

Zeitschrift: Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen = Swiss forestry journal = Journal forestier suisse

Herausgeber: Schweizerischer Forstverein

Band: 150 (1999)

Heft: 3

Artikel: Holzprodukte in vergleichenden Ökobilanzen

Autor: Werner, Frank / Künninger, Tina / Richter, Klaus

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-1098413>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 14.04.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Holzprodukte in vergleichenden Ökobilanzen¹

FRANK WERNER, TINA KÜNNIGER, KLAUS RICHTER

Keywords: Life Cycle Assessment; wood products; environmental impact. FDK 83 : UDK 504.064.2.003.3

Abstract: Life Cycle Assessment (LCA) quantifies the potential environmental impacts of a product system throughout its life cycle. LCA methods are discussed taking into account the exceptional position of forestry and wood products. The results of three studies are presented where wood products are being compared to alternative products.

Abstract: Mit Produktökobilanzen werden Kenndaten über Umweltbeeinflussungen von Produkten während ihres ganzen Lebenszyklus ermittelt. Es werden die Besonderheiten bei der Ökobilanzierung über die Forst- und Holzketten diskutiert und Holzprodukte alternativen Materialien gegenübergestellt.

1. Einführung

Umweltzeichen, Ökozertifikate und Deklarationen über ökologische Merkmale von Materialien und Produkten bekommen als Entscheidungsgrundlage bei öffentlichen Ausschreibungen und Planungen, aber auch im Hinblick auf das Konsumverhalten von bestimmten privaten Verbraucherguppen eine zunehmend wichtigere Rolle. Entwicklungen der letzten Jahre zeigen, dass einzelne Produkte des Holzgewerbes und der Holzindustrie in diesem Wettbewerb dann nicht vorteilhaft abschneiden, wenn bei der ökologischen Debatte seitens der Substitutionsbranchen einzelne Argumente herausgegriffen und ohne einen Bezug auf den Gesamtzusammenhang dargestellt werden. So haben z. B. Holzfenster Marktanteile gegenüber PVC-Fenstern verloren, weil die Unterhaltsintensität und deren Umweltwirkungen stark thematisiert wurden. Holzschwellen werden infolge der Umweltwirkungen der Holzschutzmittel durch Betonschwellen ersetzt, und im Fussbodenbereich erhalten PVC- oder Polypropylenböden den Zuschlag gegenüber Holzparkett mit der Begründung, die Ausgangsmaterialien seien recycelbar.

In diesen auf Einzelargumente abzielenden Vergleichen bleiben wichtige, vor allem ökologisch relevante Eigenschaften von Produkten aus der Wald- und Holzketten (CO₂-Neutralität, Regenerierbarkeit des Rohstoffes, vollständige Nutzung durch Kuppelprodukte, Doppelfunktion als Werkstoff und Energieträger usw.) unberücksichtigt. Diese können nur durch produktbezogene Ökobilanzen erfasst und dargestellt werden. Mit ihrer Hilfe können die Umweltwirkungen über den ganzen Lebensweg eines Produktes ermittelt, bewertet und auf vorhandenes ökologisches Optimierungspotential hin untersucht werden. In vergleichenden Ökobilanzen können dann funktionsgleiche Produkte aus verschiedenen Materialien und Herstellungsvarianten hinsichtlich ihrer ökologischen Relevanz in wissenschaftlich fundierter, vollständiger und transparenter Form einander gegenübergestellt werden.

2. Basisdaten, Erfassungsmethodik, Forschungsaktivitäten

In den letzten Jahren sind europaweit vermehrt Anstrengungen unternommen worden, eine breite forst- und holzspezifische Basis an Lebenszyklusdaten zu erstellen (FRÜHWALD, SOLBERG, 1995).

Aktuelle Dateninventare zur Rundholzbereitstellung wurden von SCHWEINLE (1996) für die Bundesrepublik Deutschland zusammengestellt. KÖCHLI (1996) hat entsprechende Module für Schweizer Buchenholzsportimente aufbereitet. Die Stoffflüsse bei der naturnahen und konventionellen Waldbewirtschaftung und deren Auswirkung auf die Materialintensitäten

von Schnittholz wurden u. a. vom Wuppertal-Institut berechnet (NICKEL, LIEDTKE, 1996.)

Die verschiedenen Sektoren der deutschen Holzwirtschaft werden seit einigen Jahren – modular aufgesplittet – von Mitarbeitern der Universitäten München und Hamburg untersucht (FRÜHWALD, WEGENER, 1996). Auch an der Abteilung Holz der EMPA Dübendorf werden seit Beginn der neunziger Jahre nach SETAC-Richtlinien (SETAC, 1993) bzw. ISO 14040ff-Richtlinien Dateninventare und Ökobilanzen zu Holz und Holzwerkstoffen sowie Holzprodukten erstellt und in der Datenbank 'EDIB' ('Environmental Data Inventory of Building Materials') unterhalten (RICHTER, SELL, 1992; RICHTER, 1995). Dem Bestreben um Datenaktualisierung und -austausch wird vermehrt Aufmerksamkeit geschenkt. Es sind zahlreiche Projektarbeiten bekannt, die sich mit Teilbereichen der Forst- und Holzwirtschaft beschäftigen und die eine verbesserte Datenbasis zur Folge haben werden.

Ein seit 1996 laufendes EU-Forschungsprojekt (ROBSON, ESSER, 1997) bemüht sich um eine länderübergreifende Abstimmung der Lebenszyklusdaten von Holzhalb- und Fertigprodukten. Ein wesentlicher Teilaspekt ist dabei, das methodische Vorgehen bei der Erfassung und Aufbereitung der Holzflussdaten zu harmonisieren. Die Aufbereitung der Holz-Stoffflüsse in Lebenszyklusstudien erfordert spezifische Festlegungen, begründet durch wechselnde Bezugseinheiten sowie die gegenseitigen Abhängigkeiten der Kenngrößen Materialfeuchte, Materialvolumen und Heizwert (ERLANDSSON, 1996). Weiter kommt der einheitlichen Anwendung von Allokationsregeln bei den zahlreichen Koppelprozessen in der Holzindustrie eine besondere Bedeutung zu, und auch eine Materialwiederverwertung ist bei Holzprodukten infolge der natürlichen Ressourcenregeneration anders zu werten als bei Materialien aus endlichen Ressourcen.

Zwei weitere und insbesondere für Ressourcen aus der Primärproduktionskette wichtige Aspekte sind die Erfassung der extensiven, aber flächenmässig bedeutenden Bodenbeanspruchung und deren sachgerechte Bewertung im Rahmen der Wirkungsabschätzung. Um hierzu aus den Kreisen der Forst- und Holzwirtschaft europaweit abgestimmte Lösungskonzepte zu erarbeiten, wurde im Herbst 1997 eine COST-Aktion gestartet, an der sich auch die Schweiz beteiligt (RICHTER, 1997).

3. Besondere Aspekte der biologischen Produktion

Der Werkstoff Holz nimmt in Ökobilanzen eine besondere Stellung ein. Im Gegensatz zu allen anderen wichtigen Werk-

¹ Nach einem Referat, gehalten am 2. Februar 1998 im Rahmen der Montagskolloquien der Abteilung für Forstwissenschaften der ETH Zürich.

stoffen ist Holz bei seiner Produktion ein integraler Bestandteil eines Ökosystems und unterliegt als Biomasse den Gesetzen des natürlichen Abbaus.

Alle Elemente, die im Holz vorkommen, sind der Ökosphäre beim Aufbau der Holzsubstanz entzogen und werden bei der natürlichen Verrottung oder Verbrennung des Holzes wieder freigesetzt. Massenmässig sind Kohlenstoff (50%), Sauerstoff (43%) und Wasserstoff (6%) die wichtigsten Elemente. Stickstoff liegt in Anteilen von 0,25 bis 0,5% vor; der Rest ist eine Vielzahl anorganischer Spurenelemente, die allerdings bisher bei der Sachbilanzierung nicht berücksichtigt werden.

Der gesamte im Holz eingebaute Kohlenstoff wird der Atmosphäre in Form von Kohlendioxid entzogen und bleibt im Holz gespeichert, bis er über natürliche Abbauvorgänge oder Verbrennung wieder freigesetzt wird. Pro Tonne trockenes Nadelholz sind dies rund 1850 kg CO₂. Holz ist somit in Lebenszyklusstudien als CO₂-neutraler Rohstoff zu behandeln. Üblicherweise wird daher bei der Bilanzierung von Holz als Rohstoff mit einem negativen CO₂-Input gerechnet, der am Ende des Lebenszyklusses als Emission wieder freigesetzt wird. Die Gesamtbilanz bleibt im heute üblichen Zeitrahmen der Bilanzierung ausgeglichen.

Bei der Berücksichtigung der energetischen Aspekte der Holzproduktion wird vereinfacht davon ausgegangen, dass der erreichbare Energie-Output, ausgedrückt durch den unteren Heizwert, dem eingesetzten Input an Sonnenenergie für die Holzherzeugung entspricht. Pro Tonne trockenes Nadelholz (atro) sind so rund 15 000 MJ (4200 kWh) zu bilanzieren.

Diese Stoff- und Energieflüsse der biologischen Produktion lassen sich in Ökobilanzen auf den Rohstoff Holz übertragen. Dagegen entziehen sich die infrastrukturellen und sozialen Leistungen der Forstwirtschaft bisher weitgehend einer Bilanzierung und Bewertung. Um hier Lösungsansätze zu erhalten, ist es nötig, die Wirkungen des Waldes von den Leistungen der Forstwirtschaft zu unterscheiden. BLUM *et al.* (1996) disku-

tieren, welche Funktionen ein Wald langfristig bei sofortiger Unterlassung weiterer Pflegemassnahmen erbringen kann. Sie weisen der Forstwirtschaft die folgenden – ökologischen – Leistungen zu: Sauerstoffproduktion, CO₂-Senke, Stickstofffixierung. Dagegen werden die anderen Umweltwirkungen des Waldes auch ohne eine geregelte Bewirtschaftung erbracht (Regelung des Wasserhaushalts, Verbesserung der Bodenqualität, Staub-, Lärmfilterung, Beeinflussung des Lokal-, Regional-, Globalklimas) und dürften – sofern quantifizierbar – der Forstwirtschaft bzw. der Holzproduktion nicht allein zugerechnet werden. Allerdings sind in diesem Modell die Aspekte der Produktions- und Wachstumsdynamik noch nicht ausreichend berücksichtigt. Ebenfalls methodisch noch nicht gelöst sind die Erfassung und Beurteilung der Naturraumbanspruchung sowie die Auswirkungen der Forstwirtschaft auf die Biodiversität.

An der Schnittstelle von der Forst- zur Holzwirtschaft trägt der Naturstoff Holz zusätzlich zu den beschriebenen Stoff- und Energieflüssen der biologischen Produktion alle Lasten der forstlichen Massnahmen, die gezielt zur Holzherzeugung eingesetzt werden (Bestandesgründung, Durchforstung, Wegebau, Ernte, Transporte). Die weitere Erfassung der Energie- und Stoffflüsse für Holzprodukte erfolgt, unter Beachtung der vorab genannten Besonderheiten, prinzipiell gleich wie bei anderen Werkstoffen.

4. Fallbeispiele von Produkt-Ökobilanzen mit Holz

Die im folgenden vorgestellten materialübergreifenden Produkt-Ökobilanzen wurden im Laufe der letzten drei Jahre an der EMPA Dübendorf erstellt und abgeschlossen. Die Studien wurden im Rahmen von Projektbegleitgruppen betreut, in denen Vertretern aller beteiligten Produktgruppen mitwirkten, und be-

Tabelle 1: Gegenüberstellung der betrachteten Zargentypen (Übersicht).

		Massivholzcharge 3teilig	Holzwerkstoffcharge 9teilig	Stahlcharge 1teilig
Vorstufen	Hauptwerkstoffe	3-Schicht-Massivholzplatte aus keilverzinkten Fichtenslamellen, Produktion Schweiz	Spanplatten, Produktion Deutschland	verzinktes Stahlblech (20% Recyclingstahl) kaltgewalzt aus Deutschland, Verarbeitung in der Schweiz
	Beschläge	Stahlbeschläge, EPDM-Dichtung	Stahlbeschläge, EPDM-Dichtung	Stahlbeschläge, EPDM-Dichtung
Fertigung	Betriebsform/ Ort	Mittelgrosse Schreinerei Ostschweiz z.T. automatisierte Fertigung handbeschickt Nutzung von 65% der aus Holzabfallverbrennung erzeugten thermischen Energie	Grosses Zargenwerk Süddeutschland weitgehend automatisierte Fertigung Nutzung von 75% der aus Holzabfallverbrennung erzeugten thermischen Energie	Grosses Stahlzargenwerk Nordschweiz Maschinen grösstenteils handbeschickt Abfälle zum Materialrecycling
	Oberflächenbehandlung	Alkydharzgrundierung und Decklack weiss im Werk gespritzt	Melamin-Formaldehyd Grundierfolie, im Werk aufgezogen, Alkydharz weiss, 2 Anstriche bauseits	Ausbesserung von angeschliffenen Stellen im Werk Alkydharz weiss, 2 Anstriche bauseits
	Verpackung	keine	Karton	keine
Montage		mit 8 Schrauben	punktwise mit PUR-Montageschaum	durch Hintergiessen mit Mörtel
Unterhalt		1x (nach 25 Jahren) wegen Dellen 2 Schichten Alkydharzlack weiss inkl. Zwischenschliff	keine Unterhaltsarbeiten	2 x (nach 20/40 Jahren) wegen Kratzern 2 Schichten Alkydharzlack weiss inkl. Zwischenschliff
Rückbau		thermische Verwertung	thermische Verwertung	Recycling
Funktionsdauer		50 Jahre	30 Jahre	60 Jahre

rücksichtigen weitestgehend die Vorgaben der prEN ISO 14040. Es liegen zu den Studien Abschlussberichte vor, die über Einzelheiten Auskunft geben. In allen Studien wurde die Wirkungsabschätzung der Sachbilanzen nach der erweiterten auswirkungsorientierten Klassifikation nach HEIJUNGS *et al.* (1992) vorgenommen; in der Schwellenstudie wurde die Human-toxizität nach dem von der Carbotech AG Basel (BUWAL 271, 1996) erarbeiteten Bewertungsansatz beurteilt, welcher die Verweil- und Abbaueiten der Emissionen berücksichtigt.

4.1 Tüorzargen

In dieser EMPA-Studie (WERNER *et al.*, 1997) wurden je eine Tüorzarge aus Massivholz, Holzwerkstoff (Spanplatte) und Stahl in einer Lebenszyklusanalyse auf ihre Umweltrelevanz untersucht. Dafür wurden sämtliche von den Zargen verursachten Stoff- und Energieflüsse von der Rohstoffgewinnung und Energiebereitstellung über die Herstellung der Zargen, deren Montage und Unterhalt bis hin zu deren Rückbau betrachtet.

4.1.1 Untersuchungsumfang

Untersucht wurden Zargen für den Innenausbau mit einer Türöffnung von 80 cm x 200 cm und einer Wanddicke von 16 cm ohne spezielle Anforderungen an die Schalldämmung und den Brandschutz. Die Lebenszyklen der drei Zargen sind material- und herstellerepezifisch modelliert (Tabelle 1). Wegen der materialbedingten unterschiedlichen Funktionsdauern der Zargen wurden deren Umwelteinwirkungen auf den Bilanzierungsrahmen von 60 Jahren (Funktionsdauer der Stahlzarge) hochgerechnet.

Für die Erhebung der Stoff- und Energieflüsse wurde der europäische UCPT-Strommix zugrunde gelegt. Holz als Rohstoff wurde über den Betrachtungsrahmen als CO₂-neutral angenommen. Umwelteinwirkungen ausgehend von Kuppelprodukten und Emissionen aus der Energiebereitstellung für Dritte – z. B. aus der Verfeuerung von Holzabfällen – wurden nicht mitbilanziert.

4.1.2 Ergebnisse

Abbildung 1 zeigt die Beiträge der drei Zargen zu sieben der elf berechneten Wirkungspotentiale. Aus Gründen der Übersichtlichkeit sind die Beiträge zu Wintersmog, Überdüngung, Aquatische Ökotoxizität und Humantoxizität nicht

ausgewiesen. Die Ergebnisse sind bezogen auf eine einheitliche Lebens-/Nutzungsdauer von 60 Jahren und normiert an den Wirkungen der Stahlzarge:

Die Umweltwirkungspotentiale der Stahlzarge sind, bis auf das Wirkungspotential Radioaktive Isotope, höher bis deutlich höher als diejenigen der Holzzargen. Trotz eines Anteils von 20% Recyclingstahl erweisen sich die Gewinnung des Stahls und dessen Verarbeitung zu verzinkten Blechen als relevanteste ökologische Einflussgrößen. Auch die Umweltwirkungen der Holzwerkstoffzarge liegen, bezogen auf 60 Jahre, ebenfalls bis auf das Wirkungspotential Radioaktive Isotope, etwas höher als diejenigen der Massivholzzarge. Die Emissionen aus der Abfallverbrennung bei der Spanplattenfertigung, der Strombedarf und die Beiträge aus der Produktion des Klebstoffes sowie die VOC-Emissionen der Oberflächenbehandlung wurden als die wichtigsten Verursachungsgrößen bestimmt. Die Fertigung der Massivholzplatte, die Zargenproduktion inkl. der Oberflächenbehandlung sowie die Renovationsanstriche bewirken bei der Massivholzzarge die umweltrelevanten Einflüsse. Die Stromverbräuche bei der Zargenfertigung führen zu den hohen Beiträgen beim Potential Radioaktive Isotope. Neben den produktionsspezifischen Belastungen verursachen die Transporte der Hauptmaterialien über den Lebenszyklus der Zargen jeweils 10% bis 20% ihrer Wirkungspotentiale.

Die erkannte ökologische Rangfolge der Zargen bestätigt sich, wenn der Verbrauch energetischer Ressourcen betrachtet wird (Abbildung 2). Über den Bilanzierungsrahmen von 60 Jahren verbraucht die Stahlzarge am meisten energetische Ressourcen, gefolgt von der Holzwerkstoffzarge und der Massivholzzarge. Bei den beiden Holzzargen wird rund ein Drittel des Energiebedarfs mit erneuerbaren Energieträgern gedeckt.

4.1.3 Folgerungen

Die detaillierten Wirkungsbilanzen und Dateninventare der drei Zargen zeigen ökologische Schwachstellen auf, aus denen Ansätze zu einem verbesserten ökologischen Produktedesign abgeleitet werden können. Zusammen mit dem vorgenommenen Lebenszyklusvergleich sind folgende Aussagen möglich:

- Für den Innenausbau ohne besondere Lärmschutz- oder Brandschutzanforderungen haben die beiden Zargen aus Holz im Vergleich zu derjenigen aus Stahl ökologische Vorteile.
- Die im Vergleich zu den Holzzargen lange mittlere Funktionsdauer der Stahlzarge kompensiert die Umweltwirkungen der Stahlgewinnung und -verarbeitung nur teilweise. Um ein den Holzzargen vergleichbares Ökopprofil zu erreichen, müsste die Funktionsdauer der Stahlzarge etwa 110 Jahre betragen.

Die im Vergleich zur Massivholzzarge höheren Umweltwirkungen der Holzwerkstoffzarge werden durch den grösseren Hilfsstoffeinsatz (Harze, Kleber u. a. m.) sowie durch die kürzere mittlere Funktionsdauer verursacht.

- Die Verwendung von Spanplatten erlaubt eine hohe Ressourceneffizienz beim Holz (Einsatz von Holzreststoffen bei der Spanplattenherstellung).

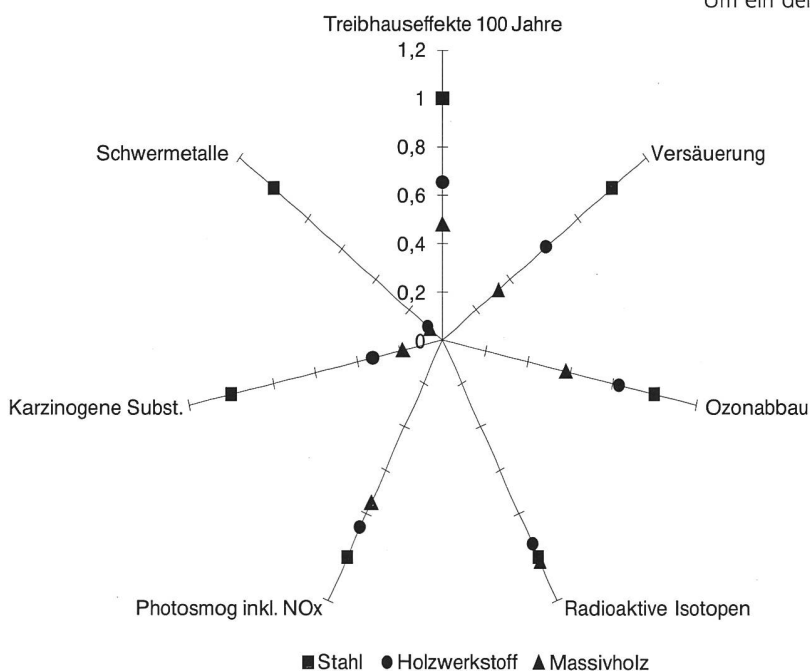


Abbildung 1: Standardisierte Umweltwirkungspotentiale der drei Zargen.

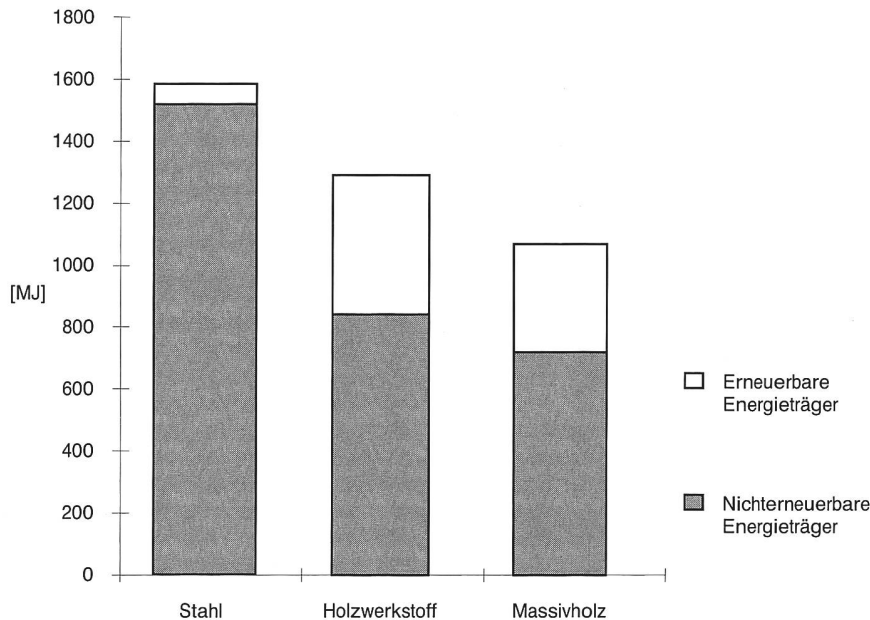


Abbildung 2: Verbrauch energetischer Ressourcen (über 60 Jahre).

- Bei einem ökologischen Produktdesign muss auf wasserbasierte Lacksysteme geachtet werden.
- Der Stromverbrauch der Holzzargen stellt durch die bei der Stromerzeugung entstehenden Umweltwirkungen eine relevante ökologische Grösse dar.

4.2 Freileitungsmasten

Über die Umweltwirkungen von imprägnierten Hölzern werden in einigen Ländern aufgrund der eingesetzten Holzschutzmittel intensive Diskussionen geführt. Um auch imprägnierte Holzteile in Ökobilanzen zu beurteilen, wurde eine Studie mit dem Bilanzobjekt Leitungsmast durchgeführt (KÜNNIGER, RICHTER, 1995). Es sollte geprüft werden, wie dieser Masttyp in einer Lebenszyklusanalyse gegenüber den alternativen Tragwerken aus Stahl und Beton einzuordnen ist.

4.2.1 Randbedingungen

Die zugrundegelegte Ausführung und Bemessung der Masten und Strecken beruht auf realistischen Angaben. Da Einzel-

tragwerke hinsichtlich der funktionellen Vergleichbarkeit nicht als bestgeeignet angesehen wurden (unterschiedliche Tragfähigkeiten und Spitzenzüge und damit unterschiedliche Mastzahl pro Streckenlänge), wurden als Basis der Gegenüberstellungen ganze Streckennetze zweier Spannungsebenen (0,4- und 20-kV-Nieder- und Mittelspannungsleitung) aus salzprägniertem Rundholz, armiertem Beton und korrosionsgeschütztem Rundstahl (100% Blasstahl) herangezogen. Die Einwirkungen der Bereitstellung der Elektrizität wurden anhand des europäischen Strommodells UCPTe berechnet. Allerdings sind auch Berechnungen nach dem Schweizer Strom-Mix erfolgt, der infolge des hohen Anteils an Energie aus Wasserkraftwerken ökologisch bedeutend günstiger ist. Jedoch ergaben sich aus dem gewählten Strommodell keine relativen Unterschiede zwischen den Materialvarianten, so dass hier nur die UCPTe-Daten vorgestellt werden.

Alle Berechnungen sind auf eine 60jährige Nutzungsdauer der Masten bezogen. Weil Holzmasten eine statistische Lebensdauer von ca. 30 Jahren aufweisen, ist bei allen Holztragwerken eine einmalige Auswechslung berücksichtigt.

Die Berücksichtigung der Verwertung basiert auf folgenden Annahmen:

- Holzmasten: 90% Verbrennung in einer Kehrichtverbrennungsanlage mit effizienter Rauchgasreinigung (Energie rückfluss gutgeschrieben; Asche und Filterstäube werden als Sondermüll bilanziert). 10% der Masten werden als Zaunmaterial usw. weiterverwendet und werden später biologisch abgebaut (die Anteile an Holzschutzmittel sind als Bodenbelastung bewertet).
- Betonmasten: 80% Weiterverwertung als Befestigungselemente im Tief-, Strassen-, Landschafts- oder Wasserbau (keine weiteren Umwelteinwirkungen berücksichtigt). 20% gehen in eine Inertstoffdeponie.

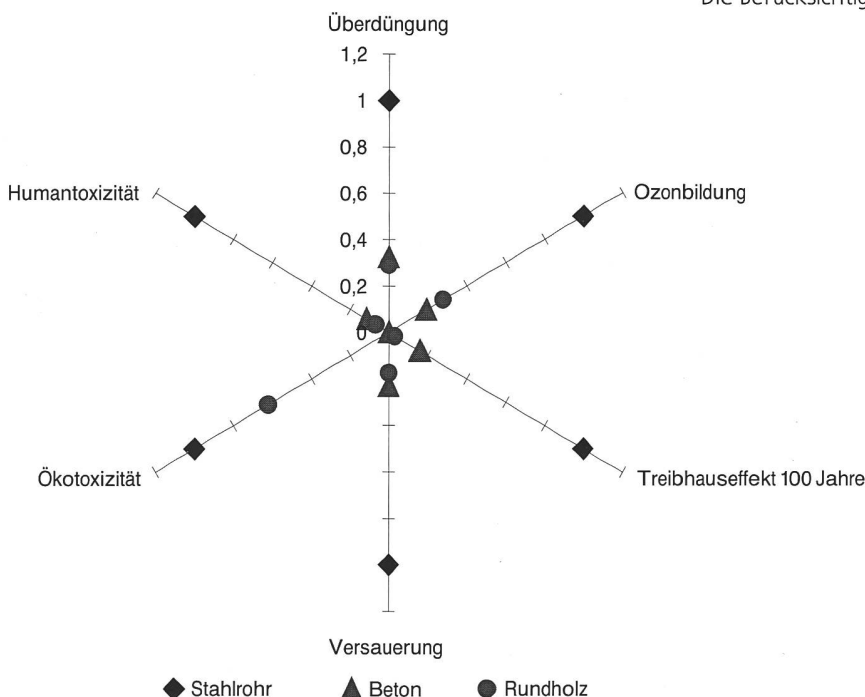


Abbildung 3: Wirkungspotentiale der 0,4-kV-Niederspannungsleitung (Leitungsstrecke 1 km).

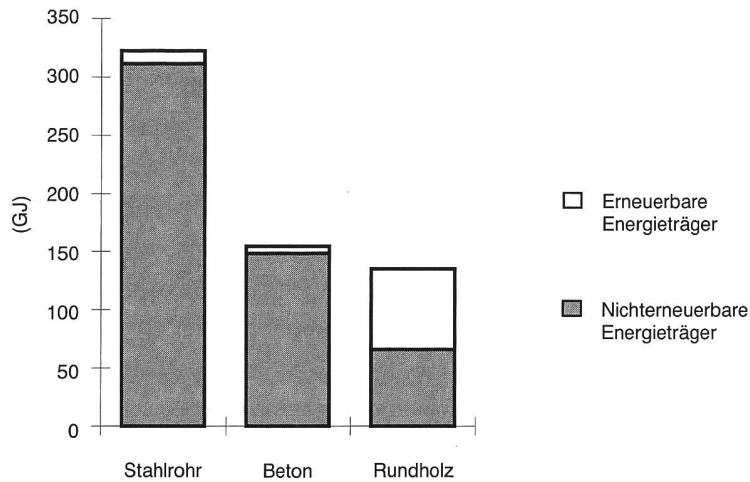


Abbildung 4: Verbrauch energetischer Ressourcen der 0,4-kV-Niederspannungsleitung (Leitungsstrecke 1 km).

- Rundstahlmasten: 100% Recycling (nur Transporte zum Altstoffhändler werden berücksichtigt).

4.2.2 Ergebnisse

Die Ergebnisse sind am Beispiel der 0,4-kV-Regelleitung dargestellt (Abbildungen 3, 4).

Bei der Gesamtbetrachtung aller untersuchten Umweltwirkungen sind deutliche Unterschiede auszumachen, obwohl kein Mastentyp über alle Kategorien eindeutige Vor- bzw. Nachteile aufweist. Die Stahlleitung bewirkt in den untersuchten Umweltpotentialen die höchsten Belastungen, hauptsächlich verursacht durch die Einwirkungen bei der Primärstahlproduktion und der Bereitstellung der Energieträger. Die Tragwerke aus Rundholz benötigen nur geringfügig weniger Gesamtenergie als die Betonmasten, jedoch basiert nur rund die Hälfte dieser Energie auf fossilen Energieträgern. Daher trägt die Holzleitung auch deutlich weniger zum Treibhauseffekt bei, und ihr Beitrag zur Versauerung und Überdüngung ist bedeutend geringer, verglichen mit denen von Stahl und Beton. Das Potential für Ökotoxizität ist bei Holzmasten im Vergleich zu Beton allerdings wesentlich höher, als Konsequenz der Holzschutzmittelauslaugung über die Lebensdauer von 2mal 30 Jahren und der Zinkkorrosion der Stahlzubehöerteile der Holzmasten. Von stehenden Betonmasten gehen keine Umweltwirkungen an die Umgebung aus, jedoch verursachen sie nach dem Ausbau den höchsten Anteil an festen Abfällen. Der Trend dieser Ergebnisse bestätigt sich bei der Analyse der Einzelmasten und der 20-kV-Mittelspannungsleitung.

Während die wirkungsorientierte Beurteilung die Holzleitung nicht eindeutig präferiert, begünstigt dagegen eine Wirtschaftlichkeitsanalyse, die auf den für die Ökobilanz zusammengestellten Sachbilanzdaten beruht, die Holzstrecken gegenüber den alternativen Bautypen (KÜNNIGER *et al.*, 1995).

4.2.3 Folgerungen

Wie auch in anderen vergleichenden Ökobilanzen werden in wichtigen Umweltkategorien markante Umweltvorteile für Holzbauerteile zahlenmässig belegbar, insbesondere beim Verbrauch fossiler Energieträger, beim Treibhauseffekt, beim Abfallvolumen. Die Umweltwirkungen der Schutzmittelbehandlung kommen im Bewertungsparameter Ökotoxizität zum Ausdruck, wo die Holzleitung deutlich schlechter im Vergleich zur Betonvariante abschneidet. Die Ökobilanz kann nicht entscheiden, wie dieser Sachverhalt im Gesamtzusammenhang zu werten ist. Hier sind erweiterte Modellbetrachtungen ebenso wie die Vorgabe von Schutzziele nötig, die auch das potentielle Gefährdungs- und Schadensrisikopotential mitberücksichtigen müssen.

Auch ohne diese Kenntnisse jedoch können die folgenden Schritte zur Prozessoptimierung angeregt werden:

- bei Holzmasten: Eine Verbesserung der Fixierungseigenschaften der Schutzmittel würde zu einem geringeren Beitrag zur Ökotoxizität führen, ebenso die Verwendung korrosionsgeschützter Stahlteile.
- bei Beton: Der Einsatz von erneuerbaren Energieträgern im Zementofen würde die Treibhaus-, Versauerungs- und Überdüngungspotentiale entlasten, ein Recyclingverfahren könnte die hohen Abfallmassen vermindern.
- bei Stahl: Der Einsatz von Recyclingstahl, soweit technisch möglich, und eine generelle Materialeinsparung (u. a. durch Gittermaste) würde die hohen Beiträge der Primärstahlproduktion reduzieren.

4.3 Eisenbahnschwellen

Die Ökobilanz über Freileitungsmasten (siehe 4.2) deckt in bezug auf die eingesetzten Holzschutzmittel nur die Gruppe der anorganischen Schutzsalze ab. Ein nicht unerheblicher Anteil der wetterbeanspruchten Holzprodukte mit Erdkontakt wird jedoch mit Steinkohlenteeröl imprägniert. Im Rahmen einer Ökobilanz über Eisenbahnschwellen konnten auch zu dieser Schutzmittelgruppe Sachbilanzen erarbeitet und ihre Auswirkungen auf die Produktbilanzierung in einer vergleichenden Betrachtung untersucht werden (KÜNNIGER, RICHTER, 1998).

Im Streckennetz der Schweizerischen Bundes- und Privatbahnen werden Schwellen aus teerölimprägniertem Holz, Stahl und vorgespanntem Beton eingesetzt. Zu Beginn der achtziger Jahre lag der Anteil der Schwellen aus Holz bei ca. 40%; 45% der Schwellen waren aus Stahl und 15% aus Beton.

In den letzten Jahren hat sich der Anteil der Stahlschwellen zugunsten der Betonschwellen rückläufig entwickelt, was mit wirtschaftspolitischen und materialtechnologischen Argumenten begründet wird. In jüngster Zeit zeichnet sich auch eine Verdrängung der Holzschwelle durch die Betonschwelle ab, wofür neben materialtechnischen und ökonomischen zunehmend auch ökologische Gründe vorgebracht werden.

Dies steht in direktem Zusammenhang mit der Diskussion um Polyzyclische Aromatische Kohlenwasserstoffe (PAKs), von denen einige aufgrund vorliegender Untersuchungen als stark kanzerogen und mutagen angesehen werden. Da teerölimprägnierte Eisenbahnschwellen ebenfalls PAKs in ihre Umgebung emittieren, sind auch sie vermehrt der Kritik ausgesetzt.

4.3.1 Untersuchungsumfang

In der Studie wurden drei verschiedene Schwellenvarianten untersucht, wie sie im Streckennetz der schweizerischen Bundes- und Privatbahnen verwendet werden. Als funktionale Einheit wurde eine Streckenschwelle inklusive der Zusatz- und Befestigungsmaterialien und 60 cm Gleisbett definiert

Tabelle 2: Materialprofil der funktionellen Einheit.

Schwellentyp	Stahl [kg]	Buche [kg]	Teeröl [kg]	Beton [kg]	Gesamtgewicht Schwelle [kg]	Gewicht 0,6 m Gleisbett [kg]
Beton: Monoblock vorgespannt	14	–	–	258	265	1920
Holz: Buche teerölimprägniert	25,5	62	15,2	–	103	1620
Stahl: Baustahl unlegiert (40% rec.)	91	–	–	–	91	1740

(siehe Tabelle 2). Die unterschiedlichen Liegedauern der Schwellen wurden berücksichtigt; sie betragen laut Statistik der SBB im Hauptgleis 1 (Strecken mit einer täglichen Gesamtbruttotonnenbelastung von mehr als 30 000 Tonnen) bei Beton 35 Jahre, bei Holz 24 Jahre und bei Stahl 30 Jahre. Anschließend werden die Schwellen aus dem Gleisbett genommen und, z.T. nach Revision und Aufbereitung, in weniger befahrenen Streckenabschnitten weiterverwendet. Die Einflüsse dieser Weiterverwendungen und realistischer Recyclingsschritte, vor allem bei den Stahlteilen, wurden in das Lebenszyklusmodell einbezogen. Nach orientierenden Laboruntersuchungen wurde angenommen, dass 45% der ursprünglich eingebrachten Teerölbestandteile der Buchenschwelle im Verlauf der Liegedauer als Luftemissionen abgegeben werden.

4.3.2 Ergebnisse

Grundsätzlich zeigen die Berechnungen des Lebenszyklusmodells, dass die Umweltbelastungen der funktionalen Einheit einerseits von den spezifischen Schwellenmaterialien, mit mehr als 50% jedoch auch von den Gleisumbauarbeiten ausgehen. Dadurch wird der Einfluss der Liegedauern bei einer vergleichenden Betrachtung zusätzlich verstärkt. In *Abbildung 5* sind die Wirkungspotentiale der Schwellenvarianten beim Einsatz im Hauptgleis pro Jahr unter Berücksichtigung der statistischen Liegedauern dargestellt.

Die Bewertung zeigt, dass die Umweltwirkungen aus dem Lebenszyklus der Holzschwelle in sechs von sieben untersuchten Potentialen am höchsten sind. Einzig beim Treibhauseffekt liegt das Potential der Stahlschwelle geringfügig höher. Ein besonders hohes Potential im Vergleich zu den Alternativen

zeigt die Holzschwelle bei den Umweltwirkungen Humantoxizität und Ozonbildung, die zu über 80% durch die Emissionen von Teerölbestandteilen während der Nutzung verursacht werden. Beide Potentiale sind etwa zehnmal höher als die der Beton- bzw. Stahlschwellen. Alle spezifischen Bewertungen der Holzschwelle werden massgeblich durch die Einflüsse des Teeröls und des aufwendigen Befestigungssystems dominiert, und bei der Gegenüberstellung zu Beton und Stahl durch die kürzeren von den SBB ausgewiesenen Liegedauern verstärkt.

Um die Auswirkung von realistischen Verbesserungsmöglichkeiten zu analysieren, wurden drei Szenarien untersucht:

- Szenario 1 Anwendung technischer Massnahmen zur Verlängerung der Liegedauern um bis zu 30%, wie von ARNOLD (1994) vorgeschlagen.
- Szenario 2 Reduktion der Einbringmenge an Imprägnieröl von gegenwärtig 15,2 kg um 1,7 kg auf 13,5 kg (mittlere Einbringung nach deutschen Vorgaben).
- Szenario 3 Verwendung des Imprägnieröls WEI Typ C statt WEI Typ B. WEI Typ C zeichnet sich durch einen sehr stark verminderten Anteil leichtsiedender Bestandteile aus ('geruchsarm') und wird in einigen holländischen und deutschen Betrieben eingesetzt.

Die rechnerischen Auswirkungen jeder dieser drei Strategien sind in *Tabelle 3* zur Grundvariante der Buchenschwelle in Bezug gesetzt. Es wird deutlich, dass die effektivste Massnahme zur Entlastung der beiden als besonders kritisch erkannten Wirkungskategorien Ozonbildung und Humantoxizität die

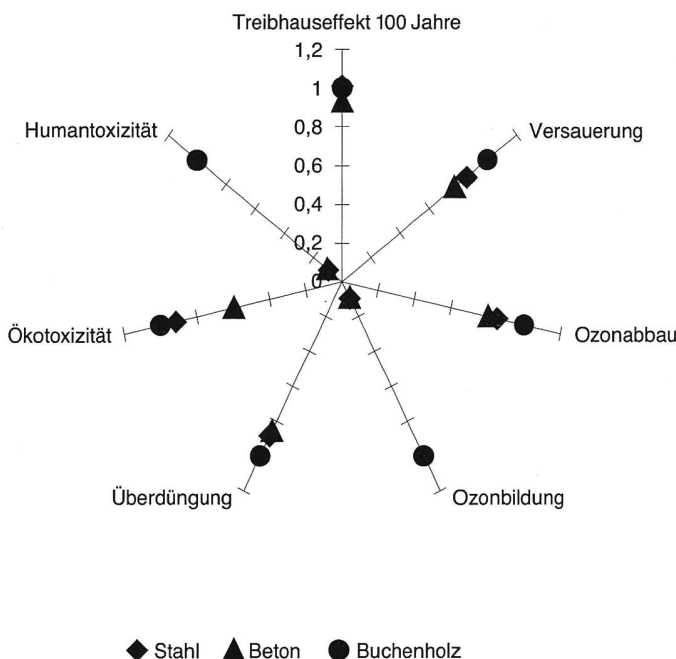


Abbildung 5: Wirkungspotentiale pro Schwelle und Jahr im Hauptgleis 1 bei Berücksichtigung der statistischen Liegedauern (normiert, Buchenholzschwelle = 1).

Umstellung des Imprägnieröls auf den Typ WEI C ist, zurückzuführen auf einen signifikant geringeren Ausstoss leichtflüchtiger Substanzen bei der Imprägnierung und über die Nutzungsdauer. Aufgrund dieser Erkenntnisse haben die SBB ihre Spezifikation zur Buchenschwellen-Imprägnierung verändert und verwenden nur noch Buchenschwellen, die mit diesem Öl imprägniert sind. Auch eine Verbesserung der Liegedauer hat erwartungsgemäss positive Auswirkungen auf die Umweltbelastung und sollte schrittweise realisiert werden.

Tabelle 3: Prozentuale Reduktion der Umweltbelastung von Buchenschwellen durch die vorgeschlagenen Verbesserungsmaßnahmen (Vergleich zur Grundvariante aus *Abbildung 5*).

Beurteilungsgrösse	Szenario 1	Szenario 2	Szenario 3
Treibhauseffekt	-22	-2	-
Ozonabbau	-19	-2	-2
Versauerung	-22	-2	-2
Überdüngung	-20	-1	-1
Photochemische Ozonbildung	-3	-10	-77
Humantoxizität	-5	-10	-69
Ökotoxizität Wasser	-21	-4	-4

4.3.3 Folgerungen

Unter den für die SBB typischen Einbausituationen in Hauptgleisen ergibt die Ökobilanzierung folgende Erkenntnisse:

- Der hohe Anteil der Umweltwirkungen wird massgeblich durch die Aufwendungen und Belastungen aus dem Gleisumbau sowie aus der Wartung des Gleisbettes inklusive der daraus resultierenden Transporte bestimmt. Durch eine Verlängerung der Liegedauern der Schwellen können die Umweltwirkungen wirkungsvoll vermindert werden.
- Die Betonschwelle zeigt ein sehr vorteilhaftes ökologisches Profil. Ihre Stärken sind vor allem der geringe Energieverbrauch bei der Herstellung und die langen Liegedauern sowie die Möglichkeit zur Weiterverwendung der Materialien nach dem Rückbau.
- Die Stahlschwellen weisen ebenfalls ein sehr günstiges Ökoprofil auf. In den meisten Bewertungsgrössen ist der Unterschied zur Betonschwelle nur sehr gering, wobei teilweise die Stahlschwellen und teilweise die Betonschwellen günstiger abschneiden. Besonders vorteilhaft wirkt sich bei der Stahlschwelle die Tatsache aus, dass alte gebrauchte Schwellen durch Umarbeitung oder Reparatur wieder gebrauchsfähig gemacht werden und somit in Hauptgleisen 2- bis 3mal zum Einsatz kommen können.
- In fast allen Bewertungsgrössen zeigt die teerölprägnierte Buchenholzschwelle die ungünstigsten ökologischen Eigenschaften. Vor allem die Emissionen von Teerölbestandteilen während der Nutzung, der hohe gewichtsmässige Anteil der Stahlteile für die Befestigung der Schienen, aber auch die im Vergleich zu den anderen Materialvarianten wesentlich kürzeren Liegedauern der Holzschwellen beeinflussen ihr ökologisches Profil negativ. Die kürzeren Liegedauern sind teilweise aber auch dadurch bedingt, dass Holzschwellen gerade aufgrund ihrer technisch guten Eigenschaften (gute Isolation, Tolerierung schlechter Untergründe, gutes Materialverhalten beispielsweise im Entgleisungsfall usw.) an höher belasteten Streckenabschnitten zum Einsatz kommen.
- Beim Einsatz von Teeröl WEI Typ C zur Imprägnierung der Holzschwellen können durch die Reduktion der PAK-Emissionen wesentliche ökologische Verbesserungen bei den Bewertungsgrössen Ozonbildung und Humantoxizität erzielt werden.
- Jede der untersuchten Konstruktionen weist sowohl ökologische als auch technische Vor- und Nachteile auf. Da keine der drei Materialtypen uneingeschränkt auf allen Streckenabschnitten eingesetzt werden kann, sollten

daher bei der Auswahl eines Materialtypes immer die ökologischen wie auch die technischen und wirtschaftlichen Aspekte gegeneinander abgewogen werden.

5. Ausblick

Bisher vorliegende, vergleichende Ökobilanzen weisen mehrheitlich gute Bewertungen für Produkte aus einheimischem, nachhaltig verfügbarem Holz auf (RICHTER, 1998). Dies wird vor allem durch den meist geringen Einsatz von fossilen Primärenergieträgern bei Holzernte und Verarbeitung und den geschlossenen CO₂-Kreislauf des Rohstoffs bewirkt. Weiter haben Holzkonstruktionen im Vergleich zu Alternativprodukten meist eine geringere Massenintensität und verursachen nur geringe, nach einer thermischen Verwertung am Ende der stofflichen Nutzung zu entsorgende Abfallmengen (in der Regel Stäube und Aschen).

Die Aussagefähigkeit vergleichender Ökobilanzen steigt mit der Qualität der benutzten Daten und der Unabhängigkeit, Neutralität und Transparenz der Studien. Es ist in den kommenden Jahren damit zu rechnen, dass die Datenverfügbarkeit und -qualität insbesondere auch im Bereich der Baustoffe und Baumaterialien zunehmen werden. Dazu können die Unternehmen der Holzindustrie durch eine Offenlegung von Sachbilanzdaten über ihre Produkte und Prozesse entscheidend beitragen. Bislang finden wesentliche Umwelteigenschaften der Waldwirtschaft noch keine ausreichende quantitative Berücksichtigung in den Sachbilanzen. Laufende Forschungsarbeiten befassen sich derzeit mit der für die Forstwirtschaft wichtigen Wirkungskategorie Landnutzung (bzw. Naturraumbeanspruchung). Weitere Einflüsse der Forstwirtschaft, z. B. im Hinblick auf den Wasserhaushalt, die Biodiversität, die Schutz- und Erholungsfunktionen sollten ebenfalls bewertbar gemacht werden.

Die Schwellenstudie zeigt, dass die Beurteilungen von Holzprodukten in vergleichenden Ökobilanzen nicht ungeprüft generalisiert und auf alle Produkte übertragen werden dürfen. Holz hat vor allem dann ökologische Vorteile, wenn es seine positiven Grundeigenschaften behaupten und durch weitere Optimierungen ausbauen kann. Wenn die Umweltauswirkungen aus den Hilfs- und Zusatzstoffen das ursprünglich gute Ökoprofil des Hauptmaterials überdecken, müssen die technischen und ökologischen Auswirkungen der Hilfsstoffe (Verlängerung der Einsatzdauern, Materialveredelungen usw.) in Relation zum nötigen Aufwand gesetzt werden. Materialkombinationen und Veredelungsschritte müssen somit auch vor dem Hintergrund ihrer ökologischen Konsequenzen sorgfältig geprüft und geplant werden. Oftmals ist es für die Gewährleistung einer hochstehenden Funktionsfähigkeit und langen Lebensdauer für viele Anwendungen unerlässlich, Holz in Kombination mit Hilfs- und Zusatzstoffen (Kleb-, Anstrichstoffe, Holzschutzmittel, Beschichtungen usw.) zu verarbeiten. Die Optimierungsanalyse zur Holzschwelle zeigt exemplarisch, dass es aber auch in diesen Fällen realistische Verbesserungsmöglichkeiten gibt, die gesucht, entwickelt und umgesetzt werden können.

Neben der qualitativen müssen Holzprodukte auch in preislicher Hinsicht konkurrenzfähig bleiben bzw. wieder werden. Gerade in wirtschaftlich ungünstigen Zeiten werden viele Kaufentscheide eher über den Preis denn über andere Produktqualitäten getroffen. Neben der betrieblichen Kalkulation könnten vor allem auch die politischen Rahmenbedingungen helfen, ökologisch vorteilhaften Produkten zu konkurrenzfähigen Preisen zu verhelfen. Wenn die Kosten der Umweltbelastungen in die heutigen Preise, z. B. von fossilen Energieträgern, einfließen würden oder die Kosten einer aufwendigen Entsorgung am Ende einer Produktnutzung in

Form einer Abgabe auf die heutigen Preise aufgeschlagen würden, dann sollten sich die ökologisch vorteilhaften Grundwerte der Wald- und Holzwirtschaft auch ökonomisch auswirken, und langfristig zu einer wirksamen gesamtökologischen Verbesserung führen.

Zusammenfassung

Produktökobilanzen zielen darauf ab, wichtige Kenndaten zu den mit der Funktion eines Produktes über dessen gesamten Lebenszyklus zusammenhängenden Umweltbeeinflussungen zu ermitteln. Sie werden eingesetzt, um umweltwirksame Verbesserungen in Einzelprozessen zu erkennen bzw. umzusetzen und um unter funktionsgleichen Produkten das ökologisch verträglichste auszuwählen. Holzprodukte und Holzbauteile nehmen beim Einbezug in Ökobilanzen eine gewisse Sonderstellung ein, weil sie aus einem biologisch produzierten Rohstoff hergestellt werden. Mit Ausnahme der CO₂-Speicherung ist es bisher nicht gelungen, die vielfältigen Umweltleistungen des Waldes soweit numerisch aufzubereiten, dass sie in Ökobilanzen mitberücksichtigt werden können. Anwendungsbeispiele aus den Bereichen Innenausbau und Stromleitungsbau zeigen, dass Holzprodukte in vergleichenden Gegenüberstellungen zu alternativen Materialien ökologisch gut abschneiden. Dies ist bei den teerölimprägnierten Eisenbahnschwellen nicht mehr der Fall, weil die Einflüsse des Teeröls und der Befestigungstechnik die positiven Grundeigenschaften des Holzes überdecken. Die Ökobilanzmethode konnte hier eingesetzt werden, um die Wirkung umweltentlastender Verbesserungsschritte aufzuzeigen und zur Umsetzung vorzuschlagen.

Résumé

Les écobilans des produits à base de bois

Les écobilans de produits visent à quantifier l'impact sur l'environnement d'un produit sur toute sa durée de vie. Ils s'utilisent pour identifier et mettre en pratique les améliorations des processus et pour choisir parmi des produits remplissant la même fonction celui qui présente la meilleure compatibilité avec l'environnement. Les produits à base de bois et les éléments de construction en bois occupent une position un peu particulière dans l'établissement des écobilans en ce sens qu'ils sont produits à partir d'une matière première qui est elle-même partie intégrante de l'écosystème qu'est la forêt. A l'exception de l'accumulation du CO₂, on n'est jusqu'ici pas encore parvenu à formuler sous forme de chiffre les performances écologiques de la forêt de manière à pouvoir les utiliser dans un écobilan. Des exemples d'application dans les domaines de l'aménagement intérieur des bâtiments et de la construction des lignes électriques montrent que les produits à base de bois sont bien placés sur le plan écologique par rapport aux autres matériaux dans ces domaines. Par contre cela n'est plus le cas pour les traverses de voies de chemin de fer imprégnées à la créosote car l'influence de la créosote et de la technique de fixation viennent recouvrir les caractéristiques fondamentales positives du bois. La méthode des écobilans peut s'utiliser ici pour mettre en évidence l'effet de mesures d'amélioration réduisant les effets négatifs sur l'environnement et pour promouvoir la mise en pratique de telles mesures.

Traduction: J. P. EMERY

Summary

Wood Products in Comparative Life Cycle Assessment Studies

Life Cycle Assessment (LCA) aspires to quantify the potential environmental impacts of a product system throughout its life cycle. The technique is used to identify and realize opportunities to improve the environmental impact of processes, and to compare between products with equivalent function and performance in order to select the environmentally best one. Wood and timber based products have an exceptional position when analysed in LCA for being produced out of a resource which itself is an integrated part of the forest ecosystem. It has not been possible yet to quantify the environmental benefits of sustainable forestry to such an extent that they can be used in LCA to underline the environmental benefits of wood, the CO₂-storage being the exception to the rule. Nevertheless, the examples selected from applications in indoor building construction and power supply lines reveal that many timber derived products have a favourable environmental position when being compared to alternative products. This is not any more true when creosote-treated railway sleepers are analysed, because the impact of the creosote emission and the relatively complex rail mounting arrangement exceed the beneficial basic values of the timber. The LCA method has been used to evaluate the effects of suitable improvement measures and to support their realisation.

Literatur

- ARNOLD, M. (1994): Verbesserung von Eisenbahnschwellen aus Schweizer Holz. Schlussberichte 1–3, EMPA Forschungsberichte Abt. Holz, Dübendorf.
- BLUM, A.; BRANDL, H.; OESTEN, G.; RÄTZ, TH.; SCHANZ, H.; SCHMIDT, S.; VOGEL, G. (1996): Wirkungen des Waldes und Leistungen der Forstwirtschaft. Allg. Forstzeitschrift/Der Wald, 1, 22–26.
- BUWAL 271 (1996): Ökobilanz stärkehaltiger Kunststoffe, Schriftenreihe Umwelt 271, Band I und II, Bern.
- ERLANDSON, M. (1996): Methodology for Environmental Assessment of Wood Based Products, Traetek Rapport I 9608070, Stockholm.
- FRÜHWALD, A.; SOLBERG, B. (eds.) (1996): Life-Cycle Analysis, A Challenge for Forestry and Forest Industry. EFI Proceedings 8, 278 p.
- FRÜHWALD, A.; WEGENER, G.; SCHARAI RAD, M.; ZIMMER, B.; HASCH, J. (1996): Grundlagen für Ökopprofile und Ökobilanzen in der Forst- und Holzwirtschaft. Hamburg 168 S.
- HEIJUNGS, R.; GUINÉE, J. B. *et al.* (1992): Environmental Life Cycle Assessment of Products. Guide and Background, Centre of Environmental Science, Leiden University, The Netherlands.
- KÖCHLI, D. A. (1996): Sachbilanz der Buchenholzproduktion in der Schweiz, dargestellt anhand der fünf wichtigsten Buchenholzproduzenten. Diplomarbeit ETHZ, Abt. Forstwissenschaften.
- KÜNNIGER, T.; RICHTER, K. (1995): Ökologischer Vergleich von Freileitungsmasten aus imprägniertem Holz, armiertem Beton und korrosionsgeschütztem Stahl. Forschungsbericht EMPA Abt. Holz, 233 S.
- KÜNNIGER, T., RICHTER, K. (1998): Ökologische Bewertung von Eisenbahnschwellen in der Schweiz. Streckenschwellen aus vorgespanntem Beton, Profilstahl und teerölimprägniertem Buchenholz. Forschungs- und Arbeitsberichte EMPA-Abt. Holz, Gruppe Ökologie, Nr. 115/38, 167 S. u. Anhang.
- KÜNNIGER, T.; RICHTER, K.; DAUWALDER, R. (1995): Ökobilanz über Tragwerke von Mittel- und Niederspannungsfreileitungen. Bulletin SEV/VSE 24, 45–51.
- NICKEL, R.; LIEDTKE, CH. (1996): Materialintensitätsanalysen von Grund-, Werk- und Baustoffen (6). Wuppertal Papers Nr. 65.
- RICHTER, K. (1995): Ökopprofil von Holz und Holzwerkstoffen. Tagungsband des 27. SAH-Fortbildungskurses 'Innenräume in Holz', S. 119–126.

- RICHTER, K. (1997): Neue COST Aktion: «Lebenszyklusbewertung in der Forstwirtschaft und bei forstwirtschaftlichen Erzeugnissen». Bulletin Kompetenz-Zentrum Holz, 2, S. 13–14.
- RICHTER, K. (1998): Life Cycle Assessment of Wood Products. In: KOHLMAIER, G. H.; WEBER, M.; HOUGHTON, R. A. (eds.): Carbon Dioxide Mitigation in Forestry and Wood Industry. Springer-Verlag Berlin, 219–248.
- RICHTER, K.; SELL, J. (1992): Ökobilanzen von Baustoffen und Bauprodukten aus Holz. Zusammenfassung erster Ergebnisse. Forschungs- und Arbeitsbericht der EMPA-Abt. Holz Nr. 115/21, 33 S., Dübendorf.
- ROBSON, D.; ESSER, P. (1997): Life-Sys-Wood: Consistent Life Cycle Analysis of Wood Products. Wood - the Ecological Material. 4. Eurowood Symposium. Träetek Rapport P 9709084, p. 25–33.
- SCHWEINLE, J. (1996): Analyse und Bewertung der forstlichen Produktion als Grundlage für weiterführende forst- und holzwirtschaftliche Analysen. Mitteilungen der Bundesforschungsanstalt für Forst- und Holzwirtschaft Hamburg, Nr. 184, 123 S.
- SOCIETY FOR ENVIRONMENTAL TOXICOLOGY AND CHEMISTRY, SETAC (1993): Guidelines for Life-Cycle Assessment: A 'Code of Practice'. 1. ed., Brussels.
- WERNER, F.; RICHTER, K.; BOSSHART, S.; FRISCHKNECHT, R. (1997): Ökologischer Vergleich von Innenbauteilen am Beispiel von Zargen aus Massivholz, Holzwerkstoff und Stahl. EMPA-Forschungsbericht. Dübendorf.

Autoren:

FRANK WERNER, Dipl. Natw. ETH, TINA KÜNNIGER, Dipl. Ing. Holztechnik, Dr. KLAUS RICHTER, Dipl. Holzwirt: EMPA, Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt, Abteilung Holz, Überlandstrasse 129, CH-8600 Dübendorf.