyse zur Abschätzung von Kaskadenpotentialen**

Der angewandte bottom-up-Ansatz schließt, ausgehend von Baustoff-Inventarlisten von Einzelgebäuden, auf den Gebäudebestand in Bayern. Das hat zur Folge, dass die ermittelten Daten einen hohen Detaillierungsgrad aufweisen, was angesichts des Ziels der Arbeit, den Altholzfluss aus dem Bestand nicht nur zu quantifizieren, sondern darüber hinaus auch ausreichende Informationen zur Qualität des Altholzes und für eine Abschätzung des Kaskadenpotentials bereitzustellen, positiv zu sehen ist. Zudem können so die Gebäudebestandteile identifiziert werden, die hauptsächlich zum Altholzfall beitragen.

Kritisch sind allenfalls die geringe Anzahl der berücksichtigten Gebäude und die dadurch bedingte hohe Varianz der enthaltenen Holzmengen zu sehen. Zusammen mit eventuellen Unsicherheiten durch die Umrechnung der oftmals als Flächen angegebenen Holzwerkstoffe in Volumeneinheiten, kann dies die Ermittlung der Werte für den bayerischen Gesamtbestand beeinflussen.

Die Untersuchung basiert auf Daten von in Bayern stehenden Gebäuden. Da die Bautraditionen in anderen Teilen Deutschlands vergleichbar sind, können die Ergebnisse grundsätzlich übertragen werden. So sind die Unterschiede zwischen urbanem und ländlichem Gebäudebestand im Hinblick auf die enthaltenen Holzmengen vermutlich größer als zwischen den verschiedenen Regionen Deutschlands. Die Studie unterscheidet zwar zwischen Wohn- und Nichtwohngebäuden, berücksichtigt jedoch darüber hinaus keine weiteren klassifizierenden Merkmale des Gebäudebestandes. Es wird davon ausgegangen, dass die 86 Gebäude den bayerischen Bestand hinreichend repräsentieren. Da es sich bei den Wohngebäuden jedoch mit einer Ausnahme um Gebäude mit nur wenigen Wohneinheiten handelt, kann nicht ausgeschlossen werden, dass der urbane Gebäudebestand unterrepräsentiert ist und die Holzmengen dadurch leicht überschätzt werden.

Bisher sind für Holz im Baubestand und für die entstehenden Altholzflüsse jedoch keine genaueren Daten vorhanden, so dass die Ergebnisse der Untersuchung einen wichtigen Baustein bei der Bewertung der Holzkaskadennutzung darstellen. Zur Vervollständigung sollten bei einer eventuellen zukünftigen Erhebung neben den Gebäudeabbrüchen auch Renovierungen, die ebenfalls zum Altholzstrom beitragen, berücksichtigt werden. Grundsätzlich erwies sich die angewendete Methode somit als geeignet, um das Ziel der Arbeit zu erreichen.

## 6.2 Ökobilanzielle Bewertung von Kaskadennutzung (Veröffentlichungen 2 und 3)

### 6.2.1 Altholzkaskaden im Vergleich mit Frischholz- und Nicht-Holz-Produkten

In den Veröffentlichungen 2 und 3 werden die Umwelteffekte einer Holznutzung in Kaskaden bewertet, indem verschiedene Altholzkaskaden mit funktionsgleichen Frischholz- und Nicht-Holz-Produkten verglichen werden. Die Ergebnisse der beiden Veröffentlichungen sind jedoch nicht absolut vergleichbar, da nur in der Veröffentlichung 3 die direkte energetische Nutzung des Altholzes Teil des Referenzsystems war (vgl. auch Kapitel 5.2). Dies liegt an der unterschiedlichen Zielsetzung der beiden Arbeiten. Bei der Veröffentlichung 2 standen die direkten Kaskadeneffekte im Fokus, wohingegen in der Veröffentlichung 3 ein Vergleich der Verwertungsoptionen für Altholz im Mittelpunkt stand.

Spanplatten sind derzeit die häufigste stoffliche Verwertung von Sekundärholz. Sie stellen im Vergleich zu Schnittholz (z. B. Bretter oder Kantholz) geringere Anforderungen an die Qualität und Beschaffenheit des eingesetzten Altholzes. Daher dominieren sie auch die untersuchten Kaskaden. Die Betrachtung wird jedoch um einen zweiten Holzwerkstoff (Oriented Strand Board aus Altholz) und um aus Altholzbalken gesägte Dielen erweitert.

#### Vergleich mit Frischholzprodukten

Der Vergleich der Kaskaden mit Frischholz-Produkten zeigte in der Mehrzahl von Varianten und Wirkungskategorien geringere Umweltwirkungen der Kaskadensysteme. Die Reduktionen sind ohne Berücksichtigung der direkten Verbrennung des Altholzes im Referenzsystem höher und erreichen für einen Großteil der berücksichtigten Wirkungskategorien Werte um -10 % (Höglmeier et al. 2014). Wenn die direkte Verbrennung als alternative Verwertungsoption mit berücksichtigt wird und folglich die kumulierte Energiemenge der verglichenen Nutzenkörbe höher ist, reduzieren sich die Vorteile des Kaskadensystems in nahezu allen Wirkungskategorien auf niedrige einstellige Prozentwerte (Höglmeier et al. accept.). Die größten Vorteile bedingt Kaskadennutzung in der Kategorie Landnutzung, da Altholz in dieser Kategorie im Gegensatz zu Frischholz nahezu keine Umweltwirkungen generiert. Eine Ausnahme ist der Vergleich einer Spanplatten-Kaskade mit frischholzbasierten Spanplatten in Veröffentlichung 3. Hier führt Kaskadennutzung zu einer höheren Landnutzung als die Verwendung von Frischholz. Grund ist die modellierte Systemraumerweiterung, in der die im Kaskadensystem fehlende Energiemenge aus Frischholz (Waldhackschnitzeln) bereitgestellt wird. Da im Referenzsystem die direkte energetische Nutzung des Altholzes enthalten ist, ist zur Herstellung der Nutzengleichheit der beiden Systeme ein hoher Frischholzeinsatz im Zielsystem notwendig, dessen Landnutzung der Kaskade zugerechnet werden muss. Daraus kann abgeleitet werden, dass Frischholz aus Umweltsicht somit möglichst nicht direkt energetisch verwertet werden sollte.

Angesichts der hohen Erwartungen, die insbesondere von politischer Seite in die Kaskadennutzung gesetzt werden, erscheinen die festgestellten Reduktionspotentiale gering. Es sollte jedoch berücksichtigt werden, dass das Frischholz-Referenzsystem, anhand dessen die

Kaskadennutzung bewertet wird, bereits relativ geringe Umweltwirkungen verursacht. Zudem tragen die Komponenten, die in den beiden Systemen unterschiedlich sind (Altholzaufbereitung vs. Frischholzproduktion, Transportdistanzen, etc.), insgesamt nur einen geringen Teil zu den gesamten Umweltwirkungen der Systeme bei. Das Potential für eine weitere Reduzierung der Umweltwirkungen ist folglich begrenzt. Eine Steigerung der Kaskadennutzung sollte somit keinesfalls zur Folge haben, dass verstärkt Frischholz zur Energiegewinnung genutzt wird, da dies zum Einen das zukünftig verfügbare Kaskadenpotential verringert und zum Anderen dadurch die positiven Umweltwirkungen der Kaskadennutzung teilweise verhindert werden. Diese Ergebnisse bestätigen die Überlegungen von Knauf (2015), der ebenfalls davon ausgeht, dass stoffliche Altholznutzung vor dem Hintergrund einer steigenden Energieholznachfrage zur Verbrennung des freiwerdenden Frischholzes führt und somit nur geringe positive Umwelt-Effekte auftreten, für die vor allem der reduzierte Bedarf von Trocknungsenergie bei der Spanplattenherstellung aufgrund des niedrigeren Wassergehalts von Altholz ausschlaggebend ist. Die Ergebnisse lassen den Schluss zu, dass Kaskadennutzung erst dann einen größeren positiven Effekt hätte, wenn durch die Mehrfachnutzung der Ressource auch mehr Holzprodukte entstehen, also der gesamte Holzprodukte-Pool wächst. Dies hätte einen höheren Substitutionseffekt und eine höhere Netto-Kohlenstoffspeicherung in den Produkten zur Folge. Die bloße Verschiebung von Altholz und Frischholz zwischen energetischer und stofflicher Nutzung, die bei gleichbleibenden Produktionsmengen zumindest bei Betrachtung eines Zeithorizonts von wenigen Jahren auftritt, kann per se keine größere Reduktion von Umweltwirkungen erzielen.

### **Vergleich mit Nicht-Holz-Produkten**

Der Vergleich von Altholzkaskaden mit Nicht-Holz-Produkten (Höglmeier et al. accept.) führt tendenziell zu uneinheitlicheren Ergebnissen über alle betrachteten Wirkungskategorien. Insbesondere weist das Kaskadensystem bei der in Ökobilanz-Studien der Holznutzung am häufigsten berücksichtigten Wirkungskategorie Klimaänderung (Klein et al. 2015, Wolf et al. 2015) höhere Werte aus als das Referenzsystem. Angesichts der oft genannten positiven Umweltwirkungen der Kaskadennutzung erscheint das überraschend, ist jedoch durch die modellierte Systemraumerweiterung bedingt. Die Altholzmenge verringert sich durch Prozessenergiebereitstellung und Erfassungsverluste im Laufe der Kaskade, so dass bei der energetischen Verwertung des letzten Kaskadenprodukts deutlich weniger Energie entsteht, als durch die direkte energetische Nutzung des Altholzes. Diese Differenz wird in den Nicht-Holz-Vergleichsvarianten mit Energie aus fossilen Rohstoffen ausgeglichen. Die dadurch verursachten Umweltwirkungen beeinflussen das Abschneiden der Kaskade vor allem in den Kategorien Klimaänderung sowie fossiler Primärenergiebedarf negativ. Dieser Effekt kann auch durch die Substitutionsvorteile der stofflichen Altholzprodukte der Kaskade nicht ausgeglichen werden. Das Ergebnis verdeutlicht, in Verbindung mit den oben beschriebenen Feststellungen für den Indikator Landnutzung, den prägenden Einfluss der Systemraumerweiterung auf das Ergebnis der Bewertung der Kaskadennutzung. Bereits Speckels (2001), der ebenfalls eine Systemraumerweiterung zum Vergleich von Spanplattenproduktion und energetischer

Altholzverwertung nutzte, stellte den dominanten Einfluss der Systemraumerweiterung mit fossilen Energieträgern auf den Vergleich verschiedener Altholzverwertungsalternativen fest.

### **Einflussfaktoren**

Den Einfluss der Systemraumerweiterung mit fossilen Rohstoffen auf die Ergebnisse kann auch die Berücksichtigung der Speicherung von Kohlenstoff in Holzprodukten nicht ausgleichen (Veröffentlichung 3). Zwar verbessert sich dadurch das Abschneiden der Kaskadennutzung in der Wirkungskategorie Klimaänderung, jedoch stellt die direkte energetische Verwertung des Altholzes weiterhin die zu präferierende Nutzungsalternative dar.

Neben den inhärenten Effekten der Methode der Systemraumerweiterung, erwies sich vor allem die Effizienz des Altholzmanagements als ein Faktor, der die Vergleichsergebnisse stark beeinflussen kann. Die Verringerung der Erfassungsrates auf 85 % der in einer Kaskadenstufe produzierten Produkte, führte dazu, dass in fast allen Wirkungskategorien die Kaskadennutzung an Konkurrenzkräften verlor. Ausschlaggebend dafür ist, dass neben der dadurch reduzierten Menge an stofflichen Altholzprodukten, vor allem die weiter vergrößerte Differenz der in den jeweiligen Systemen bereitgestellten Energie den Vergleich zu Ungunsten der Kaskade beeinflusst.

In beiden Veröffentlichungen (Höglmeier et al. 2014 & accept.) wurde der Einfluss der Anzahl der Kaskadenstufen untersucht. Es zeigte sich, dass sich eine Verringerung der Kaskadenstufen uneinheitlich auswirkt. Oftmals können vielstufige Kaskaden die untersuchten Umweltwirkungen stärker reduzieren als kürzere Kaskaden. Eine kürzere Kaskade erweist sich dann als vorteilhaft, wenn das Kaskadensystem, aufgrund des oben beschriebenen Effekts der unterschiedlichen Energiemengen und des starken Einflusses der fossil basierten Systemraumerweiterung, höhere Umweltwirkungen als das Vergleichssystem aufweist. Weniger Kaskadenstufen oder sogar die direkte Verbrennung des Altholzes und damit ein Erhalt der für eine energetische Nutzung zur Verfügung stehenden Altholzmenge, stellen in diesem Fall die unter Umweltsichtspunkten besseren Optionen dar.

Der Einfluss weiterer technischer und organisatorischer Faktoren wurde in Veröffentlichung 2 mit einer Sensitivitätsanalyse untersucht. Dabei erwiesen sich die Ergebnisse grundsätzlich als robust gegenüber den meisten durchgeführten Systemvariationen, wie beispielsweise geänderten Transportdistanzen des Altholzes und des zur Altholzaufbereitung eingesetzten Maschinentyps, und bestätigen damit ähnliche Ergebnisse von Speckels (2001). Die Effizienz der energetischen Nutzung des Altholzes am Ende der Kaskade stellte sich jedoch als ergebnisbestimmend heraus. Eine starke Verringerung des Wirkungsgrades des berücksichtigten Kraftwärmekopplungsprozesses führte zu höheren Umweltwirkungen der Kaskade im Vergleich zu Frischholzprodukten. Noch stärker wurde das Vergleichsergebnis durch Entscheidungen in Zusammenhang mit der Systemraumerweiterung beeinflusst. Falls die im Kaskadensystem gegenüber dem Frischholzsystem fehlende Energie aus fossilen Quellen bereitgestellt wird, führte Kaskadennutzung in vielen Fällen zu höheren Umweltwirkungen.

Ein Vergleich der absoluten Ergebnisse der Untersuchung mit anderen Studien ist aufgrund abweichender methodischer Ansätze schwierig. Unterschiede in den gewählten Ökobilanz-Wirkungskategorien und Methoden der Wirkungsabschätzung erschweren einen Vergleich. Gärtner et al. (2013) untersuchen eine Reihe von Kaskaden, die als Holz-Input Waldholz nutzen, und vergleichen diese mit funktionsgleichen Frischholz- und Nicht-Holz-Produkten. Die Kaskaden bedingen nahezu durchgängig geringere Umweltwirkungen als die jeweiligen Referenzsysteme. Da die Ergebnisse in Einwohnertageswerten dargestellt werden und die Systemgrenzen von den in der hier vorgestellten Studie gewählten abweichen, ist ein Vergleich der Ergebnisse nicht sinnvoll.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass die Bewertung der Altholzkaskaden mittels Systemraumerweiterung ein differenziertes Bild ergibt, und sich insbesondere bei der Wahl von fossilen Produkten zur Systemraumerweiterung uneinheitliche Ergebnisse für die verschiedenen Wirkungskategorien zeigen. Insgesamt ergibt sich eine gemäßigt positive Bewertung. Diese Einschätzung deckt sich mit der von Osterburg et al. (2013), die ebenfalls nur geringe Umweltvorteile durch Kaskadennutzung erwarten.

## **6.2.2 Methodische Diskussion**

### **Systemraumerweiterung**

Die von Heijungs & Guinée (2007) vorgebrachte Kritik an der ergebnisbestimmenden Wirkung der Entscheidungen, die im Zusammenhang mit Systemraumerweiterungen in Ökobilanzen getroffen werden, wurde durch die Ergebnisse dieser Arbeit bestätigt. Insbesondere die Wahl der Rohstoffe, die genutzt werden, um die Energie bereitzustellen, die in den Kaskadensystemen aufgrund einer geringeren End-of-life-Energie und aufgrund von Materialverlusten im Laufe der Kaskaden im Vergleich zu den Referenzsystemen fehlt, beeinflusste das Ergebnis der Bewertung. Dennoch stellt die Systemraumerweiterung die einzige mit der Norm ISO 14044 konforme Methode dar, um das Mehrproduktsystem einer Kaskadennutzung mit alternativen Produkten und Verwertungsmöglichkeiten zu vergleichen. Die beiden in Höglmeier et al. (accept.) vergleichend dargestellten Szenarien einer holzbasierten und einer auf nicht-nachwachsenden Rohstoffen basierenden Systemraumerweiterung können angesichts von Unsicherheiten bezüglich der in der Realität auftretenden Substitutionen als Grenzwerte gesehen werden, zwischen denen sich die tatsächlichen Effekte der Kaskadennutzung bewegen. Generell sollte die Darstellung alternativer Varianten der Systemraumerweiterung immer dann erfolgen, wenn auf Basis der Ergebnisse von Ökobilanzen Entscheidungen getroffen werden. Trotz dieser Unsicherheiten erwies sich die Systemraumerweiterung aber als geeignet, um ein Produktsystem ohne eindeutige Haupt- und Nebenprodukte ökobilanziell zu bewerten.



## Effizienzeffekte der Kaskadennutzung

Kaskadennutzung wird oft als Möglichkeit genannt, um die Ressource Holz effizienter zu verwenden, d. h. mehr Nutzen aus einer Einheit Material zu generieren. Da Ökobilanzen alle Umweltwirkungen von der Rohstoffproduktion bis zur Entsorgung erfassen, könnte davon ausgegangen werden, dass sich eine Steigerung der Ressourceneffizienz in den Ergebnissen der Ökobilanz durch deutliche Unterschiede zwischen den Systemen niederschlägt. Dies ist jedoch vor allem bei einem Vergleich mit Frischholzprodukten nicht der Fall. Dazu tragen mehrere Aspekte bei. Zum einen unterscheiden sich die Umweltwirkungen der Bereitstellung von Primär- und Sekundärmaterial bei Holz deutlich weniger als bei anderen Rohstoffen, insbesondere Metallen. Der Einsatz von Sekundärressourcen ermöglicht deshalb nur geringe Reduktionen. Zum anderen trägt die Ressourcenbereitstellung im Falle von Holzprodukten relativ wenig zu den gesamten Umweltwirkungen bei, insbesondere wenn es sich dabei um Holzwerkstoffe handelt, deren Ökobilanzen stark durch notwendige Additive (z. B. Klebstoffe) und ggf. fossile Prozessenergie beeinflusst werden (Höglmeier et al. 2014, Rivela et al. 2006). Reduktionen der Umweltwirkungen durch den Einsatz sekundärer Ressourcen (z. B. durch die Vermeidung von Trocknung) schlagen sich somit nur in geringem Umfang bei einer Betrachtung des gesamten Produktionssystems nieder. Darüber hinaus trägt aber auch die produkt-fokussiert Methode des „Nutzenkorbes“ dazu bei, dass eventuelle Effizienz-Vorteile der Kaskadennutzung in den Ökobilanzen nicht aufscheinen. Die zur Herstellung einer Nutzengleichheit nötige Systemraumerweiterung (Energie im Falle der Kaskade, Materialien im Falle des Referenzsystems) führt dazu, dass zusätzliche Ressourcennutzungen dem Kaskadensystem zugerechnet werden müssen und eventuelle Vorteile der eigentlichen Kaskade teilweise negieren. Eine Untersuchung des Umweltbundesamtes (UBA 2014b) stellt ebenfalls fest, dass potentielle kumulative Wirkungen der Kaskadennutzung durch nutzenbezogene Vergleiche nicht ausreichend dargestellt werden können, und schlägt statt dessen einen inputbezogenen Vergleich vor, ohne jedoch konkrete Methoden zu nennen. Ein input-bezogener Vergleich birgt jedoch die Herausforderung, dass die entstehenden Produkte nicht äquivalent sind und Systeme mit unterschiedlichem Nutzen verglichen werden. Da das Ziel jeder industriellen Produktion die Generierung von Nutzen ist, kann eine solche Untersuchung als zusätzlicher Aspekt gesehen werden, sollte jedoch eine nutzenbezogene Untersuchung nicht ersetzen.

Vor diesem Hintergrund wurde die in der Veröffentlichung 4 (Höglmeier et al. 2015) vorgestellte Studie zu Optimierungspotentialen der Holznutzung durch Kaskaden konzipiert. Eine Motivation für die Weiterentwicklung der Untersuchungen von Einzelkaskaden hin zu einem Systemmodell war die Tatsache, dass der in den Veröffentlichungen 2 und 3 gewählte Nutzenkorb-Ansatz grundsätzlich von einer unbegrenzten Verfügbarkeit von Frischholz ausgeht. Zwar wird die Produktmenge in den Nutzenkörben durch die Inputmenge des Altholzes festgelegt, die Menge an Frischholz zur Herstellung „fehlender“ Materialien und Energie wird jedoch nicht begrenzt. Angesichts einer zunehmenden Nachfrage nach Holz in Europa und auch weltweit (Mantau et al. 2010, UNECE/FAO 2011) bildet diese Annahme die Realität nur unzureichend ab. Das Stoffflussmodell geht daher von einer begrenzten Verfügbarkeit von Frischholz aus, der eine

festgelegte Produktnachfrage gegenübersteht, so dass eine steigende Nutzungseffizienz durch Kaskadennutzung abgebildet werden kann.

## **6.3 Auswirkungen kaskadischer Holznutzung auf das Gesamtsystem der Holzverwendung (Veröffentlichung 4)**

### **6.3.1 Einfluss der Kaskadennutzung auf Umweltwirkungen**

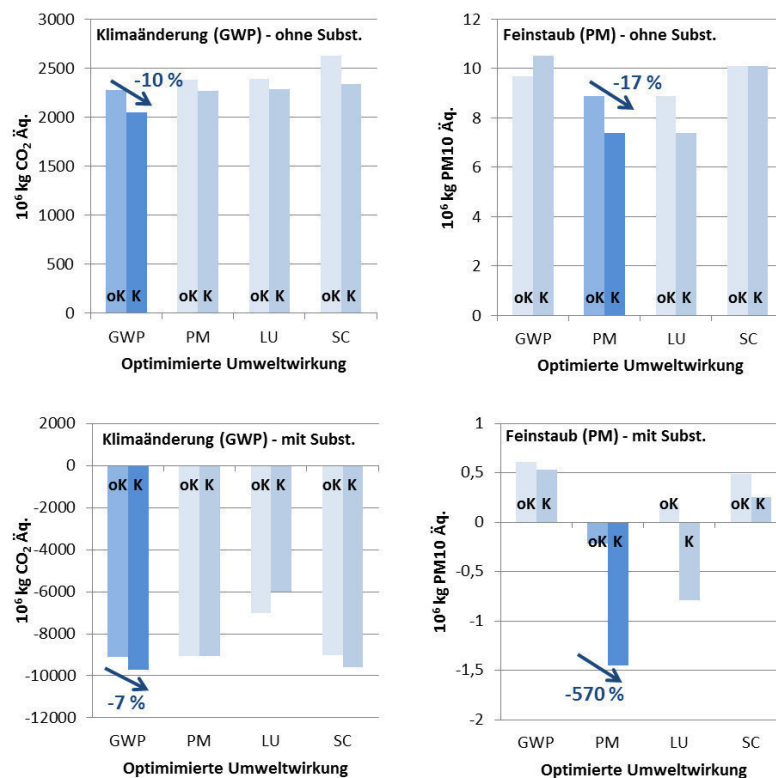
Zur Komplementierung der ökobilanziellen Bewertung spezifischer Nutzungskaskaden wurde mittels eines vereinfachten Stoffflussmodells der Holznutzung in Bayern erstmals der potentielle Einfluss von Kaskadennutzung auf der Ebene eines gesamten Nutzungssystems untersucht.

Im Fokus der Modellierung standen dabei weniger die absolute Höhe der Umweltwirkungen des Systems, als vielmehr die Unterschiede zwischen den Szenarien ohne Kaskadennutzung (*oK*) und mit Kaskadennutzung (*K*), da sich durch einen Vergleich die Auswirkungen der Kaskadennutzung auf die Umweltwirkungen der Holznutzung ableiten lassen. Der Vergleich der beiden Modellvariationen zeigt, dass Kaskadennutzung in nahezu allen Fällen zu niedrigeren Gesamt-Umweltwirkungen des Systems führt (Abbildung 7). Dies kann sowohl bei Modellierung mit, als auch ohne Berücksichtigung von Substitutionseffekten festgestellt werden. Die teils negativen Werte der Umweltwirkungen der Modellierung mit Substitution (Abbildung 7, unten) ergeben sich durch Gutschriften für die Substitution von Nicht-Holz-Produkten. Die Werte sind als theoretisch mögliches Potential der Kaskadennutzung zur Reduktion von Umweltwirkungen zu verstehen und nicht als eine Quantifizierung tatsächlich auftretender Emissionen. Die starke Reduktion der Feinstaubemissionen durch Kaskadennutzung in diesen Varianten ist durch den Ersatz von Scheitholz durch Pellets als Brennstoff bei der Bereitstellung von Heizenergie in Wohnhäusern bedingt. Dies wird im Modell möglich, da in den Kaskaden-Szenarien die Spanplatten aus Altholz hergestellt werden können, und somit mehr Industrierestholz für die Pellets-Produktion zur Verfügung steht. Die trotz der Berücksichtigung von Substitutionseffekten auftretenden Netto-Emissionen von Feinstaub (Abbildung 7, unten rechts) verdeutlichen, dass durch Holz im Vergleich zu fossilen Rohstoffen bei der Verbrennung oftmals höhere Feinstaubemissionen entstehen.

Die Modellierung ohne Substitutionseffekte bildet die tatsächlich durch Holznutzung bedingten Umweltwirkungen ab. In Szenarien mit Kaskadennutzung können die festgesetzten Mindestmengen der verschiedenen Holzprodukte mit bis zu 10 % weniger Treibhausgasemissionen produziert werden. Die Feinstaubemissionen können bis zu 17 % sinken. Vor dem Hintergrund, dass nur ein relativ kleiner Teil des Systems, nämlich die Spanplattenproduktion, direkt durch die Kaskadennutzung beeinflusst wird, die Bezugsgröße für die genannten relativen Werte jedoch die jeweilige Umweltwirkung des Gesamtsystems ist, sind diese Werte durchaus nennenswert. In Ländern, die noch einen Teil des anfallenden Altholzes deponieren, wären die durch eine Kaskadennutzung zu erzielenden Umweltvorteile noch höher, da das in dieser Studie als Referenz verwendete Modell (*oK*), analog zur rechtlichen Situation in

Deutschland, bereits von einer vollständigen energetischen Nutzung des anfallenden Altholzes ausgeht. Falls das Referenzmodell eine teilweise Deponierung mit höheren Umweltlasten vorsieht (Carpenter et al. 2013, Cherubini et al. 2009, Lippke et al. 2011), steigt auch die absolut und relativ mögliche Reduktion der Umweltwirkungen durch die Implementierung einer maximalen Kaskadennutzung. Der gewählte Ansatz vergleicht jeweils die im Hinblick auf eine spezifische Umweltwirkung optimalen Zustände des modellierten Systems, die in der Realität wohl selten anzutreffen sind. Die Höhe der erzielten Reduktionen von Umweltwirkungen sollte somit nicht als absolut gesehen werden, vielmehr zeigt die Modellierung tendenzielle Effekte der Kaskadennutzung auf.

Die durch Kaskadennutzung erzielte Reduktion der Treibhausgasemissionen im Studiengebiet Bayern entspricht in etwa 22.000 Einwohner-Jahreswerten der Treibhausgasemissionen in Deutschland (UBA 2013). Bezogen auf die bayerische Einwohnerzahl im Jahr 2013 entspricht dies einer Reduktion von 0,2 % der bayerischen Emissionen. Im Falle der Kategorie Feinstaub entspricht die potentiell mögliche Reduktion circa 550.000 Einwohner-Jahreswerten und damit etwa 4 % der bayerischen Emissionen (UBA 2014a). Wie bereits oben am Beispiel der erhöhten Pelletsnutzung erläutert, ist neben direkten Kaskadeneffekten auch die höhere Flexibilität des Holznutzungssystems durch die Integration einer stofflichen Verwertungsmöglichkeit für Altholz ausschlaggebend für die Veränderung der Umweltwirkungen. Denn je mehr potentielle Optionen zur Bereitstellung der notwendigen Produkte bestehen, desto mehr Möglichkeiten der Optimierung bietet das System.



**Abbildung 7: Ausgewählte Umweltwirkungen der Holznutzung in Bayern ohne (oben) und mit (unten) Berücksichtigung von Substitutionseffekten. Gruppierte Säulen zeigen den Unterschied zwischen Modellierung mit (K) und ohne (oK) Kaskadennutzung als Teil des Systems. (GWP: Klimaänderung, PM: Feinstaubemissionen, LU: landwirtschaftliche Landnutzung, SC: aggregierter Indikator)**

### 6.3.2 Einfluss der Kaskadennutzung auf Holzflüsse

Um den Einfluss der Kaskadennutzung auf die Holzverwendung zu untersuchen, wurden neben den Umweltwirkungen auch charakteristische Holzflusskennwerte betrachtet, wie beispielsweise der Anteil des in Kaskaden genutzten Holzes und der Anteil des Frischholzes, der zur Herstellung der Mindestproduktmengen nötig war. Erwartungsgemäß führt eine gesteigerte Kaskadennutzung zur Verringerung des energetisch genutzten Anteils des Altholzes, da sich im Zuge der stofflichen Nutzung die zur Verfügung stehende Menge durch Verbrennung des Altholzes zur Prozessenergiebereitstellung und durch Wiedererfassungsverluste reduziert. Dass die Reduktion der Altholzmenge im Laufe der Kaskaden auch auf Systemebene ein entscheidender Faktor für die Bewertung der Kaskadennutzung ist, zeigt die Sensitivitätsanalyse in Höglmeier et al. (2015). Je nach verwendetem Optimierungsparameter führten bereits Mengenverluste im einstelligen Prozentbereich dazu, dass eine stoffliche Nutzung des Altholzes zur Spanplattenproduktion aus Umweltsicht nicht mehr effizient ist, da die Nachteile der geringeren Energieausbeute am Kaskadenende die Vorteile des stofflichen Altholzeinsatzes überwiegen. Um Kaskadennutzung effizient zu implementieren, müssen diese Verluste minimiert werden. Dies würde auch dem Effekt entgegenwirken, dass bei einer hohen oder steigenden Nachfrage nach Holz zur energetischen Verwertung, wie es derzeit der Fall ist, mehr Kaskadennutzung zu mehr energetischer Frischholznutzung führt.

Bei den Varianten, die nur die jeweilige Mindestmenge der Holzprodukte bereitstellen (z. B. da keine Substitutionsgutschriften berücksichtigt werden), wird in den Kaskadenszenarien im Vergleich zu den Szenarien ohne Kaskadennutzung zwischen 3 % (Optimierung des Indikators Klimaänderung) und 15 % (Optimierung der Feinstaubemissionen) weniger Frischholz genutzt. Da in diesen Fällen die gesamte produzierte Energiemenge zwischen den Szenarien variiert, ist keine absolute Nutzengleichheit gegeben. Dennoch sind diese Zahlen ein starkes Indiz für eine Steigerung der Holznutzungseffizienz durch Kaskadennutzung. Denn trotz unterschiedlicher Energiemengen erfüllen alle Szenarien die Mengenvorgaben, jedoch mit unterschiedlichem Einsatz von Frischholz. Die optimale Nutzung des dadurch zusätzlich verfügbaren Holzes kann in diesem Modellansatz nicht bestimmt werden, jedoch kann aus den Ergebnissen darauf geschlossen werden, dass auch für diese Mengen eine Kaskadennutzung zu bevorzugen ist, wenn die Nachfrage nach stofflichen Holzprodukten in ausreichender Höhe besteht. Der ebenfalls mögliche Effekt, dass dieses Frischholzpotential angesichts einer hohen Nachfrage verstärkt energetisch genutzt wird, ist kritisch zu sehen, da sich dadurch die paradoxe Situation ergäbe, dass eine verstärkte stoffliche Altholznutzung eine Erhöhung der energetischen Nutzung von Frischholz zur Folge hat und dadurch mittelfristig zu einer Verringerung des kaskadisch nutzbaren Holzpotentials führt. Einen solchen „Rebound Effekt“ kennt man auch in anderen Bereichen, etwa wenn die Steigerung der Energieeffizienz eines Produktes zu dessen häufigerer Nutzung führt und dadurch ein Teil der erzielten Umweltvorteile wieder kompensiert wird. Aber selbst wenn Effizienzsteigerungen zu mehr stofflicher Holznutzung führen, bedeutet dies nicht zwangsläufig eine Steigerung der positiven Substitutionseffekte. Falls parallel dazu der Verbrauch zunimmt, bedienen die zusätzlichen Holzprodukte nur diese steigende Nachfrage, so dass keine

Nettoreduktion der Umweltwirkungen eintritt. Da diese Rebound-Effekte nur schwer vorhersagbar sind, gelten die Ergebnisse der Modellierung nur unter den getroffenen Annahmen bezüglich der nachgefragten Produktmengen.

### 6.3.3 Eignung des Systemmodells zur Bewertung von Kaskadeneffekten

Durch den vorgestellten systemischen Ansatz kann eine Reihe von methodischen Schwächen des Einzelkaskaden-Vergleichs ausgeglichen werden. Im produktzentrierten Untersuchungsansatz der Systemraumerweiterung schlägt sich ein potentiell effizienterer Holzeinsatz durch Kaskadennutzung im Vergleich zur Frischholznutzung nicht zwingend in substantiell geringeren Umweltwirkungen nieder. Grund sind die relativ geringen Beiträge der Rohholzbereitstellung zu den gesamten Umweltwirkungen des Systems, verglichen mit anderen Systemschritten, wie beispielsweise den Produktionsprozessen in der Weiterverarbeitung (s. a. Kap. 6.2.2). Um zusätzliche Ressourcenpotentiale durch Kaskadennutzung erkennen zu können, muss das gesamte System der Holznutzung einbezogen und dabei auch die begrenzte Holzverfügbarkeit berücksichtigt werden. Eine Betrachtung linearer Nutzungskaskaden kann zudem eventuelle Auswirkungen auf Holzprodukte außerhalb der eigentlichen Kaskade, etwa durch Sortimentsverschiebungen oder Auswirkungen auf das Vorhandensein von Koppelprodukten, nicht oder nur bedingt darstellen. Ebenso können durch einen systemumfassenden Ansatz, der stoffliche und energetische Holznutzung integriert, eventuell auftretende Verlagerungen von Umweltwirkungen berücksichtigt werden. Darüber hinaus können im Systemmodell die derzeitige Holznutzung und die Nachfrage nach Holzprodukten als Bedingungen berücksichtigt werden, so dass sichergestellt ist, dass auch ein System mit Kaskadennutzung diese Bedürfnisse erfüllt.

Die Kombination von Ökobilanzen mit einer linearen Optimierung ist ein häufig gewählter Ansatz (Pieragostini et al. 2012), auch in Verbindung mit der Nutzung verschiedener Biomasse-Potentiale (Čuček et al. 2012, Saner et al. 2014, Steubing et al. 2012, You et al. 2012). Zur Bewertung der Effekte einer Kaskadennutzung wurde diese Kombination noch nicht angewendet, erwies sich aber als geeignet, um sowohl Einflüsse auf Umweltwirkungen als auch Effekte auf Holzflüsse abzubilden. Das Modell weist jedoch auch Einschränkungen auf. Die Zeit ist nicht als Variable berücksichtigt, so dass alle Produkte de facto sofort für eine weitere Verwendung verfügbar sind. Dies bildet insbesondere die Kaskadennutzung nicht korrekt ab, da hier im Gegensatz zur Verwendung von Frischholz die Produkte nicht gleichzeitig, sondern nacheinander produziert werden. Zudem wurde, wie bereits erwähnt, biogener Kohlenstoff von der Berechnung des Treibhauspotentials ausgenommen. Der richtige Umgang mit biogenem Kohlenstoff in Ökobilanzen steht derzeit in der Diskussion (Hellweg & Mila i Canals 2014). Es wurden verschiedene Herangehensweisen vorgestellt (Brandão et al. 2013, Cherubini et al. 2011, Levasseur et al. 2012, Pawelzic et al. 2013), die sich im Hinblick auf den Zeithorizont und die Berücksichtigung der Speicherung von Kohlenstoff in Produkten, Böden und Wäldern unterscheiden. Bisher konnte jedoch kein einheitliches Vorgehen vereinbart werden. Aufgrund dessen, und da das verwendete

Modell keinen zeitlichen Bezug hat, wurden die Effekte der Kohlenstoffspeicherung in Holzprodukten nicht berücksichtigt, wenngleich davon auszugehen ist, dass sie eine Bewertung der Holznutzung im Vergleich zu fossilen und mineralischen Ressourcen positiv beeinflussen können (Bergman et al. 2014, Helin et al. 2012).

Das Modell basiert auf der Annahme, dass es sich bei der Holznutzung im Studiengebiet um ein geschlossenes System handelt. Importe von Rohholz oder Holzprodukten sind nicht berücksichtigt, obwohl in der Realität Warenflüsse in das Holznutzungssystem stattfinden. Dies hat den praktischen Grund, dass Daten zu Im- und Exporten für die Studienregion Bayern nicht verfügbar sind, da es sich nicht um eine eigenständige Volkswirtschaft handelt. Da die Untersuchung zum Ziel hat, die Effekte von Kaskadennutzung in einem System mit begrenztem Rohstoffangebot und einer festgesetzten Produkt-Nachfrage abzubilden, kann diese Schwäche des Modells vertreten werden. Rohholz und Produkte, die aus anderen Teilen Deutschlands in die Studienregion transportiert werden, verursachen aufgrund relativ einheitlicher Produktionsbedingungen ähnliche Umweltwirkungen und würden das Ergebnis daher nur bedingt beeinflussen. Jedoch hätte eine Öffnung des System für Warenflüsse von außen den Nachteil, dass Effekte der Kaskadennutzung auf die Effizienz der Holznutzung – ähnlich wie im Fall der Einzelkaskaden – nicht mehr im Modell abzubilden wären, da fehlende Rohholz- oder Produktmengen über Importe ausgeglichen werden können. Grundsätzlich kann somit festgestellt werden, dass das angewendete Modell trotz einiger Schwächen geeignet ist, um das Ziel der Untersuchung zu erreichen.

## 7 Synthese und Ausblick

### 7.1 Synthese und Schlussfolgerungen

In den vier Veröffentlichungen wird die Kaskadennutzung von Holz in der Studienregion Bayern hinsichtlich vorhandener Mengenpotentiale und Effekte auf die Höhe der Umweltwirkungen und die Effizienz der Holznutzung bewertet. Dieses abschließende Kapitel dient der zusammenfassenden Wertung dieser Arbeiten und der Ableitung von Antworten auf die in Kapitel 3 gestellten Forschungsfragen.

#### 1. **Welches Potential für eine hochwertige Sekundärnutzung in Kaskaden stellt das aus dem Gebäudebestand anfallende Altholz dar und mit welcher Methode kann es ermittelt werden?**

Die Untersuchung des im bayerischen Gebäudebestand enthaltenen Holzes und des durch Gebäudeabbrüche als Sekundärrohstoff anfallenden Altholzes zeigte, dass in der Gebäudeinfrastruktur ein erhebliches Ressourcenpotential für eine hochwertig stoffliche Altholzverwertung enthalten ist. Obwohl die im Jahr 2011 rechnerisch in Bayern angefallene Menge von 45.000 m<sup>3</sup> nur einen geringen Teil zur gesamten statistisch erhobenen Altholzmenge beiträgt, ist ihre Bedeutung für die Kaskadennutzung aufgrund ihrer Zusammensetzung erkennbar. Insbesondere großdimensionierte Massivholzteile, vorwiegend aus tragenden Verwendungen, wie z. B. Balken und Brettschichtholzträger, sind von Interesse, da die stofflichen Verwertungsmöglichkeiten dieser Hölzer deutlich vielfältiger sind als die von kleineren Teilen oder Holzwerkstoffen. Hier spielen vor allem die einfache Erfassung bzw. geringe Sammelverluste wegen der großen Dimensionen und die geringe Verunreinigung mit Störstoffen oder anderen Verbundstoffen eine Rolle. Obwohl gesetzliche Vorgaben der Altholzverordnung alle Hölzer aus lasttragenden Verwendungen derzeit nur zur energetischen Verwertung zulassen, sollte dieses Potential zukünftig besser genutzt werden. Eine Sortierung des Altholzes bereits an der Stelle des Anfalls, d. h. an der Abbruchstelle, könnte eine Wieder- oder Weiterverwendung von Holz aus dem Bauwesen unterstützen. Dort ist die Verwendung der einzelnen Hölzer noch bekannt, so dass besser auf mögliche Belastungen geschlossen werden kann, die bei einer späteren visuellen Ansprache im Verwertungsbetrieb nicht mehr ohne weiteres erkennbar sind. Um dies zu gewährleisten, sollte die Vorgabe einer sortenreinen Erfassung bereits an der Stelle des Anfalls in das Kreislaufwirtschaftsgesetz aufgenommen werden. Auch Ansätze eines „Design for disassembly“ oder „Design for Recycling“ unterstützen eine Kaskadennutzung (Kibert 2003 & 2012). Eine in dieser Arbeit nicht untersuchte Verwertungsmöglichkeit, die vor allem für Altholz aus tragenden Anwendungen interessant erscheint, ist die Wiederverwendung, also die nochmalige Nutzung in der gleichen Funktion. Wenn Holz in tragenden Anwendungen genutzt wird, können durch den Ersatz energieintensiver Materialien wie Stahl und Beton hohe Substitutionsgewinne erzielt werden (Gärtner et al. 2013, Gustavsson & Sathre 2011, Sandin et al. 2014). Eine nochmalige Anwendung von Altholz als tragendes Bauteil würde somit erheblich zur Steigerung der summierten Substitutionswirkungen pro Einheit des Rohstoffs Holz beitragen.

## **2. Können Umweltwirkungen durch eine Nutzung von Holz in Kaskaden im Vergleich zu alternativen Holz- und Nicht-Holz-Produkten und zur direkten energetischen Nutzung des Holzes verringert werden?**

Sowohl die ökobilanzielle Bewertung spezifischer Altholzkaskaden in Höglmeier et al. (2014) und Höglmeier et al. (accept.) als auch die Integration der Kaskadennutzung in ein Stoffflussmodell der Holznutzung in Bayern (Höglmeier et al. 2015) weisen für die Mehrzahl der betrachteten Varianten und Szenarien und für verschiedene Umweltwirkungen Reduktionspotentiale durch Kaskadennutzung aus. Erstmals konnte ökobilanziell gezeigt werden, dass die direkten Effekte der Kaskadennutzung nur zu relativ geringen Reduktionen der Umweltwirkungen führen. Sie sind vor allem durch Einsparungen von Prozessenergie bei der Spanplattenherstellung aufgrund des geringeren Wassergehalts von Altholz hackschnitzeln im Vergleich zu Waldholz sowie durch geringere Umweltwirkungen der Altholzaufbereitung im Vergleich zur Frischholzbereitstellung bestimmt. Lediglich bei der Quantifizierung der Landnutzung führt Kaskadennutzung im Vergleich zu Frischholznutzung direkt zu deutlichen Umweltvorteilen. Erst wenn die Substitution von konventionellen Produkten und Energieträgern, die oftmals höhere Umweltwirkungen als holzbasierte Alternativen bedingen, in die Untersuchung mit einbezogen werden, können substantielle Reduktionen in weiteren Wirkungskategorien der Ökobilanz erzielt werden (Gärtner et al. 2013, Sathre & Gustavsson 2006). Die angewendete Methode der Systemraumerweiterung zur Aufstellung nutzengleicher Ökobilanz-Systeme führt jedoch dazu, dass die erhöhten Umweltwirkungen fossiler Energieträger zum Ausgleich der in den Kaskadensystemen fehlenden Energiemengen die Beurteilung der Kaskadennutzung negativ beeinflussen.

Wenn das gesamte Holznutzungssystem in die Bewertung mit einbezogen wird, kann Kaskadennutzung die Umweltwirkungen der Holzverwendung reduzieren. Auch hier tragen mehrere Effekte bei. Zum einen bedingt die Herstellung von Altholzprodukten tendenziell geringere Umweltwirkungen. Zum anderen ermöglicht Kaskadennutzung einen flexibleren Einsatz der verschiedenen Holzsortimente bei der Produktherstellung und damit eine bessere Optimierbarkeit des Systems, so dass die Umweltwirkungen insgesamt verringert werden können.

Unter dem Eindruck einer steigenden Nachfrage nach Ressourcen kommt auch der Effizienz der Nutzung zusätzlich zu den verursachten Umweltwirkungen eine wachsende Bedeutung zu. Aufgrund der Nutzen-Fokussierung der Ökobilanzmethodik und der angewendeten Systemraumerweiterung erwies sich der Ansatz der Bewertung von Einzelkaskaden als wenig geeignet um Effizienz-Effekte der Kaskadennutzung abzubilden. Durch das gleichwertige Auffüllen der Systeme kann vor allem beim Vergleich der Kaskadennutzung mit Frischholzprodukten der Effekt einer mehrmaligen Ressourcennutzung nur unzureichend erfasst werden, da der Beitrag der Rohholzbereitstellung zu den gesamten Umweltwirkungen der Produktherstellung relativ gering ist. Durch Mehrfachnutzung erzielbare Einsparungen fallen bei den meisten Wirkungskategorien daher kaum ins Gewicht. Das Einsparpotential eines mehrfach genutzten Materials gegenüber einem nur einfach genutzten Material in Bezug auf eine begrenzte Rohstoffverfügbarkeit kann somit nicht dargestellt werden. Dies bestätigt auch die Studie des Umweltbundesamtes (UBA 2014b). Der neu



entwickelte Ansatz einer systemübergreifenden Betrachtung mit einer begrenzten Holzmenge, der eine festgesetzte Produktnachfrage gegenüber steht, zeigte jedoch, dass mit Kaskadennutzung tendenziell weniger Holz zur Bereitstellung der Produkte benötigt wird, die Effizienz der Nutzung also steigt.

Sowohl die Einzelkaskaden als auch das Systemmodell zeigen jedoch auch, dass bei einer verstärkten stofflichen Altholznutzung die Gefahr besteht, dass die durch Effizienzsteigerung nicht mehr benötigten Frischholzmengen direkt zur Energiegewinnung verwendet werden. Eine Steigerung der Kaskadennutzung erscheint deshalb nur in Verbindung mit einer Steigerung des gesamten stofflich genutzten Holzanteils und unter Berücksichtigung von möglichen Rebound-Effekten sinnvoll.

### **3. Welche technologischen, organisatorischen und methodischen Aspekte beeinflussen die ökobilanzielle Bewertung der Kaskadennutzung?**

Die Umweltbewertung der Kaskadennutzung erwies sich gegenüber den meisten untersuchten technischen und organisatorischen Adaptionen als robust. Eine Ausnahme stellt der Wirkungsgrad der energetischen Altholzverwertung dar. Eine Verbrennung des Altholzes in Anlagen mit hohem Wirkungsgrad fördert die Konkurrenzfähigkeit der Kaskadennutzung gegenüber äquivalenten Produkten aus Frischholz. Ebenso zeigen die Untersuchungen dieser Arbeit, dass die Anzahl der Kaskadenschritte die Bewertung der Kaskadennutzung beeinflusst, die Effekte jedoch nicht für alle Wirkungskategorien gleich sind. Mehrstufige Kaskaden erwiesen sich meist als positiv. Dies ist eng mit den Auswirkungen der Effizienz der Altholzerfassung zwischen den einzelnen Kaskadenstufen verknüpft. Verluste durch inkomplette Sammlung des Altholzes verringern die am Ende der Kaskade für eine energetische Nutzung zur Verfügung stehende Holzmenge. Das dadurch bedingte geringere Substitutionspotential ist vor allem beim Vergleich mit fossilen Energieträgern ausschlaggebend und verschlechtert die Bewertung der Kaskaden besonders in den Wirkungskategorien Klimaänderung und Primärenergiebedarf. Bei längeren Kaskaden steigen diese Verluste, so dass unter diesen Voraussetzungen weniger Kaskadenstufen oder die direkte energetische Verwertung aus Umweltsicht zu bevorzugen sind. Als weitere Einflussfaktoren erwiesen sich die Wahl der Vergleichsprodukte und die zur Systemraumerweiterung genutzten Produkte. Wird die direkte energetische Nutzung als Vergleich gewählt, wie in Veröffentlichung 3, und werden somit die Umweltwirkungen der Systeme durch die entstehenden Energiemengen dominiert, führt dies zu einer Verringerung der Vorteile der Kaskadennutzung. Auch die Effekte der Reduktion der Altholzmenge im Laufe der Kaskade treten in diesen Untersuchungen stärker auf.

Insgesamt kann festgestellt werden, dass die Bewertung der Kaskadennutzung in erster Linie von methodischen Aspekten beeinflusst wird und technische oder organisatorische Faktoren nur einen untergeordneten Einfluss haben.

#### **4. Wie beeinflusst Kaskadennutzung die derzeitige Holznutzung im Hinblick auf entstehende Umweltwirkungen und die Nutzungseffizienz?**

Die Ergebnisse zeigen, dass Kaskadennutzung vor allem aufgrund von dadurch möglichen veränderten Holznutzungen zur Reduktion der betrachteten Umweltwirkungen des Gesamtsystems beitragen kann, obwohl nur eines der Produkte, die Spanplatte, direkt betroffen ist. Indirekte Effekte, wie die Gefahr der Anreicherung von Schadstoffen in Produkten durch die verstärkte Verwendung von möglicherweise belastetem Altholz, sind im Modell nicht berücksichtigt. Jedoch werden neue technische Sortierverfahren diese Gefahr, die bereits heute aufgrund der derzeit praktizierten Altholzsortierung als gering einzuschätzen ist, in Zukunft weiter verringern. Zudem sollte darauf geachtet werden, dass eine Unterstützung der Kaskadennutzung nicht zum Anstieg der energetischen Nutzung von Frischholz führt. Diesen Aspekt zeigte vor allem das Stoffflussmodell auf, da auch dort die durch stoffliche Altholznutzung freiwerdenden Frischholzmengen aufgrund höherer Substitutionsgutschriften vorzugsweise energetisch genutzt wurden. Kaskadennutzung sollte folglich vor allem dann unterstützt werden, wenn dadurch eine steigende Nachfrage nach Holzprodukten bedient wird. Andernfalls sollte weiterhin bevorzugt Frischholz stofflich genutzt werden und Altholz energetisch verwertet werden.

Die Ergebnisse der Modellierung legen den Schluss nahe, dass in einem System mit Kaskadennutzung, das dadurch auch im Hinblick auf die Holzflüsse flexibler wird, tatsächlich eine effizientere Holzverwendung möglich ist. Dies ist vor allem dann ausschlaggebend, wenn die dadurch eingesparten Holzmengen wiederum möglichst effizient genutzt werden. Um die Vorteile einer Kaskadennutzung zu optimieren sollte daher die stoffliche Holznutzung per se gefördert werden.

Die in diesem Kapitel dargestellten Schlussfolgerungen basieren auf Fallstudien, die sich auf das Bundesland Bayern beziehen. Insbesondere bei den Ökobilanzen kamen jedoch größtenteils generische Datensätze mit dem Regionalbezug Deutschland oder Westeuropa zum Einsatz. Insofern können die Ergebnisse als repräsentativ für diese Regionen gesehen werden. Technische Parameter bei der Herstellung der Produkte und der Energiebereitstellung beeinflussen die Ergebnisse mehr als der regionale Bezug, so dass technologische Veränderungen die Gültigkeit der Schlussfolgerungen stärker beeinträchtigen können als ein sich ändernder örtlicher Bezug. Dies gilt in abgeschwächter Form ebenso für den Ansatz des Stoffstrommodells (Höglmeier et al. 2015), da zu erwarten ist, dass die beobachteten Effekte von Kaskadennutzung tendenziell auch in anderen Regionen mit einem ähnlichen forst- und holzwirtschaftlichen System (Mitteleuropa, Nordamerika) auftreten würden. Auch die Ergebnisse der Potentialstudie können grundsätzlich auf Deutschland übertragen werden. Dafür spricht, dass die für Bayern errechneten Holzmengen in Gebäuden in der gleichen Größenordnung liegen wie Ergebnisse von Studien mit deutschlandweitem Bezug (Kroth et al. 1991, Mantau et al. 2013). Da die Nutzung der Gebäude und deren Abbruch deutschlandweit ähnlich erfolgt, ist anzunehmen, dass die entstehenden Altholzpotentiale ebenso vergleichbar sind.

## 7.2 Ausblick

Die vorgestellte Potentialanalyse leitet erstmalig die Eignung von Altholz aus Gebäudeabbrüchen für eine Kaskadennutzung aus Daten zum Holzbestand in Bauwerken ab und liefert so Informationen, um eine weitergehende Implementierung des Kaskaden-Konzepts zu bewerten. Jedoch sollte in zukünftigen Untersuchungen der Fokus um Altholz aus Renovierungen und Bauholz erweitert werden. Der gewählte retrospektive Ansatz sollte mit einer in die Zukunft gerichteten Untersuchung kombiniert werden, auch wenn eine Prognose der Entwicklung der Bau- und Abbruchtätigkeit angesichts der langen Zeiträume mit Unsicherheiten behaftet ist. Die getroffenen Annahmen zum Umfang der während der Nutzungsphase erfolgenden Verunreinigungen des Holzes sollten verifiziert werden, beispielsweise mittels Untersuchungen tatsächlicher Althölzer aus Gebäudeabbrüchen.

Ökobilanzen sind als per se statische Betrachtungsmethode in ihrer ursprünglichen Form nicht zeit-sensitiv und erlauben eine Bewertung von Produktsystemen daher nur basierend auf dem Status Quo zu einem spezifischen Zeitpunkt. Weiterentwicklungen, wie beispielsweise dynamische Ökobilanzen (Levasseur et al. 2010), versuchen, die dadurch entstehende Informationslücke zu schließen, indem sie den Zeitpunkt der Entstehung von Emissionen in die Bewertung von Umweltwirkungen integrieren. Neben dem Zeitpunkt des Auftretens der Emissionen sind aber auch technologische Weiterentwicklungen und deren Einfluss auf die Bewertung von Produktsystemen in klassische Ökobilanzen nur unzureichend integrierbar. Das Konzept der „consequential LCA“ kann in diesem Kontext zu Verbesserungen beitragen, scheitert jedoch oft an der Verfügbarkeit geeigneter Daten. Auch die in dieser Arbeit vorgestellten Untersuchungen basieren auf Ökobilanzen ohne Berücksichtigung zeitlicher Aspekte. Beispielsweise kann die zeitliche Verschiebung der Verfügbarkeit des Altholzes für eine energetische Nutzung, die durch eine intensive Steigerung der Kaskadennutzung mittelfristig bedingt würde, zum Einsatz potentiell weniger umweltfreundlicher Energieträger in der Gegenwart führen. Gleichzeitig ist es denkbar, dass die Substitutionseffekte durch die energetische Nutzung am Ende der Kaskade geringer sind als bei einer heute stattfindenden direkten energetischen Nutzung, da durch technologische Weiterentwicklungen und einem Fortschritt in der Umstellung auf alternative Energien, zukünftig gegebenenfalls sauberere Energien durch die Altholz-basierte Energie ersetzt werden (Gärtner et al. 2013). Andererseits verlängert sich durch eine Kaskadennutzung die Speicherdauer des im Holz gebundenen Kohlenstoffs. Mit der Annahme, dass der Holzproduktespeicher insgesamt weiter wächst, sind damit vermutlich positive Klimaeffekte verbunden. Die sich dadurch ergebenden Einflüsse auf die Bewertung der Kaskadennutzung sind durch die hier vorgestellten Arbeiten noch nicht hinreichend erfasst. Weiterführende Analysen der Umwelteffekte einer Holznutzung in Kaskaden sollten somit den Aspekt „Zeit“ und die beschriebenen, damit in Verbindung stehenden Effekte von Kohlenstoffspeicherung und Technologiefortschritt berücksichtigen.

Die vorliegende Arbeit und die ihr zugrunde liegenden Teilarbeiten bewerten das Konzept der Kaskadennutzung auf Basis ökologischer Parameter. Insbesondere die systemumfassende Betrachtung zeigt, wie sich die Holznutzung im Studiengebiet noch umweltfreundlicher gestalten

ließe. Wie schon die bisher wenig diverse stoffliche Nutzung von Altholz zeigt, sind es jedoch meist nicht technische oder ökologische Gründe, die bestimmen, ob eine Verwertung praktiziert wird oder nicht. Neben Spanplatten existieren weitere Produkte, die zumindest teilweise aus Altholz hergestellt werden könnten, derzeit jedoch nur aus Frischholz produziert werden. Vor allem ökonomische Aspekte sind in diesem Zusammenhang von Bedeutung. In der hier vorgestellten Arbeit werden sie jedoch nicht untersucht, könnten aber in den entwickelten Ansatz eines sektorumfassenden Stoffflussmodells integriert werden. Zudem wird insbesondere die Holznutzung durch private Haushalte, sei es für Energieerzeugung oder als Material, allen öffentlichen Bekenntnissen zum Umweltschutz zum Trotz, oft mehr von praktischen Erwägungen und persönlichen Präferenzen bestimmt als von ökologisch-rationellen Überlegungen. Diese „weichen“ Faktoren können zusätzlich bei einer zukünftigen, weitergehenden Untersuchung der Holzkaskadennutzung mit aufgenommen werden. Ebenso kann die Betrachtung um weitere Kaskadenstufen außerhalb der klassischen Holzproduktherstellung erweitert werden. Denkbar wären beispielsweise die Holzvergasung, Ethanolherstellung oder der Einsatz von Altholz in der Papierproduktion.

Bei der Beurteilung der Effizienz der Holznutzung in Kaskaden handelt es sich um einen wichtigen Bestandteil einer Bewertung, da die Effizienzsteigerung oftmals als zentrales Argument für eine verstärkte Kaskadennutzung genannt wird. Herkömmliche vergleichende Ökobilanzen erwiesen sich in dieser Arbeit als nur bedingt geeignet, um fundierte Aussagen zu Effizienzeffekten abzuleiten. Insbesondere für den Rohstoff Holz, der am Ende des ersten Produktlebens auch ohne Kaskade nutzenbringend energetisch verwertet werden kann, ist es jedoch essentiell, die proklamierte Effizienzsteigerung durch Kaskadennutzung wissenschaftlich abzusichern. Das Stoffflussmodell ist ein erster geeigneter Ansatz. Darauf aufbauend sollten in zukünftigen Untersuchungen weitere Methoden gefunden werden, die auch über eine ökologische Bewertung hinausgehen. Angesichts der zunehmenden Nachfrage nach energetisch nutzbaren Sortimenten bedarf es dieser Untersuchungen, um eine etwaige, auch finanzielle Anreizsetzung zur Förderung der Kaskadennutzung von staatlicher Seite zu legitimieren. Ein über strukturpolitische Maßnahmen (Subventionen) hinausgehender gesetzlich verankerter Vorrang einer stofflichen Altholznutzung kann mit den Ergebnissen dieser Arbeit nicht begründet werden, da die gezeigten Umweltvorteile zu gering sind.

## 8 Literatur

- Arnold K, Geibler J, Bienge K, Stachura C, Borbonus S, Kristof K (2009a) Kaskadennutzung von nachwachsenden Rohstoffen. Ein Konzept zur Verbesserung der Rohstoffeffizienz und der Optimierung der Landnutzung. Wuppertal Papers Nr. 180, Wuppertal
- Arnold K, Bienge K, Geibler J, Ritthoff M, Targiel T, et al. (2009b) Klimaschutz und optimierter Ausbau erneuerbarer Energien durch Kaskadennutzung von Biomasse. Potenziale, Entwicklungen und Chancen einer integrierten Strategie zur stofflichen und energetischen Nutzung von Biomasse. Wuppertal Institut, Wuppertal Report Nr.5
- Atherton J (2007) Declaration by the Metals Industry on Recycling Principles. Int J LCA 12(1):59–60. doi: 10.1065/lca2006.11.283
- Baudirektion Kanton Zürich (2010) Bau- und Rückbau: Massenflüsse 1900-2020. Modellierung der wichtigsten Materialflüsse rund um das Bauwerk Kanton Zürich
- BDZ – Bundesverband der Deutschen Zementindustrie (2009) Baustoffverbrauch im Nicht-Wohnungsbau 2009: Ergebnisse einer Erhebung zum Baustoffverbrauch nach Bauteilen. Bundesverband der Deutschen Zementindustrie e.V.
- Bergeron FC (2014) Assessment of the coherence of the Swiss waste wood management. Res Con Rec 91:62–70. doi: 10.1016/j.resconrec.2014.07.011
- Bergman R, Puettmann M, Taylor A, Skog KE (2014) The Carbon Impacts of Wood Products. Forest Products Journal 64(7-8):220–231. doi: 10.13073/FPJ-D-14-00047
- Bilitewski B, Härdtle G, Marek K (2009) Abfallwirtschaft. Handbuch für Praxis und Lehre, 4. aktualisierte und erw. Aufl. Springer, Berlin
- BKI GmbH (2011) Software und Datenbank "BKI Kostenplaner". Version 14. Baukosteninformationszentrum Deutscher Architektenkammern, Stuttgart
- BMELV – Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz / BMU – Bundesministerium für Umwelt Naturschutz und Reaktorsicherheit (2010) Nationaler Biomasseaktionsplan für Deutschland. Beitrag der Biomasse für eine nachhaltige Energieversorgung, Berlin
- BMU – Bundesministerium für Umwelt Naturschutz und Reaktorsicherheit (2002) Nachhaltigkeitsstrategie. Perspektiven für Deutschland, Berlin
- BMU – Bundesministerium für Umwelt Naturschutz und Reaktorsicherheit (2012) Deutsches Ressourceneffizienzprogramm (ProgRess). Programm zur nachhaltigen Nutzung und zum Schutz der natürlichen Ressourcen. Beschluss des Bundeskabinetts vom 29.2.2012, Berlin
- BMVBS – Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (2011) Typologie und Bestand beheizter Nichtwohngebäude in Deutschland. BMVBS-Online-Publikation 16/2011, Berlin

- BMWi – Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (2015) Energiepreise und Energiekosten. <http://www.bmwi.de/DE/Themen/Energie/Energiedaten-und-analysen/Energiedaten/energiepreise-energiekosten.html>, Aufrufdatum: 13.01.2015
- Börjesson P, Gustavsson L (2000) Greenhouse gas balances in building construction: wood versus concrete from life-cycle and forest land-use perspectives. *Energy Policy* 28(9):575–588. doi: 10.1016/S0301-4215(00)00049-5
- Brandão M, Levasseur A, Kirschbaum MUF, Weidema BP, Cowie AL, Jørgensen SV, Hauschild MZ, Pennington DW, Chomkamsri K (2013) Key issues and options in accounting for carbon sequestration and temporary storage in life cycle assessment and carbon footprinting. *Int J LCA* 18(1):230–240. doi: 10.1007/s11367-012-0451-6
- Bringezu S (2012) Potenziale und Perspektiven von Urban Mining. Presentation at the 3rd Congress on Urban Mining, Iserlohn, Germany
- CaReWood (2014) Homepage des EU-Projektes “Cascading Recovered Wood”, [www.carewood.eu](http://www.carewood.eu), Aufrufdatum: 16.12.2014
- Carpenter A, Jambeck JR, Gardner K, Weitz K (2013) Life Cycle Assessment of End-of-Life Management Options for Construction and Demolition Debris. *Journal of Industrial Ecology* 17(3):396–406. doi: 10.1111/j.1530-9290.2012.00568.x
- Carus M, Raschka A, Piotrowski S (2010) Entwicklung von Förderinstrumenten für die stoffliche Nutzung von nachwachsenden Rohstoffen in Deutschland (Kurzfassung). Volumen, Struktur, Substitutionspotenziale, Konkurrenzsituation und Besonderheiten der stofflichen Nutzung sowie Entwicklung von Förderinstrumenten, nova-Institut GmbH, Hürth
- Cherubini F, Bargigli S, Ulgiati S (2009) Life cycle assessment (LCA) of waste management strategies: Landfilling, sorting plant and incineration. *Energy* 34(12):2116–2123. doi: 10.1016/j.energy.2008.08.023
- Cherubini F, Peters GP, Berntsen T, Strømman AH, Hertwich E (2011) CO<sub>2</sub> emissions from biomass combustion for bioenergy: Atmospheric decay and contribution to global warming. *GCB Bioenergy* 3(5):413–426
- Coelho A, Brito J de (2012) Influence of construction and demolition waste management on the environmental impact of buildings. *Waste Management* 32(3):532–541
- Čuček L, Varbanov PS, Klemeš JJ, Kravanja Z (2012) Total footprints-based multi-criteria optimisation of regional biomass energy supply chains. *Energy and Buildings* 44(1):135–145
- Curran MA (2012) *Life Cycle Assessment Handbook*. Wiley, New York
- Deroubaix G (2014) The DEMOWOOD project. From used wood to secondary wood products, an important resource and a large potential for improvement of its management. DEMOWOOD final conference, 06.05.2014, IFAT, München
- Deutsche Bundesregierung (2003) Verordnung über Anforderungen an die Verwertung und Beseitigung von Altholz (Altholzverordnung - AltholzV). AltholzV

- Deutsche Bundesregierung (2012) Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen. KrWG
- Dias AC, Louro M, Arroja L, Capela I (2009) Comparison of methods for estimating carbon in harvested wood products. *Biomass and Bioenergy* 33(2):213–222. doi: 10.1016/j.biombioe.2008.07.004
- Diederichs SK (2014) 2010 Status quo for life cycle inventory and environmental impact assessment of wood-based panel products in Germany. *Wood and Fiber Science* 46(3):340–355
- DIN Deutsches Institut für Normung e. V. (2006a) EN ISO 14040 - Ökobilanz - Grundsätze und Rahmenbedingungen. Beuth Verlag, Berlin
- DIN Deutsches Institut für Normung e. V. (2006b) ISO 14044 - Ökobilanz - Anforderungen und Anleitungen. Beuth Verlag, Berlin
- DIN Deutsches Institut für Normung e. V. (2012) DIN 68800-3. Holzschutz – Teil 3. Vorbeugender Schutz von Holz mit Holzschutzmitteln. Beuth Verlag, Berlin
- DIN Deutsches Institut für Normung e. V. (2014) Biobasierte Produkte –Ökobilanzen. Deutsche Fassung prEN 16760:2014. Entwurf. Beuth Verlag, Berlin
- Dodoo A, Gustavsson L, Sathre R (2009) Carbon implications of end-of-life management of building materials. *Res Con Rec* 53(5):276–286. doi: 10.1016/j.resconrec.2008.12.007
- Dornburg V (2004) Multi-functional Biomass Systems. Dissertation an der Universität Utrecht. <http://igitur-archive.library.uu.nl/dissertations/2004-1207-114735/full.pdf> (Aufrufdatum: 15.12.2014)
- Dornburg V, Faaij APC (2005) Cost and CO<sub>2</sub>-emission reduction of biomass cascading: Methodological aspects and case study of SRF poplar. *Climatic Change*(71):373–408
- Döring P, Mantau U (2012) Standorte der Holzwirtschaft - Sägeindustrie - Einschnitt und Sägenebenprodukte 2010. Universität Hamburg, Zentrum Holzwirtschaft. Arbeitsbereich: Ökonomie der Holz- und Forstwirtschaft, Hamburg
- Dubreuil A, Young SB, Atherton J, Gloria TP (2010) Metals recycling maps and allocation procedures in life cycle assessment. *Int J LCA* 15(6):621–634. doi: 10.1007/s11367-010-0174-5
- Ekvall T (1999) Key methodological issues for life cycle inventory analysis of paper recycling. *Journal of Cleaner Production*(7):281–294
- EPEA Internationale Umweltforschung (2009) CO<sub>2</sub>-Speicherung und Wertschöpfung – Holznutzung in einer Kaskade, Langfassung. Hamburg
- Erbreich M (2004) Die Aufbereitung und Wiederverwendung von Altholz zur Herstellung von Mitteldichten Faserplatten (MDF). Dissertation an der Universität Hamburg, Hamburg

- Essel R, Breitmayer E, Carus M, Fehrenbach H, et al. (2014) Discussion Paper: Defining cascading use of biomass. R&D-Project "Increasing resource efficiency by cascading use of biomass - from theory to practice", nova-Institut GmbH, Hürth
- Europäische Kommission (2010) EUROPE 2020. A strategy for smart, sustainable and inclusive growth. Communication from the Commission, Brussels
- Europäische Kommission (2011) A resource-efficient Europe. Flagship initiative under the Europe 2020 Strategy. Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions, Brussels
- Europäische Kommission (2013) A new EU Forest Strategy: for forests and the forest-based sector. Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions, Brussels
- Europäischer Rat (1999) Richtlinie 1999/31/EG des Rates vom 26. April 1999 über Abfalldeponien. In: Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaften
- European Biomass Association, Confederation of European Forest Owners, et al. (2013) Joint statement on cascaded use of wood, Brüssel
- Finnveden G (1999) Methodological aspects of life cycle assessment of integrated solid waste management systems. Res Con Rec 26(3-4):173–187
- Finnveden G, Hauschild MZ, Ekvall T, Guinée J, Heijungs R, Hellweg S, Koehler A, Pennington D, Suh S (2009) Recent developments in Life Cycle Assessment. J Env Manage 91(1):1–21. doi: 10.1016/j.jenvman.2009.06.018
- Fleischer G (1994) Methodik des Vergleichs von Verwertungs-/Entsorgungswegen im Rahmen der Ökobilanz. Abfallwirtschaft 6(10):697–701
- Fleischer G, Schmidt W (1996) Functional unit for systems using natural raw materials. Int J LCA 1(1):23–27
- Fraanje PJ (1997a) Cascading of pine wood. Res Con Rec 19:21–28
- Fraanje PJ (1997b) Cascading of renewable resources hemp and reed. Industrial Crops and Products 6(3-4):201–212. doi: 10.1016/S0926-6690(97)00009-5
- Fraanje PJ (1999) Use of wood in new Dutch one family dwellings since 1969. Eur J Wood Wood Prod 57:407–417
- Friedrich S, Schumann C, Zormaier F, Schulmeyer F, Dietz E, Burger F, Hammerl R, Borchert H, Egner J (2012) Energieholzmarktbericht 2010. LWF Wissen
- Frischknecht R, Jungbluth N (2007) Overview and Methodology. ecoinvent report No. 1. Swiss Center for Life Cycle Inventories, Dübendorf



- Frischknecht R (2010) LCI modelling approaches applied on recycling of materials in view of environmental sustainability, risk perception and eco-efficiency. *Int J LCA* 15(7):666–671. doi: 10.1007/s11367-010-0201-6
- Gaggermeier A, Friedrich S, Hiendlmeier S, Zettinig C (2014) *Energieholzmarkt Bayern 2012. Untersuchung des Energieholzmarktes in Bayern hinsichtlich Aufkommen und Verbrauch. Abschlussbericht 03/2014.* Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft, Freising
- Gala AB, Raugei M, Fullana-i-Palmer P (2015) Introducing a new method for calculating the environmental credits of end-of-life material recovery in attributional LCA. *Int J LCA* 20(5):645–654.
- Gallis C (ed) (2007) *Management of Recovered Wood. Reaching a Higher Technical, Economic and Environmental Standard in Europe.* Proceedings of the 3rd European COST E31 Conference, Klagenfurt
- GAMS Development Corporation (2013) *The General Algebraic Modeling System.* GAMS Development Corporation, Washington DC. Online: [www.gams.com](http://www.gams.com)
- Gärtner S, Hienz G, Keller H, Müller-Lindenlauf M (2013) *Gesamtökologische Bewertung der Kaskadennutzung von Holz. Umweltauswirkungen stofflicher und energetischer Holznutzungssysteme im Vergleich.* Heidelberg
- Guinée JB (2002) *Handbook on life cycle assessment. Operational guide to the ISO standards.* Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Boston
- Gustavsson L, Sathre R (2011) Energy and CO<sub>2</sub> analysis of wood substitution in construction. *Climatic Change* 105(1-2):129–153. doi: 10.1007/s10584-010-9876-8
- Härtl F, Knoke T (2014) The influence of the oil price on timber supply. *Forest Policy and Economics* 39:32–42. doi: 10.1016/j.forpol.2013.11.001
- Heijungs R, Guinée JB (2007) Allocation and 'what-if' scenarios in life cycle assessment of waste management systems. *Waste Management* 27(8):997–1005. doi: 10.1016/j.wasman.2007.02.013
- Helin T, Sokka L, Soimakallio S, Pingoud K, Pajula T (2013) Approaches for inclusion of forest carbon cycle in life cycle assessment - A review. *GCB Bioenergy* 5(5):475–486
- Hellweg S, Mila i Canals L (2014) Emerging approaches, challenges and opportunities in life cycle assessment. *Science* 344(6188):1109–1113. doi: 10.1126/science.1248361
- Höglmeier K, Weber-Blaschke G, Richter K (2013) Potentials for cascading of recovered wood from building deconstruction—A case study for south-east Germany. *Res Con Rec* 78:81–91. doi: 10.1016/j.resconrec.2013.07.004
- Höglmeier K, Weber-Blaschke G, Richter K (2014) Utilization of recovered wood in cascades versus utilization of primary wood – a comparison with life cycle assessment using system expansion. *Int J LCA* 19(10):1755–1766

- Höglmeier K, Steubing B, Weber-Blaschke G, Richter K (2015) LCA-based optimization of wood utilization under special consideration of a cascading use of wood. *J Env Manage* 152:158–170. doi: 10.1016/j.jenvman.2015.01.018
- Höglmeier K, Weber-Blaschke G, Richter K (accept.) Evaluation of wood cascading. In: Dewulf J, Alvarenga R, Meester S de (eds) *Sustainability Assessment of Renewables-Based Products: Methods and Case Studies*. Wiley, Chichester
- Jungmeier G, Merl A, McDarby F, Gallis C, Hohenthal C, Petersen A, Spanos K (2001) End of use and end of life aspects in LCA of wood products – Selection of waste management options and LCA integration. In: Jungmeier G (ed) *Life cycle assessment of forestry and forest products. Achievements of COST Action E9 working group 3 'End of life: recycling, disposal and energy generation'*. Joanneum, Institute of Energy Research, Graz, pp 4/1-4/25
- Jungmeier G, Werner F, Jarnehammar A, Hohenthal C, Richter K (2002) Allocation in LCA of wood-based products. Experiences of Cost Action E9. Part I. Methodology. *Int J LCA* 7(5):290–294. doi: 10.1007/BF02978890
- Keegan D, Kretschmer B, Ellbersen B, Panoutsou C (2013) Cascading use: a systematic approach to biomass beyond the energy sector. *Biofuels, Bioprod. Bioref.* 7:193–206
- Kibert CJ (2003) Deconstruction: the start of a sustainable materials strategy for the built environment. *UNEP Industry and Environment* 26(2/3):84–88
- Kibert CJ (2012) *Sustainable Construction. Green Building Design and Delivery*. Wiley, London
- Kim MH, Song HB (2014) Analysis of the global warming potential for wood waste recycling systems. *J Clean Prod* 69:199–207. doi: 10.1016/j.jclepro.2014.01.039
- Klein D, Wolf C, Schulz C, Weber-Blaschke G (2015) 20 years of life cycle assessment (LCA) in the forestry sector: state of the art and a methodical proposal for the LCA of forest production. *Int J LCA* 20(4):556–575. doi: 10.1007/s11367-015-0847-1
- Klöpffer W, Grahl B (2012) *Ökobilanz (LCA). Ein Leitfaden für Ausbildung und Beruf*, 1. Auflage. Wiley-VCH, Weinheim
- Knauf M (2015) Waste hierarchy revisited — an evaluation of waste wood recycling in the context of EU energy policy and the European market. *Forest Pol Econ* 54:58–60. doi: 10.1016/j.forpol.2014.12.003
- Kroth W, Kollert W, Filippi M (1991) *Analyse und Quantifizierung der Holzverwendung im Bauwesen*. Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau, München
- Lang A (2004) *Charakterisierung des Altholzaufkommens in Deutschland. Rechtliche Rahmenbedingungen, Mengenpotenzial, Materialkennwerte*. Mitteilungen der Bundesforschungsanstalt für Forst- und Holzwirtschaft, vol 215, Hamburg
- Levasseur A, Lesage P, Margni M, Deschênes L, Samson R (2010) Considering Time in LCA: Dynamic LCA and Its Application to Global Warming Impact Assessments. *Env Sci Technol* 44(8):3169–3174. doi: 10.1021/es9030003

- Levasseur A, Brandão M, Lesage P, Margni M, Pennington D, Clift R, Samson R (2012) Valuing temporary carbon storage. *Nature Climate Change* 2(1):6–8
- Lichtensteiger T, Baccini P (2008) Exploration of urban stocks. *J Environ Eng Manage* 18(1):41–48
- Lippke B, Oneil E, Harrison R, Skog K, Gustavsson L, Sathre R (2011) Life cycle impacts of forest management and wood utilization on carbon mitigation: knowns and unknowns. *Carbon Management* 2(3):303–333. doi: 10.4155/cmt.11.24
- Loth R, Hanheide M (2004) Entwicklung eines mehrstufigen Anlagenverfahrens zur Verarbeitung von Restholz zur Erzeugung von hochwertigen OSB-Spänen für die Herstellung von OSB-Platten. Abschlussbericht für die Deutsche Bundesstiftung Umwelt, Bielefeld
- Mantau U, Weimar H (2003) Standorte der Holzwirtschaft. Aufkommens- und Vermarktungsstruktur von Altholz. Abschlussbericht. Zentrum Holzwirtschaft, Universität Hamburg
- Mantau U, Bilitewski B (2010) Stoffstrom-Modell- Holz 2007. Rohstoffströme und CO<sub>2</sub>-Speicherung in der Holzverwendung. Forschungsbericht für das Kuratorium für Forschung und Technik des Verbandes der Deutschen Papierfabriken e.V. (VDP), Celle
- Mantau U, Saal U, Prins K, Steierer F, Lindner M (2010) EUwood - Real potential for changes in growth and use of EU forests: Final report, Hamburg/Germany
- Mantau U, Weimar H, Kloock T (2012) Standorte der Holzwirtschaft - Holzrohstoffmonitoring. Altholz im Entsorgungsmarkt - Aufkommens- und Vertriebsstruktur 2010. Abschlussbericht, Hamburg
- Mantau U, Döring P, Hiller D (2013) Holzeinsatz im Bauwesen – Verwendungsstrukturen nach Gebäuden und Gewerken. In: Weimar H, Jochem D (eds) Holzverwendung im Bauwesen - Eine Marktstudie im Rahmen der "Charta für Holz". Thünen Report 9. Thünen-Institut, Hamburg, pp 1–70
- Mantau U (2014) Wood flow analysis: Quantification of resource potentials, cascades and carbon effects. *Biomass and Bioenergy*, <http://dx.doi.org/10.1016/j.biombioe.2014.08.013>
- Marland ES, Stellar K, Marland GH (2010) A distributed approach to accounting for carbon in wood products. *Mitig Adapt Strateg Glob Change* 15(1):71–91. doi: 10.1007/s11027-009-9205-6
- Marutzky R (2006) Energetische und stoffliche Verwertung von Holzresten und Altholz in der Holzwerkstoffindustrie - eine aktuelle Bestandsaufnahme. In: Georg-August-Universität Göttingen (ed) Umweltschutz in der Holzwerkstoffindustrie. Tagungsband 3. Fachtagung, Göttingen, pp 17–26
- McMillan CA, Skerlos SJ, Keoleian GA (2012) Evaluation of the Metals Industry's Position on Recycling and its Implications for Environmental Emissions. *J Indust Ecol* 16(3):324–333. doi: 10.1111/j.1530-9290.2012.00483.x
- Meinlschmidt P, Berthold D, Briesenmeister R (2013) Neue Wege der Sortierung und Wiederverwertung von Altholz. In: Thomé-Kozmiensky KJ, Goldmann D (eds) Recycling und

- Rohstoffe: Kapitel 6: Neue Wege der Sortierung und Wiederverwertung von Altholz. TK-Verlag, Neuruppin
- Merl AD (2005) Bau-Ressourcenmanagement in urbanen Räumen - Fallstudie Wien. Nachhaltiger Einsatz von Holz im Rohbau. Dissertation an der Technischen Universität Wien
- Merl AD, Humar M, Okstad T, Picardo V, Ribeiro A, Steierer F (2007) Amounts of recovered wood in COST E31 countries and Europe. In: Gallis C (ed) Management of Recovered Wood. Reaching a Higher Technical, Economic and Environmental Standard in Europe. Proceedings of the 3rd European COST E31 Conference, Klagenfurt, pp 79–116
- Merl AD (2007) Reuse, recycling and energy generation of recovered wood from building construction - Showcase Vienna. In: Gallis C (ed) Management of Recovered Wood. Reaching a Higher Technical, Economic and Environmental Standard in Europe. Proceedings of the 3rd European COST E31 Conference, Klagenfurt, pp 237–251
- Müller DB (2006) Stock dynamics for forecasting material flows—Case study for housing in the Netherlands. *Ecol Econ* 59(1):142–156
- Müller-Langer F, Witt J, Thrän D, Schneider S (2007) Monitoring zur Wirkung der Biomasseverordnung: Endbericht. Institut für Energetik und Umwelt gGmbH im Auftrag des Umweltbundesamtes, Leipzig
- Osterburg B, Rüter S, Freibauer A, Witte T de, Elsasser P, et al. (2013) Handlungsoptionen für den Klimaschutz in der deutschen Agrar- und Forstwirtschaft. Thünen Report 11, Hamburg
- Pawelzik P, Carus M, Hotchkiss J, Narayan R, Selke S, Wellisch M, Weiss M, Wicke B, Patel M (2013) Critical aspects in the life cycle assessment (LCA) of bio-based materials – Reviewing methodologies and deriving recommendations. *Res Con Rec* 73:211–228. doi: 10.1016/j.resconrec.2013.02.006
- Peche R, Ballon A, Kreibe S (2011) Ökoeffiziente Papierprodukte: Chancen und Risiken für Umwelt und Kosten. bifa-Text Nr. 53, bifa Umweltinstitut, Augsburg
- PE International (2014) GaBi 6 professional academy (Computer-Software). PE International. Stuttgart. Internet: [www.gabi-software.com](http://www.gabi-software.com).
- Pieragostini C, Mussati MC, Aguirre P (2012) On process optimization considering LCA methodology. *J Env Manage* 96(1):43–54. doi: 10.1016/j.jenvman.2011.10.014
- Ratajczak E, Bidzińska G, Szostak A, Herbec M (2015) Resources of post-consumer wood waste originating from the construction sector in Poland. *Res Con Rec* 97:93–99. doi: 10.1016/j.resconrec.2015.02.008
- Rivela B, Moreira MT, Muñoz I, Rieradevall J, Feijoo G (2006) Life cycle assessment of wood wastes: A case study of ephemeral architecture. *Sci Total Env* 357:1-11
- Rubli S, Schneider M (2007) Ressourcenmodell mineralischer Baustoffe auf der Ebene Stadt Zürich: Schlussbericht. Amt für Hochbauten und Tiefbauamt der Stadt Zürich, Zürich

- 
- Rüter S, Diederichs S (2012) Ökobilanz-Basisdaten für Bauprodukte aus Holz. Arbeitsbericht aus dem Institut für Holztechnologie und Holzbiologie, Hamburg
- Sakaguchi D (2014) Potential for cascading wood from building. Master's thesis for the degree of Master of Science in Technology. Aalto University, School of Chemical Technology, Espoo, Finland
- Sandin G, Peters GM, Svanström M (2014) Life cycle assessment of construction materials: the influence of assumptions in end-of-life modelling. *Int J LCA* 19:723–731. doi: 10.1007/s11367-013-0686-x
- Saner D, Vadenbo C, Steubing B, Hellweg S (2014) Regionalized LCA-Based Optimization of Building Energy Supply: Method and Case Study for a Swiss Municipality. *Env Sci Technol* 48:7651–7659
- Sathre R, Gustavsson L (2006) Energy and carbon balances of wood cascade chains. *Res Con Rec* 47(4):332–355
- Sautter H (2004) Wohnungsbedarfsprognose Hessen 2020. Institut Wohnen und Umwelt GmbH, Darmstadt
- Schiller G, Deilmann C, Gruhler K, Röhm P, et al. (2010) Ermittlung von Ressourcenschonungspotenzialen bei der Verwertung von Bauabfällen und Erarbeitung von Empfehlungen zu deren Nutzung (Kurzfassung). Studie im Auftrag des Umweltbundesamtes, Dresden
- Schwarzbauer P, Stern T (2010) Energy vs. material: Economic impacts of a “wood-for-energy scenario” on the forest-based sector in Austria — A simulation approach. *Forest Pol Econ* 12(1):31–38. doi: 10.1016/j.forpol.2009.09.004
- Sianchuk RA, Ackom EK, McFarlane PN (2012) Determining Stocks and Flows of Structural Wood Products in Single Family Homes in the United States between 1950 and 2010. *Forest Prod J* 62(2):90–101
- Sikkema R, Junginger M, McFarlane P, Faaij A (2013) The GHG contribution of the cascaded use of harvested wood products in comparison with the use of wood for energy - A case study on available forest resources in Canada. *Env Sci Pol* (31):96–108
- Sirkin T, ten Houten M (1994) The Cascade Chain. A Theory and Tool for Achieving Resource Sustainability with Application for Product Design. *Res Con Rec* 10:213–277
- Steubing B, Zah R, Ludwig C (2012) Heat, Electricity, or Transportation? The Optimal Use of Residual and Waste Biomass in Europe from an Environmental Perspective. *Env Sci Pol* (46):164–171
- Speckels L (2001) Ökologischer Vergleich verschiedener Verwertungs- und Entsorgungswege für Altholz. *Mitteilungen der Bundesforschungsanstalt für Forst- und Holzwirtschaft*, vol 205. Max Wiedenbusch, Hamburg

- Thormark C (2001) Conservation of energy and natural resources by recycling building waste. Res Con Rec 33(2):113–130
- UBA – Umweltbundesamt (2013) Submission under the United Nations Framework Convention on Climate Change and the Kyoto Protocol 2013. National Inventory Report for the German Greenhouse Gas Inventory 1990 - 2011. Climate Change 09/2013, Dessau, Germany.
- UBA – Umweltbundesamt (2014a). Emissionen ausgewählter Luftschadstoffe nach Quellkategorien. Internet: [http://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/384/bilder/dateien/3\\_tab\\_emi-ausgew-luftschadst\\_2014-07-03.pdf](http://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/384/bilder/dateien/3_tab_emi-ausgew-luftschadst_2014-07-03.pdf) (Aufrufdatum: 19.11.2014)
- UBA – Umweltbundesamt (2014b) Ökologische Innovationspolitik – Mehr Ressourceneffizienz und Klimaschutz durch nachhaltige stoffliche Nutzungen von Biomasse. Langfassung. Texte 01/2014, Dessau
- UNECE/FAO Forestry and Timber Section (2011) European Forest Sector Outlook Study II: 2010-2030. UNECE/FAO Study Paper No. 28, Geneva, Switzerland
- Van Benthem M, Leek N, Mantau U, Weimar H (2007) Markets for recovered wood in Europe: Case study for the Netherlands and Germany based on the BioXchange project. In: Gallis C (ed) Management of Recovered Wood. Reaching a Higher Technical, Economic and Environmental Standard in Europe. Proceedings of the 3rd European COST E31 Conference, Klagenfurt, pp 215–228
- Van der Voet E, Kleijn R, Huele R, Ishikawa M, Verkuiljen E (2002) Predicting future emissions based on characteristics of stocks. Ecol Econ(41):223–234
- Wiegand T (2012) Studiengemeinschaft Holzleimbau e.V., persönliche Auskunft
- Weber-Blaschke G, Garijo A, Hölzle I, Jadhav A, Zettel S, Faulstich M (2005) Analyse, Bewertung und Management von Roh- und Baustoffströmen in Bayern: Schlussbericht des BayFORREST-Projektes F237 für das Bayerische Staatsministerium für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz. Lehrstuhl für Technologie Biogener Rohstoffe, Technische Universität München, Freising
- Weber-Blaschke G, Pacher C, Faulstich M (2006a) Resource Management in the Building Sector. In: Future Technologies in Bavaria. Environment and Energy in Bavaria. Ed. Media mind, München, 62-66.
- Weber-Blaschke G, Zettel S, Pacher C (2006b) Datenvalidierung bei der Ermittlung von Baustoffströmen. Wasser und Abfall(5):41–46
- Weimar H, Mantau U (2008) Standorte der Holzwirtschaft. Altholz im Entsorgungsmarkt - Aufkommens- und Vermarktungsstruktur. Zentrum Holzwirtschaft, Universität Hamburg
- Weimar H, Mantau U (2012) Altholz – Entwicklungen, Trends und Perspektiven für einen nachgefragten Rohstoff. Vortrag am Altholztage von BAV, BDE und VDMA am 10.05.2012, IFAT, München

- 
- Weng C, Yashiro T (2003) Urban Mining: The City as a Resource for Re-usable Building Materials. In: Jia B (ed) Dense Living Urban Structures. Proceedings of the International Conference on Open Building, Hong Kong
- Wern B, Kay S, Vogler C, Baur F, Gärtner S, Hienz G, et al. (2014) Regionale Konzepte zum Ausbau der Bioenergieerzeugung aus Holz – nachhaltige und energieeffiziente Strategieentwicklung unter besonderer Berücksichtigung der Holzkaskadennutzung: Endbericht. IZES gGmbH / IFEU / Wald-Zentrum NRW, Saarbrücken, Heidelberg, Münster
- Werner F, Richter K (2000) Economic allocation in LCA: a case study about aluminium window frames. *Int J LCA* 5:79–83
- Werner F, Althaus H, Richter K, Scholz RW (2007) Post-consumer waste wood in attributive product LCA: Context specific evaluation of allocation procedures in a functionalistic conception of LCA. *Int J LCA* 12(3):160–172
- Werner F, Taverna R, Hofer P, Thürig E, Kaufmann E (2010) National and global greenhouse gas dynamics of different forest management and wood use scenarios: a model-based assessment. *Env Sci Pol* 13(1):72–85. doi: 10.1016/j.envsci.2009.10.004
- Wittmer D, Lichtensteiger T (2007) Exploration of urban deposits: long-term prospects for resource and waste management. *Waste Management & Research* 25(3):220–226
- Wolf C, Klein D, Weber-Blaschke G, Richter K (2015) Systematic Review and Meta-Analysis of Life Cycle Assessments for Wood Energy Services. *Journal of Industrial Ecology*, accepted manuscript
- You F, Tao L, Graziano DJ, Snyder SW (2012) Optimal design of sustainable cellulosic biofuel supply chains: Multiobjective optimization coupled with life cycle assessment and input-output analysis. *AIChE J.* 2012, 58, (4), 1157-1180. 58(4):1157–1180

## 9 Publikationsliste

### Begutachtete Veröffentlichungen

- Höglmeier K, Weber-Blaschke G, Richter K (accept.) Evaluation of wood cascading. In: Dewulf J, Alvarenga R, Meester S de (eds) Sustainability Assessment of Renewables-Based Products: Methods and Case Studies. Wiley, Chichester; *Manuskript vom Herausgeber akzeptiert*
- Höglmeier K, Steubing B, Weber-Blaschke G, Richter K (2015) LCA-based optimization of wood utilization under special consideration of a cascading use of wood. J Env Manage 152:158–170. doi: 10.1016/j.jenvman.2015.01.018
- Höglmeier K, Weber-Blaschke G, Richter K (2014) Utilization of recovered wood in cascades versus utilization of primary wood – a comparison with life cycle assessment using system expansion. Int J LCA 19(10):1755–1766
- Höglmeier K, Weber-Blaschke G, Richter K (2013) Potentials for cascading of recovered wood from building deconstruction – a case study for south-east Germany. Res Con Rec (78):81–91

### Weitere Veröffentlichungen

- Höglmeier K, Weber-Blaschke G, Richter K (2015) Effiziente Erfassung und Aufbereitung entscheidend. Ökobilanz-Studie von Altholz-Verwertungsoptionen geht der Frage nach: Lohnt sich die Kaskadennutzung aus Umweltsicht? Holzzentralblatt (5):108-109
- Höglmeier K, Weber-Blaschke G, Richter K (2015) Kaskadennutzung von Altholz in Bayern. Eingereicht zur Veröffentlichung bei *LWF aktuell*
- Höglmeier K, Weber-Blaschke G, Richter K (2014) Entwicklung rohstoffgerechter Leitlinien für nachhaltiges Bauen mit Holz: Abschlussbericht des Projektes X38 für das Bayerische Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten. Holzforschung München, Technische Universität München, Freising
- Höglmeier K, Richter K (2014) Using wood in cascades - a comparative LCA study of utilization options of recovered wood. In: Processing Technologies for the Forest and Biobased Products Industries. Tagungsband der PTF BPI 2014, Fachhochschule Salzburg, Kuchl, Österreich
- Höglmeier K, Weber-Blaschke G, Richter K (2013) Cascading as a suitable strategy to improve the resource efficiency of wood consumption? In: Proceedings of the World Resources Forum, Davos, Schweiz



**Vorträge**

Höglmeier K (2014) Die Kaskade – der optimale Holznutzungsweg? Eine ökobilanzielle Betrachtung. Vortrag bei der Forstwissenschaftlichen Tagung 2014, 18.09.2014, TU Dresden, Tharandt

Höglmeier K (2013) Cascading as a suitable method to improve resource efficiency? An LCA study of waste wood. Vortrag im Rahmen des World Resources Forum, 08.10.2013, Davos, Schweiz

Höglmeier K (2013) Altholznutzung in Kaskaden – LCA einer regionalen Betrachtung. Vortrag bei der Ökobilanzwerkstatt, 25.09.2013, Technische Universität Graz, Österreich

Höglmeier K (2012) Kaskadennutzung von Altholz – Möglichkeit zur Steigerung der Ressourceneffizienz? Vortrag bei der Ökobilanzwerkstatt, 05.09.2012, Stuttgart

**Poster-Präsentationen**

Höglmeier K, Weber-Blaschke G, Richter K (2014) Optimizing wood utilization by cascading - assessment with an LCA-based material flow model. IUFRO World Congress 2014, 06.-11.10.2014, Salt Lake City, USA

Höglmeier K, Wolf C, Weber-Blaschke G, Richter K (2014) Burn or build? - Minimizing environmental impacts of wood utilization for different product portfolios. SETAC LCA XIV-Tagung, 06.-08.10.2014, San Francisco, USA

## 10 Veröffentlichungen

Der folgende Abdruck der Veröffentlichungen erfolgt mit Genehmigung der jeweiligen Rechteinhaber:

### Veröffentlichung 1

With permission from Elsevier: Resources Conservation and Recycling, 78, Höglmeier Karin, Weber-Blaschke Gabriele and Richter Klaus, *Potentials for cascading of recovered wood from building deconstruction – a case study for south-east Germany*, pp 81-91, 2013.

The manuscript is a corrected version of the paper, which will be available at [sciencedirect.com](http://sciencedirect.com) at the beginning of 2016.

The original can be accessed at [www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921344913001444](http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921344913001444).

### Veröffentlichung 2

With kind permission from Springer Science+Business Media: The International Journal of Life Cycle Assessment, *Utilization of recovered wood in cascades versus utilization of primary wood – a comparison with life cycle assessment using system expansion*, 19, 2014, pp 1755-1766, Höglmeier Karin, Weber-Blaschke Gabriele and Richter Klaus

The original can be accessed at [link.springer.com/article/10.1007%2Fs11367-014-0774-6](http://link.springer.com/article/10.1007%2Fs11367-014-0774-6).

### Veröffentlichung 3

With kind permission from John Wiley and Sons, Inc.: Dewulf J, Alvarenga R, Meester S de (eds) Sustainability Assessment of Renewables-Based Products: Methods and Case Studies, *Evaluation of wood cascading*. © by John Wiley and Sons, Inc. Permission for the use of manuscript version only.

The book will be published in 2016.

### Veröffentlichung 4

Reprinted from Journal of Environmental Management, 152, Höglmeier Karin, Steubing Bernhard, Weber-Blaschke Gabriele and Richter Klaus, *LCA-based optimization of wood utilization in South-east Germany under special consideration of a cascading use of wood*, pp 158-170, 2015, with permission from Elsevier.

The original can be accessed at [www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301479715000274](http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301479715000274).

1

## **Potentials for cascading of recovered wood from building deconstruction – a case study for south-east Germany**

Höglmeier, Karin; Weber-Blaschke, Gabriele; Richter, Klaus;

### **Abstract**

Increasing scarceness of primary raw materials leads to a heightened focus on secondary resources. Deposits from urban infrastructure, mainly the building stock, are a potential major source of secondary resources. However, reliable information concerning available volumes and qualities is lacking. We analyzed incorporated amounts of wood in the building stock of south-east Germany, and calculated resulting streams of recovered wood in order to quantify potentially available volumes for an environmentally beneficial cascading utilization of these secondary resources. By applying a new method using data from sample buildings in regard to the quantity and quality of incorporated wood and statistical data concerning the building stock, the stock of wood based materials in buildings and the recovered wood resulting from demolishing for the year 2011 were calculated.

We found that considerable amounts of recovered wood in suitable condition for a resource-efficient use in cascades can be expected to originate from the building stock: 25 % of the recovered wood is suitable for re-use and 21 % could be channeled into other high-value secondary applications.

These first initialized concepts of a cascading utilization of recovered wood should be further refined and extended to utilize the existing potential to its optimum.

### **Keywords**

building stock; cascading; demolition waste; secondary resources; urban deposit; waste wood;

## **1 Introduction**

### **1.1 Problem statement**

The Europe 2020 publication of the European Commission states increasing resource efficiency as a major strategy for generating economic growth, to fight against climate change and limit the adverse environmental impacts of resource use (European Commission 2010). The corresponding flagship initiative enumerates the re-use of valuable materials which would otherwise be wasted as a favorable measure in order to reduce the pressure on primary materials, such as raw wood from forests (European Commission 2011).

On a national level, the German Government aspires to a doubling of resource productivity by the year 2020, compared to 1994 as a baseline (BMU 2002, BMU 2012).

In addition to focusing on resource efficiency, the finite nature and instability of fossil resources supply has led to a heightened awareness concerning the importance of renewable resources for an additional and more sustainable supply for both energy-related and material use.

This paper focuses on wood as a versatile renewable resource with a high potential relating to the mitigation of climate change: First, wood products act as a carbon pool during their lifetime. Second, these products can substitute for others produced from scarce and potentially more energy-intensive resources. Third, they can substitute for fossil fuels, when used for combustion with energy recovery after their service life (Werner et al. 2005, Richter 2009).

In addition, however, also wood as a regrowing and thus renewable resource is not available infinitely with respect to volumes and regional availability. In recent years, an increasing competition for wood, intensified by rising prices for fossil fuels, can be detected (Schwarzbauer & Stern 2010). To ensure a stable supply for multiple purposes and to meet the growing demands, the efficiency of the use of wood as a resource has to be enhanced and additional sources for wood have to be identified.

### **1.2 Cascading of wood – State of the art**

A suitable means suggested both by science (Fraanje 1997, Gärtner et al. 2012, Govers et al. 2001, Haberl & Geissler 2000, Lafleur & Fraanje 1997, Sathre & Gustavsson 2006, Sirkin & ten Houten 1997, Werner et al. 2007) and legislative bodies (BMU 2008, BMU 2012) to achieve a more efficient resource use is the concept of cascading, meant as the sequential use of a certain resource for different purposes.

As described by Sirkin & ten Houten (1997), resource cascading is a method to enhance the efficiency of resource utilization by a sequential re-utilization of the same unit of a resource for multiple high-grade material applications followed by a final use for energy generation. Thereby, primary raw materials are saved and positive effects due to the substitution of finite materials by renewable resources can be increased (Gustavsson & Sathre 2011).

To maximize the effects of a cascading utilization, secondary resources should be used in the application with the highest possible quality for which they are intrinsically suitable (Fraanje 1997, Haberl & Geissler 2000). For example, high quality recovered wood from the building sector in large dimensions and without contamination, such as solid beams, should first be used to produce timber of smaller dimensions, such as lamellas, which after a service time as flooring can be chipped and used in a second cascade step as particle- or fiberboards, and finally as an energy carrier, rather than being immediately used for energy production after the first product life as a beam (Figure 1).

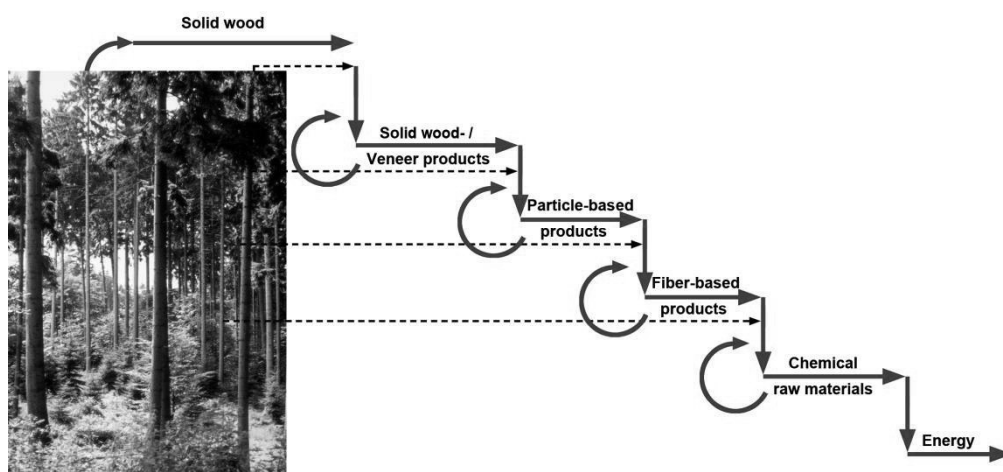


Figure 1: Cascading use of wood to improve resource efficiency (based on EPEA 2009).

Previous studies have shown various benefits from cascading. Fraanje (1997) examined the effects on primary resource use by the cascading of pine wood in the Netherlands. He found that large savings of primary resources were possible and the time a resource is used could be extended considerably by cascading. Dornburg & Faaij (2005) compared cascading chains with wood from short rotation poplar, considering land use, CO<sub>2</sub> emission reduction and economic performance. They concluded that cascading has the potential to improve both CO<sub>2</sub> emission reductions per hectare and CO<sub>2</sub> mitigation costs of biomass usage. Sathre & Gustavsson (2006) analyzed the energy and carbon balances of cascade chains for recovered lumber with several post-recovery options such as particleboard production, re-use and burning for energy recovery. They compared the balances of cascaded products to the use of virgin wood and to the use of non-wood products. Cascading was found to have positive effects on the balances, especially due to a reduced demand for non-wood products when wood is cascaded and owing to energy savings by direct cascade effects. Gärtner et al. (2012, 2013) conducted Life Cycle Assessments (LCA) of different wood cascade chains. They concluded that generally the impact on the environment decreases with more cascade steps of using wood as a material resource before a final use for energy production.

However, most studies also discussed restrictions of the benefits of cascading. Sathre & Gustavsson (2006) concluded that benefits from cascading are minor, if virgin biomass were available yet remains unused due to cascading of recovered wood. However, this is not the

case in the study area of Bavaria, despite a continuing increase of overall forest stocks. A considerable part of the increase of stocks is contained in small privately owned forests and a mobilization of these resources could not be achieved, despite great efforts over the last years. Furthermore, recovered wood today mainly substitutes virgin wood of lower quality as raw material for wood panel manufacturing (mainly particleboard). These assortments are also the main input for the growing wood use in domestic heating, which has led to rising raw wood prices and competition for these assortments between material use and use for energy production in recent years (Friedrich et al. 2012). An increase in the use of recovered wood by cascading would therefore alleviate this competition and prevent rising prices for manufactured wood products, which ultimately would lead to a partial displacement by non-wood products. This also is in accordance with the conclusion of Sathre & Gustavsson (2006) that a cascading use of recovered wood avoids the use of more energy intensive non-wood products, if forest resources are limited.

Gärtner et al. (2013) detect possible constraints in the delay of the energy recovery step for several decades which would be caused by an extensive cascading of recovered wood. This may lead to the replacement of possible cleaner energy sources in the future, when the cascaded wood finally reaches its end-of-life. Nonetheless, those possible negative environmental effects are counterbalanced by the prolonged carbon storage in the wood due to cascading, thereby contributing to the mitigation of climate change. It is evident that a cascading utilization of wood is not to be favored uncritically. Yet, when taking into account legislative requirements and the situation in the study area regarding wood demand and availability, it seems a concept worth encouraging.

Currently, in Germany, cascading of wood as a strategy to extend the material lifetime has not yet been implemented sufficiently. Close to 80 % of the total amount of recovered wood is incinerated, mainly in large-scale power plants with effective flue gas cleaning. Regarding the use of recovered wood as a secondary raw material, particleboard is the only noticeable industrial application (Friedrich et al. 2012, Mantau et al. 2012). Re-use is common in small amounts with old furniture. Other technically feasible applications, e. g. as input for other wood-based composites such as MDF (Medium Density Fiberboard) and OSB (Oriented Strand Board), or raw material for the pulp and paper production are not practiced, mainly due to only minor cost benefits, necessary technological process adaptations, and concerns of customers towards materials generated from "waste".

### **1.3 Recovered wood from building deconstruction – situation in Germany**

With declining stocks of primary resources, resources already incorporated in anthropogenic stocks will become increasingly important for a future resource supply (Müller 2006). The building stock with both its mineral and organic components is one of the most important human-made reservoirs for secondary resources (Bringezu 2012). Also for recovered wood as a secondary resource, the building sector, especially the deconstruction and demolishing of buildings, is essential. Previous studies concerning the recycling of building waste, including the

wood fraction, already described the ecological benefits (Thormark 2001, Coelho & Brito 2012). However, no studies heretofore have applied the concept of cascading to building waste or a subsection of it.

For an effective cascading of recovered wood from building deconstruction, verified information relating to the expected amounts and the quality of the recovered wood is essential. Up to now, only little comprehensive, recent information is available on national or regional level. Studies with different methodological approaches were carried out for the Netherlands, Japan and the city of Vienna (Fraanje 1999, Merl 2005, Weng & Yashiro 2003) and Kroth et al. (1991) assessed wood in the housing stock of Germany. Studies focusing on the overall material flow of the building stock are more common, though lacking more detailed information regarding the wood fraction (Baudirektion Kanton Zurich 2010, Bringezu 2012, Goerg 1997, Kloft et al. 1996, Kohler 1999, Rubli & Schneider 2007, Wittmer & Lichtensteiger 2007). Yet, such information is crucial to assess the suitability of recovered wood for a use in cascades, as both the quantity and the quality determines its potential secondary use.

Recovered wood as an additional source of wood is already used in Germany with estimated recovered annual amounts around 6.3 million tons (Mantau et al. 2012).

This volume represents the share of the total post-consumer wood which is collected separately. An additional approximately 3.1 million tons are combusted as part of the municipal waste, co-fired with coal or burned in small-scale furnaces in housing. Friedrich et al. (2012) state a total of 1.25 million tons of recovered wood for Bavaria in 2010.

Due to the implementation of a landfill ban regarding biomass based materials in 2003 and a rather strict legislation in regard to waste management, the recovered share of wood with at least one prior application can be seen as close to 100 % in Germany. The Act for Promoting Closed Substance Cycle Waste Management (German Government 2012) issued in 2012 regulates a five-step waste hierarchy, thereby implementing the concept of resource cascading on a legislative level. Which of the options of the hierarchy is to be favored depends on the quality of the recovered material. In general, the application highest in the pyramid which is suitable for a respective material has to be chosen.

In the case of recovered wood, the quality requirements to select the paths of either energy utilization, re-use or recycling are defined by the German Waste Wood Act from 2003 (German Government 2003), which offers four different categories based on former treatment of the wood products with paints, preservatives, or other chemical substances (Table 1).



**Table 1: Quality classes of recovered wood according to the German Waste Wood Act (German Government 2003).**

Class	Description	Intended application
A I	Untreated or only mechanical treatment	Material use (energy possible)
A II	Glued or painted wood; no halogen-organic compounds or preservatives	Material use (energy possible)
A III	Wood containing halogen-organic compounds; no preservatives	Energy use (Material use only with prior processing)
A IV	Contaminated wood, including halogen-organic compounds; no PCB	Energy use in large-scale combustion facilities
PCB	PCB treated wood	Non-hazardous disposal

Studies focusing on the origin of recovered wood in Germany are rare. Lang (2004) states a share of 33 % originating from the building sector. Other major contributors are packaging (14 %) and wooden parts of municipal waste (31 %). A study by the Bavarian Environmental Institute states the share of recovered wood from buildings as 44 % (LFU 2012).

#### 1.4 Objectives

To enable a cascading use, information relating to the properties of the recovered wood is crucial, as it determines the possible secondary applications and helps to steer each part of the recovered wood stream to its optimal utilization.

The main influencing factors are type of the recovered wood (e.g. solid wood, engineered wooden products), size and volume, purity and composition of the wood with other materials (hybrid materials). Finally, the overall collected amount of a certain homogenous part of the recovered wood is also decisive, as most secondary utilizations require minimum volumes to be financially viable.

In order to determine the potential for the cascading of recovered wood, this paper aims to provide information concerning the following questions:

- 1.) What quantities of wood are embodied in the Bavarian building stock?
- 2.) Which building products are the biggest contributors to wood stock?
- 3.) What amounts of recovered wood can be expected to originate from the building stock per year?
- 4.) Which potentials for cascading of recovered wood, based on the quality of the wood in the building stock, can be expected?

The area of the case study presented in this paper is the Federal State of Bavaria in south-east Germany. As the biggest of the German federal states and representing a mixture of both rural and urban building structures, it is suitable for generating outcomes also potentially applicable to other areas. Furthermore, the statistical data concerning building stocks and activities available for this region is consistent and sufficient for the purpose of this case study. We aim to evaluate the potentials for an optimal utilization of recovered wood from building deconstruction in Bavaria.

## 2 Methods

### 2.1 Case study and research approach

The first part of the study focuses on calculating the volume of wood contained in the building stock of Bavaria in south-east Germany. Based on this quantification, amounts and quality of recovered wood originating from the demolishing of buildings were derived and used to determine the potential for different secondary applications of the wood part of building waste in Bavaria (Figure 2). A bottom-up approach based on data from the German Architects Association was applied. For 86 buildings constructed between 1948 and 2008, datasets specifying detailed summaries of all the used building materials were available, including interior furnishings such as staircases and doors. The type of materials is described in detail in these datasets, as they are normally used by the German Architects Association in a software tool to estimate the costs of building projects by comparing the planned object to already existing similar ones (BKI 2011).

Based on these 86 model buildings, the volumes of wood in the housing stock of Bavaria were calculated by using statistical data of construction and demolishing of buildings provided by the Bavarian Statistical Office (BayLfStaD 2012).

For the year 2011, amount and composition of recovered wood resulting from all demolishing of buildings were calculated. We determined the quality according to the categories of the German Waste Wood Act (Table 1) and analyzed the waste wood in regard to additional quality factors:

- The amount of rather large, formerly structurally used wooden elements which would potentially be suitable for re-use or other utilizations conserving the material integrity, and
- the share of solid wood without major contamination, which is a suitable secondary raw material for engineered wood products such as particleboards.

The potential for a use in cascades of these waste wood fractions was then determined, allowing the assessment of possibilities in Bavaria for improving resource efficiency by cascading.

### 2.2 Wood in the building stock

Each dataset contains a comprehensive list of all components embodied in the respective building on the level of single parts (i.e. beams, windows, floorings). Since only the surface area of the elements was given, average thicknesses were applied in order to calculate the volume.

The volume in cubic meters of the various building components was then summarized for each building, according to the methodology previously applied by Weber-Blaschke et al. (2006a/b). However, in contrast to this study, our work focuses only on the wood fraction of the building materials. Additionally, a more detailed analysis concerning the type and quality of the used wood was carried out in order to provide suitable information to quantify waste wood streams.

35 of the datasets were for residential buildings, both single-family dwellings and multi-family apartment buildings with up to 16 units. For non-residential buildings, 51 datasets were available, representing school, office and commercial as well as agricultural buildings.

For both groups of buildings, the average amount of each of the building product groups (doors, load-bearing structures, etc.) per cubic meter of gross cubic content (GCC) was calculated. By applying the number of buildings and the average gross cubic content per building, volumes of wood for the whole Bavarian building stock were calculated according to formulae 1.

The term gross cubic content describes the volume enclosed by the building structure, including walls, roof and foundation slab. It is a key figure in terms of financing of building activities and is calculated according to the German standard DIN 277 (German Institute for Standardization 2005).

$$(1) W_{stock} = W_{GCC} * GCC * n$$

with

$W_{stock}$  = wood contained in the stock [ $m^3$ ]

$W_{GCC}$  = average amount of wood per cubic meter of GCC derived from the sample buildings [ $m^3/m^3$ ]

$GCC$  = average gross cubic content per building [ $m^3$ ]

$n$  = number of buildings in the total stock

Separate calculations were carried out for residential and non-residential buildings. In the case of residential buildings, the calculations were conducted separately for 7 building age classes. As the majority of the sample buildings were constructed later than 1975, correction factors of the wood per unit of GCC were derived from Kloft et al. (1996). Data availability was reasonably good for residential buildings. Numbers of annually constructed as well as deconstructed buildings were available (BayLfStaD 2012). Thus, a calculation of the current number of buildings and their age composition could be carried out. The age classes reflect the change in building tradition over time. For example, buildings constructed before 1918 consist of nearly four times the amount of wood, compared to buildings constructed later than 1980 (Kloft et al. 1996).

Calculation of the stock based on statistical data was not possible for non-residential buildings, as data for the time before 1987 are lacking. Still, a recent study on behalf of the German Ministry of Construction (BMVBS 2011) made an estimation of the stock of non-residential buildings in Germany based on statistical data and capital invested in building stock which we used as a basis for our calculations. To obtain the Bavarian share of the German total, numbers of inhabitants and the gross domestic product in Bavaria in relation to Germany were applied. The amount and composition of wood in the building stock was also calculated according to formulae 1. However, no age class distribution could be made.

### 2.3 Recovered wood from building deconstruction

In order to quantify potential amounts for cascading, the annual stream of recovered wood from the building sector and its composition has to be calculated. In our study, the situation of the year 2011 was calculated, as deconstruction rates were fairly stable over the last years and the results of this exemplary year can be seen as representative for the present situation.

For both residential and non-residential buildings the number of demolished and deconstructed buildings per age class and year were available from the Bavarian Statistical Office (BayLfStaD 2012). Consequently, deconstruction rates for each of the age classes could be calculated. By applying the average amounts of wooden building products derived from the sample buildings, the amount of recovered wood from the building sector was also calculated according to formulae 2.

$$(2) W_{rec} = W_{GCC} * GCC * n * d$$

with

$W_{rec}$  = recovered wood from building demolition [m<sup>3</sup>]

$d$  = annual deconstruction rate [% of total stock]

Again, these calculations were carried out separately per age class for residential buildings and as a total for non-residential buildings.

From the detailed information regarding the type, it is possible to derive the quality and intended use of all wooden materials available for the sample buildings, the quality class of the recovered wood to be expected in the future by decomposition of the buildings. A prerequisite for this was the classification of each wooden component of the building according to the four categories of the German Waste Wood Act (Table 1). As virtually no wood of class A I and A III accrues from the building stock, these classes were subsumed under the classes A II and A IV respectively. The amount of recovered wood per class in 2011 was calculated according to formulae 2, using respective values of  $W_{GCC}$  for each of the two quality classes of recovered wood.

Mainly two factors determine the potential recovered wood quality: First, the inherent properties of the wood or wooden material used to construct the building are decisive. Especially materials combined permanently with the wood, such as plastic overlays, glues, adhesives or paints are to be mentioned here. Second, influences on the quality taking place during maintenance and repair over the service life of the wood, i.e. subsequent treatment with preservatives and paints have to be taken into account. In our study, we assumed that the wood products were treated only with the necessary minimum of additives: Only if safety standards would require the treatment with preservatives or paint, was a downgrading into the respective lower waste wood class applied. Consequently the amounts of clean and untreated wood we calculated represent an optimum situation in regard to recycling of recovered wood. In reality higher shares of contaminated wood may occur. Wood from load-bearing structures such as roof beams was graded into class A IV according to legal stipulations, despite this wood in reality partially not being treated with preservatives.

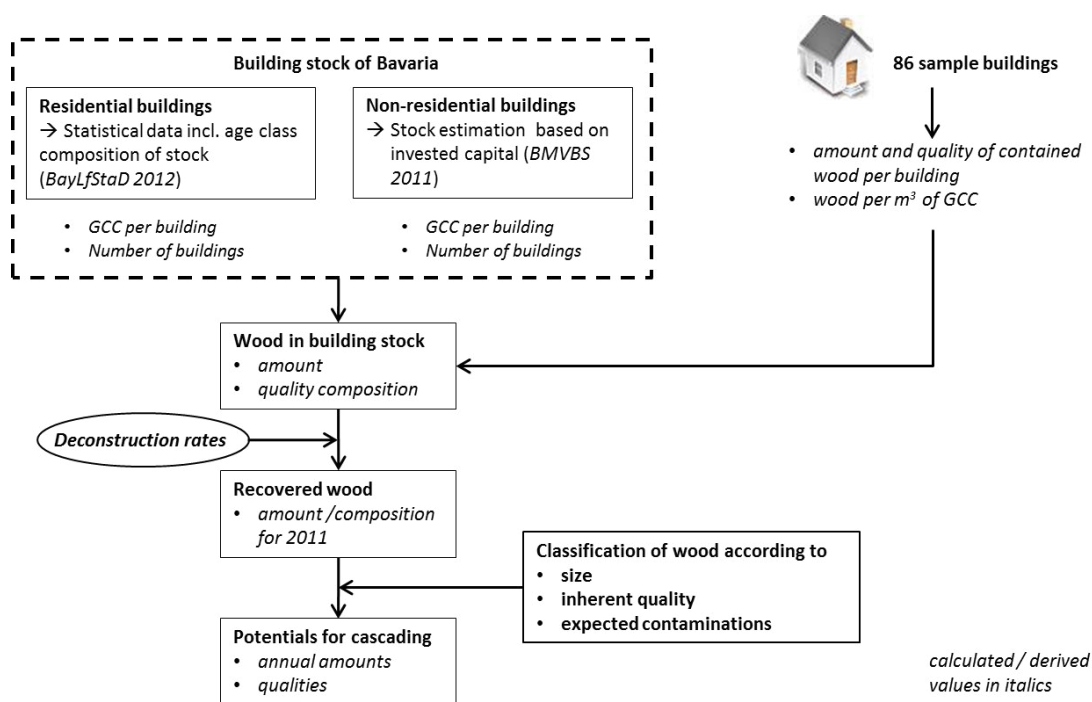


Figure 2: Process of analysis of the wood in the Bavarian building stock by using sample buildings.

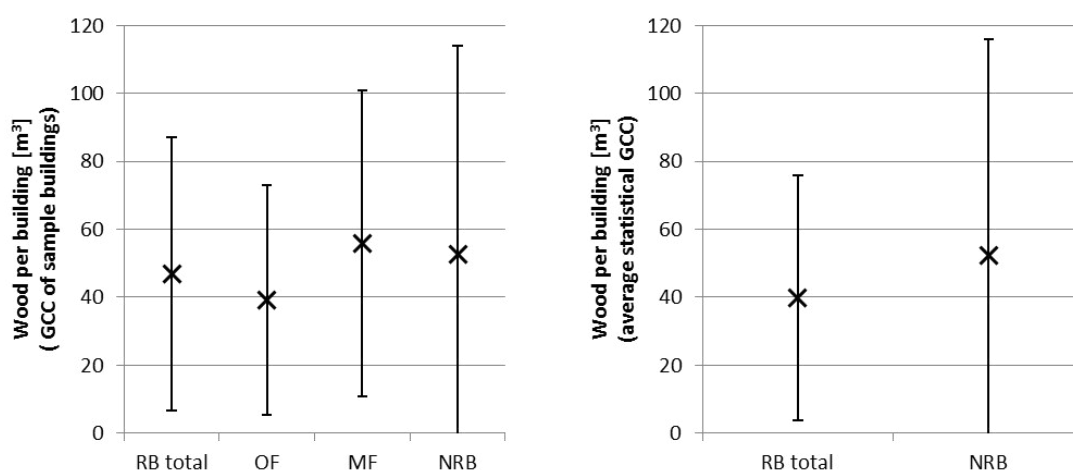
## 2.4 Potential for cascading recovered wood

Besides a classification and quantification of wood in the building stock, the assessment and evaluation of the potential for cascading recovered wood was a major goal of our study. To enable cascading, each part of the recovered wood stream has to be assigned to an appropriate secondary use, depending on its quality. To assess potential amounts for the different secondary use options, which constitute the recovered wood cascade, the wooden building products were categorized: First, according to their application in the building (load-bearing structures, doors, windows, flooring, stairs, boards etc.) and second, in regard to their inherent properties. Together, they define possible secondary use options. In the latter, the amounts of structural components possibly suitable for re-use and the fraction of solid wood products were determined. In each case, current stocks and amounts to be expected in the recovered wood stream per year were calculated, applying the described methodology.

### 3 Results and discussion

#### 3.1 Wood in the sample buildings

Values of wood content were calculated for each of the 86 sample buildings. They varied considerably, due to the size of the buildings, different construction methods and differing choices with interior fittings and windows (Figure 3).



**Figure 3: Mean values and standard deviation of wood in the sample buildings (BKI 2011); left: amounts calculated with gross cubic content of sample buildings; right: amounts calculated with statistical Bavarian average of gross cubic content (see text), no separate values for OF and MF available (RB total: residential buildings total; OF/MF: One-/Multi-family buildings; NRB: Non-residential buildings).**

The representativeness of the sample buildings in regard to the building stock in general can be assessed by the following characteristic values: (1) the share of wooden buildings in the total building stock, since those buildings incorporate a considerably higher amount of wood per unit of gross cubic content compared to conventional buildings (Kroth et al. 1991), and (2) the average GCC, as it directly influences the calculation of the total amount of wood in the stock when operating with statistical building data.

In a study for the German Ministry of Construction, Diefenbach et al. (2010) report a share of 7.2 % for wooden residential buildings in the stock of southern Germany. In our sample, 2 out of 35 residential buildings were wood constructions (6 %), representing the actual share fairly well. Diefenbach et al. (2010) present no data for the share of wooden non-residential buildings in Germany. However, it can be expected to be considerably lower than the number for residential buildings. In our sample 2 % of those buildings were wood constructions, confirming this assumption.

The second characteristic value, the average GCC per building, shows a considerable difference between the statistical value for Bavaria and the average value of our building sample. Therefore, for calculating the amounts of wood in the total building stock, the average Bavarian GCC was used, instead of the average one of the sample buildings, as the latter is considerably higher both with residential and non-residential buildings (see Figure 3 and Table 2).

**Table 2: Characteristic parameters of the sample buildings used to determine wood in the building stock of Bavaria. Data from BKI 2011. (GCC: Gross Cubic Content)**

	Residential buildings			Non-residential buildings
	total	single-family	multi-family	
<b>Number of sample buildings</b>	35	19	16	51
<b>Year of construction (from-to)</b>	1948-2009	1948-2009	1989-2008	1989-2008
<b>Average GCC [m<sup>3</sup>]</b>				
• <b>of sample buildings</b>	2,317	913	3,983	11,187
• <b>Bavarian average</b>	1,169	--	--	4,112
<b>Wooden buildings</b>	2	2	0	0

A reason for this discrepancy might be that architects can choose if they input one of their building projects into the planning tool we derived our data from (BKI 2011). It can be assumed that they do this more often with high value buildings, which normally also have a higher than average GCC. Another reason may be the high number of multi-unit houses in our sample buildings, which increases the overall average GCC. To obtain an accurate overall value of incorporated wood, we assumed all buildings to have the average Bavarian GCC, however, with differing amounts of wood contained per cubic meter of GCC, as derived from the sample buildings.

### 3.2 Wood in the building stock

The quantitative and qualitative assessment of wood in the Bavarian building stock was one major goal of the study. The Bavarian building stock is dominated by residential buildings. Although non-residential buildings account for nearly one third of the overall gross cubic content (GCC) of the Bavarian building stock (Table 3), residential buildings contribute over 90 % of the wood contained in the total stock. This is due to the fact that residential buildings embody roughly 1.5 times the amount of wood compared to non-residential buildings. Per unit of GCC, the rates differ even more (Table 4). Thus, especially residential buildings are crucial to an effective recovery of wood and the possibilities for a secondary use.

**Table 3: Description of the Bavarian building stock in 2011 (columns 1-4: data from BayLfStaD 2012 and derived values; columns 5-6: own calculations based on sample buildings and statistical data).**

	1	2	3	4	5	6
<b>Construction period of residential buildings</b>	<b>Number of buildings</b>	<b>Buildings distribution over age classes</b>	<b>Average GCC per building<sup>a</sup> [m<sup>3</sup>]</b>	<b>Gross cubic content of stock [10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>]</b>	<b>Wood contained in stock [10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>]</b>	<b>Distribution of wood over age classes</b>
before 1900	319,050	11 %	1,089	347.4	27.5	28 %
1901 – 1918	100,012	3 %	1,089	108.9	8.6	9 %
1919 – 1948	311,300	11 %	1,195	372.0	6.4	7 %
1949 – 1962	551,117	19 %	1,147	632.1	9.1	9 %
1963 – 1970	413,909	14 %	1,147	474.9	6.8	7 %
1971 – 1980	511,359	17 %	1,169	597.5	12.1	13 %
1981 – 2011	748,104	25 %	1,230	920.1	18.6	19 %
<b>Residential buildings</b>	<b>2,954,850 (88 %)</b>	--	<b>1,169</b>	<b>3,453.0 (67 %)</b>	<b>89.2</b>	<b>92 %</b>
<b>Non-residential buildings</b>	<b>406,174 (12 %)</b>	--	<b>4,112</b>	<b>1,670.3 (33 %)</b>	<b>7.9</b>	<b>8 %</b>
<b>Building stock total</b>	<b>3,361,024 (100 %)</b>	<b>100 %</b>	--	<b>5,123.3 (100 %)</b>	<b>97.1</b>	<b>100 %</b>

<sup>a</sup> Values until 1948 from IWU (2005); 1949-2011 from BayLfStaD (2011)

**Table 4: Wood in buildings – comparison of studies (shell: shell construction; GCC: gross cubic content).**

<b>Author</b>	<b>Own calculations</b>				<b>Kroth et al. 1991</b>	<b>BDZ 2009</b>	<b>Fraanje 1999</b>	<b>Weber-Blaschke et al. 2006a/b</b>
<b>Year</b>	--				<b>1990</b>	<b>2009</b>	<b>1996</b>	<b>2003</b>
<b>Year of data</b>	2011				<b>1990</b>	<b>2009</b>	<b>1996</b>	<b>2003</b>
<b>Region/Country</b>	Bavaria				<b>Bavaria</b>	<b>Germany</b>	<b>Netherlands</b>	<b>Bavaria</b>
	[m <sup>3</sup> /building]		[m <sup>3</sup> /1,000 m <sup>3</sup> GCC]		[m <sup>3</sup> /1,000 m <sup>3</sup> GCC]			[m <sup>3</sup> /building]
	<b>total</b>	<b>shell</b>	<b>total</b>	<b>shell</b>				
<b>Residential buildings</b>	30.2	21.1	25.8	18.0	21.0		3.4	37
<b>Non-residential buildings</b>	19.4	12.7	4.7	3.1	12.0	5.4	--	--
<b>Building stock</b>	28.9	20.1	18.9	13.2	--	--	--	--

The majority of the wood is part of the shell construction, mainly in roof structures, walls and ceilings. For an effective recovery of wood used in buildings, a focus has to be put on those parts of the construction that merit the highest salvageable amounts.

Kroth et al. (1991) derived an average amount of wood of 21 m<sup>3</sup> per 1,000 m<sup>3</sup> of GCC for residential buildings in southern Germany for the year 1990. Comparing these numbers to our findings, a substantial increase in wood in the residential building stock over the last 21 years could be assumed. However, as the applied methodologies are not comparable, such a conclusion is not soundly based. Weber-Blaschke et al. (2006a) stated an amount of 16 kg per cubic meter of GCC, which equals approximately 37 m<sup>3</sup> of wood per residential building in Bavaria in 2003.



Kroth et al. (1991) found average amounts of 12 m<sup>3</sup> per 1,000 m<sup>3</sup> of GCC for non-residential buildings, with numbers for different building types ranging from 6 to 16 m<sup>3</sup> per 1,000 m<sup>3</sup> of GCC. Here, our calculated amounts are considerably lower. Another study carried out by the German Cement Industry Association (BDZ 2009) found an average amount of 5.4 m<sup>3</sup> per 1000 m<sup>3</sup> of GCC for non-residential buildings newly constructed in Germany in 2009.

For the Netherlands, Fraanje (1999) indicated an average of 3.4 m<sup>3</sup> for a typical one-family dwelling in 1996. In contrast to our study, it did not take into account wood for the construction of inner walls and ceilings, skirting and roof lathing and a number of indoor finishings, which may partly explain the considerable difference of the estimated amounts compared to our findings and those of Kroth et al. (1991). Müller (2006) states an average of 3 tons per capita in the Dutch housing stock. Weber-Blaschke et al. (2006a) indicates 2.4 tons per capita. We calculated an amount of 3.8 tons per capita in 2011 in Bavaria.

**Table 5: Contribution of different building products to the wood embodied in the Bavarian building stock in 2011.**

	Total stock		Potential waste wood qualities			
			A I+II		A III+IV	
	[10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> ]	[% of total stock]	[10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> ]	[% of product]	[10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> ]	[% of product]
<b>Load-bearing structures</b>	33.3	34	5.4	16	28.0	84
<b>Boards and planks</b>	27.7	29	15.2	55	12.6	45
<b>Wood frame constructions (walls and roofs)</b>	7.9	8	2.9	37	5.0	63
<b>Plates and panels</b>	7.8	8	4.4	57	3.4	43
<b>(Roof) battens</b>	5.2	5	2.8	54	2.4	46
<b>Square timber</b>	1.0	1	0.9	88	0.1	12
<b>Doors</b>	6.7	7	4.5	68	2.1	32
<b>Staircases</b>	0.7	1	0.7	100	0.0	0
<b>Flooring</b>	3.6	4	3.6	99	0.0	1
<b>Windows</b>	1.4	1	0.1	11	1.2	89
<b>Others</b>	1.8	2	1.4	78	0.4	22
<b>Total</b>	<b>97.1</b>	<b>100</b>	<b>41.8</b>	<b>43</b>	<b>55.2</b>	<b>57</b>

When assessing wood in stock and its potential for secondary use, not only the amount but also the composition with respect to size and potential mechanical damage or chemical contamination is critical. To evaluate the risk of contamination of recovered wood, the type of wood and its use in construction are the determining factors. Consequently, the wooden share of the sample building was categorized into different building product groups (Table 5). The major part is made up of load-bearing structures (34 %). Slightly over 60 % of this category is made up of beams and rafters in roof construction, which can easily be salvaged by thorough deconstruction and therefore represent an important potential for future re-use or other high-quality secondary applications.

Wood frame constructions, which are mainly utilized as construction elements for contemporary wooden buildings, currently contribute 8 % to the total stock and can be expected to be of increasing importance in the future. The wall forming frames constitute studs and are covered

with panels such as oriented strand boards. As they are generally a composition of wood and other materials such as plastic sheetings and insulation materials, they will require a special deconstruction in order to make the wooden components available for material recycling. Therefore we list them separately, despite also being a load bearing structure.

Glulam structures have become increasingly important as structural components over the last decades in construction, as they allow a wider variety in form and show higher strength parameters with smaller dimensions. Our data did not allow estimations for all age classes, due to the uneven age distribution of the sample buildings. However, with buildings of the youngest class (1981–2011) a share of close to 19 % of the total incorporated wood are glue laminated products, both in form of panels or beams. In 1957, Germany produced a total of 5,000 m<sup>3</sup> of glue laminated wood (Wiegand 2012). This marginal number, compared to the current annual production volume of close to 500,000 m<sup>3</sup>, allows the conclusion that the amounts of this wood product type in buildings constructed earlier than the 1970s can be expected to be negligible.

### 3.3 Recovered wood from building deconstruction

For assessing possibilities for high-quality secondary applications of recovered wood from building deconstruction, reliable information concerning amounts and qualities is essential. By applying statistical deconstruction numbers, the recovered wood stream resulting in 2011 was quantified and evaluated in order to derive representative information. The overall deconstruction rate in 2011 of 0.06 % of the building stock led to an amount of roughly 57,000 m<sup>3</sup> of recovered wood in Bavaria, which equals 28,000 tons (Table 6).

**Table 6: Recovered wood stream from building deconstruction in Bavaria for the year 2011.**

Construction period of residential buildings	Number of demolished buildings in 2011	Deconstruction rate	Gross cubic content demolished [m <sup>3</sup> ]	Waste wood [m <sup>3</sup> ]	Quality distribution of waste wood [m <sup>3</sup> ]	
					Classes A I+II	Classes A III+IV
<b>before 1900</b>	104	0.03 %	113,256	8,978	3,843	5,135
<b>1901 – 191</b>	145	0.14 %	157,905	12,518	5,358	7,160
<b>1919 – 1948</b>	150	0.05 %	179,250	3,100	1,327	1,773
<b>1949 – 1962</b>	315	0.06 %	361,305	5,208	2,229	2,979
<b>1963 – 1970</b>	93	0.02 %	106,703	1,538	658	880
<b>1971 – 1980</b>	54	0.01 %	63,102	1,273	545	728
<b>1981 – 2011</b>	31	0.00 %	38,127	769	329	440
<b>Residential buildings</b>	<b>892</b>	<b>0.03 %</b>	<b>1,042,386</b>	<b>33,385 (100 %)</b>	<b>14,290 (43 %)</b>	<b>19,094 (57 %)</b>
<b>Non-residential buildings</b>	<b>1,211</b>	<b>0.30 %</b>	<b>4,979,980</b>	<b>23,453 (100 %)</b>	<b>10,912 (47 %)</b>	<b>12,541 (53 %)</b>
<b>Building stock total</b>	<b>2,103</b>	<b>0.06 %</b>	<b>6,022,365</b>	<b>56,838 (100 %)</b>	<b>25,202 (44 %)</b>	<b>31,635 (56 %)</b>

Only the classes A I and A II, which make up less than half of the amount, are potentially suitable for a secondary material use under current legal guidelines, which prohibit the re-use of recovered wood from load-bearing structures and recycling for a secondary high-value application such as the production of boards or planks.

Friedrich et al. (2012) reported an annual total amount of 1.25 million tons of recovered wood for Bavaria in 2010. Assuming a share of 33 % originating from the building sector (Lang 2004), roughly 410,000 tons could be expected, which is more than 14 times higher than our calculated amounts. A possible explanation for this discrepancy could be that the official deconstruction statistics are assumed to be underestimating the numbers considerably. A study by Sautter (2004), whose contents are presented more in detail in Chapter 3.5, showed a four times higher real deconstruction rate compared to the statistical recorded one. Assuming this trend to also be applicable to Bavaria, the calculated amount would increase up to 112,000 tons annually, which is still nearly four times less than the amounts derived from Friedrich et al. (2012).

However, another factor to be taken into account is the fact that our study only encompasses recovered wood from the deconstruction of buildings. Yet, the reported amounts of recovered wood from the building sector generally also includes wood originating from the construction of buildings, such as formwork and packaging. Kroth et al. (1991) calculated an average of 0.7 tons of recovered wood accruing per newly constructed 1,000 m<sup>3</sup> of GCC. Weber-Blaschke et al. (2005) confirm this amount as they state 0.75 tons per 1,000 m<sup>3</sup> of GCC for buildings erected between 1978 and 1999. Sianchuk et al. (2012) state a number of 1.9 tons of wooden building waste per building for the US in 2009. In 2011, new buildings with a total of 68 million cubic meters GCC were constructed in Bavaria (BayLStAD 2012), thereby producing roughly 51,000 tons of additional recovered wood.

Our methodology did not allow the calculation of the volume of recovered wood from building components which are renewed during the life span of a building. Those mainly consist of windows, doors, stairs, flooring, panels and plates. Together they account for 20.2 million cubic meters of the wood in the current stock (Table 5). The average age of the buildings deconstructed in Bavaria in 2011 was 63 years. When assuming one exchange of each of those building products per average building life time, roughly 321,000 m<sup>3</sup> or 160,000 tons respectively of waste wood will be generated by these minor renovations per year.

Wood from deconstruction, building waste and wood from minor renovations together would sum up to 323,000 tons of annually recovered wood. Further investigation is needed to determine the exact share from minor renovations.

### **3.4 Potential amounts for cascading**

Effective cascading requires recovered wood of good quality, i.e. clean, homogenous and in usable dimensions. An entry of the recovered wood at a high level of the cascade chain allows several following steps, since the quality of the wood generally decreases with each step. Previous research has shown that the number of possible cascade steps directly influences the ecological benefits of cascading (Fraanje 1997, Gärtner et al. 2013). In order to determine

potential amounts for a high quality cascading utilization of recovered wood, two suitable types of recovered wood were determined and their amounts calculated.

The first group of suitable recovered wood consists of rather large, formerly structurally used wooden parts. This share mainly originates from roof structures or wooden ceilings. Roughly one quarter of the total recovered wood (25 %) can be classified in this group (Table 7). Possible secondary utilizations could be a re-use as part of a load-bearing structure, an application in interior design or the manufacturing of boards and planks. However, with the current legal situation in Germany, the re-use of this wood in load-bearing structures is not allowed, as the German Waste Wood Act (German Government 2003) classifies this wood in class A IV, which disqualifies the wood for other applications than energy production. Nevertheless, also these amounts are included in the calculations as they are potentially valuable input resources for cascading. The overall cascading potential (Table 7) is therefore higher than the total amount of class A II wood (Table 6). For an effective use of this considerable resource amount and in the light of improving sorting technologies for recovered wood, this strict regulation ought to be reconsidered.

Another factor determining the potential of recovered wood from building deconstruction for cascading utilization is the share of solid wood without major contamination (class A I+II), which is a suitable raw material for engineered wood products such as particleboards or even OSB and other high-quality products. We found that 21 % of the recovered wood from building deconstruction in Bavaria meets these requirements (Table 7). The quality requirements for particleboard also allow for waste wood fractions consisting of engineered wood products to be used as input, which increases the potentially available amount to 44 % of the total recovered wood (Classes I + II; Table 6).

**Table 7: Potential amounts for cascading utilization of recovered wood from building deconstruction in Bavaria in 2011. Percentages refer in each case to the total amount of recovered wood of 56,838 m<sup>3</sup> as presented in Table 6.**

	<b>Structural components suitable for re-use [m<sup>3</sup>]</b>	<b>Solid wood [m<sup>3</sup>]</b>
<b>Residential buildings</b>	7,016 (10 %)	7,072 (16 %)
<b>Non-residential buildings</b>	6,948 (16 %)	4,954 (11 %)
<b>Building stock total</b>	13,964 (25 %)	12,026 (21 %)

As mentioned in Chapter 2.3, we assumed minimum contamination during the service life of the wooden building components. Currently, the actual share of non-contaminated solid wood from dismantling can be assumed to be lower than the amounts calculated by applying this assumption. Yet, with a rising awareness of the problems associated with chemicals and preservatives in wood, an achievement of this share in recovered wood streams from buildings can be seen as probable. Problems generally occur twofold: In both the production and use phase of impregnated wood and wooden products can the applied chemicals such as chromium and copper or substances such as creosote cause serious harm to human health. Additionally, the end-of-life options for impregnated wood are restricted, since an incineration with effective flue gas cleaning often is the only viable option. The Biocidal Products Directive (98/8/EC) of the

EU, issued in 2000, accommodates these facts by requiring the authorization of a wide range of biocide products, which previously could be applied without authorization.

In the study area, the development towards constructive instead of chemical wood protection will be further encouraged by a current change of the standard DIN 68800, which rescinded the mandatory treatment of certain wooden building parts with preservatives and generally emphasizes a reticent application of chemical wood treatment.

### **3.5 Relevance of recovered wood from deconstruction for a cascading utilization**

To determine the relevance of recovered wood from building deconstruction for cascading utilization, we additionally conducted a scenario analysis by applying different deconstruction rates and comparing the resulting amounts of recovered wood to the annual input of virgin wood in the wood products manufacturing industry in Bavaria. Scenario A depicts the current deconstruction rate of 0.06 %, as derived from statistical data (BayLfStaD 2012). Scenario B assumes a four times higher rate, in accordance with a study of Sautter (2004), carried out for the neighboring state of Hesse in Germany. It showed a four times higher real deconstruction rate compared to the statistical recorded one. Scenario C assumes a building lifetime of 80 years, as given by IEMB (2006), to be the technical lifetime of brick buildings in Germany. Finally, in scenario D, the average building lifetime is assumed to be 50 years, in accordance with most Life Cycle Assessments (LCA) of buildings, especially in the German Building Certification Scheme DGNB (Lemaitre 2011).

Particleboard is the most important utilization of recovered wood as a secondary material in Bavaria. Due to given requirements regarding size, moisture and color of the applied wood chips, recovered wood is suitable when applying a thorough sorting beforehand. Furthermore, particleboard is the only industrially manufactured wood product of significance in Bavaria in regard to production volume. According to Friedrich et al. (2012) a raw material input of approximately 750,000 tons of wood was required in 2011 in Bavarian production sites. Since it can be assumed that in 2011 already 33 % of this amount was constituted by recovered wood (EPF 2012), only 500,000 tons of virgin wood were utilized. This amount of virgin wood could further be reduced by using recovered wood from building deconstruction, if the concept of cascading were widely applied. Due to legal guidelines and quality standards, only recovered wood of the quality classes I and II (Table 1) is eligible for particleboard production.

When applying the statistical recorded deconstruction rate of 0.06 % as in scenario A, slightly less than 13,000 tons of suitable secondary raw material will be available per year (Table 8). This amount could replace only 3 % of the total annual demand of 500,000 tons. Assuming the findings of Sautter (2004) to be applicable for Bavaria, a resulting deconstruction rate of 0.25 % would lead to a potential contribution of 10 % (Scenario B, Table 8). Scenarios C and D are based on different average building lifetimes, in accordance with IEMB (2006) and LCA principles in building certification (Lemaitre 2011). Both scenarios lead to a substantial increase in recovered wood from deconstruction, enabling considerable substitution of recovered wood for primary wood in particleboard production in Germany.

**Table 8: Scenario analysis of different deconstruction rates, resulting amounts of recovered wood and their potential contribution to cascading utilization in particleboard production in Bavaria. Percentages refer to the total annual input of virgin wood in particleboard production in Bavaria (500,000 t).**

Scenario	Deconstruction rate	Resulting waste wood [1,000 tons]	Suitable for particleboard production (Class I+II) [1,000 tons]	Possible contribution as cascading resource
A <b>Statistical rate</b>	0.06 %	28	13	3 %
B <b>Assumed real rate</b> (Sautter 2004)	0.25 %	118	52	10 %
C <b>Building lifetime of 80 yrs.</b>	1.25 %	592	261	52 %
D <b>Building lifetime of 50 yrs.</b>	2.00 %	947	417	83 %

However, deconstruction rates have been gradually declining in Bavaria since a peak at the beginning of the 1990s for both residential and non-residential buildings. A rise to a magnitude seriously influencing the available amounts of recovered wood as shown in Scenarios C and D is therefore not to be expected in the near future. Furthermore, despite its being technically feasible and already established in other European countries such as Italy, Great Britain and France, using higher amounts of waste wood in particleboard production seems to meet a certain resistance both by customers and producers in Germany. Some reasons may be a reluctance to purchase products manufactured out of “waste” on the part of the customers and an apprehension to possibly exceed maximum permissible values of contaminants on the part of the manufacturers.

Even as recovered wood from building deconstruction only contributes a minor share to the overall amount of recovered wood, it is nevertheless important for a cascading utilization of wood. Due to the partly larger size compared to recovered wood parts from other sources such as furniture, applications with a higher quality such as OSB, floorings or re-use are possible. This requires a planned and thoroughly executed deconstruction in order to salvage those parts which are suitable for these purposes. Kibert (2003) describes the opportunities and constraints associated with deconstruction. Among the constraints are especially the uniqueness of most buildings and the use of aggregated and hardly separable materials.

As deconstruction rates cannot be expected to increase, the focus should be on improving and simplifying deconstruction, thereby maximizing the originating potential amounts of secondary resources.

In order to facilitate a disassembly of buildings and allow a re-use and recycling of the incorporated materials, some steps should be taken already in the design phase and during the construction process. Of major importance is a profound knowledge regarding the incorporated materials, accessibility to all parts of the buildings and the possibility to remove and replace individual building parts without demolishing the whole complex (Crowther 1999, Kibert 2003). In the case of wood as a building material, efforts have been made over the last years to implement these principles of design for disassembly: Buildings constructed with pre-assembled wood frame wall elements can easily be disassembled after their service life and the reduction of chemicals in wood preservation also facilitates a re-use as secondary material. However, it is additionally necessary to further develop and implement robust and efficient analytical sensor technologies to secure a reliable identification of impurities and contaminants.

## **4 Conclusion**

Our study revealed a considerable amount of recovered wood from the building sector available in conditions which allow a high-quality material cascading and thus a secondary utilization.

Forty-four percent of the recovered wood from building deconstruction is potentially suitable for use as raw material for particle- or fiberboard production, and 25 % would even be applicable in a re-use scenario, thereby adding an additional step to a possible cascading of recovered wood and thus increasing the time span of carbon storage in the wood products in order to delay its contribution to the greenhouse effect. Twenty-one percent of the recovered wood could be utilized for high-quality secondary applications.

Yet, to be able to use this resource potential of the building stock to its fullest extent, the deconstruction of existing buildings has to be conducted in such a way that a recovery of the incorporated valuable secondary resources is possible. Currently, the awareness of the importance of resources stored in the building stock is rather unpronounced, resulting in a destruction of valuable resources during the process of demolishing. With rising prices for resources, a change in awareness can be expected in the future.

Additionally, legal regulations currently hinder certain aspects of an effective cascading use of recovered wood, such as the reuse of structurally used wood components. To facilitate cascading in the future, adaptations in the legal guidelines should be considered. Especially the reuse of structural components should be permitted for those suitable in regard to strength properties und contamination.

Detailed information regarding the stock and its contents – as provided by this study for the wood fraction – is crucial and will become even more important with increasingly scarce primary resources. To apply the concept of cascading of recovered wood in the most beneficial way, further research regarding the ecological and economic benefits, the necessary logistics and the technical processing is necessary.

## **Acknowledgements**

The authors thank Dr. John Guess for language editing and the reviewers for helpful comments and suggestions on previous versions of this paper. The authors gratefully acknowledge funding by the Bavarian State Ministry of Food, Agriculture and Forestry.

## 5 References

- Baudirektion Kanton Zürich. Bau- und Rückbau: Massenflüsse 1900-2020: Modellierung der wichtigsten Materialflüsse rund um das Bauwerk Kanton Zürich: AWEL Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft; 2010.
- BayLfStaD – Bavarian Statistical Office. Baufertigstellungen in Bayern im Jahr 2011; 2012. Bericht F II 2j 2011.
- BDZ-Association of the German Cement Industry. Baustoffverbrauch im Nicht-Wohnungsbau 2009: Ergebnisse einer Erhebung zum Baustoffverbrauch nach Bauteilen: Bundesverband der Deutschen Zementindustrie e.V.; 2009.
- BKI GmbH. Software and database "BKI Kostenplaner": Version 14. Stuttgart: Baukosteninformationszentrum Deutscher Architektenkammern; 2011.
- BMU-German Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation and Nuclear Safety. Nachhaltigkeitsstrategie: Perspektiven für Deutschland. Berlin; 2002.
- BMU-German Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation and Nuclear Safety. Strategie Ressourceneffizienz: Impulse für den ökologischen und ökonomischen Umbau der Industriegesellschaft. Berlin; 2008.
- BMU-German Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation and Nuclear Safety. Deutsches Ressourceneffizienzprogramm (ProgRess). Berlin; 2012.
- BMVBS-German Federal Ministry of Transport, Building and Urban Development. Typologie und Bestand beheizter Nichtwohngebäude in Deutschland. Berlin; 2011. BMVBS-Online-Publikation 16/2011.
- Bringezu S. Potenziale und Perspektiven von Urban Mining: Presentation at the 3<sup>rd</sup> Congress on Urban Mining. Iserlohn, Germany; 2012.
- Coelho A, Brito J de. Influence of construction and demolition waste management on the environmental impact of buildings. *Waste Management* 2012;32(3):532–41.
- Crowther P. Design for Disassembly to Extend Service Life and Increase Sustainability. In: Lacasse MA, Vanier DJ, editors. *Durability of Building Materials and Components 8: Service Life and Asset Management*. Proceedings of the 8th DBMC Conference, Vancouver; 1999.
- Diefenbach N, Cischinsky H, Rodenfels M, Clausnitzer K. Datenbasis Gebäudebestand: Datenerhebung zur energetischen Qualität und zu den Modernisierungstrends im deutschen Wohngebäudebestand. Darmstadt: Institut Wohnen und Umwelt; 2010.
- Dornburg V, Faaij APC. Cost and CO<sub>2</sub>-emission reduction of biomass cascading: Methodological aspects and case study of SRF poplar. *Climatic Change*; 2005(71):373–408.
- EPEA Internationale Umweltforschung. CO<sub>2</sub>-Speicherung und Wertschöpfung – Holznutzung in einer Kaskade. Hamburg; 2009.
- EPF European Panel Foundation. Annual Report 2011-2012. Brussels; 2012.
- European Commission. EUROPE 2020: A strategy for smart, sustainable and inclusive growth. Brussels; 2010.
- European Commission. A resource-efficient Europe: Flagship initiative under the Europe 2020 Strategy. Brussels; 2011.
- Fraanje PJ. Cascading of pine wood. *Res Con Rec*;1997(19):21–8.
- Fraanje PJ. Use of wood in new Dutch one family dwellings since 1969. *Eur J Wood Prod* 1999;57:407–17.



- Friedrich S, Schumann C, Zormaier F, Schulmeyer F, Dietz E, Burger F et al. Energieholzmarktbericht 2010: Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft; 2012. LWF Wissen 70.
- Gärtner SO, Hienz G, Keller H, Paulsch D. Ökobilanz der kaskadierten Nutzung nachwachsender Rohstoffe am Beispiel Holz – eine Einordnung. *uwf* 2012;20(2-4):155–64.
- Gärtner S, Hienz G, Keller H, Müller-Lindenlauf M. Gesamtökologische Bewertung der Kaskadennutzung von Holz: Umweltauswirkungen stofflicher und energetischer Holznutzungssysteme im Vergleich. Heidelberg: IFEU; 2013.
- German Government. Verordnung über Anforderungen an die Verwertung und Beseitigung von Altholz: Altholzverordnung - AltholzV; 2003.
- German Government. Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen: KrWG; 2012.
- German Institute for Standardization. DIN 277-1: Areas and volumes of buildings - Part 1: Terminology, bases of calculation. Berlin: Beuth Verlag, 2005.
- Görg H. Entwicklung eines Prognosemodells für Bauabfälle als Baustein von Stoffstrombetrachtungen zur Kreislaufwirtschaft im Bauwesen. Darmstadt: Verein zur Förderung des Instituts für Wasserversorgung, Abwasserbeseitigung und Raumplanung der Technischen Hochschule Darmstadt; 1997.
- Goverse T, Hekkert MP, Groenewegen P, Worrell E, Smits RE. Wood innovation in the residential construction sector; opportunities and constraints. *Res Con Rec* 2001;34(1):53–74.
- Gustavsson L, Sathre R. Energy and CO<sub>2</sub> analysis of wood substitution in construction. *Climatic Change* 2011;105(1-2):129–53.
- IEMB Institut für Erhaltung und Modernisierung von Bauwerken e.V. an der TU Berlin. Lebensdauer von Bauteilen und Bauteilschichten: Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung; 2006. Info-Blatt Nr. 4.2.
- IWU Institut Wohnen und Umwelt. Deutsche Gebäudetypologie. Systematik und Datensätze. Darmstadt; 2005.
- Kibert CJ. Deconstruction: the start of a sustainable materials strategy for the built environment. *UNEP Industry and Environment* 2003; 26(2/3):84–8.
- Kloft H, Wörner J, Liebermann A. An investigation of the use of building materials in residential premises constructed at different times. *IABSE congress report* 1996;15:481–486.
- Kohler N, Hassler U, Paschen H. Stoffströme und Kosten in den Bereichen Bauen und Wohnen. Berlin; Heidelberg; New York: Springer; 1999.
- Kroth W, Kollert W, Filippi M. Analyse und Quantifizierung der Holzverwendung im Bauwesen. München: Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau; 1991.
- Haberl H, Geissler S. Cascade utilization of biomass: strategies for a more efficient use of a scarce resource. *Ecol Eng* 2000;16:111–121.
- Lafleur MCC, Fraanje PJ. Towards a sustainable use of the renewable resource wood in the Netherlands - a systemic approach. *Res Con Rec*;1997(20):19–29.
- Lang A. Charakterisierung des Altholzaufkommens in Deutschland: Rechtliche Rahmenbedingungen, Mengenpotenzial, Materialkennwerte. Hamburg; 2004.
- Lemaitre C. Nachhaltiges Bauen: DGNB Handbuch Neubau Wohngebäude ; Version 2011. 2nd ed. Stuttgart; 2011.
- LFU - Bavarian State Institute for Environment. Altholz; 2012. infoBlatt Abfallwirtschaft.
- Mantau U, Weimar H, Kloock T. Standorte der Holzwirtschaft - Holzrohstoffmonitoring: Altholz im Entsorgungsmarkt - Aufkommens- und Vertriebsstruktur 2010. Abschlussbericht. Hamburg; 2012.

- Merl AD. Reuse, recycling and energy generation of recovered wood from building construction - Showcase Vienna. In: Gallis C, editor. Management of Recovered Wood: Reaching a Higher Technical, Economic and Environmental Standard in Europe. Proceedings of the 3<sup>rd</sup> European COST E31 Conference. Klagenfurt; 2007. p. 237–251.
- Müller DB. Stock dynamics for forecasting material flows—Case study for housing in the Netherlands. *Ecol Econ* 2006;59(1):142–156.
- Richter K. Perspektiven der stofflichen Verwendung von Holz. In: Thees O, Lemm R, editors. Management zukunftsfähige Waldnutzung: Grundlagen, Methoden und Instrumente. Zürich: vdf Hochschulverlag; 2009. p. 697–714.
- Rubli S, Schneider M. Ressourcenmodell mineralischer Baustoffe auf der Ebene Stadt Zürich: Schlussbericht; 2007.
- Sathre R, Gustavsson L. Energy and carbon balances of wood cascade chains. *Res Con Rec* 2006(47):332–355.
- Sautter H. Wohnungsbedarfsprognose Hessen 2020. Darmstadt: Hessisches Ministerium für Wirtschaft, Verkehr und Landesentwicklung; 2004.
- Schwarzbauer P, Stern T. Energy vs. material: Economic impacts of a “wood-for-energy scenario” on the forest-based sector in Austria — A simulation approach. *Forest Policy Econ* 2010;12(1):31–38.
- Sianchuk R A, Ackom E K, McFarlane P N. Determining Stocks and Flows of Structural Wood Products in Single Family Homes in the United States between 1950 and 2010. *Forest Prod. J.* 2012;62(2):90–101.
- Sirkin T, ten Houten M. The Cascade Chain: A Theory and Tool for Achieving Resource Sustainability with Application for Product Design. *Res Con Rec*;1994(10):213–77.
- Thormark C. Conservation of energy and natural resources by recycling building waste. *Res Con Rec* 2001;33(2):113–30.
- Weber-Blaschke G, Faulstich M. Analyse, Bewertung und Management von Roh- und Baustoffströmen in Bayern. Freising: Technische Universität München, Lehrstuhl für Technologie Biogener Rohstoffe; 2005.
- Weber-Blaschke G, Zettel S, Pacher C. Datenvalidierung bei der Ermittlung von Baustoffströmen. *Wasser und Abfall* 2006a(5):41–46.
- Weber-Blaschke G, Pacher C, Faulstich M. Resource Management in the Building Sector. In: Future Technologies in Bavaria. Environment and Energy in Bavaria. München: Media Mind; 2006b. p. 62–66
- Weng C, Yashiro T. Urban Mining: The City as a Resource for Re-usable Building Materials. In: Jia B, editor. Dense Living Urban Structures: Proceedings of the International Conference on Open Building, Hong Kong; 2003.
- Werner F, Taverna R, Hofer P, Richter K. Carbon pool and substitution effects of an increased use of wood in buildings in Switzerland: first estimates. *Ann For Sci* 2005;62(8):889–902.
- Werner F, Althaus H, Richter K, Scholz RW. Post-consumer recovered wood in attributive product LCA: Context specific evaluation of allocation procedures in a functionalistic conception of LCA. *Int J LCA* 2007;12(3):160–172.
- Wiegand T. Studiengemeinschaft Holzleimbau e.V. (Association for building with Glulam); personal communication. 2012
- Wittmer D, Lichtensteiger T. Exploration of urban deposits: long-term prospects for resource and waste management. *Waste Manage Res* 2007;25(3):220–226.

2

# Utilization of recovered wood in cascades versus utilization of primary wood—a comparison with life cycle assessment using system expansion

Karin Höglmeier · Gabriele Weber-Blaschke · Klaus Richter

Received: 27 January 2014 / Accepted: 23 June 2014 / Published online: 19 July 2014  
© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2014

## Abstract

**Purpose** A cascading utilization of resources is encouraged especially by legislative bodies. However, only few consecutive assessments of the environmental impacts of cascading are available. This study provides answers to the following questions for using recovered wood as a secondary resource: (1) Does cascading decrease impacts on the environment compared to the use of primary wood resources? (2) What aspects of the cascading system are decisive for the life cycle assessment (LCA) results?

**Methods** We conducted full LCAs for cascading utilization options of waste wood and compared the results to functionally equivalent products from primary wood, thereby focusing on the direct effects cascading has on the environmental impacts of the systems. In order to compare waste wood cascading to the use of primary wood with LCA, a functional equivalence of the systems has to be achieved. We applied a system expansion approach, considering different options for providing the additionally needed energy for the cascading system.

**Results and discussion** We found that the cascading systems create fewer environmental impacts than the primary wood systems, if system expansion is based on wood energy. The most noticeable advantages were detected for the impact categories of land transformation and occupation and the demand of primary energy from renewable sources. The results of the sensitivity analyses indicate that the advantage of the cascading system is robust against the majority of considered factors. Efficiency and the method of incineration at the end of life do influence the results.

**Conclusions** To maximize the benefits and minimize the associated environmental impacts, cascading proves to be a preferable option of utilizing untreated waste wood.

**Keywords** Cascading · Life cycle assessment (LCA) · Particleboard · System expansion · Recovered wood · Waste wood

## 1 Introduction

Although wood is a regrowing and, thus, renewable resource, it is not infinitely available. A continuous substantial increase of the harvested volume cannot be realized in most European countries, either because the total increment is already reaped, additional amounts are located in privately owned forests where wood harvesting is not desired by owners, or due to aspects of nature conservation. Mantau et al. (2010) predicted that by 2030 at the latest, demand will exceed the overall wood supply in the 27 EU countries. As wood products often lead to considerably less impact on the environment during their production and end-of-life phase compared to equivalent products out of mineral and fossil resources (Sathre and O'Connor 2010; Werner et al. 2005; Werner and Richter 2007), an increase of their amount would be beneficial in terms of environmental and resource protection. Rising prices of fossil fuels in combination with feed-in tariffs for electricity produced from biomass have led to an increase of demand and, consequently, price of wood assortments for energy production in Germany over the last few years (Härtl and Knoke 2014; Schwarzbauer and Stern 2010). As the same wood assortments that are utilized for energy production are also the main input for the production of wood-based panels such as particleboard, the competition for those wood assortments has increased considerably.

Responsible editor: Niels Jungbluth

K. Höglmeier (✉) · G. Weber-Blaschke · K. Richter  
Chair of Wood Science, Technische Universität München,  
Winzererstr. 45, 80797 Munich, Germany  
e-mail: hoeglmeier@hfm.tum.de

A cascading utilization is often mentioned as a suitable strategy to bridge this gap between rising demand for wood and stagnating availability of primary wood (i.e., wood which has not been used in a prior application) (Mantau 2012). By using the same resource for multiple successive applications, first as a material and finally as a fuel, the benefit created by one unit of a resource could be multiplied.

Recovered wood or waste wood, i.e., wood which has been already utilized at least in one prior application, is available in progressively good quality and quantity due to advances in sorting technology. Furthermore, the currently increasing use of wood in building applications and transport systems is expected to increase the amount of recovered wood considerably in the upcoming years. Legal requirements, such as landfill bans, additionally drive an increase in the availability for secondary applications. Until now, the majority of this valuable resource is either landfilled or incinerated, partly with energy recovery, throughout the EU. Using this wood first for a material application before the final disposal can help mitigate the scarcity of wood in the future.

### 1.1 Environmental impacts of wood cascading

A prerequisite for promoting the use of wood in cascades is scientifically sound information concerning the impacts on the environment by using recovered wood multiple times, i.e., in cascades. Up to now, only a few studies dealing with the concept of cascading of wood are available. Overall, they concluded that cascading creates benefits, depending on the specific aspects under study. Fraanje (1997) examined a possible cascade from pine wood in the Netherlands, concluding that cascading can substantially prolong carbon sequestration to mitigate climate change. Sathre and Gustavsson (2006) calculated the primary energy and carbon balances for various wood cascades, taking into account direct cascade effects, substitution effects, and effects of differing land use due to cascading. They concluded that land use effects are the dominating contribution to the overall effects of cascading. A recent study (Sikkema et al. 2013) assesses the consequences of a cascading wood use in Canada on GHG emissions, comparing different cascading scenarios to the IPCC default scenario which assumes an immediate incineration and thereby carbon dioxide release from the wood. They found that noticeable reductions of greenhouse gas emissions can be achieved, yet did not take into account the direct effects of cascading. Gärtner et al. (2013) focused on comparing wood cascades to equivalent nonwood products and credited the cascades for the end-of-life energy production by using life cycle assessment (LCA). The results indicate that cascading creates less environmental burdens than the provision of an equal benefit from nonwood products. Yet, the major part of those benefits by cascading can be attributed to substitution effects. The equivalent fossil- or mineral-based products in

most cases have higher environmental burdens than wood products. Therefore, when comparing a whole cascade chain to a multitude of equivalents, benefits add up with each cascade step, leading to considerable overall advantages for the cascaded wood products. In contrast, our goal was to determine whether cascading of wood is beneficial in itself without taking substitution into account. This question is important as not all wood products can and will be substituted by nonwood products if not available, for example due to a lack of suitable raw materials. A major application for particleboard, which is the main product produced from recovered wood in Germany, is furniture: Over 70 % of the particleboards produced in Germany are utilized in this way (Mantau and Bilitewski 2010). However, especially in the take-away market sector, a substitution of particleboards by fossil or mineral products in furniture is unlikely, since competitive prices and a low weight are essential criteria. Therefore, assuming potential substitution benefits for all cascaded wood products does not comprehensively depict the real situation. In order to close this gap, we chose to compare the use of waste wood in cascades, mainly for particleboard production, to the production of the same wood products from primary wood. Thus, we are able to determine those environmental effects from cascading which are directly associated to the cascading itself rather than substitution.

We chose LCA to investigate major applications of waste wood in cascades and compared the results to the production of functionally equivalent products out of primary wood. LCA is a powerful tool to gain comprehensive information on environmental impacts of the production of goods and services. It allows the comparison of different ways of production and the resulting environmental impacts.

LCA is ideally suited to answer the following questions:

1. Does a cascading utilization of waste wood lead to lower environmental impacts from the production of wood based panels, compared to the production from primary wood?
2. What aspects of the cascading systems are decisive for the results? (sensitivity analysis)

### 1.2 Functional equivalence of cascading systems

A prerequisite to compare different production systems with LCA is the equality of benefit provided by the systems under study (DIN 2006a). Only if both systems create the same benefit, a comparison and eventual ranking is possible and acceptable. Determining the benefit created by a system is often straightforward when considering, for example, cradle-to-gate production processes of a certain good or service. However, a cascading utilization system produces several goods out of a certain amount of wood during its lifetime. A

LCA study investigating such a system encompasses multiple life cycles of different products, including their end of life. Defining the benefit (=functional unit) of such a complex system can therefore be rather challenging. Besides the production of materials and energy out of wood, the system also takes into account for the necessary disposal of waste wood. When comparing this system to the production of products out of primary wood, an equality of benefit from both systems has to be ensured. This problem has been addressed in a number of studies dealing with the approach of open loop recycling in waste management systems in LCA (Ekvall 1999; Finnveden 1999; Heijungs and Guinée 2007; Jungmeier et al. 2002). Although our focus is not primarily on waste management, but rather more on a holistic cascading utilization of waste wood, the challenges are similar. The ISO 14040 standard favors the system expansion method to ensure a functional equivalence of the compared systems.

Yet, system expansion as well as its “inversion,” crediting for avoided burdens, is regarded critically by some authors. Heijungs and Guinée (2007) argue that crediting of systems, and thereby the required decision of which process will be assumed to be avoided, is one of the main reasons for strongly varying or even contradictory results when evaluating waste management systems. They propose that partitioning multi-output processes and thereby allocating the burdens to specific products is preferred. Another point mentioned by both Ekvall (1999) and Finnveden (1999) is the fact that applying system expansion approaches does not enable the focus on just one of the products provided by a system, which may lead to a loss of information concerning the single life cycles of the system.

However, the system expansion approach has also a number of strong points. Most importantly, it allows the avoidance of choices on allocation which in some cases also can have considerable influence on the results (economic vs. physical allocation) (Finnveden 1999; Ekvall 1999; Jungmeier et al. 2002; Werner et al. 2007). Finnveden et al. (2009) declare system expansion as suitable if LCA is used as tools to not only investigate the life cycles of single products but rather to examine combinations of several life cycles. As cascading per se leads to a multitude of products over the whole run of the cascade, our focus consequently is not on one product but rather on the overall products made out of the cascaded waste wood (boards, energy). Therefore, to compare the cascading system to products out of primary wood, an approach to LCA with allocation is not applicable. Also losses in information in regard to life cycles of single products as mentioned by Ekvall (1999) are of minor importance in our study, due to the more holistic focus.

For comparing a cascading utilization of waste wood to the use of primary wood resources as intended in our study, system expansion and derived approaches, such as the “avoided burden” concept, can therefore be seen as adequate and preferential. We chose this approach in order to enable the

comparison of the two systems in our study. In this context, we derived answers to the following methodological questions from the presented LCA study of cascading uses of waste wood:

3. Is system expansion as described in ISO 14040 a suitable method to compare cascading to noncascading production systems?
4. How do choices of system expansion influence the results?

## 2 Material and methods

### 2.1 Systems under study

The starting point for the cascading system was 1 metric ton of untreated waste wood with a moisture content of 18 %. The waste wood was assumed to enter the system under study at the stage of “end-of-waste” of the previous production system. Consequently, it carried no burdens from previous life cycles. However, inherent properties of the material such as the content of biogenic carbon and primary energy were modeled and considered. As particleboard is the most common material application of waste wood in Germany, the basic waste wood cascading system consists of two steps of particleboard production followed by an incineration in a 6.4-MW combined heat and power plant (CHP plant), which is representative for waste wood incineration in Germany (Fig. 1). Between each step of the cascade, collection, sorting, and processing of the waste wood take place in order to ensure a suitable quality for the next application. The reference system was assumed to produce the same amount of particleboard from primary wood, mainly low diameter wood from thinning operations. The end of life of this particleboard also consisted of incineration in the same CHP plant as used in the cascading system. The use phase of the products was outside the scope of the study as it can be assumed to be similar for both systems and, consequently, would not influence the results.

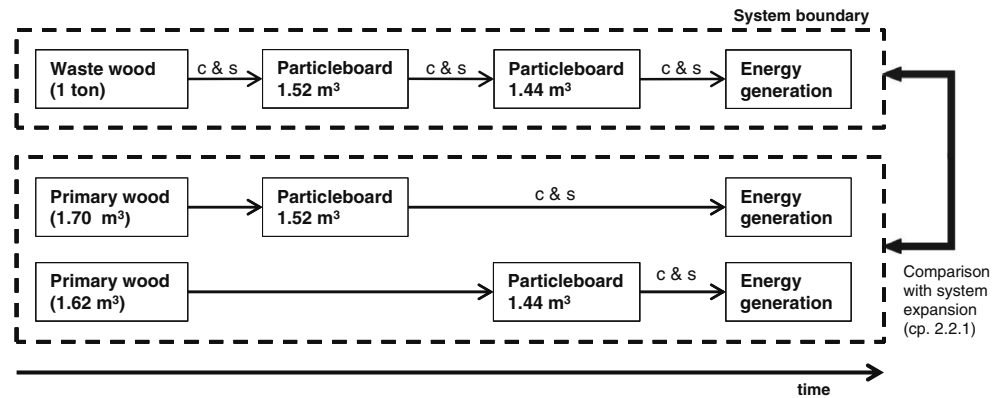
In order to determine the influences of different specifics of the systems on the overall results, various parameter variations were modeled and their impact on the performance of the systems was analyzed (Section 2.2.2).

### 2.2 Approach to the research questions

#### 2.2.1 System expansion to create equality of benefit

Depicting resource cascading in LCA leads to a rather complex model which comprises several different product life

**Fig. 1** Systems under study: waste wood cascade (*top*) and equivalent products from primary wood (*bottom*) (c & s: collection and sorting of the waste wood)



cycles and produces a number of products and services. A necessary prerequisite for the comparison of two systems in LCA is the equality of the benefits generated by the systems (DIN 2006a). Therefore, when comparing waste wood cascading to the use of primary wood, both systems have to provide the same multiple benefits. The standard ISO 14044 (DIN 2006b) describes a number of approaches to deal with multibenefit systems in LCA. The given stepwise procedure implicitly includes a preference for approaches which avoid allocation if possible. In our study, the primary wood system provides a considerably higher amount of energy from the end-of-life incineration of wood panels compared to the cascading system, since the amount of wood required to produce all panels (particleboard or oriented strand board) from primary wood is higher as each unit of wood is used only once for material production. Contrarily, the cascading system utilizes far less wood than the primary system as it produces two or more products in multiple steps from the same amount of wood. This consequently results in lower end-of-life energy amounts. In order to ensure the comparability of the two systems, we applied a system expansion approach, as described by Fleischer and Schmidt (1996) and previously applied by Bystricky et al. (2010). Figure 2 depicts the concept of our system expansion approach exemplified for two different products provided by the cascading system (e.g., particleboard and oriented strand board).

The functional unit for comparing a cascading use of waste wood to the production of equivalent products from primary wood by means of system expansion is summarized in Table 1. The chosen source of energy for the system expansion approach is assumed to have a great influence on the overall results. In the basic scenario, we assumed the additional energy needed in the cascading system to be generated by incineration of waste wood. Additionally, system expansion (SE) variants were modeled as part of the sensitivity analyses.

An important prerequisite when applying system expansion approaches is the equivalency of the products which are supposed to be substitutes (DIN 2006b; Heijungs and Guinée 2007). In case of differing sources of energy generation, such a declaration of equivalency is rather noncontroversial. Each

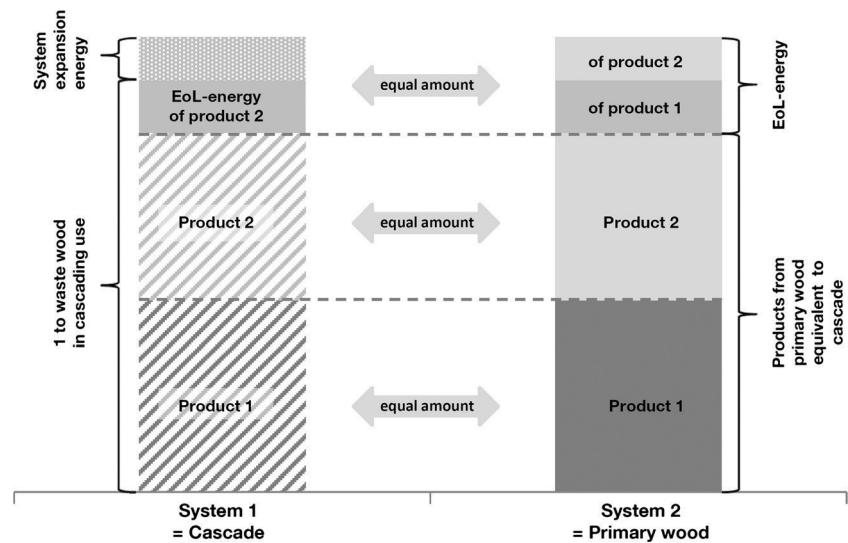
unit of heat or power, regardless of the energy carrier used for its production, is equivalent. The equivalency of panels out of waste wood and primary wood, however, cannot be declared so easily. Differences in color and—most importantly—the customer's perception of the products out of "waste" as something less valuable might point toward lacking equivalency. Yet, as Fleischer and Schmidt (1996, p. 26) point out, "small differences in the quality of the compared products do not influence the comparability [as] otherwise a comparison would frequently be impossible". As wood-based panels are in most cases not utilized "raw" but painted or coated, differences in color can be seen as not relevant and, therefore, harmless for a comparison. Opinions of customers toward products of secondary materials have to be taken seriously, but should not be taken into account when applying a scientific approach such as LCA. Additionally, all particleboards regardless of the used raw material have to fulfill the standard EN 13986 requirements (DIN 2005) and can thus be assumed to be suitable for the intended purpose. Therefore, the equivalency of the products (energy and panels) from waste wood and primary wood compared in this study can be assumed.

### 2.2.2 Sensitivity analyses

The robustness of the results toward systemic changes and uncertainties of assumptions was examined by performing sensitivity analyses for a number of aspects of the systems under study. Table 2 gives an overview of the considered parameters and their variations. The basic scenario represents the average German conditions. Generally, changes were done in the cascading system in order to determine the effects on development of the impact categories relative to the primary wood system.

Already in the basic variant of the cascade, transportation distances for waste wood were assumed to be higher than those for primary wood, as there are fewer waste wood power plants and only a certain number of sorting and processing facilities throughout south-east Germany, thereby increasing the distance for transporting the waste wood. In scenario A1,

**Fig. 2** Scheme of the system expansion applied to compare a cascading use of resources to the use of primary resources for a cascade with two exemplary material production steps



the transportation distances of waste wood were assumed to be equal to those of primary wood, as may be the case in the future, if more waste wood will be used in a cascading application and more processing facilities will be available. Scenario A2 assumed a tripling of the distances of waste wood transportation to 450 km for material application in order to determine whether the performance of a cascading system is dependent on the difference between the transportation of waste wood and primary wood. Finally, scenario A3 assumes a doubling of the distances in both systems to examine the overall effects of transportation on the results. The default case of waste wood processing encompassed an electricity-driven, stationary crusher, as it is the state of the art in larger waste wood facilities in Germany. However, facilities which especially handle only smaller amounts of waste wood per year also operate with mobile diesel-powered crushers. Scenario B assumes the chipping or crushing and sorting to be done in such a way. If taking the effects of material substitution into account, the number of steps of wood cascades influences the environmental performance of cascading (Gärtner et al. 2013). To determine if this is also the case without considering substitution, we increased (C1) and decreased (C2) the number of cascade steps as part of the sensitivity analyses.

Currently, particleboard is the only noticeable material application for waste wood in Germany. Therefore, we considered only this panel type in the basic variant of the systems. In order to determine whether the production of an additional panel type such as oriented strand board (OSB) influences the

results, scenario D includes OSB production as a first step of the cascade. Scenarios E to G explore the influence of variations in the energy production of the systems, either by assuming a production of only electricity as end-of-life option (scenario F), applying different degrees of efficiency to the CHP incineration, or examining the effects of waste wood as a resource to generate the process heat to produce particleboard from fresh wood. Finally, scenario group H examines the influence of different fuels to generate the energy for system expansion.

### 2.3 Data and modeling

#### 2.3.1 Data sources

We used the software GaBi v 6 for all LCA models. If not specified otherwise, the data of ecoinvent v 2.2 (Frischknecht and Jungbluth 2007) was the basis for modeling the systems. Where available, we used data which is representative for German conditions. Table 3 summarizes specifics and data sources for key processes of our LCA models.

The models of OSB and particleboard (PB) are based on the inventory data provided by Rüter and Diederichs (2012), which represents average German conditions. For modeling the waste wood cascading and the primary wood system, adjustments regarding the wood input and the energy input were made. OSB production from waste wood is currently not practiced on an industrial level; consequently, no industry data

**Table 1** Composition of the functional unit for the comparison between cascading of waste wood and utilization of primary wood, including the additional energy accounted for in system expansion

	Particleboard (m <sup>3</sup> )	End-of-life energy (MJ)		System expansion energy (MJ)	
		Heat	Power	Heat	Power
Cascade	2.96	12,077	1,214	12,699	1,269
Primary wood	2.96	24,776	2,482	–	–



**Table 2** Overview of the scenarios considered in the sensitivity analyses of the cascading of waste wood

Scenario	Parameter	Default in basic scenario	Variations
A	Transportation distance of wood resources	Waste wood: 75 km to incineration, 150 km to material application Primary wood: 50 km to incineration, 100 km to material application	A1 Equal distances for both wood types A2 Tripling of distances for waste wood only A3 Doubling of all distances
B	Waste wood preparation	Electric crusher	Diesel-powered crusher
C	Number of cascade steps	2 steps of particleboard production	C1 3 steps of particleboard C2 1 step of particleboard
D	Panel types	Particleboard only	Oriented strand board (OSB)+particleboard
E	Degree of efficiency of CHP	78 % for end of life incineration in both systems	E1 Reduction to 60 % for cascade system (incl. system expansion) E2 Reduction to 40 % for the cascade system (incl. SE)
F	End of life	CHP plant, 6.4 MW	Electricity-only plant, 20 MW
G	Process heat for particleboard production	From primary wood for primary wood panels	From waste wood also for primary wood panels
H	Fuels for system expansion	Waste wood incineration in CHP plant	H1 Forest wood chips in CHP plant H2 Fossil energy sources

is available for such a process. Therefore, we based our model on the experiments of Loth and Hanheide (2004), who developed a method to produce strands of suitable quality out of waste wood by producing maxi-chips in a first step, followed by a stranding of the chips. OSB production from waste wood is considered in our study as a sensitivity analysis in order to assess whether the integration of another type of wood-based panel influences the ranking of the systems decisively.

Particleboard from 100 % of waste wood is currently not produced in Germany. Therefore, we adapted the average German life cycle inventory data (Rüter and Diederichs 2012) which assume a waste wood content of 20 %. The adaptations consisted mainly of increasing the wood loss by chipping and of decreasing the energy required for drying of the wood. The extent of the energy reduction was based on industry information from a German particleboard manufacturer. No adaptations were made for the adhesive resin fraction and other chemicals. The process heat for production of panels from waste wood was assumed to be produced from waste wood as is the case in the particleboard industry in south-east Germany, whereas in case of the panels from primary wood, only the production rejects were assumed to be incinerated for energy production and additional energy was generated from other industrial residue wood.

### 2.3.2 Impact categories

We chose the following impact categories for life cycle impact assessment (LCIA), which were calculated according to CML-IA (Guinée 2002): impact on global warming caused by fossil sources (GW fossil), primary energy consumption of fossil sources (PENR), primary energy demand from renewable sources (PER), acidification (AC), eutrophication (ET),

and human toxicity (HT). In case of GW, we excluded biogenic carbon. As all considered systems depict whole life cycles from carbon dioxide uptake from the air during plant growth to a final release of the carbon via incineration, the systems can be regarded as neutral in regard to biogenic carbon. This approach is in accordance with Pawelzik et al. (2013), who recommend accounting for biogenic carbon only in case of cradle-to-gate assessments.

Additionally, the midpoint indicators for land occupation (LO) and transformation (LT) of ReCiPe 1.07 (Goedkoop et al. 2009) were considered in our assessment, since contrary to the production of primary wood, the provision of waste wood has no direct impact on land occupation. By using secondary resources such as recovered wood, the pressure on available land can be decreased.

## 3 Results

### 3.1 Basic scenario

When producing the same amount of wood-based panels and energy from both cascading utilization of waste wood and from primary wood, environmental burdens are lower in all considered impact categories for the cascade. Figure 3 depicts the differences for the basic scenario with waste wood as the fuel considered in system expansion. Savings by cascading range from slightly over 10 % for the impact category GW to close to 100 % for the impact category land occupation.

A reason for the relatively minor advantages of cascading over the use of primary wood especially in the categories GW and PENR may be that the production of primary wood does

**Table 3** Process specifications and data sources for major processes of modeling waste wood and primary wood utilization

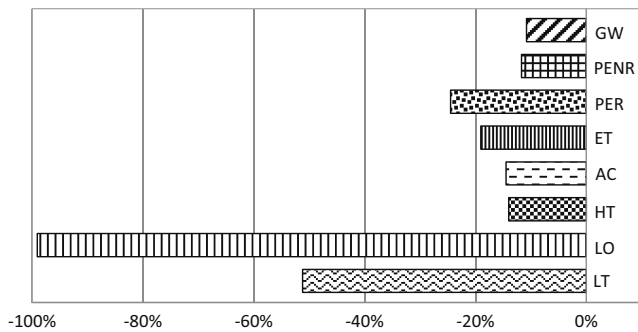
Process	Specifications and assumptions	Data source
<b>Panels</b>		
PB waste wood	<ul style="list-style-type: none"> <li>• German average technology</li> <li>• Reduction of process heat for drying step due to lower water content of waste wood</li> <li>• Wood input: 100 % waste wood</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Rüter and Diederichs (2012)</li> <li>• Industry data (personal communication)</li> </ul>
PB primary wood	<ul style="list-style-type: none"> <li>• German average technology</li> <li>• Wood input: 100 % industrial round wood</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Rüter and Diederichs (2012)</li> <li>• Industry data (personal communication)</li> </ul>
OSB waste wood	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Innovative production process with a 2-step strand production (chipper and strander)</li> <li>• Wood input: 100 % waste wood</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Loth and Hanheide (2004)</li> <li>• Rüter and Diederichs (2012)</li> </ul>
OSB primary wood	<ul style="list-style-type: none"> <li>• German average technology</li> <li>• Wood input: 100 % industrial round wood</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Rüter and Diederichs (2012)</li> </ul>
<b>Energy production/end of life</b>		
Waste wood in CHP plant	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 6.4 MW CHP</li> <li>• SNCR filter for flue gas cleaning</li> <li>• Degree of efficiency: 78 %</li> <li>• Emissions adapted for incineration of waste wood</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• ecoinvent v 2.2</li> </ul>
Forest wood chips in CHP plant	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 6.4 MW CHP</li> <li>• SNCR filter for flue gas cleaning</li> <li>• Degree of efficiency: 78 %</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• ecoinvent v 2.2</li> </ul>
Waste wood to electricity	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 20 MW electric output</li> <li>• Flue gas cleaning</li> <li>• Degree of efficiency: 28 %</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• BioEnergieDat (<a href="http://www.bioenergie-dat.de">www.bioenergie-dat.de</a>)</li> </ul>
Heat from fossil sources	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Generation from natural gas</li> <li>• Plant size &gt;100 kW; low NO<sub>x</sub> status</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• ecoinvent v 2.2</li> </ul>
Electricity	<ul style="list-style-type: none"> <li>• German electricity production mix</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• ecoinvent v 2.2</li> </ul>
<b>Transportation distances</b>		
Waste wood	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Collection to processor: 50 km</li> <li>• Processor to incineration: 75 km</li> <li>• Processor to material application: 150 km</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Industry data</li> </ul>
Primary wood	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Forest wood chips to incineration: 50 km</li> <li>• Industrial round wood for PB: 90 km</li> <li>• Industrial roundwood for OSB: 95 km</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Rüter and Diederichs (2012)</li> <li>• Rüter and Diederichs (2012)</li> </ul>
<b>Waste wood collection, sorting, and chipping</b>		
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Manual sorting</li> <li>• Electrical crusher</li> <li>• On-site transportation with wheel loader</li> <li>• Removal of impurities</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Industry data from 3 different production sites in south-east Germany</li> </ul>

not create substantial environmental impacts, contrary to the provision of most fossil resources. Consequently, when comparing a recycling system such as the cascading of waste wood to an already rather environmentally friendly system such as products from primary wood, no outstanding amounts of savings can be expected.

In order to get a better understanding of the underlying factors influencing the overall results presented in Fig. 3, the LCIA results of the cascading and primary wood systems are broken down into the contributing process groups for the basic variant (Fig. 4). The light gray section of the cascade columns is

the part of the overall impact which is caused by the provision of the additional energy by waste wood required to achieve an equality of benefit by system expansion. The biggest single contribution to nearly all impact categories is made by the process group “chemicals” which contains the impacts of the adhesive resin fraction and other chemicals needed in the panel production. Only in case of land transformation and land occupation, the acquisition of primary wood as a raw material has a higher contribution to the overall impact.

The process group “raw materials” summarizes the impacts created by either the provision of primary wood or recovered



**Fig. 3** LCIA results for the basic scenario of the cascading system (SE waste wood). Displayed is the impact of the cascading system relative to the primary wood system as a reference for all considered impact categories

wood, depending on the system. Sorting and crushing the waste wood to produce suitable input material for either panels or incineration leads to considerably less impacts in all categories than providing equivalent raw material from primary wood. The value for GW is 50 % reduced, for PENR nearly 80 %. However, as the contribution of raw material provision to the overall impacts of the systems is lower than 5 % for all categories except PER, LT, and LO, these differences only have a minor influence on the overall impact of the systems.

The process group “transport” includes transportation of all raw materials. Despite the lower distances assumed in the primary wood system, the impacts from transportation are higher because the primary wood is generally transported with a higher moisture content than the waste wood.

The electricity needed in the panel production (part of “energy fossil”) is higher for the primary wood system as the chipping or stranding of the industrial round wood takes place at the panel production site, whereas the waste wood is already delivered in chipped form and the associated energy consumption already accounted for in the “raw material” section. Particleboards from waste wood have a lower consumption of process energy (“energy bio”), as the waste wood has a considerably lower moisture content and less energy is needed for drying compared to the production with fresh wood. The aspects where a distinction between the systems is possible—mainly the impacts related to raw material provision—provide minimal contribution to the overall system impact and do not strongly influence the overall results. The albeit small but noticeable advantages of cascading variants using wood as additional energy source should be regarded against this background.

### 3.2 Sensitivity analyses

#### 3.2.1 Influence of system expansion

The type of fuel accounted for in the system expansion scenarios (group H) strongly influences the performance of the

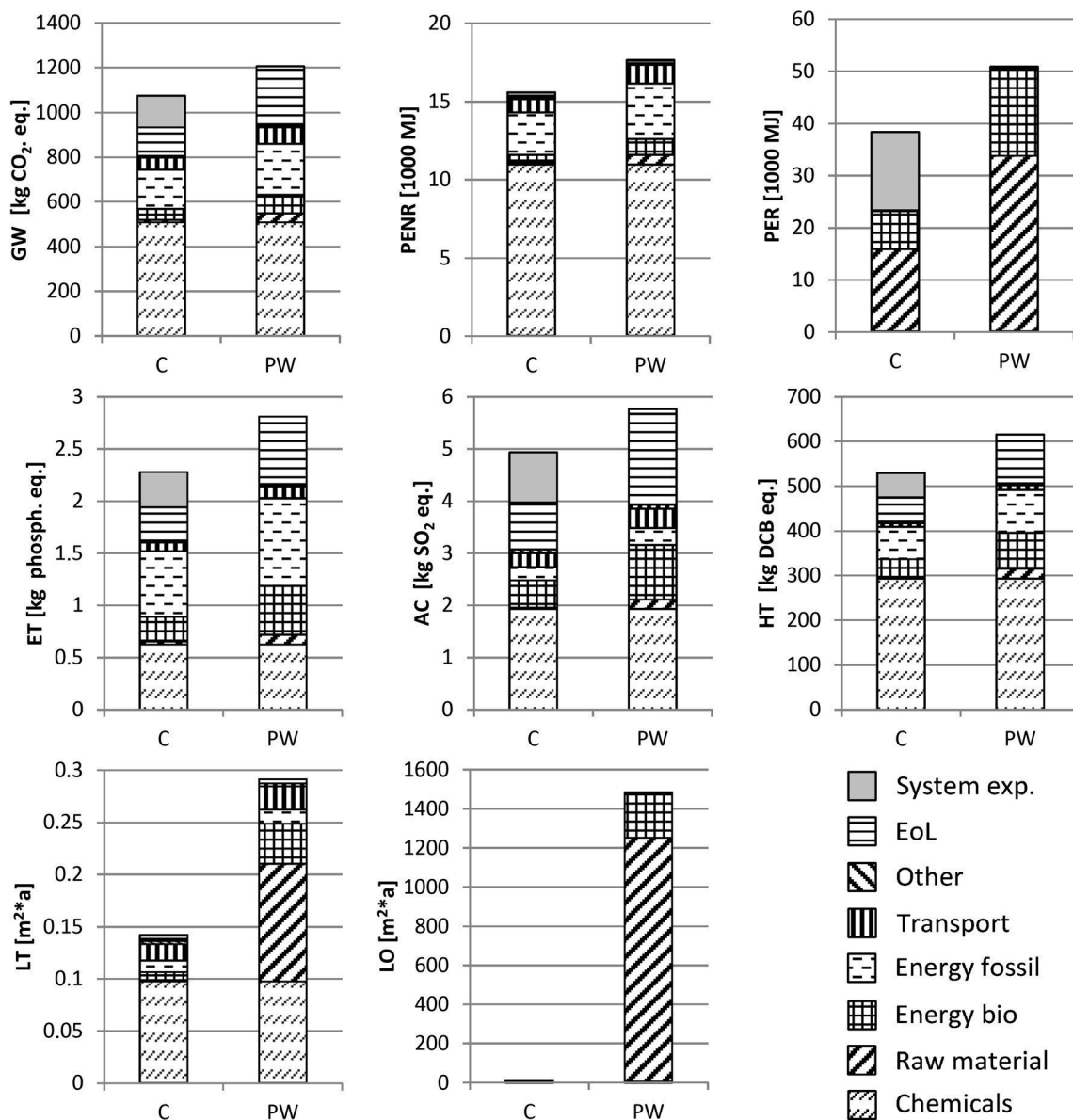
cascading system in comparison to the primary wood reference system. Even if the additional energy is assumed to be generated by incinerating primary wood instead of waste wood (variant H1), cascading still leads to lower impacts on the environment compared to the reference system (Table 4). Yet, for all impact categories, the advantages of the cascade decrease, especially notable in the categories of land occupation and transformation, due to the use of primary wood. The second considered variant (H2), which represents the provision of the system expansion energy by natural gas and the electricity production mix of Germany, leads to a 78 % higher amount of greenhouse gases and a 96 % higher consumption of primary energy from nonrenewable sources by the cascading system, compared to the primary wood system. Eutrophication is the third impact category which depicts an advantage for the use of primary wood, while the four remaining categories depict lower values for the cascading system with a system expansion based on predominately fossil fuels.

#### 3.2.2 Influences of specific processes of the cascading system

The results of the sensitivity analyses focusing on process specifics are summarized in Table 4 (scenarios A to G). Transportation mainly influences the categories GW, PENR, and ET as it consumes fossil fuels. The categories PER, HT, LC, and LO are only marginally influenced since they do not predominately measure the impacts of fossil resource consumption. Consequently, the performance of the cascade in relation to the primary wood system improves, especially in regard to GW, PENR, and ET in the scenario which assumes smaller distances for the cascading system (A1). Scenario A2 represents a tripling of the distances of waste wood transportation to 450 km for material application. Despite this increase, cascading still does not lead to higher environmental impacts than the use of primary wood. A doubling of the distances in both systems (A3) has no major influence on the results, due to the overall low influence of transportation-related impacts. Scenario B was calculated by assuming crushing was done with a diesel-driven device. However, the minor changes in the results compared to the basic variant indicate that the sort of chipper or crusher used in the facility has virtually no influence on the environmental impacts.

The increase of cascading steps in scenario C1 led to a slight reduction of the advantage of the cascading system, whereas the decrease to one particleboard step (C2) led to a better performance relative to the primary wood system. Overall, the number of cascading steps can be seen as inconsequential to the comparison.

Including the production of another wood panel type (OSB) into the waste wood cascade entails a less pronounced advantage of the cascading system. The degree of efficiency of the end-of-life incineration strongly influences the results: decreasing the efficiency in the cascading system including



**Fig. 4** Contribution of different process groups of the life cycle to LCIA results in the basic scenario for the considered impact categories (*C* cascading system, *PW* primary wood system)

the system expansion energy to 60 % substantially diminishes the potential advantages of the cascade for nearly all impact categories. Assuming a decrease to a value as low as 40 % consequently favors the primary wood system considerably.

Changing the incineration at the end of life from a CHP plant to a power plant which generates only electricity improves the performance of the cascade relative to the primary wood system (scenario F). Assuming that the process heat required for particleboard production is generated by incinerating waste wood also in case of the primary wood system does not distinctly influence the results.

The results of the sensitivity analyses confirm the findings based on the analysis of the contribution of the process group

to the overall impacts (Section 3.1). Due to the overwhelming influence of the adhesive resin fraction on most impact categories, the system comparison proved to be insensitive to most of the more “technical” aspects which only contribute a small amount to the overall impacts of the systems. Thus, changes in these process groups have no significant effects on the overall comparison. It stands to reason that this may be different when integrating wood products which are manufactured without considerable chemical raw material contribution, e.g., floor boards, in the cascades. However, we decided to focus our assessment on wood panels as they are today the only application of a waste wood as a material resource with an industrial importance.

**Table 4** Variations in LCIA for different system variants. Energy for system expansion is assumed to be generated from waste wood in all cases except variants H. The numbers indicate the impacts caused by the

cascading system relative to the primary wood system. Positive values, which indicate a relative advantage of the primary wood system, are stated in italics

Scenario	Aspect of analysis	GW (%)	PENR (%)	PER (%)	AC (%)	ET (%)	HT (%)	LO (%)	LT (%)
Basic		-10.8	-11.7	-24.5	-14.5	-19.1	-14.0	-99.1	-51.2
A	Transportation								
A1	Equal distance	-12.2	-13.2	-24.5	-15.9	-20.0	-14.4	-99.1	-52.9
A2	Waste wood tripled	-3.0	-3.3	-24.5	-6.5	-14.0	-11.7	-99.1	-41.6
A3	Doubled both	-11.5	-12.4	-24.5	-15.1	-19.3	-14.2	-99.1	-49.6
B	Diesel chipper (waste wood)	-10.8	-11.6	-24.5	-14.4	-19.1	-13.8	-99.1	-50.8
C	Number of cascade steps								
C1	3 steps	-10.6	-11.4	-24.5	-14.3	-18.9	-13.9	-99.1	-50.9
C2	1 step	-11.5	-12.5	-24.5	-15.2	-19.5	-14.2	-99.1	-52.1
D	Panel types	-7.0	-7.8	-19.5	-9.7	-11.6	-11.2	-99.2	-54.9
E	Efficiency of CHP incineration								
E1	60 %	-3.5	-10.9	-6.2	-4.2	-11.7	-8.4	-99.0	-50.3
E2	40 %	<i>11.6</i>	-9.3	<i>31.9</i>	<i>17.1</i>	<i>3.6</i>	<i>3.1</i>	-98.9	-48.5
F	Electricity only as EoL	-13.6	-11.8	-24.5	-17.4	-22.5	-15.6	-99.3	-51.7
G	Process heat from waste wood	-12.0	-11.3	-21.1	-14.7	-19.0	-14.1	-98.9	-46.9
H	System expansion								
H1	Forest wood chips	-10.1	-8.9	-18.9	-12.0	-17.3	-12.2	-54.5	-28.1
H2	Fossil fuels	<i>78.1</i>	<i>96.4</i>	-53.6	-10.0	<i>9.2</i>	-1.0	-98.9	-11.8

## 4 Discussion

### 4.1 Comparison of the two systems

The differences between the systems which range from 10 to 20 % for most impact categories except LT and LO may be surprising when taking into account the high expectations, especially from legislative bodies, of the cascading of resources (BMU 2012; European Commission 2011). However, our study focuses on the direct effects of cascading. Our results are in accordance with previous findings by Sathre and Gustavsson (2006) who also concluded that direct cascade effects are relatively minor when comparing cascading to the use of primary wood. Yet, most studies focus on greenhouse gases (Sikkema et al. 2013; Werner et al. 2010; Sathre and Gustavsson 2006). When taking into account additional aspects such as land transformation and other impacts on the environment as it is possible with an extensive LCA, cascading proves to be an even more preferable treatment option of waste wood. Gärtner et al. (2013) conducted LCAs of wood-based products in cascades and compared the environmental impacts to those of functionally equivalent nonwood products. They found cascading to be neutral or positive, yet also stated that the results depend on the chosen product equivalent. These presented results depict that even when only considering direct cascade effects and without accounting for the substitution of fossil energy, cascading is a viable option. The categories PER, LO, and LT show the

greatest advantages for the cascading system. It indicates that the advantages of cascading are mainly attributed directly to the provision of the respective wood resources (waste wood and primary wood), since the above-mentioned categories account for the use of the resource wood.

### 4.2 Sensitivity analysis

In our study, the performance of the cascading system depended on the energy source chosen for the additional energy needed to achieve an equality of benefits. If this energy is produced from conventional sources, the respective environmental impacts outweigh any savings from cascading and dominate the overall results of the system. Heijungs and Guinée (2007) state that the selection of the additional process or avoided burden is often highly biased and can be used to influence the results. The basic variant (SE by waste wood) and the scenario H2 (SE fossil based) can be perceived as a “best case” and “worst case,” as in reality, the additional energy probably will be a mix of renewable and conventional energy sources.

Most authors dealing with system expansion approaches discuss system expansion in comparison to allocation as ways to deal with multi-output systems (Finnveden 1999; Finnveden et al. 2009; Heijungs and Guinée 2007; Nguyen and Hermansen 2012). In our case, allocation is not a suitable option to achieve the comparability of the two systems as the focus is on waste wood cascades with all resulting products

and not on a single desired product. Thus, system expansion is the only viable option to deal with the multibenefit nature of the studied systems. However, one challenge, discussed also by Heijungs and Guinée (2007), became evident: the choice of process to expand the system. The way of additional energy generation can reverse the ranking of the two compared systems, as evident for the two major impact categories of GW and PENR when accounting with conventional energy sources for system expansion. Consequently, in order to determine if cascading is to be the preferred use of waste wood, the choice of the process for system expansion is decisive.

As shown with the sensitivity analysis of group C, the comparison of systems is indifferent to the number of cascade steps. The study design, which compares functionally equivalent systems but does not limit the amount of available wood resources entering the systems, certainly contributes to this outcome. Material losses during collection and recycling are considered but have virtually no influence on the results since both systems are assumed to produce an equal amount of wood products and the major factor influencing the environmental impact of the systems (resin fraction of particleboards, process energy, and transportation) is directly dependent on the product output of the system, not the input of resources.

#### 4.3 Limitations of the study

Our study did not take into account aspects of time when comparing the systems. Contrary to the primary wood system, the cascade systems provide the products not at the same time but over a period which can encompass several decades, depending on the application of the cascaded products. This is important as technologies improve over time, especially in the energy sector but also in the production of wood panels. Consequently, the second or third product step of a cascade will likely “compete” with products which are different from the ones of today. However, as the products compared in our study are rather similar, technological changes will affect both the cascaded products and the primary wood products in a similar way, so that the depicted trends in the comparison of the systems would probably remain unchanged.

Carbon sequestration in wood products and the associated mitigation effects on climate change were also not in the scope of our study. However, these aspects shall be discussed when further assessing cascading wood utilization. Cascading can prolong the time of carbon storage considerably, thereby decreasing climate impacts at least if taking a medium time frame of several decades into account. Currently, several methods exist to integrate the effects of carbon sequestration in wood products in LCA (Brandão et al. 2013).

Factors deliberately not accounted for in our study are the effects of substitution, even though they have a certain influence in reality. If more wood products were manufactured from secondary resources, the overall amount of wood

products could increase, thereby substituting for more energy-intensive nonwood products (Gärtner et al. 2013). However, a shift of primary wood resources toward small-scale energy production in households is also a conceivable option, if the demand for primary wood for materials production decreases. Further studies encompassing a regional scale and the consequences of shifting resource allocation are needed to add this perspective to the assessment of a cascading use of waste wood.

Land use impacts by utilizing secondary resources instead of primary ones are difficult to assess with attributional LCA models. We tried to integrate the aspect by taking the impact categories of land occupation and transformation into account. In order to comprehensively assess the effects of a cascading utilization, a systemic approach coupling limited wood availability with the given demand for wood products would be necessary. The system expansion approach chosen in this study should be seen as a first step toward such an assessment. The notably lower land impacts of cascading (impact categories LO and LT) indicate that further investigation on a regional level is needed.

## 5 Conclusions

To conclude, we can answer the research questions as follows:

1. Utilizing waste wood in cascades is beneficial when considering environmental impacts. Our study approach, which only accounted for direct cascade effects, depicted decreases between 10 and 50 % for the different impact categories. In reality, positive effects from substituting fossil-based materials and the effects of increased land use efficiency will add to these direct benefits of cascading. Therefore, cascading proves to be an environmentally beneficial option of resource use.
2. The performance of the cascading system is especially influenced by the efficiency of the end-of-life incineration when it differs from the compared primary wood system. Transportation, the method of waste wood processing and cleaning, the number of cascade steps, and the type of panels produced have only minor direct effects.
3. System expansion as described in ISO 14040 proved to be a viable option for assessing a multi-output cascading system.
4. The choice of energy used for calculating the system expansion is decisive for the impact categories of GW and PENR. Accounting for conventional energy as system expansion entails distinct advantages of the primary wood system compared to the cascading system. Therefore, the way system expansion is modeled has to be considered carefully.

These conclusions are applicable for untreated wood which is suitable for material applications. Only this share of the overall available waste wood can be utilized in a cascading way. Consequently, our study depicts the best case scenario of dealing with waste wood. Direct incineration of the more contaminated amounts will also be necessary in the future. To maximize the benefits from waste wood and minimize the associated environmental impacts, collection and sorting have to be improved in order to steer the waste wood streams to the best possible application, which in the case of untreated wood should be a cascading application.

**Acknowledgments** The authors gratefully acknowledge the funding by the Bavarian State Ministry of Food, Agriculture and Forestry. The authors wish to thank Nathaniel Smith for language correction and the three reviewers for valuable comments on a previous version of this work.

## References

- BMU-German Federal Ministry for the Environment Nature Conservation and Nuclear Safety (2012) Deutsches Ressourceneffizienzprogramm (ProgRes), Berlin
- Brandão M, Levasseur A, Kirschbaum MUF, Weidema BP, Cowie AL, Jørgensen SV, Hauschild MZ, Pennington DW, Chomkham Sri K (2013) Key issues and options in accounting for carbon sequestration and temporary storage in life cycle assessment and carbon footprinting. *Int J Life Cycle Assess* 18(1):230–240
- Bystricky M, Knödseder T, Weber-Blaschke G, Faulstich M (2010) Comparing environmental impacts of electricity, heat and fuel from energy crops: evaluating biogas utilization pathways by the basket of benefit methodology. *Eng Life Sci* 10(6):570–576
- DIN Deutsches Institut für Normung e. V. (2005) DIN EN 13986 - Holzwerkstoffe für Verwendung im Bauwesen - Eigenschaften, Bewertung der Konformität und Kennzeichnung (Wood-based panels for use in construction—characteristics, evaluation of conformity and marking)
- DIN Deutsches Institut für Normung e. V. (2006a) ISO 14040 - Ökobilanz - Grundsätze und Rahmenbedingungen(14040)
- DIN Deutsches Institut für Normung e. V. (2006) ISO 14044 - Ökobilanz - Anforderungen und Anleitungen(14044)
- Ekvall T (1999) Key methodological issues for life cycle inventory analysis of paper recycling. *J Clean Prod* 7:281–294
- European Commission (2011) A resource-efficient Europe. Flagship initiative under the Europe 2020 Strategy, Brussels
- Finnveden G (1999) Methodological aspects of life cycle assessment of integrated solid waste management systems. *Resour Conserv Recy* 26(3–4):173–187
- Finnveden G, Hauschild MZ, Ekvall T, Guinée J, Heijungs R, Hellweg S, Koehler A, Pennington D, Suh S (2009) Recent developments in life cycle assessment. *J Environ Manage* 91(1):1–21
- Fleischer G, Schmidt W (1996) Functional unit for systems using natural raw materials. *Int J Life Cycle Assess* 1(1):23–27
- Fraanje PJ (1997) Cascading of pine wood. *Res Con Rec* 19:21–28
- Frischknecht R, Jungbluth N (2007) Overview and methodology. ecoinvent report no. 1. Swiss Center for Life Cycle Inventories, Dübendorf
- Gärtner S, Hienz G, Keller H, Müller-Lindenlauf M (2013) Gesamtökologische Bewertung der Kaskadennutzung von Holz. Umweltauswirkungen stofflicher und energetischer Holznutzungssysteme im Vergleich, Heidelberg
- Goedkoop MJ, Heijungs R, Huijbregts M, De Schryver A, van Struijs J, Zelm R (2009) ReCiPe 2008. A life cycle impact assessment method which comprises harmonised category indicators at the midpoint and the endpoint level. First edition Report I: Characterisation
- Guinée JB (2002) Handbook on life cycle assessment. Operational guide to the ISO standards. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht; Boston
- Härtl F, Knoke T (2014) The influence of the oil price on timber supply. *Forest Policy Econ* 39:32–42
- Heijungs R, Guinée JB (2007) Allocation and ‘what-if’ scenarios in life cycle assessment of waste management systems. *Waste Manage* 27(8):997–1005
- Jungmeier G, Werner F, Jarnehammar A, Hohenthal C, Richter K (2002) Allocation in LCA of wood-based products. Experiences of Cost Action E9. Part I. Methodology. *Int J Life Cycle Assess* 7(5):290–294
- Loth R, Hanheide M (2004) Entwicklung eines mehrstufigen Anlagenverfahrens zur Verarbeitung von Restholz zur Erzeugung von hochwertigen OSB-Spänen für die Herstellung von OSB-Platten. Abschlussbericht, Bielefeld
- Mantau U (2012) Holzzrohstoffbilanz Deutschland. Entwicklungen und Szenarien des Holzaufkommens und der Holzverwendung 1987 bis 2015, Hamburg
- Mantau U, Bilitewski B (2010) Stoffstrom-Modell- Holz 2007. Rohstoffströme und CO<sub>2</sub>-Speicherung in der Holzverwendung. Forschungsbericht für das Kuratorium für Forschung und Technik des Verbandes der Deutschen Papierfabriken e.V. (VDP), Celle
- Mantau U, Saal U, Prins K, Steierer F, Lindner M (2010) EUwood—real potential for changes in growth and use of EU forests. Final report, Hamburg/Germany
- Nguyen TLT, Hermansen JE (2012) System expansion for handling co-products in LCA of sugar cane bio-energy systems: GHG consequences of using molasses for ethanol production. *Appl Energy* 89(1):254–261
- Pawelzik P, Carus M, Hotchkiss J, Narayan R, Selke S, Wellisch M, Weiss M, Wicke B, Patel M (2013) Critical aspects in the life cycle assessment (LCA) of bio-based materials—reviewing methodologies and deriving recommendations. *Res Con Rec* 73:211–228
- Rüter S, Diederichs S (2012) Ökobilanz-Basisdaten für Bauprodukte aus Holz. Arbeitsbericht aus dem Institut für Holztechnologie und Holzbiologie, Hamburg
- Sathre R, Gustavsson L (2006) Energy and carbon balances of wood cascade chains. *Res Con Rec* 47:332–355
- Sathre R, O’Connor J (2010) Meta-analysis of greenhouse gas displacement factors of wood product substitution. *Environ Sci Pol* 13(2):104–114
- Schwarzbauer P, Stern T (2010) Energy vs. material: economic impacts of a “wood-for-energy scenario” on the forest-based sector in Austria—a simulation approach. *Forest Policy Econ* 12(1):31–38
- Sikkema R, Junginger M, McFarlane P, Faaij A (2013) The GHG contribution of the cascaded use of harvested wood products in comparison with the use of wood for energy—a case study on available forest resources in Canada. *Env Sci Pol* 31:96–108
- Werner F, Richter K (2007) Wooden building products in comparative LCA. A literature review. *Int J Life Cycle Assess* 12(7):470–479
- Werner F, Taverna R, Hofer P, Richter K (2005) Carbon pool and substitution effects of an increased use of wood in buildings in Switzerland: first estimates. *Ann For Sci* 62(8):889–902
- Werner F, Althaus H, Richter K, Scholz RW (2007) Post-consumer waste wood in attributive product LCA. Context specific evaluation of allocation procedures in a functionalistic conception of LCA. *Int J Life Cycle Assess* 12(3):160–172
- Werner F, Taverna R, Hofer P, Thürig E, Kaufmann E (2010) National and global greenhouse gas dynamics of different forest management and wood use scenarios: a model-based assessment. *Env Sci Pol* 13(1):72–85





3

## **Evaluation of wood cascading**

**Karin Höglmeier, Gabriele Weber-Blaschke, Klaus Richter**

Technische Universität München, Holzforschung München, Chair of Wood Science,  
Winzererstr. 45, 80797 München, Germany

### **Abstract**

This chapter introduces the concept of utilization of wood in cascades, i.e. for multiple successive material applications followed by a final incineration for energy production. Cascading is widely mentioned as a measure to tackle possible resource shortages due to increasing resource utilization. To evaluate this concept, a case study comparing cascading use of one metric ton of recovered wood to direct incineration of this resource by applying environmental life cycle assessment (LCA) is presented. To enable a comparison of the two options, a system expansion approach based on both primary wood products and fossil products is carried out. Additionally highlighted aspects of LCA in this chapter are carbon storage in wood products and the consideration of time in LCA.

In the majority of the considered impact categories and variants, cascading proved to be the more environmental friendly alternative. Yet, especially the efficiency of the recovery of wood between the different steps of the cascade influences the performance of the cascading system, thereby demonstrating the importance of improving process efficiency also when handling renewable resource such as wood.

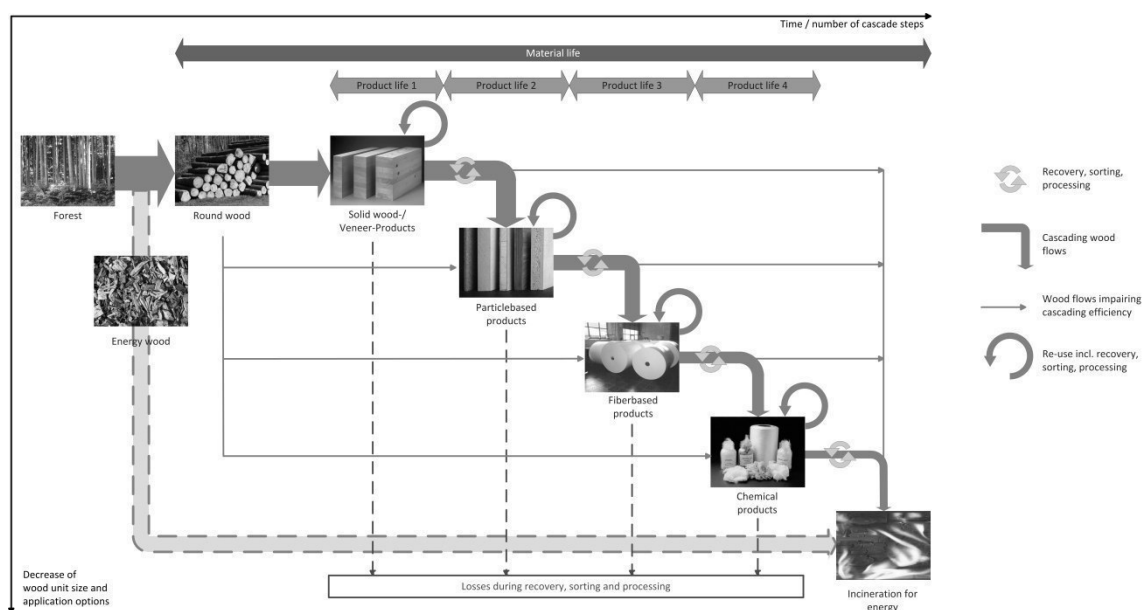
### **Keywords**

resource cascading, resource efficiency, life cycle assessment (LCA), recovered wood, waste wood, system expansion, particleboard, substitution

## 1 Introduction

### 1.1 Concept of wood resource cascading

The concept of the use of a resource in cascades has first been scientifically proposed by Sirkin & ten Houten [1]. Their goal was to enhance the efficiency of resource use by sequential re-utilization of the same unit of a resource for multiple high-grade material applications followed by final disposal. For maximizing potential positive effects of cascading use, secondary resources should be used in the application with the highest possible quality for which they are intrinsically suitable [2], [3]. In case of wood, solid recovered wood should be kept in as large dimensions as possible, since each degradation in size, e. g. by chipping or crushing, diminishes future utilization possibilities and generally leads to the necessity of resins and other chemicals to produce a wood material out of the small dimension wood. For example, high quality recovered wood from the building sector in large dimensions and without contamination, such as solid beams, should first be used to produce timber of smaller dimensions, such as lamellas, which after a service time as flooring can be chipped and used in a further cascade step as particle- or fiberboards, and finally as an energy carrier, rather than being immediately used for energy production after the first product life as a beam (Figure 1). The material life of the wood consequently spans over several product lives, thereby extending, for example, carbon storage time and multiplying the overall benefits generated from a unit of wood.



**Figure 1: The concept of a cascading use of wood.**

Using resources in cascades has been increasingly supported by legislative bodies, also on a European level. Generally, the reuse and recycling of materials has been given priority over an incineration for energy production through the waste hierarchy in Europe [4]. On the other hand, the Renewable Energy Directive [5] and its national offspring support direct incineration and thereby hinder the cascading use of bio-based resources.

In recent years, a number of studies have assessed the concept of wood cascading in order to present scientifically based information also to legislative bodies [6], [2], [7], [8]. Only a few studies have been published so far using life cycle assessment (LCA) to highlight effects of cascading use of wood on environmental impacts.

Höglmeier et al. [9] conducted an LCA study of a recovered wood cascade and compared it to equivalent products from primary wood. They found cascading to be advantageous over the use of primary wood. Yet, since two wood based systems were compared, effects of substitution of fossil fuels are rather low and therefore, the detected environmental benefits by cascading were only around 10 % for nearly all impact categories considered.

Gärtner et al. [10] focused on comparing wood cascades to equivalent non-wood products and credited the cascades for the end of life energy production. The results indicate that cascading creates less environmental burden than the provision of an equal benefit from non-wood products. The major part of those cascading benefits can be attributed to substitution effects. The equivalent fossil- or mineral-based products in most cases create higher environmental burdens than wood products. Therefore, when comparing a whole cascade chain to a multitude of equivalents, benefits add up with each cascade step, leading to considerable overall advantages for the cascaded wood products.

## **1.2 Current recovered wood utilization in cascades**

Currently, cascading of wood as a strategy to extend the material lifetime has not yet been implemented on a wider scale in Europe. In Germany, for example, where this case study is based, nearly 80 % of the annually available recovered wood of 6.3 million tons [11] are incinerated in power plants for energy generation. This approach is already regarded as a basic cascade, especially by industry representatives. Yet, in this study, cascading is understood as the endeavor to maintain the quality and value of the wood over several product lives. Consequently, incineration after the first material life is not seen as cascading per se. The not incinerated amount is mainly used for particleboard production, which constitutes a cascaded use also with the understanding of the term as applied here. Other technically feasible applications for high-quality secondary wood such as medium density fiberboards (MDF), oriented strand boards (OSB) or as an input in the pulp and paper production are up to date not implemented, mainly due to only minor cost benefits, necessary technological process adaptations and possible concerns of customers towards materials generated from “waste”. Applications of secondary wood with a higher individuality such as the production of floor boards and decorative planks from old wood beams exist regionally on a small scale but are of minor economic importance. In other European countries and throughout the world, landfilling is still another important but inappropriate handling option of post-consumer wood.

Currently, sorting based on visual assessment of the recovered wood in sorting facilities is common in Europe, if sorting takes place at all. For enhancing the possibilities of a material application of recovered wood and minimizing the accumulation of contaminants over several

use cycles, reliable sorting is of the essence. Emerging technologies such as Near infrared spectrometry (NIR) and X-ray fluorescence analysis (XRF) are developed to enable mechanized, continuous detection of possible contamination of recovered wood with high selectivity and precision [12].

Necessary prerequisites in regard to sufficient amount and quality for the utilization of recovered wood in cascades can therefore be met.

## **2 Environmental assessment of wood cascading by LCA**

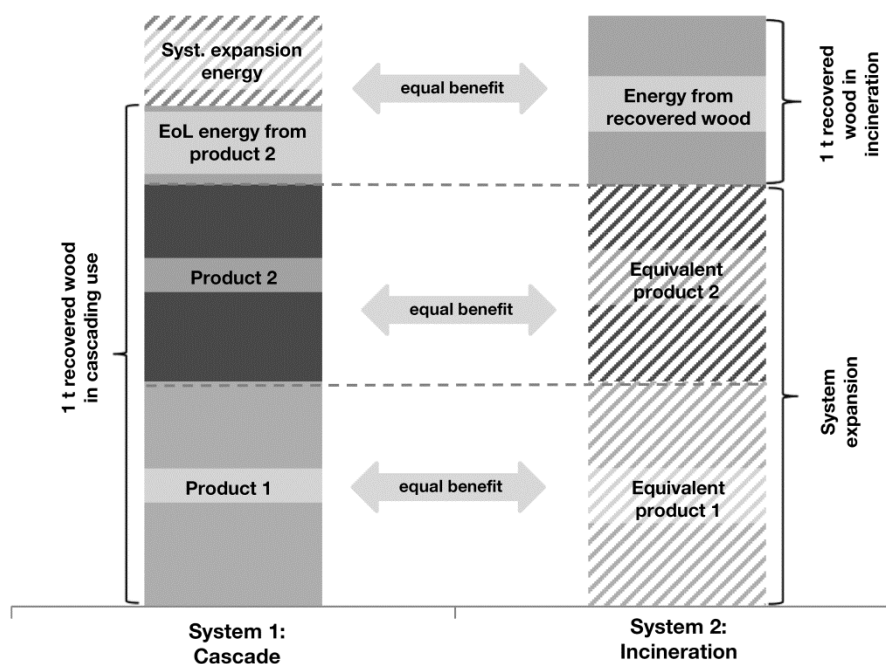
### **2.1 Equality-of-benefits of multi-output systems**

When assessing the cascading use of wood with the method of LCA and comparing the resulting environmental impacts to those generated by functionally equivalent non-wood or primary wood products, several issues worthy of discussion arise.

First and foremost, the composition of the functional unit, which is the basis of comparison, has to be determined. Cascading use of wood generates a rather complex LCA system, consisting of several successive product life cycles and consequently providing a multitude of different products (materials and energy). In order to compare this utilization option of waste to alternatives such as direct incineration with energy generation, a suitable functional unit has to be selected. The ISO 14040 standard recommends system expansion as the preferable way of dealing with multi output systems in LCA. In order to compare two different production systems, all products which are not provided by one of the two systems but produced by the other one are added to the respective systems where they are originally lacking. Consequently, the systems to be compared both generate the same array of products, more generally called “benefit” (Figure 2). The sums of potential environmental impacts created by the original systems plus the expansion products can then be viably compared and therefore a ranking of the systems in regard to their impacts on the environment is possible.

To assess recovered wood cascading, a system expansion approach, called the “basket-of-benefit” method was applied. It was originally described by Fleischer & Schmidt [13] for waste management systems and previously applied by Bystricky et al. [14] to assess multiple use options for the crop yield of a specific agricultural area.

In the case of this assessment (Figure 2), one metric ton of clean post-consumer wood entered both systems. The cascading system used the resource to produce several wood materials and incinerated the remaining wood amount at the end of the cascade. The reference system, against which the cascading use was compared, assumed direct incineration of the total recovered wood and consequently produced no materials out of the recovered wood. In a first assessment, the missing products and energy in each “basket” (=system) were assumed to be produced from primary wood, i.e. fresh forest wood. In a second scenario set, the system expansion took place with non-renewable products.



**Figure 2: Concept of comparing different product systems in LCA with system expansion for two exemplary products and energy. Solid areas represent products from recovered wood; shaded sections represent additional products added to the systems to achieve an equality of benefits of the two systems. (EoL: End-of-life)**

Despite being favored by the ISO 14040 standard for LCA, system expansion is also regarded critically by some authors. Heijungs & Guinée [15] argue that crediting of systems, and the decision required thereby on which process will be assumed to be avoided, is one of the main reasons for strongly varying or even contradictory results when evaluating waste management systems. They propose that partitioning multi-output processes and thereby allocating the burdens to specific products is preferred. In this case study on cascading it will be shown that the choice of system expansion products can indeed have an influence on the results and ranking of the systems.

However, the system expansion approach also offers a number of strong points which make it best suited for assessing the cascading use of wood in LCA. Most importantly, it allows to avoid decisions in regard to allocation, which in some cases can also have considerable influence on the results (economic vs. physical allocation) [16], [17]. Finnveden et al. [18] declare system expansion as suitable if LCA is used to not only investigate the life cycles of single products but rather to examine combinations of several life cycles. Because cascading per se leads to a multitude of products (materials and energy), the assessment is focused on the benefits created by the whole system rather than a single product. Allocation or partitioning of the system is therefore not suitable.

## 2.2 Recovered wood cascading in comparison to direct incineration – system description and data

Particleboard is currently the only economically important application of secondary wood, mainly because of the rather high flexibility of the process towards different wood assortments. Consequently, particleboard from recovered wood plays an important role in the cascades to be examined in this study. Albeit it is generally produced from a mix of secondary wood, industrial wood residues and primary wood, this study assumed a production with 100 % recovered wood. This is technically feasible and common in European countries like Italy and France. One of the two examined exemplary cascades (cascade 2) produces particleboard in three and two steps respectively. The first cascade starts with floorboard production from wooden beams, followed by particleboard production, again in three and two steps (Table 1).

**Table 1: Products of the cascading systems with different numbers of cascading steps in comparison to direct incineration of recovered wood.**

		Product 1	Product 2	Product 3	Product 4	Energy [MJ]
<b>Cascade 1a</b>	<b>Product</b>	Floorboards	Particleboard	Particleboard	Particleboard	Heat / power
	<b>Amount</b>	51.3 m <sup>2</sup>	0.67 m <sup>3</sup>	0.50 m <sup>3</sup>	0.37 m <sup>3</sup>	3,115 / 322
<b>Cascade 1b</b>	<b>Product</b>	Floorboards	Particleboard	Particleboard	--	Heat / power
	<b>Amount</b>	51.3 m <sup>2</sup>	0.67 m <sup>3</sup>	0.50 m <sup>3</sup>	--	4,179 / 432
<b>Cascade 2a</b>	<b>Product</b>	Particleboard	Particleboard	Particleboard	--	Heat / power
	<b>Amount</b>	1.10 m <sup>3</sup>	0.82 m <sup>3</sup>	0.61 m <sup>3</sup>	--	5,159 / 533
<b>Cascade2b</b>	<b>Product</b>	Particleboard	Particleboard	--	--	Heat / power
	<b>Amount</b>	1.10 m <sup>3</sup>	0.82 m <sup>3</sup>	--	--	6,921 / 715
<b>Direct incineration</b>	<b>Product</b>	--	--	--	--	Heat / power
	<b>Amount</b>	--	--	--	--	12,455 / 1,269

The LCA models of the wood products are based on the average German LCI data of Rüter & Diederichs [19] with some adaptations of drying energy to accommodate the use of recovered wood instead of primary wood. The necessary processing of the recovered wood (collection, sorting, chipping/crushing) between the steps of the cascades was modeled based on primary data from three recycling facilities located in southeast Germany. All background processes and the non-wood-substitution products were based on the ecoinvent 2.2 database [20], as well as the incineration of secondary and primary wood in a 6.4 MW combined heat and power plant.

Due to losses during particleboard manufacturing (process energy) and by collection and sorting of the waste wood, the incineration at the end of the cascades provides less energy than the direct incineration of the recovered wood. Following the concept of system expansion as described in chapter 2.1, the difference is added to the cascading systems. The same applies to wood materials, which cannot be provided from recovered wood if direct incineration is assumed and therefore have to be added to this system. Products for necessary system expansion were primary wood products in one scenario set and non-wood products in a second scenario set (Table 2).

For assessing the effect of carbon storage and consequently prolonged removal of carbon from the atmosphere, the method recommended in the ILCD Handbook [21] was applied. An average lifetime of 15 years was assumed for both particleboard and wood flooring.

To assess the influence of the efficiency of secondary wood recovery on the competitiveness of cascading use in comparison to direct incineration, scenarios with an assumed recovery rate of only 85 % were conducted in addition to the default scenarios, where a recovery of 100 % was the basis for the assessment. Technical losses of 5 % were assumed for each sorting and processing stage between cascade steps.

**Table 2: Equivalent products for system expansion.**

Secondary wood products (cascade)	Primary wood products	Non-wood products
Floorboards	Floorboards	Ceramic tiles
Particleboard 100 % secondary wood	Particleboard 100 % primary wood	Module equivalent to 1 m <sup>3</sup> of particleboard (35 % office furniture, 15 % metal shelf, 40 % gypsum boards, 10 % XPS board)
Heat and power from incineration of secondary wood in CHP	Heat and power from incineration of forest wood chips	Heat from natural gas, electricity as German grid mix

### 2.3 Choice of LCA impact categories for assessing wood products

For the life cycle impact assessment, an increasing number of impact assessment schemes and categories are developed and integrated into most specific software applications. Choosing the impact categories to be considered can be decisive for the outcomes of an LCA study since contradictory trends are common between different categories when comparing systems in LCA. The International Reference Life Cycle Data System (ILCD) handbook [21] recommends including all the main relevant environmental issues related to the system if the goal definition of the study does not specifically limit the scope of impacts to be covered. Yet, identifying the main issues is not an easy task. Two recent reviews of wood production [22] and wood energy use [23] identified a number of common impact categories for LCA studies dealing with wood production and use. All studies considered by Klein et al. [22] assess climate change impacts; approximately half of them additionally include carbon storage in wood products. Eutrophication and acidification were the next most analyzed categories, followed by ozone-focused assessments and energy consumption. Further impact categories such as human- and ecotoxicity and land use were considered in less than 20 % of all studies. The studies assessing wood for energy use confirm these findings: Also here, global warming impacts were assessed in all cases, followed by energy source related assessments and acidification. Roughly a quarter of the studies additionally incorporated the assessment of particulate matter formation and eutrophication. When putting wood and wood products in the focus of an LCA study, aspects beyond the traditional, above mentioned impact categories are worth considering. Especially if incineration is part of the life cycle, the formation of particular matter and its implications on human health should be assessed. The formation of indoor formaldehyde emissions from wood composite products, especially particle- and fiberboard, is a much



discussed topic up to now not represented sufficiently in LCA. Efforts have recently been made to develop a suitable scheme [24] to assess their impact on the environment.

In order to provide a sound foundation for decision making, the impact assessment of LCA studies on wood products should be constructed carefully and with regard to categories beyond the obvious. In this case study on cascading use of recovered wood, the following impact categories were selected in accordance with the above depicted trends: Global warming (GW), particulate matter formation (PM), land use (LU), ozone depletion (OD), acidification (AC) and eutrophication (ET). Additionally, the impact of carbon storage in wood products on the global warming potential was considered in a separate category (GW cs). It was calculated according to the methodology proposed by the ILCD handbook [21], by weighting the amount of carbon stored in the wood with the assumed time of storage, based on a reference timeframe of 100 years.

## **2.4 Results of comparing cascading use to direct incineration**

The option of using recovered wood in a cascade instead of directly incinerating the wood leads to lower potential environmental impacts for the majority of the considered LCA impact categories, if the system expansion products (materials and energy) are assumed to be produced from primary wood (Figure 3). The most pronounced differences can be detected for the category land use, since the recovered wood as a secondary resource carries no burdens from the first life cycle. For all other impact categories, the achievable benefits are mostly lower than 20 %. Cascades with more steps (1a and 2a) are generally preferable from an environmental point of view, except for the category land use. There, the higher amount of additional energy needed in system expansion (from fresh wood) due to higher losses during cascading contradicts possible positive effects of more wood products provided by the longer cascade.

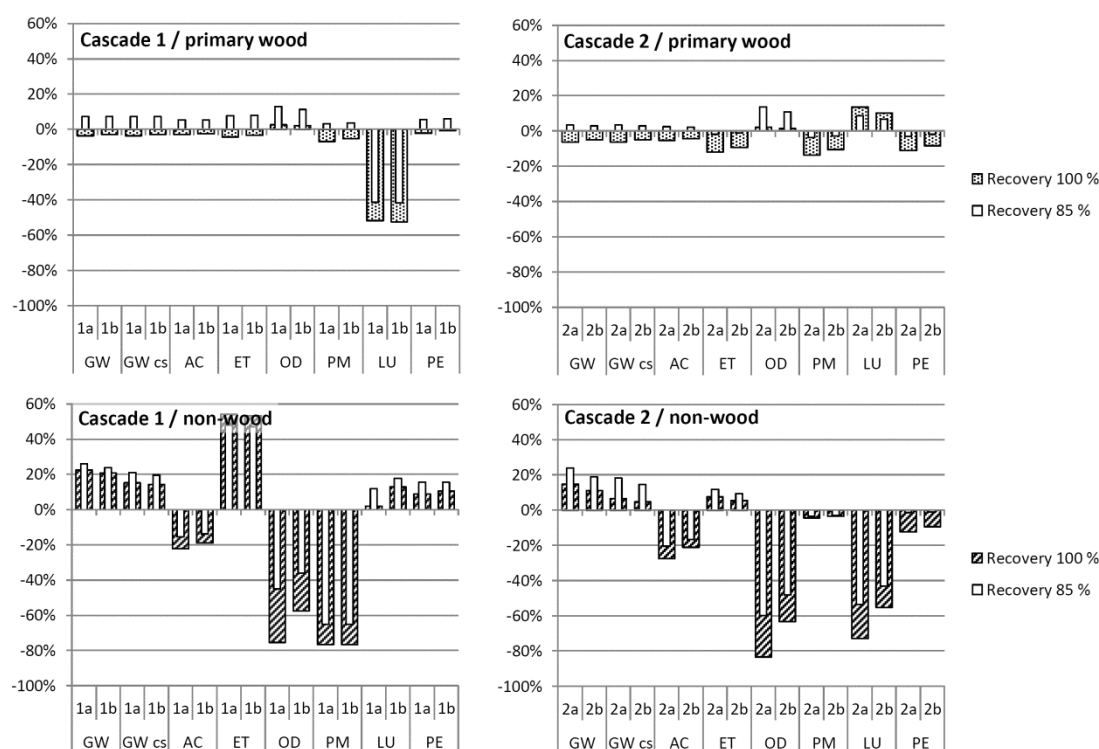
Similar trends can be noted when comparing cascading use to direct incineration but assuming the products for filling the baskets of benefits are produced from fossil and mineral raw materials. Since the non-wood substitution products are more different from the cascaded products than the primary wood products, the noted relative differences in environmental impacts are not as consistent over the different impact categories. The cascading systems show lower environmental impacts for the categories of acidification and ozone depletion. Land use can be reduced by cascading. In this case study, only the particleboard cascade (cascade 2) displayed benefits, since the wood losses during sawing floor boards out of waste wood beams in cascade 1 impair the performance strongly in the category land use, but also to a lesser extent in other impact categories. The formation of particulate matter is also reduced by cascading, since less wood is incinerated in these scenarios.

In a number of categories, the option of directly incinerating the recovered wood leads to lower potential environmental impacts. Especially the categories global warming, eutrophication and primary energy demand, which are strongly influenced by the production of heat and power

from fossil sources, show advantages of direct incineration. The reasons are the impacts caused by the amount of additional energy needed in system expansion in the case of the cascading systems. That the shorter cascades lead to fewer impacts compared to the longer ones emphasizes this point, since they require less additional energy.

Accounting for carbon storage in wood products influences the comparison of the systems only in case of the non-wood system expansion, where it decreases the disadvantage of the cascade. In case of the all-wood systems, carbon storage has no influence because both systems provide the same products and therefore the same amount of carbon stored.

The recovery rate of secondary wood strongly influences the system performance of the cascades, even more so than the number of cascade steps. In all cases, a drop in efficiency of recovery deteriorates the competitiveness of a cascading use of recovered wood, since the amounts lost during the cascading are no longer available for energy production at the end of the cascade and need to be substituted by primary wood based or fossil fuel based energy.



**Figure 3: Potential environmental impacts of different cascading uses of recovered wood relative to equivalent products from primary wood (top) and fossil/mineral resources (bottom) with recovery rates of 100 and 85 % of secondary wood.**

### **3 Discussion and conclusion**

#### **3.1 Assessing resource efficiency of wood in LCA**

The fact that a decrease in the recovery rate of secondary wood strongly impairs the competitiveness of cascading use of wood is not surprising, as it directly decreases the resource losses during the cascade and consequently the available wood for energy production. It should be understood as a request to also utilize renewable resources as efficiently as possible. Since they are in the long run ultimately not limited in their amount due to their renewability, often less focus is placed on the efficiency of their use compared to finite fossil resources. Yet, they are nevertheless mostly only available in limited amounts and especially wood is facing an increasing demand. In order to successfully implement concepts like cascading utilization, which can assist to meet this growing demand, efforts towards more efficient processes in recovery but also production of wood products should be made.

The concept of cascading is often mentioned to lead to an increase in efficiency of resource use by producing more products out of a certain unit of material. As the environmental impacts of raw material acquisition are part of a full LCA, it could be expected, that cascading would consequently lead to considerably less potential environmental impacts compared to the production of equivalent products from primary wood. As shown in this study, this is not the case due to two reasons: Firstly, contrary to other resources such as metals, the provision of primary wood is only a minor contributor to the overall environmental impacts of wood products manufacturing [9]. Especially in case of composite wood products such as particleboard, which is the main use of recovered wood nowadays, resins and other chemical additives as well as the energy required during the production process cause the majority of the overall environmental impacts of the wood products. An efficient resource use by cascading therefore is only presentable to a small amount in LCA. Secondly, the output-focused functional unit (a basket of several equivalent products) results in a need for system expansion with energy in case of the cascading system, as material losses with each cascade step due to incomplete recovery reduce the amount of energy to be produced from the original input of recovered wood. The therefore needed primary wood amount compensates eventual savings by cascading and renders an assessment of the efficiency of cascading itself impossible. In this case, limits of LCA as an assessment method become obvious.

#### **3.2 Effects of choices of system expansion**

The presented approach towards life cycle assessment of cascading use of wood highlights the possibly decisive impact of methodological choices on the results of LCA studies. Two specific choices profoundly influence the results presented here: Firstly, the choice of the products for system expansion determines the performance of the cascading system in relation to the reference system. As it is difficult to predict if and what kind of substitution will take place, choices regarding substitution are always to a certain extent biased. To allow a well-founded

decision based on the LCA results, several options should be modeled to show the range of outcomes, as done in this study.

Secondly, choices regarding the reference system can be determining factors for the outcomes. If cascading was assessed by comparing the resulting products to equal products from primary wood or non-wood resources without considering direct incineration of recovered wood as a competing option, the outcome of the assessment would be different to the results presented here. The performance of the cascading system would improve in this case. The reason is the lower amount of energy in the product mix of the systems if a direct waste wood incineration is not part of the reference system. Consequently, less environmental impacts of fossil fuel based energy would have to be added to the cascading system. Such an approach would place the focus on the effects of substitution of non-wood products by wood products whereas the approach of this case study focuses on the environmental effects of cascading. This further underlines the decisive influence of the composition of the reference system on the outcomes of system expansion approaches.

### **3.3 Consideration of time in LCA**

One aspect difficult to consider in LCA is time [25]. With regard to this study, it is an aspect worth to be discussed on several levels. The systems compared in this study differ insofar as the cascading system provides the materials in succession, while the materials of the reference system could be available simultaneously. Whether the two product systems are considered equivalent and therefore comparable in LCA consequently depends on the time boundaries agreed upon. The lifetimes of wood products can span several decades and therefore a cascade can run even longer. Consequently, future technological changes in the production processes of both materials and energy should theoretically be considered but are practically impossible to integrate. Thus, the results of a comparison of such a long-running system can only be seen as valid for now and need to be re-assessed in future. Especially in regard to the integration of the effects of substitution of wood vs. non-wood products, innovations of one of the two systems could strongly influence a comparison [10]. For example, if renewable resources other than wood were widely implemented in the future, the positive effects of substituting the existing fuel mix by wood could considerably diminish. In this case, an incineration of wood and consequential substitution of fossil fuels today would be the preferable option. In addition, the delay of the energy recovery step for several decades which would be caused by extensive cascading of recovered wood has to be taken into account. This may lead to the replacement of possible cleaner energy sources in the future, when the cascaded wood finally reaches its end-of-life.

### **3.4 Modelling carbon storage**

Discussions on how and whether to model carbon storage in LCA are ongoing [26]. One option is to disregard biogenic carbon, assuming that all biogenic carbon released into the atmosphere has been sequestered at one time and therefore the wood product is considered carbon neutral. If accounting for biogenic carbon and its storage in wood products, a number of competing approaches have been proposed so far [27]. This assessment uses the approach recommended in the ILCD Handbook [21] which accounts for time and only considers carbon released within a timeframe of 100 years. Since it takes into account the amount of carbon stored and its time of sequestration but not when the sequestration occurs, the results of the category *GW cs* for the two considered all-wood systems did not differ. Storing a certain amount of carbon for 45 years as in the cascading scenarios in this assessment equals the storage of three times this amount of carbon for 15 years as in the reference system. Yet, the effects of these two options on climate change might nevertheless not be the same, as the effect of an additional unit of carbon on the climate depends on the level of carbon dioxide already present in the atmosphere at the time of release.

### **3.5 Outlook**

Life cycle assessment is a powerful tool to examine the effects of decisions in regard to resource utilization on the environment. In this study, LCA modelling allowed to generate viable information regarding possible options for use of recovered wood. Yet, for a rounded more comprehensive assessment additional aspects should be taken into consideration. Especially the economic viability of a certain utilization option, e. g. cascading, is decisive for determining if it will be pursued or not. Methods like life cycle costing but also calculations of added value of production processes help to determine sustainable options. An environmental life cycle assessment as in this study therefore should be seen as one component in a holistic assessment. Recommendations or even legal demands towards the implementation of cascading use of recovered wood should therefore be based on an as broad as possible assessment.

### **Acknowledgement**

The authors gratefully acknowledge funding by the Bavarian State Ministry of Food, Agriculture and Forestry.

## 4 References

- 1 Sirkin, T. and ten Houten, M. (1994) The Cascade Chain: A Theory and Tool for Achieving Resource Sustainability with Application for Product Design. *ResConRec*, **10**, 213–277.
- 2 Fraanje, P.J. (1997) Cascading of pine wood. *Resources, Conservation and Recycling*, **19**, 21–28.
- 3 Haberl, H. and Geissler, S. (2000) Cascade utilization of biomass: strategies for a more efficient use of a scarce resource. *Ecol Eng*, **16**, 111–121.
- 4 European Union (2008) Directive 2008/98/EC of the European Parliament and of the Council of 19 November 2008 on waste and repealing certain Directives, in *Official Journal of the European Union*.
- 5 European Union (2009) Directive 2009/28/EC of the European Parliament and of the Council of 23 April 2009 on the promotion of the use of energy from renewable sources and amending and subsequently repealing Directives 2001/77/EC and 2003/30/EC, in *Official Journal of the European Union*.
- 6 Dornburg, V. and Faaij, A.P.C. (2005) Cost and CO<sub>2</sub>-emission reduction of biomass cascading: Methodological aspects and case study of SRF poplar. *Climatic Change* (71), 373–408.
- 7 Sathre, R. and Gustavsson, L. (2006) Energy and carbon balances of wood cascade chains. *ResConRec*, **47** (4), 332–355.
- 8 Sikkema, R., Junginger, M., McFarlane P, Faaij, A. (2013) The GHG contribution of the cascaded use of harvested wood products in comparison with the use of wood for energy - A case study on available forest resources in Canada. *Environmental Science & Policy* (31), 96–108.
- 9 Höglmeier, K., Weber-Blaschke, G., Richter, K. (2014) Utilization of recovered wood in cascades - a comparison with life cycle assessment using system expansion. *Int J LCA*, **19** (10), 1755–1766.
- 10 Gärtner, S., Hienz, G., Keller, H., Müller-Lindenlauf, M. (2013) Gesamtökologische Bewertung der Kaskadennutzung von Holz: Umweltauswirkungen stofflicher und energetischer Holznutzungssysteme im Vergleich.
- 11 Mantau, U., Weimar, H., Kloock, T. (2012) Standorte der Holzwirtschaft - Holzrohstoffmonitoring: Altholz im Entsorgungsmarkt - Aufkommens- und Vertriebsstruktur 2010. Abschlussbericht.
- 12 Meinschmidt, P., Berthold, D., Briesenmeister R (2013) Neue Wege der Sortierung und Wiederverwertung von Altholz, in *Recycling und Rohstoffe: Kapitel 6: Neue Wege der Sortierung und Wiederverwertung von Altholz* (eds K.J. Thomé-Kozmiensky and D. Goldmann), TK-Verlag, Neuruppin.
- 13 Fleischer, G. and Schmidt, W.-P. (1996) Functional unit for systems using natural raw materials. *Int J Life Cycle Assessment*, **1** (1), 23–27.
- 14 Bystricky, M., Knödseder, T., Weber-Blaschke, G., Faulstich, M. (2010) Comparing environmental impacts of electricity, heat and fuel from energy crops: Evaluating biogas utilization pathways by the basket of benefit methodology. *Eng. Life Sci.*, **10** (6), 570–576.
- 15 Heijungs, R. and Guinée, J.B. (2007) Allocation and 'what-if' scenarios in life cycle assessment of waste management systems. *Waste Management*, **27** (8), 997–1005.
- 16 Jungmeier, G., Werner, F., Jarnehammar, A., Hohenthal, C., Richter, K. (2002) Allocation in LCA of wood-based products: Experiences of Cost Action E9, Part I. Methodology. *Int J LCA*, **7** (5), 290–294.
- 17 Werner, F., Althaus, H.-J., Richter, K., Scholz, R.W. (2007) Post-consumer waste wood in attributive product LCA: Context specific evaluation of allocation procedures in a functionalistic conception of LCA. *Int J LCA*, **12** (3), 160–172.

- 18 Finnveden, G., Hauschild, M.Z., Ekvall, T., Guinée, J., Heijungs, R., Hellweg, S., Koehler, A., Pennington, D., Suh, S. (2009) Recent developments in Life Cycle Assessment. *Journal of Environmental Management*, **91** (1), 1–21.
- 19 Rüter, S. and Diederichs, S. (2012) Ökobilanz-Basisdaten für Bauprodukte aus Holz. *Arbeitsbericht aus dem Institut für Holztechnologie und Holzbiologie 2012/1*.
- 20 Frischknecht, R. and Jungbluth, N. (2007) Overview and Methodology: ecoinvent report No. 1. Swiss Center for Life Cycle Inventories.
- 21 European Commission (2010) *ILCD handbook: General guide for Life Cycle Assessment - Detailed guidance*, Publications Office of the European Union, Luxembourg.
- 22 Klein, D., Wolf, C., Schulz, C., Weber-Blaschke, G. (2015) 20 years of Life Cycle Assessment (LCA) in the Forestry Sector: State of the Art and a Methodical Proposal for the LCA of Forest Production. *Int J LCA*, DOI 10.1007/s11367-015-0847-1.
- 23 Wolf, C., Klein, D., Weber-Blaschke, G., Richter, K. (2015) Systematic Review and Meta-Analysis of Life Cycle Assessments for Wood Energy Services. *Journal of Industrial Ecology* (accepted).
- 24 Chaudhary, A. and Hellweg, S. (2014) *Indoor exposure to emissions from wood products: Complementary views from life cycle assessment and risk assessment*, Basel, Switzerland.
- 25 Collet, P., Lardon, L., Steyer, J.-P., Hélias, A. (2014) How to take time into account in the inventory step: a selective introduction based on sensitivity analysis. *Int J Life Cycle Assess*, **19** (2), 320–330.
- 26 Levasseur, A., Brandão, M., Lesage, P., Margni, M., Pennington, D., Clift, R., Samson, R. (2012) Valuing temporary carbon storage. *Nature Climate Change*, **2** (1), 6–8.
- 27 Pawelzik, P., Carus, M., Hotchkiss, J., Narayan, R., Selke, S., Wellisch, M., Weiss, M., Wicke, B., Patel, M. (2013) Critical aspects in the life cycle assessment (LCA) of bio-based materials – Reviewing methodologies and deriving recommendations. *ResConRec*, **73**, 211–228.





4



Contents lists available at ScienceDirect

## Journal of Environmental Management

journal homepage: [www.elsevier.com/locate/jenvman](http://www.elsevier.com/locate/jenvman)

# LCA-based optimization of wood utilization under special consideration of a cascading use of wood



Karin Höglmeier <sup>a,\*</sup>, Bernhard Steubing <sup>b</sup>, Gabriele Weber-Blaschke <sup>a</sup>, Klaus Richter <sup>a</sup>

<sup>a</sup> Chair of Wood Science, Center for Life Sciences Weihenstephan, Technische Universität München, Winzererstr. 45, 80797 Munich, Germany

<sup>b</sup> Group for Ecological Systems Design, Institute of Environmental Engineering, ETH Zurich, John-von-Neumann-Weg 9, 8093 Zurich, Switzerland

## ARTICLE INFO

## Article history:

Received 8 September 2014

Received in revised form

12 December 2014

Accepted 14 January 2015

Available online

## Keywords:

Cascading

Waste wood

Recovered wood

Optimization

Life cycle assessment (LCA)

Environmental modelling

## ABSTRACT

Cascading, the use of the same unit of a resource in multiple successional applications, is considered as a viable means to improve the efficiency of resource utilization and to decrease environmental impacts. Wood, as a regrowing but nevertheless limited and increasingly in demand resource, can be used in cascades, thereby increasing the potential efficiency per unit of wood. This study aims to assess the influence of cascading wood utilization on optimizing the overall environmental impact of wood utilization. By combining a material flow model of existing wood applications – both for materials provision and energy production – with an algebraic optimization tool, the effects of the use of wood in cascades can be modelled and quantified based on life cycle impact assessment results for all production processes. To identify the most efficient wood allocation, the effects of a potential substitution of non-wood products were taken into account in a part of the model runs. The considered environmental indicators were global warming potential, particulate matter formation, land occupation and an aggregated single score indicator. We found that optimizing either the overall global warming potential or the value of the single score indicator of the system leads to a simultaneous relative decrease of all other considered environmental impacts. The relative differences between the impacts of the model run with and without the possibility of a cascading use of wood were 7% for global warming potential and the single score indicator, despite cascading only influencing a small part of the overall system, namely wood panel production. Cascading led to savings of up to 14% of the annual primary wood supply of the study area. We conclude that cascading can improve the overall performance of a wood utilization system.

© 2015 Elsevier Ltd. All rights reserved.

## 1. Introduction

Wood products are often found to have lower environmental impacts when compared to functionally equivalent products from fossil or mineral resources (Sathre & O'Connor, 2010; Werner et al., 2005; Werner and Richter, 2007). Raw material acquisition and production requires less fossil based energy, which leads to overall reduced environmental impacts and therefore creates benefits if substituting conventional materials. If utilized as fuel, wood can substitute for the diminishing fossil energy carriers. Because wood materials can be utilized for energy production at their end-of-life, benefits occur two-fold. By using wood in cascades – i.e. for multiple successive applications, first as a material and finally as a fuel –

the benefit created by one unit of wood could possibly be even further increased. In particular, legislative bodies have put high expectations into the concept of cascading for strengthening the efficiency of resource use (European Commission, 2011; BMU, 2012). Additionally, a cascading utilization is often regarded as a suitable strategy to bridge the gap between rising demand for wood and the projected stagnating availability of primary wood (Mantau, 2012).

Several studies analyzing wood cascading have been published so far and almost all of them, depending on the particular focus of the study, concluded that cascading creates environmental benefits. After the initial introduction of the concept by Sirkin and ten Houten (1994), Fraanje (1997) examined possible cascades of pine wood utilization in the Netherlands, finding that cascading can substantially prolong carbon sequestration to mitigate climate change. Sathre and Gustavsson (2006) calculated the primary energy and carbon balances for various wood cascades, taking into account direct cascade effects, substitution effects, and effects of

\* Corresponding author.

E-mail addresses: [hoeglmeier@hfm.tum.de](mailto:hoeglmeier@hfm.tum.de) (K. Höglmeier), [steubing@ifu.baug.ethz.ch](mailto:steubing@ifu.baug.ethz.ch) (B. Steubing).

### Nomenclature

C	Model runs with the option of a utilization of waste wood in cascades
CHP	Combined heat and power plant
GWP	Global warming potential; optimized value
h	Hardwood
IC	Impact category in LCA
IRW	Industrial round wood
LCA	Life Cycle Assessment
LCIA	Life Cycle Impact Assessment
LO	Agricultural land occupation (including forests); optimized value
nC	Model runs without the option of cascading of waste wood
OSB	Oriented Strand Board
PM	Formation of particulate matter (<10 µm); optimized value
PW	Primary wood from forests
s	Softwood
SC	Single Score Indicator aggregating several impact categories; optimized value
WW	Waste wood

varying land use due to cascading. They concluded that land use effects are the dominating contribution to the overall effects of cascading. A more recent study (Sikkema et al., 2013) assesses the consequences of a cascading wood use in Canada on GHG emissions, comparing different cascading scenarios to the IPCC default scenario, which assumes an immediate incineration and thereby carbon dioxide release from the wood. They found that noticeable reductions of GHG emissions can be achieved, yet they did not take into account the direct effects of cascading, such as energy savings in panel production due to lower moisture content in waste wood compared to primary wood.

Life cycle assessment (LCA) is used to evaluate impacts on the environment resulting from processes, products and related activities (ISO, 2006), thereby taking into account the whole life cycle of the product from raw material acquisition to final disposal or secondary utilization and allowing for a comparison of different product systems. LCA is frequently applied to assess environmental impacts related to the production of specific wood products such as wood based panels (Diederichs, 2014; Gonzales-Garcia et al., 2009; Wilson, 2010) and wood decking (Bergman et al., 2014). Comparative assessments of wood products, e.g. to determine possible substitution benefits as included in our study, have also been published (Sandin et al., 2014; Werner and Richter, 2007). A review by Sathre & O'Connor (2010) covers substitution effects of wood in regard to greenhouse gases. Two recent reviews of LCA studies of wood production and utilization (Klein et al., 2015; Wolf et al., *subm.*) further indicate that LCA is a well-established methodology to assess the environmental impacts of the whole forest-wood-chain. Yet to date, only a few studies assessing wood cascading with the method of LCA have been published (Gärtner et al., 2012; Höglmeier et al., 2014). These two studies both compared exemplary wood cascades to equivalent products from primary wood, albeit with different approaches to crediting and substitution. They conclude that cascading creates less environmental impacts when compared to the production of equivalent products from primary wood. However, when comparing exemplary cascading product chains to reference systems as displayed in the aforementioned studies, several aspects crucial for the evaluation of the

environmental performance of cascading are not sufficiently considered. First and foremost, if the basis for comparison (= functional unit) is the amount of product output (materials and energy) of the system, the wood input required to provide the products is only considered in terms of resulting environmental impacts. Since the utilized amount of wood only contributes to a minor extent to the overall impacts of the provision of wood products, the fact that one system might require substantially less wood input than the other system (being therefore more resource efficient) is not sufficiently accounted for in the LCA results.

The fact that wood is a regrowing but nevertheless limited and increasingly in demand resource and the resulting competition for wood resources cannot be adequately addressed by such an approach. Furthermore, interdependencies with and consequences for wood products not assessed by the considered cascade chain, such as the use of by-products, are not taken into account when only looking at single cascades. In order to integrate these aspects into the assessment, a holistic view of the wood utilization system must be taken by integrating materials, energy production and resulting wood flows. The goal should be an optimization of the system level to which cascading might contribute in new dimensions. Therefore, this study combines an LCA-based material flow model of wood material and energy generation options based on the region of Bavaria in southeast Germany with an algebraic optimization tool to enable a systemic assessment. Cascading utilization of wood is integrated in the model.

To close this gap, the goal is to identify the relationships between various utilization options of wood in the context of a cascading use of wood and to detect and highlight decisive drivers for the environmental performance of the system. This approach will create knowledge about sensitive parts of the system in order to integrate a cascading use of resources in the most environmentally beneficial way. The model is based on the situation in southeast Germany, yet findings are in principle transferable to other areas with similar wood utilization systems, i.e. large parts of Europe and North America. In detail, the following research questions will be answered:

- (1) How does cascading influence an effective wood utilization under consideration of current utilization patterns?
- (2) Does cascading lead to a reduction of the overall environmental impact of wood utilization, and what magnitude of reduction can be expected?
- (3) What are the determining factors in regard to the efficiency of cascading?
- (4) Is the approach of combining LCA with a material flow model suitable for answering these questions?

## 2. Material and methods

### 2.1. Model description

A material flow model containing the most common wood materials as well as wood energy options for both heat and power was developed (Fig. 1). It has the annual forest wood supply of the state of Bavaria in southeast Germany as an input. The considered products (materials and energy) were chosen based on the wood use situation in the study region, however, also products, such as oriented strand board (OSB), not produced in Bavaria but in nearby areas were included in order to ensure the transferability of the results to a wider geographic scope. The utilization of waste wood and industrial residual wood originating from the production processes in the model was also included. Life cycle impact assessment (LCIA) results for all model processes, from raw wood

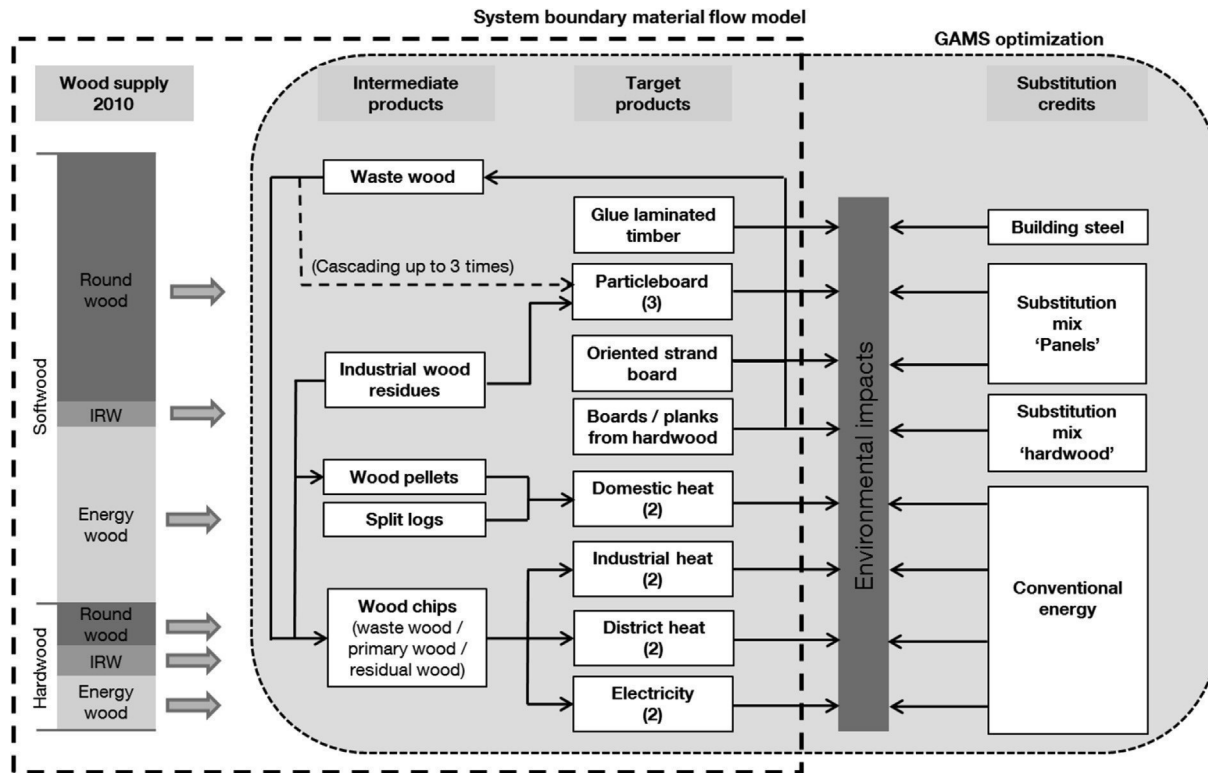


Fig. 1. Simplified overview of the model approach (only selected material flows are displayed). Numbers in brackets indicate considered amounts of variants (IRW: Industrial round wood).

Table 1  
Wood products of the model and considered non-wood substitution products.

Wood product	Substitution product
<i>Materials</i>	
Glue-laminated timber	Building steel
Boards and planks (hardwood)	Module combining weighted LCIA of indoor building products (windows 60%, floorings 40%)
<i>Wood panels:</i>	
a) Oriented strand board	Module combining weighted LCIA of fossil and mineral based panels and furniture to represent current panel utilization in Germany (Furniture 50%, gypsum boards 50%)
b) Particleboard with different wood input mixes (100% primary wood or 100% waste wood or 20% waste wood/ 65% Industrial residual wood/ 15% primary wood)	
<i>Energy</i>	
<i>Domestic heat from</i>	
a) split logs	Domestic heat mix (light fuel oil 80% and natural gas 20% in small scale boilers)
b) wood pellets	
<i>Industrial heat from</i>	
a) forest wood chips	Industrial heat mix (natural gas 65%, hard coal 25%, light fuel oil 10%)
b) industrial residual wood	
in a mix of different boiler sizes	
<i>District heat from</i>	
a) forest wood chips or	District heat from 100% natural gas
b) waste wood	
in heating plant or combined heat and power plant (CHP)	
<i>Electricity from</i>	
a) forest wood chips	Conventional electricity (German grid mix)
b) waste wood	
in power plant or CHP	

provision to materials manufacturing and energy generation from primary and secondary wood resources, as well as transportation were included in the model. The inclusion of LCA enabled an assessment of the collective environmental impacts caused by utilizing the annual wood supply of 2010. By combining a spreadsheet-based material flow matrix, which defined types and amounts of input and output flows of all processes of the wood utilization system as well as their associated environmental impacts, with the algebraic modelling program GAMS (GAMS Development Corporation, 2013), the overall environmental impact of the system could be calculated. The aim was to determine the specific wood utilization which meets all set constraints, especially in regard to the demanded products amounts, and which causes the overall lowest environmental impact for different impact categories of LCA. Model outputs were a portfolio of different wood products produced from the annual wood supply, as well as the total environmental impact of the system – from timber production to end-of-life incineration of the wood products – for four impact categories of LCA.

In a number of the model runs, materials and energy from wood were credited with “substitution benefits”, i.e. the potentially avoided environmental impacts by substituting fossil and mineral based products with wood based products (Table 1, chapter 2.3.1). The choice of the substitution product or product group reflected the common utilization of the respective wood product in the study area. E.g. in the case of wood panels, non-wood furniture as well as a variety of gypsum based panels were chosen as substitution products, since 80% of German wood panels are used for furniture production and the remaining 20% in the building sector (Mantau and Bilitewski, 2010). Detailed information regarding the substituted amounts and substitution factors is given in the Supplementary Information. For one set of scenarios, no substitution credits were given so that the optimization was carried out

based solely on the environmental impacts of the provision of wood products (chapter 2.3.2).

The production of pulp and paper was not part of the model, since the paper industry has already implemented resource cascading to a high level (Peche et al., 2011). Additionally, almost all by-products of pulp and paper production are utilized internally. Consequently, after the input of fresh forest wood and industrial wood residues to the production process, no further interactions and interdependencies of pulp and paper production with other wood resources and products take place. The wood resources utilized for pulp and paper production were excluded from the total wood supply of the model.

The utilization of wood in cascades was implemented in the model by allowing wood based panels to be produced from fresh wood as well as from waste wood or a mix of both (cp. chapter 2.2.3). Alternatively to this material application of waste wood, incineration for energy production was possible in the model. The possibility to use waste wood for panels could be excluded for specific model runs, so that all waste wood had to be incinerated directly and no cascading took place. To model reality as accurately as possible, minimum values were set for each target product category. The current wood utilization in the study area was taken as a basis for determining these minimum or threshold values (see chapter 2.2.2).

## 2.2. Input parameters of the model

### 2.2.1. Annual forest wood supply

An input parameter of the model was the annually available wood supply for the state of Bavaria in southeast Germany. The amounts and quality grading ratios modeled by Härtl and Knoke (2014) for the year of 2010 were utilized. Their assessment is based on the forest optimizer model YAFO (Härtl et al., 2013) coupled with oil related timber price development scenarios. Härtl et al. (2013) modeled the expected wood supply for a time span from 2010 to 2035 with various assumptions relating to the development of the oil price and its influence on timber supply. Possible reactions of forest owners to the development of timber price with regards to felling amounts were taken into account by the model. The moderate basis scenario, which assumed a constant oil price over the coming years, was the input of the model.

Since pulp and paper production were excluded from the model, the wood amounts utilized for these products were subtracted from the overall supply (Table 2). The model distinguishes between softwood and hardwood, with the former including predominately spruce and pine and the latter beech and oak as the main tree species of the study region. For each species group, the assortments

**Table 2**  
Annual wood supply as input values for the model.

		Total (Härtl and Knoke, 2014)	Without wood input for pulp and paper production (own calculations <sup>a</sup> )
		[m <sup>3</sup> under bark]	
Softwood	Roundwood	8,875,642	8,875,642
	Industrial roundwood	1,288,655	619,055
	Energy wood	5,537,120	5,280,620
Hardwood	Roundwood	1,326,525	1,326,525
	Industrial roundwood	1,169,550	723,150
	Energy wood	1,769,988	1,684,488
Total		19,967,480	18,509,480

<sup>a</sup> Based on Härtl and Knoke (2014) and Friedrich et al. (2012).

of roundwood, industrial roundwood and energy wood are distinguished.

### 2.2.2. Current wood utilization and resulting minimum amounts for target product categories

In order to better represent the current situation in the study area in the model and thus enable valid conclusions, minimum amounts representing the current use of wood products were set as thresholds for each of the target product groups. The demand for wood for material and especially energy production is expected to increase in the future (Mantau et al., 2010). Therefore, minimum amounts derived from current wood use can be expected to remain valid in the future, since demand will most probably not drop below these numbers. Statistical data of the most current demand for wood products are not available for the region of Bavaria. Hence, the minimum values for the different products considered in the model were derived based on the utilization of forest wood assortments in the year 2010 as assessed by Friedrich et al. (2012). By applying the wood input values (assortments and amount) for each product as utilized in the model matrix, hypothetical demands were deduced (Table 3).

### 2.2.3. Integration of wood cascading

The effects of a cascading wood utilization on the optimal utilization portfolios were assessed by implementing recycling possibilities into the model (cp. Fig. 1). Quality requirements of specific wood products, with regard to particle size and cleanliness of the wood, must be taken into account and limit cascading possibilities. Additionally, waste wood collection and recycling inevitably leads to losses. A technical yield of 95% following the transportation and processing (sorting and chipping/crushing) required after each service life of the wood products was assumed. This value is in accordance with process specifics derived from two German waste wood processing facilities. Additionally, a collection rate of 95% was applied. These values result in a total loss of 10% for each cascading step (Table 4).

Whether a wood product occurring in the model is suitable for material recycling or only fit for energy production was based on the relevant German legal requirements (German Government, 2003), which prohibit landfilling and require the sorting of waste wood into different classes. This classification determines the possible secondary application (material and/or energy). Data regarding the resulting shares of waste wood quality from different utilizations (e.g. building, packaging, furniture) are scarce. Höglmeier et al. (2013) assessed waste wood qualities resulting from building deconstruction. Lang (2004) provided shares of waste wood qualities resulting from different applications. In accordance with these assessments, Table 4 shows the assumed distribution into material or energy as the possible subsequent waste wood recycling steps in the model. Waste wood potentially suitable for material application can, however, be utilized further

**Table 3**  
Required minimum amounts per product group based on actual timber utilization in 2010 without pulp and paper (based on Friedrich et al., 2012).

Target product group	Actual utilization/minimum values
<i>Materials</i>	
Glulam from softwoods [m <sup>3</sup> ]	3,917,455
Sawn timber from hardwoods [m <sup>3</sup> ]	478,800
Panels (Particleboard and OSB) [m <sup>3</sup> ]	1,656,000
<i>Energy</i>	
Domestic heat [TJ]	41,625
Industrial heat [TJ]	6,383
District heat [TJ]	22,271
Electricity [TJ]	1,237

**Table 4**

Quality distribution and yield of waste wood processing in the model in % of total occurring waste wood for various wood products (based on Höglmeier et al., 2013; Lang, 2004).

	Recollection rate <sup>a</sup>	Technical loss (transportation/processing)	Remaining waste wood suitable for	
			Materials	Energy
Glulam timber (s)	95	5	90	0
Sawn timber (h)	95	5	54	36
Panels, step 1	95	5	72	18
Panels, step 2	95	5	63	27
Panels, step 3	95	5	0	90

<sup>a</sup> Subject to sensitivity analysis (cp. chapter 2.4).

for energy production but not vice versa. In the case of wood based panels, three cascading steps were distinguished with varying quality shares to ensure that a certain unit of wood could only be cascaded a maximum of three times. Additional recycling steps for particleboard are technically unlikely due to the decreasing wood particle size and the increase of the adhesive resin amount in the waste wood.

## 2.2.4. Life cycle assessment of wood and substitution products

**2.2.4.1. Life cycle impact assessment.** The environmental impact categories (IC) examined in this study comprise three midpoint indicators. The global warming potential (GWP) was calculated based on the report by the IPCC (2007) and excluded biogenic carbon. The formation of particulate matter smaller than 10 µm (PM) and agricultural land occupation (LO) were assessed based on the impact assessment scheme ReCiPe 1.07 (Goedkoop et al., 2013). We focus on these ICs as they represent impacts often mentioned in public discussion in regard to wood production and utilization. Additionally to these three midpoint indicators, the ReCiPe Endpoint H/A method, which integrates weighted LCIA results of all endpoint impact categories of ReCiPe 1.07, was used as an aggregated single score indicator (SC) in order to enable the concurrent consideration of different potentially contradicting environmental impacts in the single objective optimization.

**2.2.4.2. Life cycle inventory.** If not specified otherwise, the basis for all LCAs was the generic datasets of the ecoinvent database in version 2.2 (Frischknecht and Jungbluth, 2007) for materials, energy and all necessary background processes. Where available, data representative for German conditions was used or the ecoinvent data was adapted accordingly. The sorting and processing of waste wood was modeled with primary industry data of three differently sized, south German waste wood recycling companies (cp. the supplementary information). The wood material models (glulam, panels, sawn timber from hardwoods) are based on the inventory data provided by Rüter and Diederichs (2012), which represents average German conditions. Particleboard from 100% waste wood is currently not produced in Germany but is part of the study system in order to assess the effects of cascading. Therefore, the average German LCI data from Rüter and Diederichs (2012), which assume a waste wood content of 20%, was adapted. The adaptations consisted mainly of increasing the wood loss by chipping and of decreasing the energy required for drying of the wood. The amount of the relative energy reduction was based on industry information from a German particleboard manufacturer. No adaptations were made for the adhesive resin fraction and other chemicals. Detailed descriptions of the adaptations can be found in the supplementary information. The process heat required for production of panels from waste wood was assumed to be produced from waste wood, whereas in the case of the panels from primary wood, only the

production rejects were assumed to be incinerated for energy production and additional energy was generated from other industrial residue wood. The processes for conventional energy generation and wood energy from primary wood were taken from the ecoinvent database. For incineration of waste wood, emissions were adapted, e. g. by adding CO<sub>2</sub> from fossil sources originating from coatings, additives, and resins in the waste wood.

## 2.3. Modeled scenarios

### 2.3.1. Scenarios with credits for substitution of non-renewable products

In a first set of model runs, credits for the substitution of non-renewable products were given for each wood product. The model detected the optimal product portfolio by minimizing specific environmental impact categories of LCA. The total environmental impact was calculated by adding all impacts generated by utilizing the wood supply and subtracting impacts prevented by substituting conventional products with wood products. To determine optimal wood utilization and effects of cascading, all model runs were conducted with (C) and without (nC), including the possibility of a cascading utilization of waste wood consisting of the production of panels totally or partially from waste wood. This enabled for a comparison of resulting overall environmental impacts and product portfolios, thereby displaying the effect of cascading. The parameter to be optimized was the total environmental impact of the system.

### 2.3.2. Scenarios without substitution credits

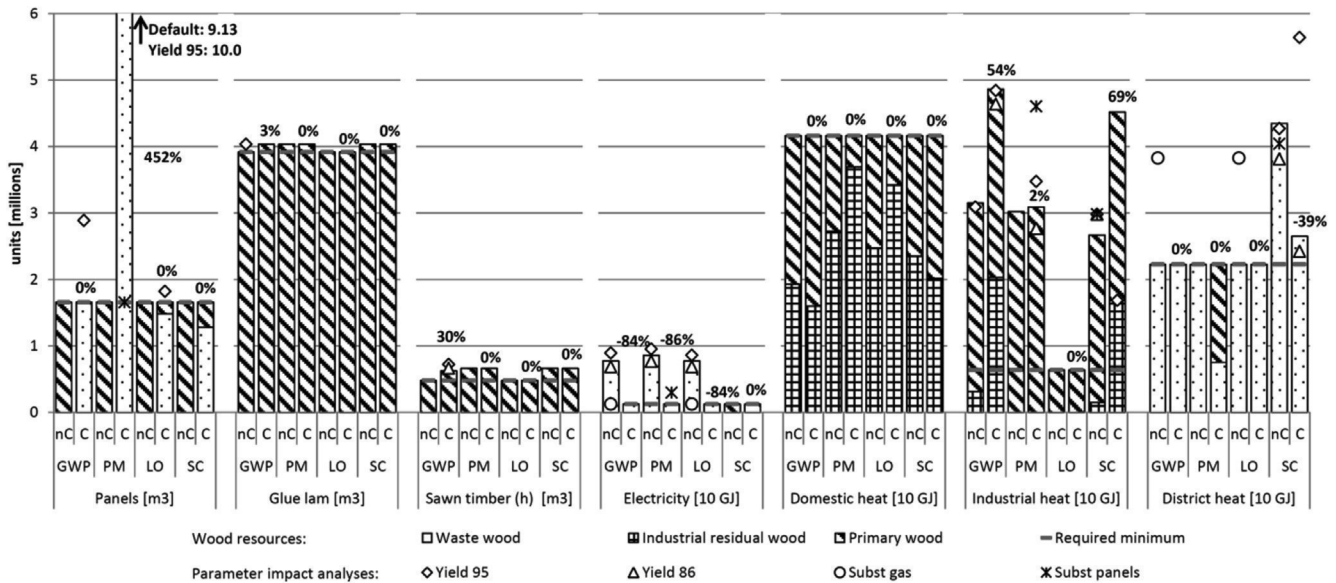
A second set of model runs was conducted where the model considered the LCIA results for the production of the wood materials and wood energy until the end-of-life of each product, however, no effects of substituting fossil or mineral based products were assumed. The overall environmental impact of the system to be optimized was composed of the sum of the environmental impacts of wood utilization.

The intention of this additional approach was twofold: Firstly, since crediting of wood products with potential substitution benefits influences the optimal product portfolio, the approach made it possible to examine whether the conclusions to be deduced from the scenarios including credits also hold true if no, to a certain extent always subjective crediting is applied. Secondly, this approach enabled an examination of the influence of cascading on the efficiency of wood utilization. As no credits are given, the production of each unit of a wood product increases the total environmental impact of the system. Consequently, only the

**Table 5**

Overview of sensitivity analyses and respective examined effects.

Sensitivity analysis name	Varied parameter	Default setting	Variation	Examined effects
Yield 95	Yield of waste wood collection & processing	90%	95%	Product portfolio/ Environmental impacts
Yield 86	Yield of waste wood collection & processing	90%	86%	
Yield panel	Yield of waste wood collection & processing	90%	30 ... 100% recollection of waste wood	Total produced amount of panels
Subst gas	Substitution electricity	German grid mix	Natural gas	Product portfolio/ Environmental impacts
Subst panel	Substitution module for wood panels	Furniture 50%, Gypsum boards 50%	100% Cypsum boards	Product portfolio/ Environmental impacts



**Fig. 2.** Optimal product portfolio for the optimization parameters GWP, PM, LO and SC with and without the possibility of cascading. Numbers on the cascading columns indicate the difference of produced amounts between the respective cascading and non-cascading scenarios. Minimum amounts are indicated by the bold line. Markers indicate portfolio changes by parameter analyses (no changes if no markers are displayed).

minimum values set for each of the target product categories are produced, contrary to the crediting-scenario where as many products as possible are produced.

#### 2.4. Sensitivity analyses

To assess the robustness of the results, scenarios with variations of a number of parameters of the model with crediting for substitution were conducted (Table 5). Since it directly influences the efficiency of the use of secondary wood, the recollection rate of waste wood was the first parameter to be analyzed. No reliable assessment of the actual share of wood products recollected after their service life is available for Germany. Yet, due to a strict legislation and effective collection system, rather high shares can be assumed. Since panels are the only material application of waste wood considered in the model and also the only one with actual real importance, an additional examination was also carried out of the effects of the efficiency of waste wood collection and sorting on the amount of panels produced with different optimization parameters.

The second examined parameter was substitution credits for electricity and wood panels. Credits for electricity was chosen because its substitution benefits are generally higher than those of heat and thereby more strongly influence the optimal product portfolio composition. Panels are an important and variable product group that was credited by a module containing a mix of several products, and the composition of this module was the other substitution credit examined in the sensitivity analysis.

### 3. Results

#### 3.1. Scenarios with substitution credits

##### 3.1.1. Product portfolios with different optimization parameters

The option of cascading waste wood influences the composition of product portfolios, both in terms of produced amounts and in the wood assortments used (Fig. 2). Changes occur mainly in the product groups that allow waste wood as a raw material. Apart from panel production, where cascading leads to a substantial

share of panels produced from waste wood even though the overall amount varies only for optimizing PM, mainly electricity and to a certain extent district heat are influenced. The results suggest that panels are not an optimal wood allocation, since in most scenarios only the required minimum amount was produced by the model. The reason is the relatively high environmental impacts of panel production due to the required wood processing, adhesives and additives. Therefore, the benefits achievable by substituting non-wood products are lower for panels when compared to other wood products, since the difference in environmental impacts between wood and non-wood products is smaller. However, engineered wood products, such as panels, are flexible products with a multitude of applications and with a stable demand. Production from waste wood through cascading is the preferable way to meet this demand, as shown by the change in utilized raw materials for panels in the model runs allowing cascading.

With cascading, electricity production drops to the minimum value in all cascading scenarios, since the provision of panels in multiple cascading cycles decreases the available waste wood amount due to consumption of waste wood for process heat production and some losses. Yet waste wood is found as the preferred raw material for electricity and district heat in nearly all scenarios. Industrial heat as well as domestic heat could only be produced from waste wood in our model. Cascading also influences these product groups because primary wood and industrial residual wood is available in higher amounts when waste wood can be cascaded. When optimizing PM, even district heat is produced from primary wood to a certain extent. Specifically, cascading leads to a shift from industrial roundwood from panel manufacturing to split log production and therefore to a decrease in the second source of domestic heat (pellets). This, in turn, increases the availability of industrial residual wood for the production of industrial heat (Fig. 3).

However, as can be seen in Fig. 3, in order to optimize the impact category global warming potential, no substantial increase of production is possible in the case of glulam and sawn timber. The suitable raw wood assortments for these products (roundwood from softwoods and hardwoods) are limiting factors, since a major

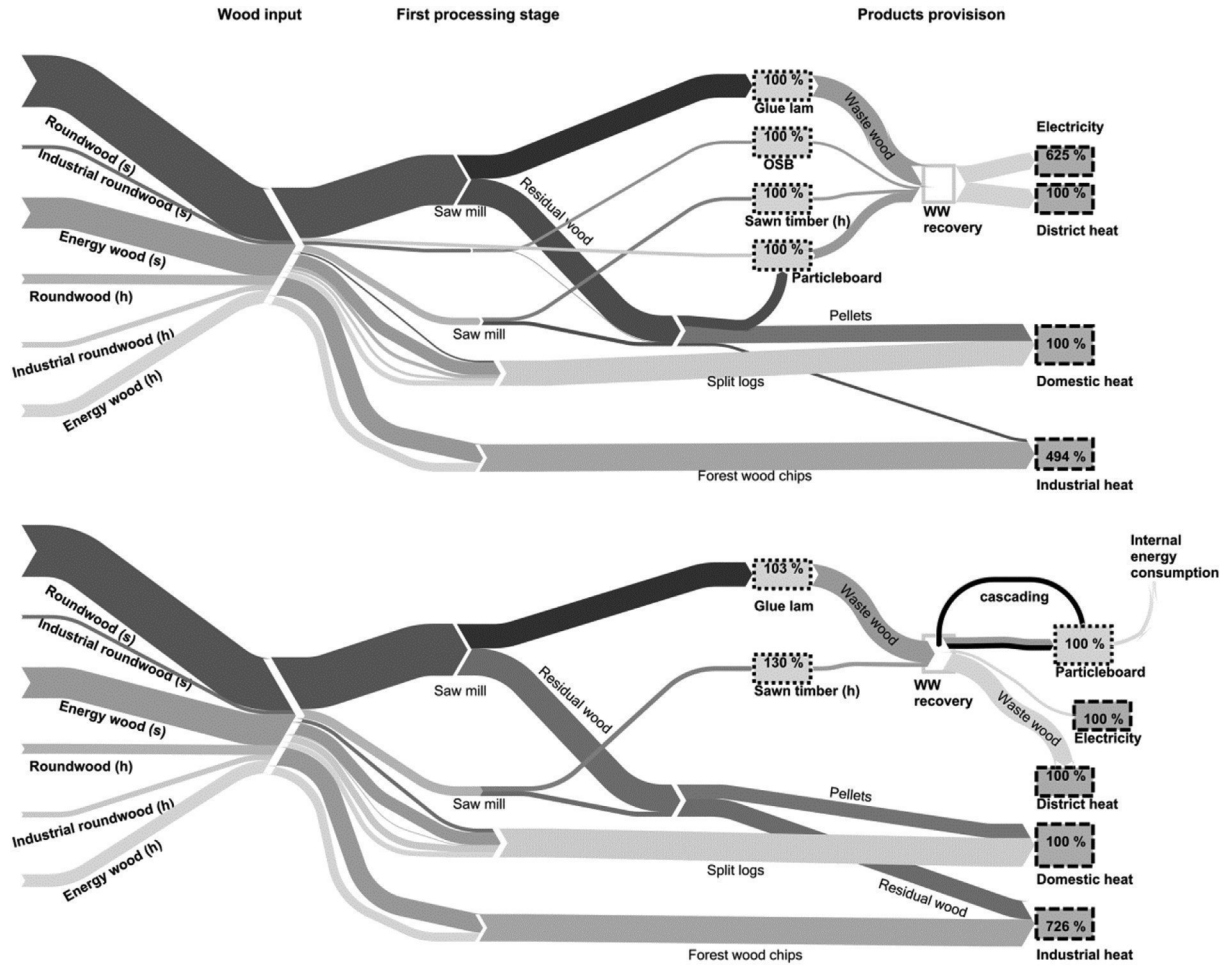


Fig. 3. Sankey diagrams displaying the material flow for optimizing GWP, without (top) and with (bottom) the possibility of cascading. Percentages show the degree of fulfillment of the required minimum amounts per product category. The arrow width is determined by dry matter content of the wood flow.

share is already required to produce the defined minimum amounts indicated by the bold line in Fig. 2. The increases of 3% of glulam and 30% of sawn timber from hardwoods, which occur in the cascading scenario of GWP, are the maximum possible increases. In all cascading scenarios, regardless of the optimized environmental impact, the total roundwood supply is used for sawn products.

Overall, the changes in the wood flows by cascading are noticeable. Yet the general allocation of the primary wood input assortments is not influenced, with the exception of rather small amounts of industrial roundwood. Cascading mainly influences the wood flows after the first processing stage.

3.1.2. Resulting environmental impacts of wood utilization

A focus was placed on the difference between non-cascading and cascading variants rather than on absolute amounts. A first trend that can be concluded from the environmental impacts of wood utilization (Table 6) is that if cascading is a possibility in the system, the overall environmental impacts of the system generally decrease. Exceptions are global warming potential when optimizing land occupation and the single score indicator when optimizing particulate matter formation and land occupation. With regard to relative differences between cascading and non-cascading scenarios, the biggest improvements occur for the formation of particulate matter, where reductions of 571% and 519% are possible for optimizing PM and LO.

Minimizing the single score indicator leads to rather similar outcomes as those from the optimization of GWP. In particular, the reduction of greenhouse gases is in the same magnitude.

The overall environmental impact including substitution credits is negative in most scenarios, meaning that possible credits exceed the impacts caused by the provision of wood products. An exception is the impact category land occupation, where impacts exceed credits in all scenarios. Conventional products often have an advantage when compared to wood products, since they lead to less land occupation.

The overall impacts are lowest when optimizing land occupation for all categories. However, this is due to the fact that in the LO-scenarios only a certain share of the total primary wood supply was used by the model, namely the amount required to provide the minimum needed per target product group. This is as no net credits result from the provision of wood products for this category (chapter 3.1.3). In the category of particulate matter formation, credits are lower than impacts in wood production processes for some scenarios. However, as already mentioned, cascading can lead to substantial reductions in this category. This is mainly caused by the shift of domestic heat production from the incineration of split logs in small furnaces to the use of pellets, as more industrial residual wood is available for pellets when particleboards are produced from waste wood. The effect of substantially increasing particulate matter formation by small scale domestic furnaces is widely being discussed in Germany, since rising fossil fuel prices



**Table 6**

Total environmental impacts of wood utilization for different impact categories and optimizations for nC and C variants with consideration of substitution credits. Relative difference ( $\Delta$ ) of the C in relation to the nC variant.

	Optimization parameter											
	GWP			PM			LO			SC		
	nC	C	$\Delta$	nC	C	$\Delta$	nC	C	$\Delta$	nC	C	$\Delta$
	[10 <sup>6</sup> kg CO <sub>2</sub> eq.]		[%]	[10 <sup>6</sup> kg PM10 eq.]		[%]	[10 <sup>6</sup> m <sup>2</sup> *a]		[%]	[10 <sup>6</sup> ReCiPe points]		[%]
GWP	-9,100	-9,714	-6.7	-9,055	-9,059	0.0	-7,021	-5,983	14.8	-9,001	-9,609	-6.8
PM	0.61	0.53	-12.7	-0.22	-1.45	-571	0.19	-0.79	-519	0.49	0.25	-49.9
LO	20,351	20,339	-0.1	20,353	19,922	-2.1	17,043	15,371	-9.8	20,370	20,357	-0.1
SC	-1.84	-1.96	-6.3	-1.84	-1.73	5.8	-1.48	-1.31	11.5	-1.93	-1.96	-2.0

have led to an especially strong increase of using split logs for heating.

### 3.1.3. Changes in wood utilization parameters by cascading

To get a better understanding of the effects of cascading on the material flow system, several parameters characterizing wood utilization in the system were assessed additionally to the portfolio composition and environmental impacts (Table 7). Lines 1 to 3 of Table 7 show the share of the total produced energy that has been provided by incineration of waste wood. The highest total shares (heat and power, line 3) of 38% are obtained in non-cascading scenarios, which is due to the fact that particleboard production from waste wood in the cascading scenarios decreases the available waste wood for energy production at the end-of-life. This trend can be detected for most of the cascading scenarios as well as when looking separately at the different energy types (lines 1 and 2).

Another characterizing aspect is the share of the total primary wood supply utilized in a material application in the first step, thus enabling a later potential use in cascades. Noticeably, these numbers are higher for the non-cascading model runs, since panels have to be produced from primary wood in these cases. Yet this finding does not automatically allow for the conclusion that cascading of waste wood leads to a higher share of incineration of primary wood. The reason is rather the specific setup of the model, which credits wood products for substituting conventional products. Hence, if less primary wood is needed for providing the required materials due to cascading, the remaining primary wood is incinerated, which leads to the displayed higher shares of primary wood for energy production (line 4). Reviewing the scenarios that optimize the land occupation impact category confirms this. In this case, the provision of wood products does not lead to positive credits, and, therefore, only the required minimum amount of wood products is produced in each category. As can be seen in line

**Table 7**

Characterization of wood utilization with and without the possibility of cascading for modelling with substitution credits (WW: waste wood).

[% of total produced or used]	Optimization parameter							
	GWP		PM		LO		SC	
	nC	C	nC	C	nC	C	nC	C
1 Heat from WW	23	20	24	8	32	32	39	23
2 Electricity from WW	100	100	100	100	100	100	0	100
3 Total energy from WW <sup>a</sup>	29	21	30	9	38	33	38	24
4 Primary wood for material application	56	54	62	57	74	81	60	57
5 Cascaded wood...								
5a ...in relation to total PW supply			11	59	15	9		
5b ...in relation to roundwood + industrial roundwood			18	95	18	14		
6 Primary wood supply utilized	100	100	100	100	80	66	100	100

<sup>a</sup> Heat and power generated from waste wood relative to the overall energy production of the system (in MJ at plants).

6, the cascading scenario requires only 66% of the primary wood, whereas the non-cascading scenario utilizes 80% of the available resources. Additionally, the share of the wood used for material production (line 4) is higher in the cascading scenario in this case. To have a closer look at the effects of cascading on wood utilization, scenarios without substitution credits were modeled (chapter 3.2).

Finally, lines 5a and 5b display the amount of waste wood used for a material application instead of incineration in relation to the total primary wood supply (5a) and in relation to the part of primary wood that could potentially be used for material application (5b), namely the assortments of saw timber and industrial roundwood. With the exception of the PM-scenario, where a rather high amount of particleboard is produced (more than five times the minimum amount), all scenarios result in similar shares of cascaded wood, both in relation to the total wood supply as well as in relation to the assortments potentially suitable for cascading (roundwood and industrial roundwood).

### 3.2. Scenarios without substitution credits

When modelling without credits for substitution, the resulting environmental impacts of wood utilization (Table 8) show similar trends to those from the model runs with credits. For nearly all optimization parameters, the environmental impacts can be reduced when allowing a cascading use of waste wood in the model. Possible savings with regard to greenhouse gases are slightly over 10% when optimizing the category GWP and increase to 11% when optimizing the single score indicator, but with higher absolute amounts. Again, in accordance with the results from modelling with crediting, the highest relative reductions by cascading can be detected for particulate matter formation when optimizing the categories PM and LO. The fact that both approaches – the modelling with and without credits – results in similar trends of the environmental impacts is a strong indicator that the crediting did not lead to distortion of the results.

As already briefly discussed in the previous chapter, the total utilization of the wood supply as a consequence of crediting for substitution influences the performance of the system. In order to gain an additional perspective, scenarios without substitution crediting were run. They have in common that only a part of the available quantity of primary wood is utilized, since no credits counteract the environmental impacts of the provision of wood products. Thus, the minimization of environmental impacts of the model leads to a limitation of the produced amounts to the defined minimum per category. Nevertheless, the energy provided by the various scenarios varies, since all wood products must be handled until their end-of-life, which, in our model, is incineration for energy production (Table 9). All cascading scenarios show a lower utilization share of primary wood when compared to the non-cascading scenarios. The highest input of primary wood is required by the two model runs with optimization of the single

**Table 8**  
Total environmental impacts of wood utilization for different impact categories and optimization parameters for nC and C variants without consideration of substitution credits. Relative difference ( $\Delta$ ) of the C in relation to the nC variant.

	Optimization parameter											
	GWP			PM			LO			SC		
	nC	C	$\Delta$	nC	C	$\Delta$	nC	C	$\Delta$	nC	C	$\Delta$
	[10 <sup>6</sup> kg CO <sub>2</sub> eq.]		[%]	[10 <sup>6</sup> kg PM10 eq.]		[%]	[10 <sup>6</sup> m <sup>2</sup> *a]		[%]	[10 <sup>6</sup> ReCiPe points]		[%]
GWP	2,279	2,045	-10.3	2,384	2,270	-4.8	2,389	2,280	-4.6	2,626	2,335	-11.1
PM	9.69	10.50	8.4	8.87	7.36	-17.0	8.88	7.39	-16.8	10.08	10.08	-0.1
LO	18,678	18,164	-2.7	17,661	16,064	-9.0	17,192	15,514	-9.8	20,388	19,400	-4.8
SC	0.36	0.34	-4.1	0.37	0.38	1.7	0.37	0.38	2.0	0.39	0.36	-6.7

score indicator. Since all the resulting wood products have to be incinerated at their end-of-life, these two scenarios also lead to the highest amount of additional energy (line 7; sum of electricity and heat, converted to lower heating value). Generally, the cascading scenarios display a lower amount of surplus energy, since a part of the wood material is not incinerated directly but utilized for another material application, during which the amount decreases due to provision of process energy and losses.

Contrary to the modelling with substitution credits, the cascading scenarios display a higher share of primary wood used for a material application, a desirable effect when aiming to prolong the average time of carbon storage in the wood products. The numbers in lines 4 and 6 can also be seen as indicators for an assessment of the influence of cascading on the efficiency of wood utilization. Since the different model runs lead to differing produced amounts of energy, these numbers are not totally comparable. However, they strongly indicate that implementing the possibility of cascading in a wood utilization system increases the efficiency by allowing more flexibility of possible assortments for specific products and, consequently, requiring less primary wood for providing a specific product portfolio.

### 3.3. Sensitivity analyses

#### 3.3.1. Product portfolio composition

To determine the influence of the assumptions regarding substitution and the yield of waste wood collection and sorting, impact analyses for four different parameters were conducted. The resulting changes in the composition of the products portfolio are displayed in Fig. 2 together with the portfolio of the default scenarios. Markers indicate changes of the produced amounts. If no marker is displayed for a scenario-column, the specific amount remained unaffected by the respective impact analysis.

Increasing the efficiency of waste wood processing by

improving the overall share of waste wood recovery from 90 to 95 % as carried out in the first impact analysis (*Yield 95*) favors panel production from waste wood. With all optimization parameters except the single score indicator, the produced amount of panels increases with a rising collection rate, but only when cascading is possible. Because losses during recovery of waste wood can be expected to be particularly of influence with cascading of wood, since it can require several recollection cycles until the final incineration and losses add up, an additional examination of the correlation of recovery rate and produced amount of panels was carried out (*Yield panels*; Fig. 4). The produced amount of the solid wood products glulam and sawn timber from hardwoods are rather unaffected by a change in the waste wood recollection rate, as can be expected. The amount of electricity from incineration of waste wood increases with a rising recollection rate and decreases if the recollection becomes less efficient, as assumed in the variation *Yield 86*. This effect can only be detected for non-cascading scenarios, since with cascading, the default recollection rate also only allows for providing the minimum electricity required as waste wood is mainly used for particleboard production. A decreasing efficiency of waste wood collection, as done in variation *Yield 86*, also results in lower amounts of the energy categories providing heat.

As a default, the German grid mix was assumed to be substituted by electricity from wood. To determine the influence of this assumption on the results, a variation with electricity from natural gas as the basis for substitution was conducted. It did not influence wood materials production, but it made electricity production less favourable when optimizing GWP and LO. The respective waste wood was shifted to the provision of district heat.

Another parameter variation was set for the product mix which wood panels are assumed to substitute for. This change led to a reduction of the produced particleboard amount to the minimum value. The waste wood no longer needed for panels production could then be used for increasing the produced amounts of

**Table 9**  
Characterization of wood utilization with and without the possibility of cascading for modelling without substitution credits (WW: waste wood).

	[% of total produced or used]	Optimization parameter							
		GWP		PM		LO		SC	
		nC	C	nC	C	nC	C	nC	C
1	Heat from WW	32	27	43	32	44	32	0	11
2	Electricity from WW	100	100	100	100	100	100	100	100
3	Total energy from WW <sup>a</sup>	38	28	44	33	45	33	19	22
4	Primary wood for material application	68	66	74	81	74	81	57	60
5	Cascaded wood...								
5a	...in relation to total PW supply	0	13	0	16	0	15	0	5
5b	...in relation to roundwood + industrial roundwood	0	16	0	17	0	18	0	7
6	Primary wood supply utilized	80	77	78	63	80	66	98	86
7	Energy surplus over required minimum [PJ] <sup>b</sup>	20.4	17.1	20.3	0.0	20.3	0.0	48.6	31.7

<sup>a</sup> Heat and power generated from waste wood relative to the overall energy production of the system (in MJ at plants).

<sup>b</sup> From end-of-life of wood products; displayed as lower heating value of wood for better comparability.

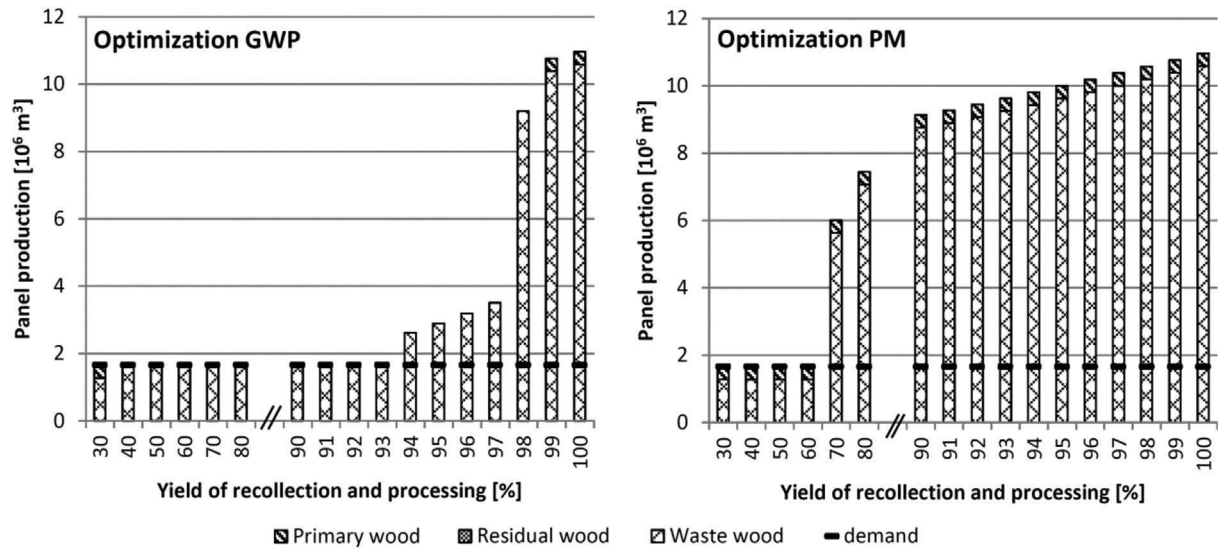


Fig. 4. Development of panel production with varying efficiencies of waste wood collection and sorting (cascading variants). The bold line indicates the required minimum amount of panels set as a constraint in the model.

electricity, district and industrial heat. This outcome indicates that a general conclusion towards the environmental preference of panel production from waste wood in regard to particulate matter formation can not be drawn from the results of our study. The LCIA of non-wood furniture production, which is included in the substitution product mix in the default setting but was omitted in the variation, seems to influence the preference of panels when optimizing particulate matter formation, yet it can not be seen as totally representative for the whole furniture sector in Germany.

The final analysis was the examination of the effects of the efficiency of waste wood recollection on the produced panel amount when cascading is possible in the model (*Yield panels*; Fig. 4). The efficiency of waste wood collection and sorting, as assumed for the default model runs, is based on rather rough assessments due to a lack of reliable data for Germany. However, the parameter analyses *Yield 95* and *Yield 86* have shown that the recollection rate of waste wood strongly influences the amount of particleboard produced. Therefore, more in depth examinations were carried out to examine the effects of the recollection rate on panel production. Fig. 4 shows that when optimizing GWP with the possibility of cascading, panel production drops to the required minimum already with the rather high recollection yield of 93%. If the yield drops to 30%, the amount of waste wood in the system is no longer sufficient to produce the required panels; primary wood has to be used additionally. In contrast, when optimizing particulate matter formation, a surplus of panels is produced until the yields drops below 70%. This indicates that the efficiency of waste wood handling is essential when considering a cascading use of wood, as the losses multiply with each additional processing step and are simply lost for energy generation at the end of life. Only rather high yields of waste wood processing support cascading.

### 3.3.2. Environmental impacts

The environmental impacts resulting from the model runs during the variation analysis were compared to the results of the default scenarios (Table 10). Overall, the conducted variations only selectively influence the environmental impact of the system. Particulate matter formation shows the most pronounced differences. An increase of the yield of waste wood recollection and processing in most scenarios has a positive impact on particulate matter formation, whereas the variations of the substitution

products for wood panels and electricity lead to an impairment for all scenarios, since the substitution credits for the impact category PM decrease with both variations.

The single score indicator, which integrates a variety of different impact categories, is relatively unaffected by the examined variations. This shows a robustness of the model towards assumptions and choices in the model setup, thereby indicating a good reliability of the results.

## 4. Discussion

### 4.1. Modelling approach

The aim of our study was to analyze and quantify effects of a cascading use of wood resources by taking the whole system of wood utilization on a regional level into account. The advantage of such a comprehensive, supply based approach over the assessment of cascading with conventional LCA is the possibility of integrating effects on the environmental impact of the system which are less

Table 10

Difference of environmental impacts between parameter analyses and the default scenarios. Differences to the default scenario greater than 5% are highlighted in bold.

[Δ % of environmental impacts]	Optimization parameter								
		GWP		PM		LO		SC	
		nC	C	nC	C	nC	C	nC	C
Yield 95	GWP	-1.4	-1.7	-1.5	-4.8	-1.9	-0.6	-2.3	<b>5.1</b>
	PM	<b>-37.5</b>	<b>-21.8</b>	-4.4	<b>-5.6</b>	-4.8	-0.4	<b>-8.5</b>	<b>272.1</b>
	LO	0.0	-0.4	0.0	-0.3	0.0	-0.8	0.0	0.1
	SC	-1.4	-0.5	-1.2	-3.7	-1.4	-0.1	-1.8	-1.1
Yield 86	GWP	-1.4	1.9	-1.5	4.2	-1.9	0.2	-2.3	1.4
	PM	1.5	<b>-6.6</b>	4.4	<b>5.0</b>	4.8	-0.7	<b>-20.3</b>	<b>-11.8</b>
	LO	0.0	0.0	0.0	0.3	0.0	0.9	0.0	0.0
	SC	1.2	1.7	1.2	3.2	1.4	0.0	1.6	1.7
Subst gas	GWP	0.4	0.3	2.1	0.3	0.5	0.4	0.3	0.3
	PM	<b>51.1</b>	<b>7.5</b>	<b>127.1</b>	2.7	<b>164.0</b>	5.0	<b>8.0</b>	<b>15.9</b>
	LO	0.1	0.0	0.1	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0
	SC	-4.5	-0.5	-3.9	-0.6	<b>-5.6</b>	-0.8	-0.5	-0.5
Subst panels	GWP	1.4	1.7	1.4	-2.3	1.8	2.4	0.6	1.3
	PM	<b>43.3</b>	<b>64.2</b>	<b>121.9</b>	<b>31.2</b>	<b>139.0</b>	<b>38.4</b>	<b>38.8</b>	<b>106.1</b>
	LO	0.2	0.3	0.2	2.4	0.2	0.3	0.2	0.2
	SC	0.7	0.8	0.7	<b>-9.4</b>	0.9	1.1	0.6	0.6

directly associated with the use of wood in cascades but should still be taken into consideration. Some examples are the reduction of available waste wood in each cascade step through losses or shifts of wood assortments other than waste wood as input for materials and energy. Additionally, the model based approach enabled the integration of current wood utilization and demand of derived wood products into the study area as a constraint to ensure that the system including cascading also fulfills the wood products demand.

The combination of LCA with optimization is a common approach (Pieragostini et al., 2011) and has been recently applied to detect the optimal utilization of biomass potentials (Čuček et al., 2012; Saner et al., 2014; Steubing et al., 2012; You et al., 2012) from an environmental perspective. However, the integration of cascading wood utilization paths in order to assess their influence on the wood utilization system as a whole has, to the best of our knowledge, not been conducted previously.

The study compares optimum states of the system. In reality, both the cascading as well as the reference system will hardly ever be in this state. Nevertheless, to assess effects of changes in the system, such as cascading, comparing optima is a viable approach if information regarding the actual status quo – in this case the environmental impacts of the utilization of the annual wood supply – are not available. The calculated savings by cascading of wood resources should be seen as best-case assessments of possible effects by cascading. Decisive factors detected in this study, e.g. that the benefits of cascading highly depend on the efficiency of recovery of waste wood, can be expected to hold true also in reality.

A result indicating the robustness of the model approach is the similar trend that the considered impact categories display in most scenarios. They were chosen with the goal of displaying the extensive effects of wood utilization, and the category of particulate matter formation especially aims at accommodating current criticisms towards wood utilization and the integration of the important aspect of human health. Land occupation was considered, since one of the fundamental aspects of cascading is the provision of a resource virtually without the environmental impacts associated with the provision of primary resources. However, the choice of indicators is always subjective to a certain extent and further investigation of the effects of cascading on other environmental impacts is called for.

The products, both materials and energy, accounted for in our study were chosen to achieve a realistic abstraction of the current utilization of the wood supply. Although not all utilization options were integrated into the model, the applications with the main relevance in regard to amount and economic value for the various wood assortments were considered. This allows the results to be seen as representative not also for the study areas, but also for beyond. As the considered wood products are rather common and the applied LCA data is mostly representative for middle European conditions, the detected effects of a cascading use of wood are not limited to the study area but can be expected to occur in a similar way in other countries with an equivalent wood utilization system.

The study focused on the difference between a system enabling a cascading of wood and a system without this option. Therefore, the use of generic LCA datasets from the ecoinvent database for all conventional and most wood based energy generation options can be seen as suitable, despite the fact that potentially the environmental impacts of energy generation in the study area do not perfectly match reality because of differing incineration and flue gas cleaning technologies and plant capacities. This is a weakness our study shares with most LCA studies where generic data are used for energy generation processes.

We chose the application of substitution credits in order to quantify optimal wood utilization and assess the influence of cascading on four environmental indicators. One of the underlying

assumptions of this approach is that each unit of manufactured wood product in fact displaces fossil or mineral based products. This may not always be the case in reality, as wood products may as well substitute other wood or biomass based products. Especially with particleboard that is used for furniture production, substitution is more unlikely due to a differing perception of particleboard-based and e.g. glass- or steel based furniture. We took this into account by carrying out an impact analysis without furniture as part of the substitution mix. The choice of substitution products and their associated environmental impacts can be decisive for the results. By considering “substitution modules” consisting of a mix of different products for panels, sawn hardwood and all energy substitutes, we integrated a variety of products and production technologies, thereby striving to ensure that the uncertainty of actual substitution is considered in the model to an adequate extent. By carrying out a second set of scenarios without the integration of substitution, it was verified that the displayed effects of cascading are not overly influenced by the substitution approach.

The optimization of ecological parameters, as done in our study, can indicate the direction in which a system should be developed. However, in reality, factors beyond those considered here are equally or even more influential for such a development. This holds especially true for economic factors not considered here. Additionally, decisions influencing wood utilization by private households, both for energy production and as a material, are probably only to a small part influenced by rational considerations regarding eco-friendliness and far more by practical considerations in regard to availability or personal preferences. Further research is needed in order to quantify the influence of economic and social factors on the effects of a cascading use of wood.

#### 4.2. Limitations of the model

Time is not considered in the model. Products and by-products of processes are assumed to be available for further utilization instantaneously. This is especially noticeable when comparing a cascading utilization of wood with a scenario not enabling cascading. With cascading, the materials are available at different points in time, whereas without, all materials would be available at the same time. The same holds true for assuming energy from waste wood incineration is equivalent to energy from incineration of primary wood, as is done in our model. However, when assuming a steady-state system over a longer time span, the model may nevertheless be an adequate description of reality, since waste wood and by-products of production processes would occur in the same quantities every year and could be used for the applications as assumed by the model.

How to integrate biogenic carbon and its associated implications for global warming potential in LCA is currently under discussion in the scientific community, and several approaches have been presented up to now (Cherubini et al., 2011; Levasseur et al., 2012). As no consensus regarding the preferred approach has been reached (Brandão et al., 2013; Helin et al., 2013; Pawelzic et al., 2013) and since our model has no consideration of time, the timing of carbon emissions and uptake including carbon storage in wood products has not been accounted for in this study.

#### 4.3. Results discussion

The results indicate that exploiting the possibility of a utilization of wood in cascades leads to a decrease of the overall environmental impacts of wood utilization when taking the whole system into account. Additional benefits of cascading as found for the indicator global warming potential in the single digit percentage range might seem low, but the reference for these relative

assessments has to be taken into account. Although cascading, as examined in our study, only influences a rather small part of the system, namely the production of particleboard, the additional benefits are referenced to the respective environmental impacts of the total system, which, with the exception of pulp and paper production, represent the annual wood utilization of the 12-million-inhabitant area of Bavaria. In this context, the fact that the “non-cascading” reference system already contains the possibility of a cascading utilization must be considered. Since the reference system represents the status quo of wood utilization, a basic cascade – namely the incineration with energy recovery of all primary wood products at their end-of-life – is already integrated. Landfilling of waste wood is prohibited by German legislation. Consequently, already today, virtually all accruing waste wood is incinerated, either in specific facilities or together with other municipal waste. In countries where existing wood utilization structures include substantial shares of landfilling, which is the case in most countries throughout the world, implementing a cascading utilization would increase possible environmental benefits even further, since the then implemented incineration at the end-of-life of wood products creates less environmental impacts compared to landfilling if the resulting energy is utilized (Cherubini et al., 2009; Lippke et al., 2011). If the additional steps of a material application were added, the benefits detected in our study would occur additionally.

The relative benefits of cascading over equivalent primary wood products found in our study show a similar trend as findings of previous case studies (Gärtner et al., 2012; Höglmeier et al., 2014). Höglmeier et al. (2014) reported a 10% GWP reduction for the cascading system compared to equivalent products from primary wood. The same relative reduction was found in this study when substitution effects are not taken into account. However, since the system boundaries differ greatly (comprehensive wood utilization system vs. specific waste wood cascade), the values are not directly comparable. Gärtner et al. (2012) reported absolute values in person-years based on substitution effects achievable by cascading of a specific amount of wood. Hence, a direct comparison to this study is not possible.

The absolute potential reductions of environmental impacts by cascading can be referenced to the emissions occurring in the study area. The current greenhouse gas inventory for Germany (Federal Environmental Agency, 2013) reports a total annual average emission of 11.52 tons of CO<sub>2</sub> eq. per capita in the year 2010. The difference between the cascading and non-cascading scenarios when optimizing the indicator GWP therefore accounts for the annual per-capita emissions of over 50,000 persons if substitution credits are included and of still over 20,000 if only the environmental impacts of the wood utilization are accounted for. No data on the total greenhouse gas emissions of the study area is available. However, assuming the German per-capita value is correct for the state of Bavaria, the possible reduction (without credits) would account for 0.2% of the annual emissions. Considering that wood utilization is only a minor contributor to the overall greenhouse gas emissions, this can be seen as substantial. For the second considered environmental impact, the formation of particulate matter, the cascading scenario leads to reductions equivalent to the emissions of over 550,000 inhabitants based on German emission data (Federal Environmental Agency, 2014).

## 5. Conclusion

To conclude, we can answer our research questions as follows:

- (1) Despite the fact that cascading in our model only directly influenced the production of particleboard, since it enabled

the use of waste wood as a raw material, it impacted the whole wood utilization system. The amount of energy from waste wood decreased, since the material use of waste wood over several cascading steps considerably decreased the available waste wood at the end-of-life. Regarding the efficiency of resource use, in most scenarios cascading led to a substantial decrease in the amount of primary wood required to provide a defined product portfolio. The possible savings ranged from 3 to 14 % of the total primary wood supply. The characteristic that the cascading scenarios frequently displayed of having a higher share of primary wood utilized for energy generation might be seen as critical regarding attempts to increase the carbon storage in the wood products pool and increase resource efficiency. To increase the overall efficiency of wood utilization, the primary wood amounts additionally available by cascading should also be used in an efficient way, preferably also in cascades.

- (2) The overall environmental impacts of the wood utilization system in our model could be considerably decreased if cascading of waste wood was an option, both for the scenarios including effects of substitution as well as if only the environmental impacts of the manufacturing system were taken into account.
- (3) The efficiency of a cascading use of wood strongly depends on the magnitude of losses during each cascading step. If losses, especially because of ineffective recovery, are high, the consequently lost possibility of generating wood energy and its associated benefits outweighs the possible benefits created by preceding additional material applications of the wood by cascading. For cascading to be able to compete with a direct incineration of the waste wood for energy production, collection and processing yields of at least 70% are required in regard to the indicator PM and 92% respectively for GWP. This strongly indicates that an effective cascading wood utilization requires a minimization of losses over the cycles in order to conserve the wood amount as efficiently as possible during the cascade steps. This can be achieved both by improving the yield of waste wood collection and processing steps as well as by improving process efficiency in the wood industry by minimizing the amount of wood that is ultimately removed from the cycle.
- (4) The chosen approach of comparing the overall environmental impacts of different variations of the wood utilization system has proven to be a viable method to assess direct effects of the use of waste wood for products and of substitution. This has also been done in previous studies, albeit not on the level of entire systems. Additionally, indirect effects of cascading such as shifts of the use of wood assortments for specific products and substitution effects on the level of input materials could be incorporated by the presented study. The integration of wood products demand as a constraint contributed to the goal of completing a comprehensive assessment on the system level rather than looking at single utilization options.

## Acknowledgements

Karin Höglmeier, Gabriele Weber-Blaschke and Klaus Richter gratefully acknowledge funding of the project X38 by the Bavarian State Ministry for Food, Agriculture and Forestry. Bernhard Steubing was funded within the National Research Programme «Resource Wood» (NRP 66, [www.nfp66.ch](http://www.nfp66.ch)) by the Swiss National Science Foundation (project no. 136612). The authors thank Dr. John Guess, Gillian Ptazcek and Justin Boucher for English language

editing and the reviewers for helpful comments on an earlier version of the paper.

## Appendix A. Supplementary data

Supplementary data related to this article can be found at <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2015.01.018>.

## References

- Bergman, R.D., Oneil, E., Eastin, I.L., Han, H.-S., 2014. Life cycle impacts of manufacturing redwood decking in northern California. *Wood Fiber Sci.* 46 (3), 322–339.
- BMU-German Federal Ministry for the Environment Nature Conservation and Nuclear Safety, 2012. Deutsches Ressourceneffizienzprogramm (ProgRes) (Berlin).
- Brandão, M., Levasseur, A., Kirschbaum, M.U.F., Weidema, B.P., Cowie, A.L., Jørgensen, S.V., Hauschild, M.Z., Pennington, D.W., Chomkhamkri, K., 2013. Key issues and options in accounting for carbon sequestration and temporary storage in life cycle assessment and carbon footprinting. *Int. J. LCA* 18, 230–240.
- Cherubini, F., Bargigli, S., Ulgiati, S., 2009. Life cycle assessment (LCA) of waste management strategies: landfilling, sorting plant and incineration. *Energy* 34, 2116–2123.
- Cherubini, F., Peters, G.P., Berntsen, T., Strømman, A.H., Hertwich, E., 2011. CO<sub>2</sub> emissions from biomass combustion for bioenergy: atmospheric decay and contribution to global warming potential. *GCB Bioenergy* 3, 413–426.
- Čucek, L., Varbanov, P.S., Klemes, J.J., Kravanja, Z., 2012. Total footprints-based multi-criteria optimisation of regional biomass energy supply chains. *Energy Build.* 44, 135–145.
- Diederichs, S.K., 2014. 2010 Status quo for life cycle inventory and environmental impact assessment of wood-based panels products in Germany. *Wood Fiber Sci.* 46 (3), 340–355.
- European Commission, 2011. A Resource-efficient Europe. Flagship Initiative under the Europe 2020 Strategy (Brussels).
- Federal Environmental Agency, 2013. Submission under the United Nations Framework Convention on Climate Change and the Kyoto Protocol 2013. National Inventory Report for the German Greenhouse Gas Inventory 1990–2011. Climate Change 09/2013, Dessau, Germany.
- Federal Environmental Agency, 2014. Emissionen ausgewählter Luftschadstoffe nach Quellkategorien. Internet: [http://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/384/bilder/dateien/3\\_tab\\_emi-ausgew-luftschadst-2014-07-03.pdf](http://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/384/bilder/dateien/3_tab_emi-ausgew-luftschadst-2014-07-03.pdf) (Retrieved: 19.11.2014).
- Fraanje, P.J., 1997. Cascading of pine wood. *ResConRec* 19, 21–28.
- Friedrich, S., Schumann, C., Zormaier, F., Schulmeyer, F., Dietz, E., Burger, F., Hammerl, R., Borchert, H., Egner, J.-P., 2012. Energieholzmarktbericht 2010. In: *LWF Wissen* 70.
- Frischknecht, R., Jungbluth, N., 2007. Overview and Methodology. ecoinvent report No. 1. Swiss Center for Life Cycle Inventories, Dübendorf.
- GAMS Development Corporation, 2013. The General Algebraic Modeling System. GAMS Development Corporation, Washington DC. Online: [www.gams.com](http://www.gams.com).
- Gärtner, S.O., Hienz, G., Keller, H., Paulsch, D., 2012. Ökobilanz der kaskadierten Nutzung nachwachsender Rohstoffe am Beispiel Holz – eine Einordnung. *uwf* 20, pp. 155–164.
- German Government, 2003. Verordnung über Anforderungen an die Verwertung und Beseitigung von Altholz: Altholzverordnung – AltholzV (Waste Wood Ordinance).
- Goedkoop, M.J., Heijungs, R., Huijbregts, M., De Schryver, A., van Struijs, J., Zelm, R., 2013. ReCiPe 2008: a Life Cycle Impact Assessment Method Which Comprises Harmonised Category Indicators at the Midpoint and the Endpoint Level, First ed. (revised) (Report I: Characterisation).
- Gonzalez-Garcia, S., Feijoo, G., Widsten, P., Kandelbauer, A., Zikulnig-Rusch, E., Moreira, M.T., 2009. Environmental performance assessment of hardboard manufacture. *Int. J. LCA* 14, 456–466.
- Härtl, F., Hahn, A., Knoke, T., 2013. Risk-sensitive planning support for forest enterprises: the YAFO model. *Comput. Electron. Agric.* 94, 58–70.
- Härtl, F., Knoke, T., 2014. The influence of the oil price on timber supply. *For. Policy Econ.* 39, 32–42.
- Helin, T., Sokka, L., Soimakallio, S., Pingoud, K., Pajula, T., 2013. Approaches for inclusion of forest carbon cycle in life cycle assessment - a review. *GCB Bioenergy* 5, 475–486.
- Höglmeier, K., Weber-Blaschke, G., Richter, K., 2013. Potentials for cascading of recovered wood from building deconstruction—A case study for south-east Germany. *Resour. Conservation Recycl.* 78, 81–91.
- Höglmeier, K., Weber-Blaschke, G., Richter, K., 2014. Utilization of recovered wood in cascades versus utilization of primary wood – a comparison with life cycle assessment using system expansion. *Int. J. LCA* 19 (10), 1755–1766.
- ISO 14040, 2006. Environmental Management - Life Cycle Assessment - Principles and Framework. International Standardization Organization, Geneva, Switzerland. Vol. ISO 14040:2006(E).
- Klein, D., Wolf, C., Weber-Blaschke, G., Richter, K., 2015. 20 years of Life Cycle Assessment (LCA) in the Forestry Sector: State of the Art and a Methodical Proposal for the LCA of Forest Production. *Int. J. LCA*. (accepted for publication).
- Lang, A., 2004. Charakterisierung des Altholzaufkommens in Deutschland. Rechtliche Rahmenbedingungen, Mengenpotenzial, Materialkennwerte. In: *Mitteilungen der Bundesforschungsanstalt für Forst- und Holzwirtschaft* 215 (Hamburg).
- Levasseur, A., Brandão, M., Lesage, P., Margni, M., Pennington, D., Clift, R., Samson, R., 2012. Valuing temporary carbon storage. *Nat. Clim. Change* 2, 6–8.
- Lippke, B., Oneil, E., Harrison, R., Skog, K., Gustavsson, L., Sathre, R., 2011. Life cycle impacts of forest management and wood utilization on carbon mitigation: knowns and unknowns. *Carbon Manag.* 2, 303–333.
- Mantau, U., Bilitewski, B., 2010. Stoffstrom-Modell- Holz 2007. Rohstoffströme und CO<sub>2</sub>-Speicherung in der Holzverwendung. Forschungsbericht für das Kuratorium für Forschung und Technik des Verbandes der Deutschen Papierfabriken e.V. (VDP), Celle.
- Mantau, U., Saal, U., Prins, K., Steierer, F., Lindner, M., 2010. EUwood - Real Potential for Changes in Growth and Use of EU Forests. Final report, (Hamburg/Germany).
- Mantau, U., 2012. Entwicklungen und Szenarien des Holzaufkommens und der Holzverwendung 1987 bis 2015. Holzrohstoffbilanz Deutschland, Hamburg.
- Pawelzik, P., Carus, M., Hotchkiss, J., Narayan, R., Selke, S., Wellisch, M., Weiss, M., Wicke, B., Patel, M., 2013. Critical aspects in the life cycle assessment (LCA) of bio-based materials – Reviewing methodologies and deriving recommendations. *ResConRec* 73, 211–228.
- Peche, R., Ballon, A., Kreibe, S., 2011. Ökoeffiziente Papierprodukte: Chancen und Risiken für Umwelt und Kosten. bifa Umweltinstitut, Augsburg bifa-Text Nr. 53.
- Pieragostini, C., Mussati, M.C., Aguirre, P., 2011. On process optimization considering LCA methodology. *JEnvMan* 96, 43–54.
- Rüter, S., Diederichs, S., 2012. Ökobilanz-Basisdaten für Bauprodukte aus Holz. Arbeitsbericht aus dem Institut für Holztechnologie und Holzbiologie 2012/1. Hamburg.
- Sandin, G., Peters, G.M., Svanström, M., 2014. Life cycle assessment of construction materials: the influence of assumptions in end-of-life modelling. *Int. J. LCA* 19, 723–731. <http://dx.doi.org/10.1007/s11367-013-0686-x>.
- Saner, D., Vadenbo, C., Steubing, B., Hellweg, S., 2014. Regionalized LCA-based optimization of building energy supply: method and case study for a Swiss municipality. *Environ. Sci. Technol.* 48, 7651–7659.
- Sathre, R., Gustavsson, L., 2006. Energy and carbon balances of wood cascade chains. *ResConRec* 47, 332–355.
- Sathre, R., O'Connor, J., 2010. Meta-analysis of greenhouse gas displacement factors of wood product substitution. *Environ. Sci. Policy* 13 (2), 104–114. <http://dx.doi.org/10.1016/j.envsci.2009.12.005>.
- Sikkema, R., Junginger, M., McFarlane, P., Faaij, A., 2013. The GHG contribution of the cascaded use of harvested wood products in comparison with the use of wood for energy - a case study on available forest resources in Canada. *Environ. Sci. Policy* 31, 96–108.
- Sirkin, T., ten Houten, M., 1994. The Cascade chain. A theory and tool for achieving resource sustainability with application for product design. *ResConRec* 10, 213–277.
- Steubing, B., Zah, R., Ludwig, C., 2012. Heat, electricity, or transportation? the optimal use of residual and waste biomass in Europe from an environmental perspective. *Environ. Sci. Policy* 164–171.
- Werner, F., Taverna, R., Hofer, P., Richter, K., 2005. Carbon pool and substitution effects of an increased use of wood in buildings in Switzerland: first estimates. *Ann For Sci* 62, 889–902.
- Werner, F., Richter, K., 2007. Wooden building products in comparative LCA. A literature review. *Int. J. LCA* 12, 470–479.
- Wilson, J.B., 2010. Life-cycle inventory of particleboard in terms of resources, emissions, energy and carbon. *Wood Fiber Sci.* 42 (Suppl. 1), 90–106.
- Wolf C., Klein D., Weber-Blaschke G., Richter K., (submitted for publication). Systematic Review and Meta-Analysis of Life Cycle Assessments for Wood Energy Services. *Journal of Industrial Ecology*.
- You, F., Tao, L., Graziano, D.J., Snyder, S.W., 2012. Optimal design of sustainable cellulosic biofuel supply chains: multiobjective optimization coupled with life cycle assessment and input-output analysis. *AIChE J.* 58, 1157–1180.

# **LCA-based optimization of wood utilization under special consideration of a cascading use of wood**

---

## **Supporting Information**

**Höglmeier, Karin <sup>a,\*</sup>; Steubing, Bernhard <sup>b</sup>; Weber-Blaschke, Gabriele <sup>a</sup>;  
Richter, Klaus <sup>a</sup>**

<sup>a</sup> Chair of Wood Science, Center for Life Sciences Weihenstephan, Technische Universität München, Winzererstr. 45, 80797 Munich, Germany

<sup>b</sup> Group for Ecological Systems Design, Institute of Environmental Engineering, ETH Zurich, John-von-Neumann-Weg 9, 8093 Zurich, Switzerland (steubing@ifu.baug.ethz.ch)

\* corresponding author: hoeglmeier@hfm.tum.de; Tel. +49 8161 71 4160; Fax +49 8161 71 2482

## Content

1	Primary data of waste wood processing .....	3
2	Adaptations to database processes and life cycle inventories (LCI) from literature .....	4
2.1	Particleboards from 100 % waste wood and 100 % primary wood.....	4
2.2	Oriented Strand Board (OSB) from 100 % waste wood.....	5
2.3	Incineration of waste wood in a combined heat and power plant (CHP) .....	5
3	Overview of utilized LCA data .....	6
4	Substitution products .....	7
5	References .....	8

## Tables

Table S1: LCI of waste wood processing (sorting and crushing with electricity driven crusher). Based on industry data from a south-east German waste wood facility (~ 50,000 tons per year).

Table S2: LCI of waste wood processing (sorting and crushing with diesel power crusher). Based on industry data from two south-east German waste wood facilities (~ 17,000 tons/year and ~ 10,000 tons/year).

Table S3: Adaptations to standard LCI of particleboard (Rüter & Diederichs 2012) to accommodate the replacement of round wood and industrial residues by waste wood.

Table S4: Adaptations to standard LCI of particleboard (Rüter & Diederichs 2012) to accommodate the replacement waste wood by primary wood assortments.

Table S5: Adaptations to standard LCI of OSB (Rüter & Diederichs 2012), based on an experimental OSB production from waste wood by Loth & Hanheide (2004).

Table S6: Adaptations to the LCA process of incineration of waste wood in a CHP-plant, based on literature survey of Rüter & Diederichs (2012, p.88). Values refer to the provision of 1 MJ heat and 0.103 MJ power.

Table S7: Overview of utilized datasets from the database ecoinvent 2.2. and own calculation (CH: Switzerland; DE: Germany; RER: Europe).

Table S8: Substitution products and respective amounts utilized in the model.



## 1 Primary data of waste wood processing

The waste wood management was modeled based on primary data provided by three south-east German waste wood processing facilities. The information provided by two similar operating recyclers were merged into one LCI (Table S2). Transportation of the waste wood from the collection site to the facility is considered separately. 100 km were assumed.

**Table S1: LCI of waste wood processing (sorting and crushing with electricity driven crusher). Based on industry data from a south-east German waste wood facility (~ 50,000 tons per year).**

<b>Input</b>		
Waste wood (22% water content)	1000	kg
Electricity, German consumption mix	19.08	MJ (lower heating value)
Fuel, in wheel loader	13.5	MJ (lower heating value)
Crusher, electric [Provision]	5.30E-08	pieces
Lubricating oil	0.0076	kg
Tap water	21	kg
Saw mill [Provision of building]	1.47E-09	pieces
<b>Output</b>		
Waste wood chips (18% water content)	990	kg
Residue, waste wood (18% water content)	10	kg
Dust (unspecified)	0,0063	kg

**Table S2: LCI of waste wood processing (sorting and crushing with diesel power crusher). Based on industry data from two south-east German waste wood facilities (~ 17,000 tons/year and ~ 10,000 tons/year).**

<b>Input</b>		
Waste wood (22% water content)	1000	kg
Fuel, in crusher	44.8	MJ (lower heating value)
Fuel, in excavator	18.7	MJ (lower heating value)
Vulcanized rubber	7.86E-02	kg
Mobile Crusher, diesel powered [Provision]	1.32E-05	pieces
Lubricating oil	0.012	kg
Tap water	16.3	kg
Steel, low-alloy (Provision of building)	8,58E-02	kg
<b>Output</b>		
Waste wood chips (18% water content)	983	kg
Residue, waste wood (18% water content)	17	kg
Dust (unspecified)	0,0063	kg

## 2 Adaptations to database processes and life cycle inventories (LCI) from literature

### 2.1 Particleboards from 100 % waste wood and 100 % primary wood

The basis was the LCI representing average German technology published by Rüter & Diederichs (2012) and Diederichs (2014). It assumes a contribution of waste wood chips to the total dry mass of wood input of 20 %. The remaining wood is made up of residual wood from the wood processing industry (65 %) and industrial round wood from forests (15 %).

The adaptations conducted to represent the use of 100 % waste wood are displayed in detail in Table S3.

**Table S3: Adaptations to standard LCI of particleboard (Rüter & Diederichs 2012) to accommodate the replacement of round wood and industrial residues by waste wood.**

Parameter adapted	Adaptation	Explanation
Electricity	75 % of original value	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Industry information: 33-40 % of total electricity for chipping of primary wood</li> <li>- Waste wood enters production process already in chipped form, yet some grading is necessary</li> </ul>
Process heat	79 % of original value	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Industry information: 70% of the total process energy is used for drying of wood.</li> <li>- Based on the average water content of the original wood input (31 %), this share was reduced to reflect the water content of waste wood of 22 %.</li> </ul>
Wood amount (dry matter)	107 % of original value	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Industry information: waste wood as a input material for particleboard increases the wood material losses by 5 to 7 %</li> </ul>

Table S6 contains the alterations to accommodate the use of only primary wood assortments in particleboard production (35 % industrial round wood, 65 % industrial residual wood).

**Table S4: Adaptations to standard LCI of particleboard (Rüter & Diederichs 2012) to accommodate the replacement waste wood by primary wood assortments.**

Parameter adapted	Adaptation	Explanation
Electricity	117 % of original value	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Industry information: 33-40 % of total electricity for chipping of primary wood</li> <li>- Round wood has to be chipped, contrary to the displaced waste wood which is chipped separately before entering the production process</li> </ul>
Process heat	116 % of original value	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Industry information: 70% of the total process energy is used for drying of wood.</li> <li>- Based on the average water content of the original wood input (31 %), this share was increased to reflect the higher water content of 39 %.</li> </ul>

## 2.2 Oriented Strand Board (OSB) from 100 % waste wood

The basis was the LCI representing average German technology published by Rüter & Diederichs (2012) and Diederichs (2014). Industrial round wood is utilized for production of the strands. Currently, waste wood is not used for OSB production in Germany. However, Loth & Hanheide (2004) proposed and tested OSB production from waste wood in two-step process, where waste wood large chips are stranded to provide suitable input material. The adaptations to the standard LCI, as summarized in Table S5, are derived from this report.

**Table S5: Adaptations to standard LCI of OSB (Rüter & Diederichs 2012), based on an experimental OSB production from waste wood by Loth & Hanheide (2004).**

Parameter adapted	Adaptation	Explanation
Electricity	+ 31 MJ/ m <sup>3</sup> OSB	- Assumption: consumption of stranding step is the same for waste wood and primary wood - Additional consumption of the required chipping of waste wood in comparison to the crushing which is already accounted for in the standard waste wood processing module
Process heat	59 % of original value	- Calculation identical to particleboard production - Assumed water content of industrial round wood was 58 % and 22 % for waste wood
Fuel, in wheel loader	115 % of original value	- Estimation - Accounts for increased on-site transportation when using waste wood chips instead of logs
Wood amount (dry matter)	125 % of original value	- Excess which is too small for strand production - Used partly for internal energy provision

## 2.3 Incineration of waste wood in a combined heat and power plant (CHP)

Incineration of waste wood was modeled based on a CHP-process from ecoinvent v3 database which describes the incineration of primary wood chips:

*DE: heat and power co-generation, wood chips, 6400kW thermal, with extensive emission control*

To accommodate specifics of waste wood as an incineration material, some emissions were adapted as depicted in Table S6. Due to the lack of reliable data, other emissions were not adapted.

**Table S6: Adaptations to the LCA process of incineration of waste wood in a CHP-plant, based on literature survey of Rüter & Diederichs (2012, p.88). Values refer to the provision of 1 MJ heat and 0.103 MJ power.**

Parameter	Original value	Adapted value	Explanation
Methane (biogenic)	5.66E-07 kg	1.42E-05 kg	--
CO <sub>2</sub> (fossil)	--	0.00149 kg	from coatings and adhesives in the waste wood
Ash (to disposal)	0.000690 kg	0.00426 kg	6-12 % of dry matter content, depending on the waste wood quality

### 3 Overview of utilized LCA data

Basis for the LCA models was the database ecoinvent 2.2 (Frischknecht & Jungbluth 2007), integrated in the software GaBi 6 (PE International, Baitz et al. 2012). Table S7 specifies the datasets used to model the products of the material-flow model and states if other sources were utilized.

**Table S7: Overview of utilized datasets from the database ecoinvent 2.2. and own calculation (CH: Switzerland; DE: Germany; RER: Europe).**

Product	Dataset	Location
<b>Primary wood provision</b>		
Roundwood (softwood)	round wood, softwood, debarked, u=70% at forest road	RER
	round wood, softwood, under bark, u=70% at forest road	RER
Industrial round wood (softwood)	industrial wood, softwood, under bark, u=140%, at forest road	RER
Energy wood (softwood)	residual wood, softwood, under bark, u=140%, at forest road	RER
Roundwood (hardwood)	round wood, hardwood, under bark, u=70%, at forest road	RER
Industrial round wood (hardwood)	industrial wood, hardwood, under bark, u=80%, at forest road	RER
Energy wood (hardwood)	residual wood, hardwood, under bark, u=80%, at forest road	RER
Wood chips production	wood chopping, mobile chopper, in forest	RER
Split logs production	logs, mixed, at forest	RER
<b>Wood products</b>		
Glue laminated timber	glued laminated timber, indoor use, at plant	RER
Particleboard, 100% primary wood	Own model based on Rüter & Diederichs (2012), cp. Table S4	DE
Particleboard, German average wood input	LCI from Rüter & Diederichs (2012)	DE
Particleboard, 100 % waste wood	Own model based on Rüter & Diederichs (2012), cp. Table S3	DE
Oriented strand board, 100 % primary wood	LCI from Rüter & Diederichs (2012)	DE
Oriented strand board, 100 % waste wood	Own model based on Rüter & Diederichs (2012) with adaptations based on Loth & Hanheide (2004), cp. Table S5	DE
Boards and planks from hardwood	sawn timber, hardwood, planed, air / kiln dried, u=10%, at plant	RER
<b>Wood energy</b>		
Domestic heat, wood pellets	heat, wood pellets, at furnace 15kW	CH
Domestic heat, split logs	heat, softwood logs, at wood heater 6kW	CH
	heat, softwood logs, burned in furnace 30kW	CH
Industrial heat, forest wood chips	heat, mixed chips from forest, at furnace 300kW	CH
	heat, mixed chips from forest, at furnace 50kW	CH
Industrial heat, industrial residual wood chips	heat, mixed chips from industry, at furnace 1000kW	CH
District heat, forest wood chips	heat, mixed chips from industry, at furnace 50kW	CH
	heat, at cogen 6400kWth, wood	CH
District heat, waste wood	heat, at cogen 6400kWth, wood (with adaptations, cp. Table S6)	CH
Electricity, forest wood chips	electricity, at cogen 6400kWth, wood, emission control	CH
Electricity, waste wood	electricity, at cogen 6400kWth, wood (with adaptations, cp. Table S6)	CH

**Continuation of table S7**

<b>Fossil/mineral products</b>		
Building steel	reinforcing steel, at plant	RER
Gypsum based panels	gypsum fibre board, at plant	CH
	gypsum plaster board, at plant	CH
Furniture	LCIA from Lioi M (2014) <sup>a</sup>	RER
Substitution mix "sawn hardwood" <sup>a</sup>	window frame, wood, U=1.5 W/m <sup>2</sup> K, at plant	RER
	window frame, wood-metal, U=1.6 W/m <sup>2</sup> K, at plant	RER
	window frame, plastic (PVC), U=1.6 W/m <sup>2</sup> K, at plant	RER
	window frame, aluminium, U=1.6 W/m <sup>2</sup> K, at plant	RER
	Parquet flooring, modeled according to LCI from Rüter & Diederichs (2012)	DE
	Ceramic tiles, own model based on literature	RER
<b>Conventional energy</b>		
Domestic heat	heat, light fuel oil, at boiler 10kW, non-modulating	CH
	heat, light fuel oil, at boiler 100kW, non-modulating	CH
	heat, natural gas, at boiler atmospheric low-NOx non-modulating <100kW	RER
Industrial heat	heat, natural gas, at industrial furnace low-NOx >100kW	RER
	heat, heavy fuel oil, at industrial furnace 1MW	RER
	heat, at hard coal industrial furnace 1-10MW	RER
District heat	heat, natural gas, at industrial furnace low-NOx >100kW	RER
Electricity	electricity mix, supply mix	DE
<b>Other</b>		
Transportation	transport, lorry >16t, fleet average	RER

<sup>a</sup> Deduction of substitution factors for LCA impact categories

## 4 Substitution products

The following table S8 contains an overview of the wood products of the model, their substitution products and the respective amounts. Basis for determining the substitution ability was an equal benefit of the products for common applications. The model partly provides semifinished wood products which often have to be further processed until a substitution for a conventional product takes place (boards from hardwood, wood panels). In these cases, specific substitution factors for each considered LCA impact category were derived from LCIA models of the finished products. The factors were then applied to the LCIA results of the semifinished products in order to assess substitution effects.

**Table S8: Substitution products and respective amounts utilized in the model.**

Wood product	Amount	Substitution product	Amount	Comments
Glue-laminated timber	1 m <sup>3</sup>	Building steel	369.5 kg	Amount based on equal load bearing capacity (Sandin et al. 2014; Helm 2013)
Wood window frame	1 pc	Aluminum window frame	1 pc	Derived substitution factor per LCA impact category applied to LCIA results of production of sawn hardwoods
		PVC window frame	1 pc	
Parquet flooring	1 m <sup>2</sup>	Ceramic tiles	1 m <sup>2</sup> (15.7 kg)	
Wood based panels	1 m <sup>3</sup>	Gypsum-fiberboard	1038 kg	Amounts based on average panel weights and thicknesses in building applications from Lioi (2014);
		Gypsum-plasterboard	933 kg	
Particleboard-based office furniture	1 pc	Glass-steel office furniture	1 pc	Derived substitution factor per LCA impact category applied to LCIA results of particleboard production
Wood energy	1 MJ	Conventional energy	1 MJ	See table S7 for specific applied technologies

## 5 References

- Baitz M, Makishi-Colodel C, Kupfer T, Pflieger J, Schuller O, Hassel F, Kokborg M, Fong L (2011) GaBi Database and Modelling Principles. PE International, Stuttgart
- Diederichs SK (2014) 2010 Status quo for life cycle inventory and environmental impact assessment of wood-based panels products in Germany. *Wood and Fiber Science* 46(3):340–355
- Frischknecht R, Jungbluth N (2007) Overview and Methodology. ecoinvent report No. 1. Swiss Center for Life Cycle Inventories, Dübendorf
- Helm S (2013) Vergleich eines landwirtschaftlichen Gebäudes in Holz- versus Stahlbauweise hinsichtlich Primärenergiebedarf und Treibhauspotenzial. Masterarbeit. Technische Universität München
- Lioi M (2014) Environmental life cycle assessment study about material substitution in office desks in Germany. Master-Thesis am Lehrstuhl für Holzwissenschaft. Technische Universität München, München
- Loth R, Hanheide M (2004) Entwicklung eines mehrstufigen Anlagenverfahrens zur Verarbeitung von Restholz zur Erzeugung von hochwertigen OSB-Spänen für die Herstellung von OSB-Platten. Abschlussbericht, Bielefeld
- Rüter S, Diederichs S (2012) Ökobilanz-Basisdaten für Bauprodukte aus Holz. Arbeitsbericht aus dem Institut für Holztechnologie und Holzbiologie, Hamburg
- Sandin G, Peters GM, Svanström M (2014) Life cycle assessment of construction materials: the influence of assumptions in end-of-life modelling. *Int J LCA* 19:723–731. doi: 10.1007/s11367-013-0686-x