



**TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DRESDEN**

Technische Universität Dresden

School of Civil and Environmental Engineering

Faculty of Civil Engineering

Institute of Steel and Timber Construction

Chair of Timber Engineering

A Retrospective and Prospective Study of Wood in Germany Based on Material Flow Analysis

Cumulative Dissertation

to achieve the academic degree of

Doctor of Engineering (Dr.-Ing.)

submitted by M.Eng. Ruisheng Wang

Born on 23.01.1996 in Shanxi, China

Reviewers: Prof. Dr. Peer Haller
Prof. Dr. Klaus Richter
Prof. Dr. Edeltraud Günther

Other member: Prof. Dr. Robert Jockwer

Chair: Prof. Dr. Viktor Mechtcherine

Submission: 14.10.2024

Defense: 05.05.2025

Abstract

Wood, an essential natural resource in human civilization, remains widely used despite advances in technology and material substitution. The surge in greenhouse gas emissions and environmental concerns accentuates the need for optimizing wood utilization. Material flow analysis is a powerful tool for tracking material flows and stocks, aiding resource management and environmental decision-making. However, the full extent of its methodological dimensions, particularly within the context of the wood supply chain, remains relatively unexplored. In Germany, a vital wood supplier and user in Europe, the wood supply chain's production, consumption, trade, and recycling have been insufficiently investigated. Against the backdrop of the Climate Action Plan 2050, Germany is intensifying efforts to reduce energy consumption and emissions, signaling a potential shift in consumption patterns.

The first article delves into the existing literature on wood flow analysis, discussing its primary objectives, materials involved, temporal and spatial scales, data sources, units, conversion factors, data uncertainty, data reconciliation, and crucial assumptions. Key findings reveal the significance of wood cascading and substitution effects by replacing non-wood materials, where they can reduce greenhouse gas emissions more than the natural carbon sink of forests and wood products. Strategies for improving wood efficiency involve maximizing material use, advancing construction technologies, extending product lifespans, promoting cascade use, and optimizing energy recovery processes.

The second article employs oven-dry metric tonne as the reference unit to construct a static wood flow based on the material flow analysis and wood resource balance in Germany in 2020. The Sankey diagrams comprehensively visualize the flow and stock of wood in various sectors, including forests, sawmills, pulp mills, buildings, energy, and waste. In addition to apparent data, this study also uses resource allocation, carbon storage, and cascade potential as examples to demonstrate that wood flow is applicable for further in-depth analysis, supporting wood efficient utilization.

The third article conducts a comprehensive dynamic wood flow analysis from 1991 to 2020. Approximately 2143 million cubic meters of standing timber were felled in German forests over the past three decades, with 80% used for materials and 20% for energy purposes. Wood flow patterns were susceptible to market demand and forest disturbances like drought, storms, and insect infestations. Notably, the net forest carbon sink, carbon storage in forest products, and energy substitution effect (replacing fossil energy with wood) reached 160, 332, and 322 million tons of carbon, respectively.

However, the transition to renewable energy, wooden buildings, and wood and paper packaging demands further strains the wood supply chain.

The last manuscript aims to forecast wood consumption in Germany from 2020 to 2050 and evaluate the ability of domestic forests to meet demand. Employing a material flow analysis approach and considering recent data alongside Germany's Climate Action 2050 goals, consumption projections were made for sectors such as building, paper, energy, furniture, and packaging. Results indicate a significant surge in wood consumption, particularly in the scenario with a high residential renovation rate, necessitating substantial wood imports to fulfill demand. Energy and building emerge as pivotal sectors for reducing wood consumption.

From a research perspective, this cumulative dissertation highlights the necessity for standardized approaches in wood flow analysis and emphasizes the potential of wood efficiency strategies in addressing environmental challenges. Specifically, circular static wood flow analysis holds promise for application across various countries and periods given adequate data and conversion factors. The retrospective and prospective investigations fill a gap in understanding Germany's recent wood flows and future consumption trends, crucial for aligning strategies with environmental goals.

Zusammenfassung

Holz, eine wesentliche natürliche Ressource der menschlichen Zivilisation, wird trotz technologischer Fortschritte und Materialsubstitution weiterhin häufig genutzt. Der Anstieg der Treibhausgasemissionen und Umweltbedenken verdeutlichen die Notwendigkeit einer Optimierung der Holznutzung. Die Materialflussanalyse ist ein leistungsstarkes Werkzeug zur Verfolgung von Materialflüssen und -beständen und unterstützt das Ressourcenmanagement und die Entscheidungsfindung im Umweltbereich. Das volle Ausmaß seiner methodischen Dimensionen, insbesondere im Kontext der Holzlieferkette, ist jedoch noch relativ unerforscht. In Deutschland, einem wichtigen Holzlieferanten und -verbraucher in Europa, sind Produktion, Verbrauch, Handel und Recycling der Holzlieferkette nur unzureichend untersucht. Vor dem Hintergrund des Klimaschutzplans 2050 verstärkt Deutschland seine Anstrengungen zur Reduzierung des Energieverbrauchs und der Emissionen und signalisiert damit eine mögliche Verschiebung des Konsumverhaltens.

Der erste Artikel befasst sich mit der vorhandenen Literatur zur Holzflussanalyse und erörtert deren Hauptziele, beteiligte Materialien, zeitliche und räumliche Skalen, Datenquellen, Einheiten, Umrechnungsfaktoren, Datenunsicherheit, Datenabgleich und wichtige Annahmen. Die wichtigsten Ergebnisse verdeutlichen die Bedeutung von Holzkaskaden- und Substitutionseffekten durch den Ersatz von Nichtholzmaterialien, wo sie die Treibhausgasemissionen stärker reduzieren können als die natürliche Kohlenstoffsenke von Wäldern und Holzprodukten. Strategien zur Verbesserung der Holzeffizienz umfassen die Maximierung des Materialeinsatzes, die Weiterentwicklung von Bautechnologien, die Verlängerung der Produktlebensdauer, die Förderung der Kaskadennutzung und die Optimierung von Energierückgewinnungsprozessen.

Der zweite Artikel verwendet ofentrockene metrische Tonnen als Referenzeinheit, um einen statischen Holzfluss basierend auf der Materialflussanalyse und der Holzressourcenbilanz in Deutschland im Jahr 2020 zu erstellen. Die Sankey-Diagramme visualisieren umfassend den Holzfluss und -bestand in verschiedenen Sektoren, darunter Wälder, Sägewerke, Zellstofffabriken, Gebäude, Energie und Abfall. Zusätzlich zu den offensichtlichen Daten verwendet diese Studie auch Beispiele für Ressourcenallokation, Kohlenstoffspeicherung und Kaskadenpotenzial, um zu zeigen, dass der Holzfluss für eine weitergehende eingehende Analyse geeignet ist und eine effiziente Holznutzung unterstützt.

Der dritte Artikel führt eine umfassende dynamische Holzflussanalyse von 1991 bis 2020 durch. In den letzten drei Jahrzehnten wurden in deutschen Wäldern rund 2143 Millionen

Kubikmeter stehendes Holz eingeschlagen, wovon 80% stofflich und 20% energetisch genutzt wurden. Die Holzflussmuster waren anfällig für die Marktnachfrage und Waldstörungen wie Dürre, Stürme und Insektenbefall. Bemerkenswert ist, dass die Netto-Kohlenstoffsенke des Waldes, die Kohlenstoffspeicherung in Waldprodukten und der Energiesubstitutionseffekt (Ersatz fossiler Energie durch Holz) 160, 332 bzw. 322 Millionen Tonnen Kohlenstoff erreichten. Der Übergang zu erneuerbaren Energien, Holzgebäuden sowie Holz- und Papierverpackungsanforderungen belastet die Holzlieferkette jedoch zusätzlich.

Das letzte Manuskript zielt darauf ab, den Holzverbrauch in Deutschland von 2020 bis 2050 zu prognostizieren und die Fähigkeit der heimischen Wälder zu bewerten, den Bedarf zu decken. Mithilfe eines Materialflussanalyseansatzes und unter Berücksichtigung aktueller Daten sowie der deutschen Klimaschutzziele 2050 wurden Verbrauchsprognosen für Sektoren wie Bau, Papier, Energie, Möbel und Verpackung erstellt. Die Ergebnisse deuten auf einen erheblichen Anstieg des Holzverbrauchs hin, insbesondere im Szenario mit einer hohen Renovierungsrate bei Wohngebäuden, was erhebliche Holzimporte erforderlich macht, um die Nachfrage zu decken. Energie und Gebäude erweisen sich als Schlüsselsektoren für die Reduzierung des Holzverbrauchs.

Aus wissenschaftlicher Sicht unterstreicht diese kumulative Dissertation die Notwendigkeit standardisierter Ansätze in der Holzflussanalyse und betont das Potenzial von Holzeffizienzstrategien bei der Bewältigung von Umweltherausforderungen. Insbesondere die zirkuläre statische Holzflussanalyse verspricht bei ausreichenden Daten und Umrechnungsfaktoren eine Anwendung in verschiedenen Ländern und Zeiträumen. Die retrospektiven und prospektiven Untersuchungen schließen eine Lücke im Verständnis der aktueller Holzströme und zukünftigen Verbrauchstrends in Deutschland, die für die Ausrichtung von Strategien auf Umweltziele von entscheidender Bedeutung ist.