

# Der »Carbon Footprint« von Wärme aus Holz

»ExpResBio« erstellt Ökobilanzen für die Bereitstellung von Rohholz und anschließender Wärmeerzeugung

Daniel Klein, Christian Wolf, André Tiemann, Gabriele Weber-Blaschke, Hubert Röder und Christoph Schulz

**Jeder Produktionsprozess hat bestimmte Auswirkungen auf die Umwelt. Mit Ökobilanzen können diese Umweltwirkungen quantifiziert werden. Dabei beschreibt der »Carbon Footprint« als eine mögliche Wirkungskategorie in Ökobilanzen die Treibhausgas-Emissionen, die beispielsweise bei der Herstellung, Nutzung oder Entsorgung von Produkten entstehen. Im Projekt »ExpResBio« werden sektorübergreifend für die Land-, Forst- und Holzwirtschaft Ökobilanzen für verschiedene Biomasse-Bereitstellungsketten erstellt. Ein Schwerpunkt liegt dabei auf dem Carbon Footprint für die Bereitstellung von Bioenergie.**

Die Ökobilanz ist mittlerweile ein gut etabliertes Werkzeug, um ökologische Auswirkungen von Unternehmen, Produkten oder Dienstleistungen aus den unterschiedlichsten Sektoren zu beschreiben und zu analysieren. Dabei ist eine Ökobilanz nicht auf den Carbon Footprint beschränkt, sondern kann je nach Zielsetzung zahlreiche andere Wirkungskategorien wie z. B. Feinstaub oder Versauerungspotenzial bis hin zu Lärm-belästigung beinhalten. Der Carbon Footprint beschreibt somit lediglich eine von zahlreichen möglichen Umweltwirkungen, die mittels einer Ökobilanz dargestellt werden können. Grundsätzliches zu Ökobilanzen sowie zum Verbundprojekt »ExpResBio« kann im LWF aktuell 103 nachgelesen werden (Klein und Schulz 2015).

In »ExpResBio« beschäftigt sich die Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft mit der Bereitstellung von Rohholz bis zur Waldstraße bzw. bis zum Werkstor oder Hoftor. Die weiteren Produktionsschritte für die Erzeugung von Wärme werden an der Holzforschung München bilanziert. Die Frage, was eine Minderung von Treibhausgas (THG)-

Emissionen (THG-Vermeidungskosten) durch den Einsatz von Holz als Brennstoff kostet, bearbeitet das Fachgebiet Betriebswirtschaft Nachwachsener Rohstoffe der Hochschule Weihenstephan-Triesdorf.

## Carbon Footprint – Begrifflichkeiten

Neben dem Begriff »Carbon Footprint« finden sich zahlreiche, Verwirrung stiftende Bezeichnungen wieder, die letztlich alle gleichermaßen die Auswirkungen auf den Klimawandel, ausgedrückt in CO<sub>2</sub>-Äquivalente, beschreiben: Klimawandel, Klimaänderung, THG-Emissionen und englische Bezeichnungen wie Carbon Footprint, Global Warming Potential oder Climate Change. Lediglich die Bezeichnung »CO<sub>2</sub>-Emissionen« kann irreführend sein und es ist darauf zu achten, ob tatsächlich nur die CO<sub>2</sub>-Emissionen berücksichtigt werden, oder ob (wie üblich) auch andere THG-Emissionen wie z. B. Lachgas oder Methan mit in die Berechnungen einfließen. In »ExpResBio« werden alle prozessbedingten THG-Emissionen berücksichtigt und im Folgenden als Carbon Footprint beschrieben. CO<sub>2</sub>-Freisetzungen aus biogenen Prozessen (Kohlenstoff, der im Holz gespeichert ist und als CO<sub>2</sub> wieder freigesetzt wird) bleiben jedoch unberücksichtigt.

## Der Carbon Footprint von Wärme aus Holz

Wärme aus Holz wird durch die Verbrennung von Scheitholz, Hackschnitzel oder Pellets erzeugt. Auf Basis der Anlagenverteilung zur Nutzung biogener Festbrennstoffe in Bayern (Joa et al. 2015) ist es möglich, einen mengengewichteten Gesamtwert (Menge an erzeugter Energie) für die Wärmebereitstellung aus Holz abzuschätzen (Holzwärmemix Bayern). Darauf aufbauend und in Kombination mit insgesamt acht modellierten Bereitstellungsketten für Wärme aus Holz kann der Carbon Footprint des Holzwärmemix Bayern berechnet werden. Innerhalb der betrachteten Verarbeitungsketten werden alle relevanten Prozessgruppen berücksichtigt (Abbildung 2), beginnend bei der Erzeugung und Bereitstellung von Rohholz [A], über die Transformation des Rohholzes zum Bioenergieträger [B] (z.B.



Foto: maho, fotolia.de

Abbildung 1: Wie groß ist der CO<sub>2</sub>-Fußabdruck, der mit dem Einsatz von Holz zur Wärmegegewinnung verbunden ist? Antworten darauf haben die Experten von ExpResBio.

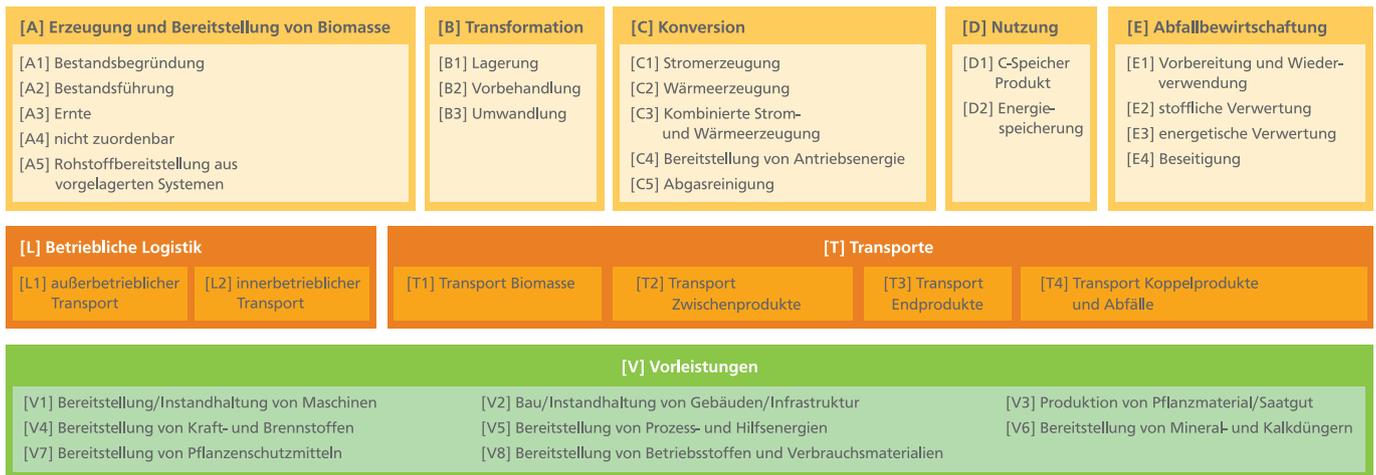


Abbildung 2: Das harmonisierte System aus »ExpResBio« zur Ökobilanzierung der Bereitstellung von Energie aus Biomasse

Hacken) bis hin zur Konversion des Bioenergieträgers in Wärmeenergie [C] inklusive aller Transport- [T] und Logistikprozesse [L] sowie aller vorgelagerten Prozesse [V], wie z. B. die Herstellung von Maschinen oder die Bereitstellung von Treibstoff. Die Nutzung [D] (in erster Linie Kohlenstoffspeicher von Holzprodukten) sowie Wiederverwertung und Beseitigung eventueller Reststoffe [E] (z.B. Asche) werden hier nicht dargestellt, da [D] bei Energieholz nicht relevant ist und sich [E] mengenmäßig nicht bedeutend auf die THG-Emissionen auswirkt. Alle Prozessgruppen beinhalten wiederum einzelne Unter-Prozessgruppen, die sich in mehrere Prozesse gliedern. Details zur Methodik können in Klein et al. (2016) und Wolf et al. (2015a) bzw. im »ExpResBio«-Methodenhandbuch, das 2016 erscheint, nachgelesen werden. Der Rohholzinput für die verschiedenen Biomasselinien basiert auf der bayerischen Holzeinschlagsstatistik aus 2013 und den Auswertungen zur Bundeswaldinventur 2012, so dass alle Energieholzsortimente gewichtet nach Erntemengen berechnet werden. Zudem wurden für die Prozessgruppen [A], [B], [C] und [T] folgende Annahmen für die Bilanzierung getroffen:

#### Prozessgruppe [A]: Erzeugung und Bereitstellung von Biomasse

Alle drei Sortimente (Stammholz für Pellets aus Sägereestholz, Industrieholz für Hackschnitzel und Scheitholz) werden separat nach Baumarten bilanziert. Die Bestandsbegründung erfolgt durch manuelle Pflanzung, bei Fichte durch Naturverjüngung. Außer bei Fichte wird eine Einzäunung angenommen. Zudem werden verschiedene Pflegemaßnahmen veranschlagt. Die Holzernte erfolgt mit Harvester in der Durchforstung und motormanuell in der Endnutzung, die Holzbringung mit Forwarder. Lediglich Scheitholz wird manuell vorgeliefert. Außerdem werden regelmäßige Wegepflege- und Instandsetzungsmaßnahmen durchgeführt.

#### Prozessgruppe [B]: Transformation

Für Pellets wird Industrierestholz (Sägenebenprodukte) als Rohholzinput angenommen, welches technisch getrocknet und pelletiert wird. Für das Scheitholz liegt die Annahme eines Selbstwerbers zugrunde, der mit Hilfe von Senkrechtspalter und Brennholzkreissäge den Bioenergieträger erzeugt. Das Scheitholz unterliegt zudem einer zweijährigen Lufttrocknung. Für die Bereitstellung von Hackschnitzeln aus Industrieholz wurde der Einsatz eines LKW-gestützten Hackers bilanziert.

#### Prozessgruppe [C]: Konversion

Für die Konversion des Holzes in Wärme kommen je nach Bioenergieträger unterschiedliche Technologien zum Einsatz. Die Nutzung von Hackschnitzeln erfolgt in Konversionsanlagen mit einer Leistung zwischen 50 kW und 300 kW sowie in einem Hackschnitzelheizwerk mit 1.000 kW. Pellets werden in Holzzentralheizungen im Leistungsbereich zwischen 15 kW und 50 kW verwendet. Für Scheitholz werden sowohl eine moderne Einzelraumfeuerstätte als auch ein traditioneller Kamin- und Kachelofen angenommen.

#### Prozessgruppe [T]: Transporte

Veranschlagt wird eine einfache Transportentfernung von 100 km für Rundholz und je 15 km für Scheitholz (Lieferung Scheitholzrollen zum Hof zur Weiterverarbeitung zu Scheitholzstücken, Lieferung des fertigen Scheitholzes zum Ort der Verbrennung). Zusätzlich treten Transportprozesse für den Transport der Pellets und Hackschnitzel auf (je 100 km einfach).

Auf Basis der oben beschriebenen Grundannahmen ergibt sich ein THG-Wertebereich von 8 bis 25 g CO<sub>2</sub>-Äq je Megajoule (MJ) Wärme mit den geringsten THG-Emissionen für moderne Scheitholzöfen und den höchsten für Pellets in 15 kW Anlagen (Abbildung 3). Die THG-Emissionen für den Holz-wärmemix in Bayern belaufen sich auf 11 g CO<sub>2</sub>-Äq je MJ. Dieser Wert liegt eher im unteren Bereich der Wertespanne und erklärt sich durch den hohen Anteil von Scheitholzöfen an der Wärmebereitstellung aus Holz in Bayern von 83 % (Joa et al. 2015). Die THG-Emissionen können im Einzelfall durchaus von den hier dargestellten Ergebnissen abweichen, beispielsweise

aufgrund veränderter Transportentfernungen, anderer Erntemethoden oder Trocknungsverfahren. Diese Wertespanne liefert somit nur einen Anhaltspunkt unter Annahmen, die für bayerische Verhältnisse als realistisch anzusehen sind.

Innerhalb der einzelnen Biomasselinien trägt die Bereitstellung von Rohholz bis zur Waldstraße etwa 15 % (Scheitholz) bis 36 % (Hackschnitzelheizkraftwerk) zu den gesamten THG-Emissionen bei. Prozessgruppe [A] ist bei letzterem sogar Hauptverursacher, da als Holzinput zum Hackschnitzelmix bei Heizkraftwerken etwa ein Viertel Pellets angenommen werden, die neben den THG-Emissionen aus der Bereitstellung von Rundholz auch THG-Emissionen aus dem Sägeprozess anteilig für die Herstellung von Sägenebenprodukten berücksichtigen. Beim Scheitholz verursachen Konversionsprozesse [C], d.h. die Verbrennung des Holzes, die höchsten THG-Emissionen, wobei es sich, wie oben bereits beschrieben, nicht um das freigesetzte biogene CO<sub>2</sub> handelt, sondern um die bei der Verbrennung entstehenden Treibhausgase Methan und Lachgas. Das bei der Verbrennung freigesetzte CO<sub>2</sub> muss nicht berücksichtigt werden, wenn durch die Holznutzung bedingte langfristige Verringerungen im Kohlenstoffspeicher auf der Fläche nicht anzunehmen sind, was in Bayern anhand der Auswertungen zur BWI 3 (Klemmt et al. 2015) nachgewiesen werden kann. Im Gegensatz zum Scheitholz sind bei Pellets Transformationsprozesse [B] (Herstellung der Pellets) die Hauptverursacher von THG-Emissionen.

Skaliert auf einen Erntefestmeter mit Rinde werden bei der Wärmebereitstellung zwischen 53 kg (moderner Scheitholzofen mit hoher Effizienz) und 145 kg CO<sub>2</sub>-Äq (15 kW Pelletheizung) verursacht. Hier zeigen sich nochmal die höheren THG-Emissionen der Pellets im Vergleich zu den anderen beiden Produkten. Der Grund dafür sind die hohen THG-

Emissionen bei der Rohholzbereitstellung sowie die vergleichsweise energieaufwendige Herstellung und die größeren Transportentfernungen.

### THG-Vermeidungseffekte durch Substitution konventioneller Energieträger

Die Ergebnisse zeigen, dass die Bereitstellung von Wärme aus Holz keineswegs CO<sub>2</sub>-neutral (bzw. klimaneutral) ist, da die für die Bereitstellung notwendigen Prozesse THG-Emissionen verursachen. Jedoch ist eine Bewertung dieser Umweltwirkung erst durch den Vergleich mit anderen Energieträgern zur Bereitstellung von Wärme aussagekräftig. Hier zeigt Wärme aus Holz einen unschlagbaren Carbon Footprint und die in »ExpResBio« erarbeiteten Daten liefern einen weiteren Beleg für die positive Klimawirkung von Wärme aus Holz. So liegen die THG-Emissionen der Wärmebereitstellung aus Heizöl mehr als 9-mal höher als bei Wärme aus Holz, bei Wärme aus Strom sogar 15-mal höher (Abbildung 4). Im Vergleich zu anderen erneuerbaren Wärmequellen (»sonstige Erneuerbare« in Abbildung 4: Mengengewichteter Mix aus Biogas, Geothermie etc.) ist die Differenz geringer, jedoch ist Wärme aus Holz mit 0,011 kg zu 0,028 kg CO<sub>2</sub>-Äq je MJ aufgrund oft aufwendigerer Technologien bei anderen erneuerbaren Energieträgern noch weitaus günstiger. Eine reine Wärmeversorgung aus heimischem Holz würde im Vergleich zum aktuellen Wärmemix in Bayern nur circa 13 % der aktuellen THG-Emissionen verursachen (Wolf et al. 2015b). Jedoch ist das ein theoretischer Wert und aufgrund der begrenzten Verfügbarkeit und vielfältigen Nachfrage von Holz natürlich nicht umsetzbar.

Ersetzt man Heizöl durch Holz, so können für jeden eingesetzten Erntefestmeter (Efm m.R.) etwa 550 kg CO<sub>2</sub>-Äq vermieden werden (Referenz: Holzwärmemix Bayern). Die Substitution von Erdgas bringt circa 410 kg CO<sub>2</sub>-Äq an THG-Einsparung. Die in »ExpResBio« erarbeiteten Daten lie-

THG-Emissionen verschiedener Bereitstellungsketten für Holzenergie

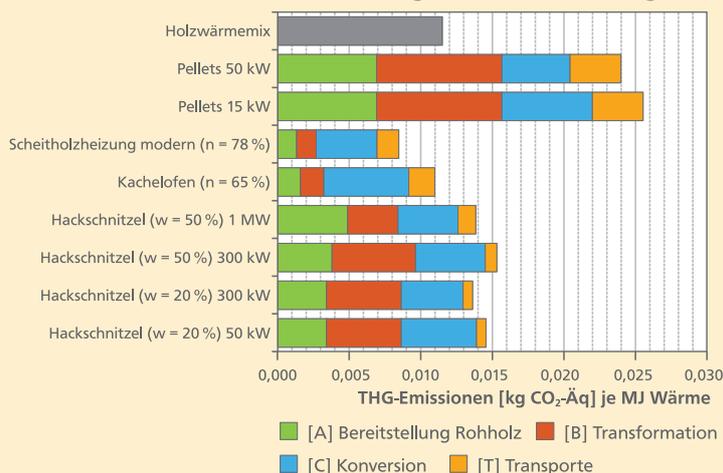


Abbildung 3: Die THG-Emissionen verschiedener Bereitstellungsketten für Wärme aus Holz; Äq = Äquivalente, n = Wirkungsgrad, w = Wassergehalt, kW = Kilowatt, MW = Megawatt, MJ = Megajoule. Transformation [B] = die Umwandlung von Rohholz zum Energieträger, Konversion [C] = die Umwandlung vom Energieträger zu Energie.

THG-Emissionen verschiedener Energieträger

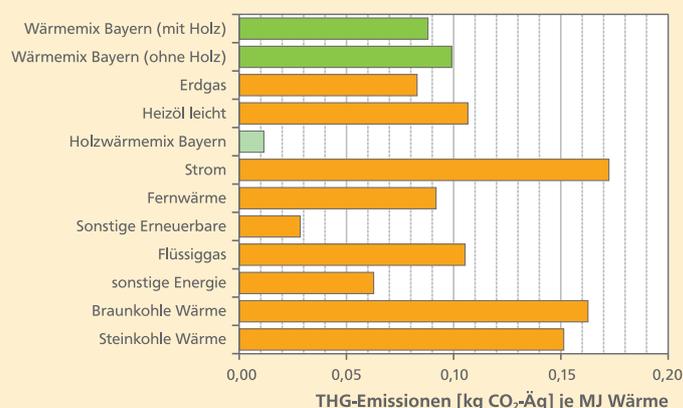


Abbildung 4: Vergleich der THG-Emissionen verschiedener Energiequellen zur Erzeugung von Wärme

fern somit bayernspezifische Zahlen für Substitutionseffekte der energetischen Holznutzung. Dadurch können bisher verwendete und zumeist sehr allgemeine Substitutionsfaktoren aus der Literatur mit bayernspezifischen Werten ersetzt werden, wodurch der Beitrag der Holzverwendung zum Klimaschutz präziser berechnet werden kann.

### THG-Vermeidungskosten

THG-Vermeidungskosten geben Aufschluss darüber, welche Kosten die Einsparung von Treibhausgasen verursacht, wenn mit Wärme aus Holz andere Energieträger substituiert werden. Dabei werden sämtliche Kosten der Bereitstellung von Wärme auf Vollkostenbasis berechnet. Es werden sowohl Einzelkosten (z.B. Betriebsstoffkosten) als auch Gemeinkosten (z.B. Verwaltungskosten) berücksichtigt. Erste Ergebnisse für Wärme aus Hackschnitzeln und Scheitholz (Fichte, Buche) zeigen einen Wertebereich im Leistungsspektrum 6–300 kW von –40 bis +305 € pro Tonne vermiedener Treibhausgase. Wärme aus Holz kann somit bezogen auf ein MJ erzeugter Energie in bestimmten Fällen durchaus eine kostengünstige (geringe positive Werte), in Einzelfällen sogar eine günstigere Alternative (negative Werte) zur Energieerzeugung aus fossilen Brennstoffen darstellen (Referenz: Heizöl, Erdgas).

Der breite Wertebereich verdeutlicht, dass bestimmte Voraussetzungen bei der Wärmebereitstellung durch Holz erfüllt werden müssen, um möglichst günstige Vermeidungskosten gegenüber der konventionellen Wärmeerzeugung zu gewährleisten. Negative Vermeidungskosten (= Kosteneinsparung) verursacht die Wärmebereitstellung mittels Fichtenhackschnitzeln in einer 50 kW Anlage bei Substitution von Heizöl. Entscheidend ist die Wechselwirkung zwischen absoluter Vermeidungsleistung je MJ und den Kosten der Brennstoffbereitstellung je MJ. Im günstigsten Fall liegt eine Kombination aus motormanueller Holzernte in der Endnutzung sowie einem hohen Mechanisierungsgrad (effektiver Forwarder und Harvester) in Durchforstung und Transformation (LWK-gestützter Hacker) vor. Schwach mechanisierte Produktionsverfahren verfügen zwar über hohe THG-Vermeidungsleistungen (Bringung mit Schlepper, motormanuelle Holzernte auch in der Durchforstung, Anhängelhacker an Schlepper), der im Vergleich zur stark mechanisierten Brennstoffproduktion erhöhte Zeitaufwand kann allerdings zu Gesamtkosten führen, die diesen positiven ökologischen Effekt ökonomisch aushebeln. Daher ist die Mechanisierung der Arbeitsvorgänge eine entscheidende Stellschraube, um bei gleichzeitig möglichst hohen THG-Vermeidungsleistungen, aber geringen Kosten geringe THG-Vermeidungskosten zu erreichen.

### Fazit und Ausblick

Wärme aus Holz ist nicht klimaneutral. Jedoch sind die THG-Emissionen im Vergleich zu anderen Energieträgern deutlich geringer, und jeder energetisch genutzte Festmeter Holz kann je nach Referenzprodukt zwischen 100 kg (sonstige Erneuer-

bare) und 920 kg (Wärme aus Strom) an THG-Emissionen einsparen und damit einen nennenswerten Beitrag zum Klimaschutz leisten. Jedoch ist die Verfügbarkeit von Holz in Bayern nicht unbegrenzt und die nachhaltig verfügbaren Holzmengen reichen bei weitem nicht aus, um ganz Bayern mit Holzenergie zu versorgen. So kann Wärme aus Holz lediglich eine von mehreren Maßnahmen sein, dem Klimawandel entgegenzuwirken. Weitere Untersuchungen sollen auch zeigen, welche bayernspezifischen THG-Einsparpotenziale die stoffliche Nutzung von Holz unter Anwendung der harmonisierten Methodik mit sich bringt. Die präzise Beschreibung dieser ökologischen und ökonomischen Bewertungsmethodik land- und forstwirtschaftlicher Produktsysteme wird in einem »ExpResBio«-Methodenhandbuch im Jahr 2016 veröffentlicht.

### Literatur

Joa, B.; Wolf, C.; Weber-Blaschke, G. (2015): Einzelöfen verursachen die höchsten Emissionen. Forschungsprojekt untersucht regionale Verteilung und Emissionen von Holzfeuerungsanlagen in Bayern. Holz-Zentralblatt, Nr. 30, 24. Juli 2015, S. 748–750

Klein, D.; Schulz, C. (2014): ExpResBio - Expertengruppe bilanziert CO<sub>2</sub>-Emissionen für verschiedene Biomasseprodukte. LWF aktuell 103, S 26–28

Klein, D.; Wolf, C.; Schulz, C.; Weber-Blaschke, G. (2016): Environmental impacts of various biomass supply chains for the provision of raw wood in Bavaria, Germany, with focus on climate change. Science of the Total Environment 539, S. 45–60

Klemmt, H. J.; Neubert, N.; Mößang, M.; Hopf, C. (2014): Nachhaltig und naturnah. Wald und Forstwirtschaft in Bayern. Ergebnisse der dritten Bundeswaldinventur. Eine Broschüre der Bayerischen Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft, 32 S.

Wolf, C.; Klein, D.; Richter, K.; Weber-Blaschke, G. (2015a): Systematic review and meta-analysis of life cycle assessments for wood energy services. Journal of Industrial Ecology. DOI: 10.1111/jiec.12321.

Wolf, C.; Klein, D.; Richter, K.; Weber-Blaschke, G. (2015b): Environmental Effects of Shifts in a Regional Heating Mix through an Increased Utilization of Solid Biofuels for Energetic Purposes - Case Study Bavaria. Eingereicht beim Journal of Environmental Management im August 2015

---

Dr. Daniel Klein und Christoph Schulz sind Mitarbeiter der Bayerischen Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft. Christoph Schulz leitet den Projektteil »Ökobilanzierung von Rohholz« in »ExpResBio«.

Christian Wolf ist Mitarbeiter und Prof. Dr. Gabriele Weber-Blaschke Leiterin des Forschungsbereiches Stoffstrommanagement an der Holzforschung München der TU München. Prof. Dr. Gabriele Weber-Blaschke leitet den Projektteil »Ökobilanzierung der Weiterverarbeitung von Holz«.

André Tiemann ist Mitarbeiter und Prof. Dr. Hubert Röder ist Leiter des Fachgebiets »Betriebswirtschaft Nachwachsender Rohstoffe« der Hochschule Weihenstephan-Triesdorf. Prof. Dr. Hubert Röder leitet den Projektteil »Ökonomische Bewertung der Forstwirtschaft«.

---

Korrespondierender Autor: [Daniel.Klein@lwf.bayern.de](mailto:Daniel.Klein@lwf.bayern.de)