
Abschlussbericht

Recyclinggerechter Rückbau und Wiederverwendung von verbautem Altholz
für den Neubau eines Mehrfamilienhauses in Holzbauweise in Hamburg

Fachgebiet Tragwerksentwicklung und Bauphysik
Fachbereich Architektur
Technische Universität Darmstadt



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

Recyclinggerechter Rückbau und Wiederverwendung von verbautem Altholz für den Neubau eines Mehrfamilienhauses in Holzbauweise in Hamburg

Abschlussbericht
DBU-Projekt AZ 35632/01
Gefördert von der *Deutsche Bundesstiftung Umwelt* (DBU)

Autoren:
Mark Fellner, M.Sc.
Stephan Abel, M.Sc.

Fachgebiet
Tragwerksentwicklung und
Bauphysik

Prof. Dr.-Ing.
Karsten Tichelmann

El-Lissitzky-Str. 1
64287 Darmstadt

Tel. +49 6151 16 - 75501
Fax +49 6151 16 - 75510

Darmstadt, der 08.03.2022

Projektdatenblatt
der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt



Az	35632/01	Referat	Umweltechnik	Fördersumme	47.640 €
----	-----------------	---------	---------------------	-------------	-----------------

Antragstitel **Recyclinggerechter Rückbau und Wiederverwendung von verbautem Altholz für den Neubau eines Mehrfamilienhauses in Holzbauweise in Hamburg**

Stichworte Recycling, Rückbau, Altholz, Wiederverwendung

Laufzeit	Projektbeginn	Projektende	Projektphase(n)
17 Monate	01.06.2021	31.3.2022	

Zwischenberichte 1

Bewilligungsempfänger	TU Darmstadt	Tel +49 6151 1675500
	Fachbereich Architektur	Fax +49 6151 1675510
	Fachgebiet Tragwerksentwicklung und Bauphysik	Projektleitung
	Prof. Dr.-Ing. Karsten Tichelmann	Prof. Karsten Tichelmann
		Bearbeiter
		Mark Fellner M.Sc.,
		Stephan Abel M.Sc.

Kooperationspartner VHT GmbH Institut für Leichtbau, Trockenbau, Holzbau
DeepGreen Projekt Fischbecker Höfe Haus C UG & Co. KG
Holzbau Netzwerk Nord e.V.

Zielsetzung und Anlass des Vorhabens

Ziel des Forschungsvorhabens ist es, einen Nachweis und eine Handlungsempfehlung für die Praxis im Hinblick auf die Beurteilung und hochwertige Wiederverwendbarkeit von Altholz als gleichwertigen Baustoff zu entwickeln. Das Vorhaben soll in Form eines CO₂-neutralen Pilotgebäudes innerhalb eines „Smart Quartiers“ umgesetzt werden. Das Demonstrativgebäude dient als Best-Practice-Beispiel.

Die Chronologie des Projektablaufs ist, dass im ersten Schritt das Altholz der Dachstühle von zwei früheren Kasernen zurückgebaut wird. Die Kasernen werden aufgestockt, um dort zusätzlichen Wohnraum zu schaffen ohne gleichzeitig neue Flächen zu versiegeln. Die Holzbauteile werden in situ begutachtet, auf Eignung und Kontaminationen bewertet, im Hinblick auf statisch-konstruktive Eigenschaften vorsortiert und überprüft. Dazu gehören unter anderem Feuchtegehalt, Festigkeiten, Ästigkeit, Rissbildung, Schadstoffbelastungen, Hemmnisse der Weiterverarbeitung, wie metallische Verbindungsmittel und gegebenenfalls biotischer Befall. Die Ergebnisse bilden die Voraussetzung, um eine hoch- und höherwertige Wiederverwendung des Altholzes abzuleiten.

Das Altholz wird unmittelbar für den Neubau eines Pilotgebäudes mit 12 Maisonette-Wohnungen auf einem benachbarten Grundstück verwendet. Dadurch entfallen auch Transportwege (für die Entsorgung des Altholzes und Transport von neuem Bauholz auf die Baustelle). Dahingehend werden Bauteilaufbauten sowie Leitdetails entwickelt und abschließend auf eine allgemeine Übertragbarkeit geprüft. Parallel wird der ökologische Vorteil und die ökonomischen Auswirkungen gegenüber der konventionellen Errichtung des Gebäudes aus neuem, nicht recyceltem Material anhand einer Lebenszyklusanalyse bestimmt. Damit kann unter anderem dargelegt werden, wie viel CO₂ und Graue Energie nachweislich eingespart werden kann. Die gewonnenen, baupraktischen Erkenntnisse werden auf ihre Verallgemeinerung hin geprüft und in einem Handlungsleitfaden zusammengefasst.

Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden

Es wurden stichprobenartig Balken aus dem Dachstuhl ausgewählt und sowohl durch visuelle als auch maschinelle Prüfungen untersucht. Bei der visuellen Untersuchung wurde nach Rissen, Ästen und anderen

Imperfektionen in den Holzbalken gesucht, um auf die Sortierklasse zu schließen. Bei den maschinellen Untersuchungen wurden der lokale und der globale Elastizitätsmodul bestimmt, um auf die Festigkeitsklasse zu schließen.

Aus diesen Ergebnissen wurden Konzepte für tragende sowie nichttragende Wände erstellt. Die entwickelten Innen- und Außenwände wurden einer Ökobilanzierung unterzogen und mit Referenzwänden verglichen.

Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation

Aufgrund der Coronapandemie waren geplante Veranstaltungen zur Präsentation der Ergebnisse nicht möglich. Es wird mit den Kooperationspartnern geprüft, ob es andere Möglichkeiten gibt, die Forschungsergebnisse einem breiten Publikum zu präsentieren.

Fazit

Die Untersuchungen ergaben, dass Altholz aus Dachstühlen für tragende als auch nichttragende Wände verwendet werden können. Eine allgemeingültige Aussage ist nicht möglich. Denn es ist im Einzelfall zu kontrollieren, dass das zu verwendende Altholz über den Benutzungszeitraum keine Schäden erlitten hat, wie zum Beispiel Risse, Feuchteschäden oder Pilzbefall. Auch zu überprüfen ist die Festigkeitsklasse des Altholzes und Verarbeitungskerben.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	4
Abbildungsverzeichnis	5
Tabellenverzeichnis	6
Abkürzungsverzeichnis	6
1.....Zusammenfassung	7
2.....Einleitung	8
3.....Ziele und Untersuchungsrahmen der Studie	9
3.1. Untersuchung des Bestandholzes	9
3.1.1. Visuelle Holzsortierung	9
3.1.2. Festigkeitsklasse Holz	9
3.1.3. 4-Punkt-Biegung	10
3.2. Steinholz	12
3.2.1. Herstellung der Probekörper	12
3.2.2. Untersuchungen	13
3.3. Ökobilanzierung	15
3.3.1. Untersuchte Wandsysteme	15
3.3.2. Funktionseinheit	15
3.3.3. Systemgrenzen und Annahmen	16
4.....Durchgeführte Untersuchungen	19
4.1. Untersuchung der Holzqualität	19
4.1.1. Visuelle Bestimmung der Sortierklasse im angelieferten Zustand	19
4.1.2. Bestimmung der Festigkeitsklasse, Balken im angelieferten Zustand	23
4.1.3. Sortierungsklasse im gehobelten Zustand	27
4.1.4. 4-Punkt-Biegung gehobelter Balken	30
4.1.5. Rohdichte	32
4.2. Steinholz	33
4.2.1. Rohdichte	33
4.2.2. Oberflächenhärteprüfung nach EN 13892-6	34
4.2.3. Biegezugprüfung nach EN 13892-2	34
4.3. Ökobilanzierung	35
4.3.1. Wandaufbauten und Sachbilanz der untersuchten Systeme	35
4.3.2. Tragende Außenwand	35
4.3.3. Nichttragende Innenwand	40
4.3.4. Ökologischen Eigenschaften der untersuchten Wandsysteme	41
4.3.5. Massen der Wände	47
5.....Fazit	49
5.1. Festigkeitsuntersuchung der Holzbalken	49
5.2. Steinholz	50
5.2.1. Oberflächenhärte	50
5.2.2. Biegezugprüfung nach EN 13892-2	51
5.2.3. Bewertung des Steinholzes	51
5.3. Ökobilanzierung	52
6.....Literaturverzeichnis	53

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 Prüfanordnung zur Bestimmung des lokalen Elastizitätsmoduls	10
Abbildung 2 Prüfanordnung zur Bestimmung des globalen Elastizitätsmoduls	11
Abbildung 3 Angelieferte Holzbalken.....	19
Abbildung 4 Balken mit Riss und Baumkanten.....	20
Abbildung 5 Balken mit Schablone für Sichtprüfung.....	20
Abbildung 6 Biegeprüfungen- Hölzer im Anlieferungszustand, Prüfungen 1-8	25
Abbildung 7 Biegeprüfungen- Hölzer im Anlieferungszustand, Prüfungen 9-16	25
Abbildung 8 Biegeprüfungen- Hölzer im Anlieferungszustand, Prüfungen 17-24	26
Abbildung 9 Biegeprüfungen- Hölzer im Anlieferungszustand, Prüfungen 25-30	26
Abbildung 10 Gehobelte Balken.....	27
Abbildung 11 Zwei Balken mit Vertiefungen.....	27
Abbildung 12 Biegeprüfungen- Hölzer nach Zuschnitt, Prüfungen 1-8	31
Abbildung 13 Biegeprüfungen- Hölzer nach Zuschnitt, Prüfungen 9-16	31
Abbildung 14 Biegeprüfungen- Hölzer nach Zuschnitt, Prüfungen 17-22	31
Abbildung 15 Ein Probekörper aus Steinholz	33
Abbildung 16 Illustrierte tragende Außenwand mit Altholz	35
Abbildung 17 Querschnitt tragende Außenwand	35
Abbildung 18 Rendering der Massivholzwand mit Brettsper Holz	36
Abbildung 19 Querschnitt Wand mit Brettsper Holz.....	36
Abbildung 20 Illustrierte Holzständerwand.....	37
Abbildung 21 Querschnitt der Holzständerwand mit beidseitiger Beplankung und dem WDVS außen	37
Abbildung 22 Illustrierte Kalksandsteinwand.....	38
Abbildung 23 Querschnitt Kalksandsteinwand.....	38
Abbildung 24 Illustrierte nichttragenden Außenwand.....	39
Abbildung 25 Querschnitt der nichttragenden Außenwand.....	39
Abbildung 26 Illustrierte tragende Innenwand.....	40
Abbildung 27 Querschnitt der Innenwand	40
Abbildung 28 Primärenergiebedarf (PE) für den Gesamtlebenszyklus der tragenden Außenwände.....	41
Abbildung 29 Wirkungskategorien der Außenwände in Relation zu der Altholzwand ohne das ODP..	42
Abbildung 30 relativer Vergleich des Ozonbildungspotentials einschließlich des Transportes.....	43
Abbildung 31 relativer Vergleich weiterer Wirkungskategorien für den Gesamtlebenszyklus der Außenwände, ohne den Transport.....	44
Abbildung 32 Primärenergiebedarf (PE) des Gesamtlebenszyklus der nichttragenden Außenwand	45
Abbildung 33 Primärenergiebedarf (PE) der nichttragenden Außenwand aufgeteilt nach Transport, Herstellung und Recyclingpotential	45
Abbildung 34 Primärenergiebedarf (PE) für den Gesamtlebenszyklus der tragenden Innenwand	46
Abbildung 35 Primärenergiebedarf (PE) für die tragenden Innenwand aufgeteilt nach Transport, Herstellung und Recyclingpotential	46
Abbildung 36 Masse [kg] der Materialien der Wände aus dem Altholz	47
Abbildung 37 Masse [kg] der Materialien der Leichtbau-Holzwände	48
Abbildung 38 Masse [kg] der Materialien der Kalksandsteinwand	48
Abbildung 39 Kleinformatige nichttragende Außenwand ohne Dämmmaterial	49
Abbildung 40 Kleinformatige nichttragende Außenwand ohne Dämmmaterial	50

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 Mischungsverhältnis der Probekörper.....	13
Tabelle 2 Holzsortierung nach EN 4074-1 - Hölzer im Anlieferungszustand.....	21
Tabelle 3 Biegeprüfungen - Hölzer im Anlieferungszustand.....	24
Tabelle 4 Sortierklasse - Hölzer im gehobelten Zustand.....	28
Tabelle 5 Biegeprüfungen - Hölzer im gehobelten Zustand.....	30
Tabelle 6 Rohdichte - Hölzer im gehobelten Zustand.....	32
Tabelle 7 Rohdichte [kg/dm ³] ermittelt im Abbindezeitraum.....	33
Tabelle 8 Oberflächenhärte nach EN 13892-6.....	34
Tabelle 9 Biegezugfestigkeit nach EN 13892-2.....	34
Tabelle 10 Primärenergieverbrauch der Wände.....	41
Tabelle 11 Wirkungskategorien der tragenden Außenwände.....	42
Tabelle 12 Ozonabbaupotential der Transporte.....	43
Tabelle 13 Wirkungskategorien der tragenden Außenwände ohne den Transport.....	44
Tabelle 14 Wirkungskategorien der nichttragenden Außenwand.....	45
Tabelle 15 Wirkungskategorien der tragenden Innenwand.....	47
Tabelle 16 Gesamtmassen der Wände.....	47

Abkürzungsverzeichnis

$E_{m,global}$	Globaler Elastizitätsmodul [N/mm ²]
$E_{m,lokal}$	Lokaler Elastizitätsmodul [N/mm ²]
a	Abstand zwischen einer Laststelle und dem nächsten Auflager [mm]
l_1	Messlänge zur Bestimmung des Elastizitätsmoduls
I	das Flächenmoment 2 Grades [mm ⁴]
G	Schubmodul [N/mm ²]
F	Last [N]
f_m	Festigkeit [N/mm ²]
$f_{m,k}$	Charakteristische Festigkeit [N/mm ²]
b	Breite [mm]
h	Höhe [mm]
l	Länge [mm]
m	Gewichte [g] Rohdichte [kg/m ³]
w	Verformung [mm]
$m_{(x)}$	Mittelwert
$s_{(x)}$	Standardabweichung
$v_{(x)}$	Variationskoeffizient
max	Maximum
$mean$	Mittel
ODP	Ozonabbaupotential
PE	Primärenergie
GWP	Treibhauspotential
POCP	Photochemisches Ozonbildungspotential
AP	Versauerungspotential
EP	Eutrophierungspotential
end-of-life	Lebensende
cradle to gate	Von der Wiege bis zum Werkstor
usw.	und so weiter
z.B.	zum Beispiel

1. Zusammenfassung

In dem vom DBU geförderten Forschungsprojekt wird untersucht, ob das Holz aus dem Dachgiebel einer Kaserne aus der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts für den Aus- und Neubau wiederverwertet werden kann. Ziel dieser Studie ist es, den CO₂-Ausstoß und den Verbrauch von Grauer Energie zu senken. In diesem Rahmen soll auch eine Ökobilanzierung durchgeführt werden, um diesen positiven Effekt zu bilanzieren.

Zu Beginn wurde eine Auswahl an ausgebauten Balken auf deren Festigkeitswerte begutachtet, um zu prüfen, ob das Altholz verwendet werden kann.

Aus diesen Untersuchungen sind drei mögliche Wände entwickelt worden: zwei Außenwände (tragend und nichttragend) und eine tragende Innenwand. Die tragende Außenwand ist dann beispielhaft mit anderen Wänden aus der Trocken- und Massivbauweise verglichen worden.

In dieser Studie kam heraus, dass die Wiederverwendung von bereits verbautem Holz in Wänden sinnvoll ist, da sich das zu transportierende Material verringert und für Bauholz keine Bäume gefällt werden müssen. Auch wird durch das Recycling der Zeitraum für die Benutzbarkeit des Holzes verlängert.

In diesem Fall lassen sich Altholzbalken auch für tragende Wände verwenden. Für jedes neue Projekt muss erneut geprüft werden, ob das Holz den statischen und bauphysikalischen Anforderungen des geplanten Einsatzzweckes genügt und dann sprechend angepasst werden.

2. Einleitung

Vor dem Hintergrund, dass es in Deutschland über 20 Millionen Gebäude gibt und kontinuierlich neue hinzukommen, stellt sich die Frage der Wiederverwendung der bereits verbauten Materialien. Beim Abriss von Gebäuden wird das Material größtenteils entsorgt, während bei Neubauten in der Regel auf neue Werkstoffe zurückgegriffen wird. Bei diesen Prozessen wird unter anderem viel Energie verbraucht und CO₂ freigesetzt. Um diese Graue Energie zu reduzieren wird in dem DBU-Forschungsvorhaben „Recyclinggerechter Rückbau und Wiederverwendung von verbautem Altholz für den Neubau eines Mehrfamilienhauses in Holzbauweise in Hamburg“ untersucht, ob aus Holzbauteilen von einer Dachkonstruktion eines ehemaligen Kasernengebäudes in tragenden und nichttragenden Wänden wiederverwendet werden kann.

Im Kooperationsprojekt wurden folgende Untersuchungen durchgeführt:

- Es wurden stichprobenartig Altholzbalken entnommen. Diese wurden sowohl einer Sicht- als auch einer Biegeprüfung unterzogen, um deren Festigkeitswerte zu bestimmen.
- Basierend auf den Versuchsergebnissen wurden drei Wände (eine tragende und nichttragende Außenwand und eine tragende Innenwand) auf die gegebene Anwendung geplant. Diese Wände wurden auf deren ökologische Auswirkungen hin untersucht und mit anderen Wänden verglichen.
- Da bei der Holzbearbeitung und dem Holzzuschnitt Sägespäne anfallen, wurde daraus in Kombination mit Zusätzen ein Magnesiaestrichmörtel („Schnittholz“) gefertigt. Dieser wurde mechanisch untersucht.

Die Holzsortierung wurde nach DIN 4074-1:2012-06 im angelieferten sowie im gehobelten Zustand durchgeführt. Im Anschluss wurde mit denselben Balken nach DIN EN 384:2019-02 der lokale und globale E-Modul in beiden Zuständen bestimmt. Die Balken im gehobelten Zustand wurden auf ihre Biegefestigkeit hin untersucht.

Der Estrichmörtel wurde anhand der EN 13813:2002 auf alle relevanten Eigenschaften hin untersucht.

Anlehnend an eine zurückliegende Studie des Fachgebiet Tragwerksentwicklung und Bauphysik wurden die geplanten Wände aus Altholz mit anderen tragenden Außenwänden sowohl in Trocken- und Leichtbauweise als auch in massiver Bauweise hinsichtlich möglicher Umwelteinwirkungen verglichen. Zur Bewertung der Umweltaspekte sowie potenziellen Umweltwirkungen wie die Nutzung von Ressourcen und die Umweltauswirkungen von Emissionen wurden dazu die Methode der Ökobilanzierung nach DIN EN ISO 14040: 2021-02, DIN EN ISO 14044:2021-02 sowie DIN EN 15804:2020-03 angewendet.

Die Studie ist dabei wie folgt aufgebaut:

Als erstes wird im Kapitel 3 auf die Ziele und den Untersuchungsrahmen des Forschungsprojekts eingegangen. Hier werden die mechanischen Experimente und Sichtprüfungen beschrieben. Bei der Ökobilanzierung wird definiert, welche Systeme untersucht werden, welche Annahmen angesetzt werden und wo die Systemgrenzen der Studie liegen.

Im Kapitel 4 wird auf die durchgeführten Untersuchungen eingegangen und erklärt, was untersucht wird. In diesem Kapitel werden auch die Ergebnisse der Prüfungen und der Ökobilanzierung vorgestellt.

Im Kapitel 5 wird ein Fazit über das Forschungsprojekt gezogen.

3. Ziele und Untersuchungsrahmen der Studie

3.1. Untersuchung des Bestandholzes

Um eine Bewertung vornehmen zu können, ob das Holz aus dem Dachstuhl die Anforderungen für tragende Wände erfüllt, wurden Prüfungen durchgeführt, durch welche die Festigkeitsklassen des Holzes festgestellt werden können. Dazu wurden 30 Balken zufällig ausgewählt und untersucht.

Die Balken wurden in dem angelieferten Zustand getrocknet und einer visuellen Sortierung nach der Festigkeitsklasse unterzogen. Danach wurde zerstörungsfrei eine 4-Punktbiegung durchgeführt, um eine Sortierung nach den Festigkeitsklassen durchzuführen.

Die Balken wurden im Anschluss auf einen einheitlichen Querschnitt sowie auf gleiche Länge zugeschnitten. Das Ziel der Bearbeitung der Balken war es zu überprüfen, ob sich die Festigkeit und der Elastizitätsmodul sowie die Sortierklasse ändern.

3.1.1. Visuelle Holzsortierung

Hölzer werden in Sägewerken einer visuellen Sichtprüfung unterzogen und eine von drei Sortierklassen eingeteilt. Die Kriterien, wonach das Holz sortiert wird, sind in Deutschland in der Normenreihe DIN 4074 geregelt. Die Bezeichnung der Sortierklassen bestehen aus einem oder zwei Buchstaben, je nach Holzart, und der Zahl 7, 10 oder 13. Die Untersuchungskriterien sind folgende:

- Äste
- Faserneigung
- Markröhre
- Jahrringbreite
- Risse
- Baumkante
- Krümmung
- Verfärbungen, Fäule
- Insektenfraß von Frischholzinsekten
- Sonstige Sortiermerkmale
- Holzfeuchte
- Weitere Sortierkriterien

Mit den Sortierklassen für Nadel- und Laubschnittholz kann mittels der EN 338 sowie der EN 1912 auf die jeweilige Festigkeitsklasse für Holz geschlossen werden.

3.1.2. Festigkeitsklasse Holz

Bauhölzer sind in verschiedene Festigkeitsklassen eingeteilt. In diesen Klassen werden charakteristische Eigenschaften ausgewiesen, welche für statische Bemessungen von Holzkonstruktionen verwendet werden.

Die zu untersuchenden Hölzer werden auf ihre Biegefestigkeit, Steifigkeit und Rohdichte hin untersucht. Für jedes Untersuchungskriterium wird der charakteristische Wert ermittelt und mit den genormten Anforderungen der EN 338 verglichen. Um in eine Festigkeitsklasse eingeteilt zu werden, muss das jeweilige Holz allen Anforderungen der Festigkeitsklasse genügen. Die Nadelhölzer werden aufgrund von Hochkantbiegeprüfungen in die Festigkeitsklassen C12 bis C50 eingeteilt. Werden Nadelhölzer auf Grundlage von Zugprüfungen eingeteilt, lauten die Festigkeitsklassen T8 bis T30. Laubhölzer werden nur auf Grundlage von Hochkantbiegeprüfungen in die Festigkeitsklassen D18 bis D80 eingeteilt.

In dieser Untersuchung wird die Hochkantbiegeprüfung anstelle von Zugprüfungen durchgeführt. Für die Prüfungen der Festigkeitsklassen verweist die EN 338 auf die EN 408. Die EN 408 fordert, für die Biegeprüfungen eine 4-Punkt-Biegeprüfung durchzuführen.

3.1.3. 4-Punkt-Biegung

Die statischen Prüfungen wurden nach EN 408 Abschnitte 9 und 10 durchgeführt. Es wurde der globale sowie der lokale Elastizitätsmodul der Proben bestimmt.

Die Länge der Prüfkörper entsprach in allen Fällen der 19-fachen Querschnittshöhe.

Bei der Durchführung der Prüfungen entsprach die Spannweite zwischen den Auflagern der 18-fachen Querschnittshöhe. Die Prüfgeschwindigkeit betrug (0,003 h) in mm/s.

Die Messung der Wege für den globalen Elastizitätsmodul erfolgte über den Traversenweg und die Messung der Wege für den lokalen Elastizitätsmodul erfolgte mit zwei externen Wegaufnehmern, welche die Verformungen der Proben in der neutralen Faser aufnahmen. Diese waren mittels einer Vorrichtung an den Proben angebracht. Die Vorrichtung selbst war spannungsfrei an je zwei Aufhängungen auf jeder Seite der Proben befestigt. Die Belastung wurde mit einer Kraftmessdose erfasst, der Maximalwert wurde automatisch gespeichert. Der Weg wurde maschinenintern gemessen. Die Kraft und der Weg wurden per EDV aufgezeichnet.

Für die Bestimmung des lokalen Elastizitätsmoduls werden 10 % und 40 % der zu erwartenden Maximallast angefahren. Zwischen diesen beiden Punkten wird eine Regressionsanalyse durchgeführt. Ermittelt werden muss nach DIN EN 408:2012-10 die längste Kurve, bei welcher der Korrelationskoeffizient mindestens 0,99 beträgt. Sofern mindestens 20 % und 30 % der zu erwartenden Maximallast in der Kurve vorhanden sind, wird der lokale Elastizitätsmodul mit folgender Formel bestimmt:

$$E_{m, \text{lokal}} = \frac{a l_1^2 * (F_2 - F_1)}{16I(w_2 - w_1)}$$

Dabei ist:

$F_2 - F_1$ die Laststeigerung

$w_2 - w_1$ die Verformungszunahme entsprechend der Laststeigerung

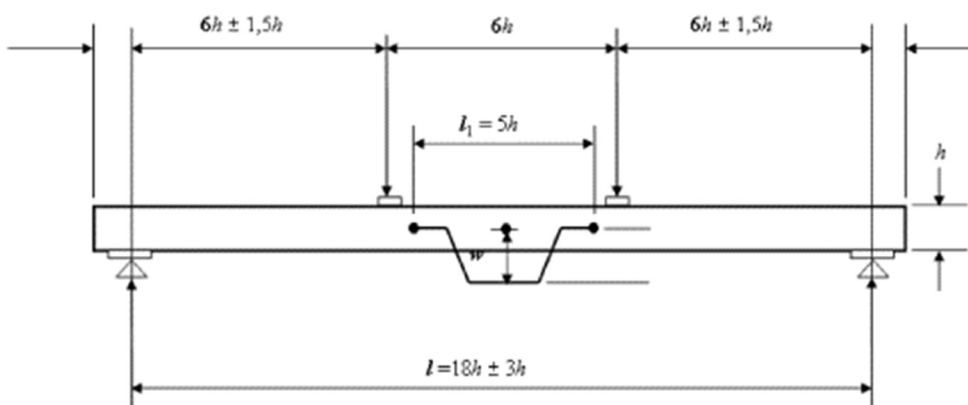


Abbildung 1 Prüfanordnung zur Bestimmung des lokalen Elastizitätsmoduls

Für die Bestimmung des globalen Elastizitätsmoduls wird genauso vorgegangen wie bei dem lokalen Elastizitätsmodul. Es wird folgende Formel herangezogen:

$$E_{m,global} = \frac{3al^2 - 4a^3}{2bh \left(2 \frac{w_2 - w_1}{F_2 - F_1} - \frac{6a}{5Gbh} \right)}$$

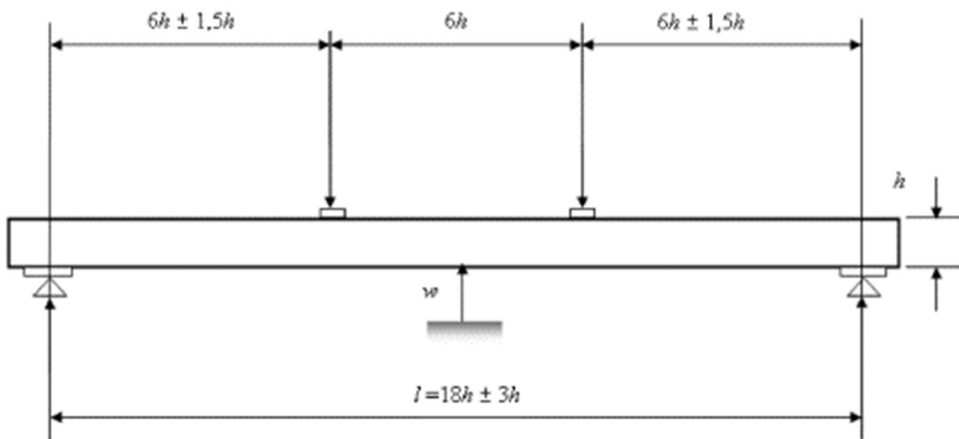


Abbildung 2 Prüfanordnung zur Bestimmung des globalen Elastizitätsmoduls

3.2. Steinholz

Die in der Holzverarbeitung entstehenden Reste wie Schnittreste, Sägepläne und Ähnliches werden in der Regel thermisch verwertet. Diese Holzreste können auch anderweitig verwendet werden.

Da diese Studie die Weiterverwendung von Altholz untersucht, welches vor Ort bearbeitet wird, kam die Idee auf, die Sägespäne für die Herstellung von Magnesiaestrich zu verwenden. Die Verwendung von Sägeplänen ist eine sinnvolle und nachhaltige Möglichkeit für die Aufstockung von Wohnhäusern.

Die Sägespäne und Hobelspäne wurden beim Zuschneiden der Probekörper für andere Prüfungen aufgefangen. Die Sägespäne aus den Längsschnitten wurden händisch gesiebt, sodass einerseits die mehlartigen feinen Späne und andererseits die langen Fasern verwendet werden konnten. So entstanden drei Faserarten / Holzkorngrößen für die Prüfungen: erstens die langen Sägespäne, zweitens die gesiebten Sägespäne und drittens die Hobelspäne.

Es wurde ein Steinholzhersteller kontaktiert, um vergleichbares Material und ein Mischungsverhältnis herauszubekommen. Der Hersteller stellte einen Steinholzprobekörper (Original, Abkürzung „O“) und seine Holzhäckseln zur Verfügung. Zusätzlich konnten die benötigten Materialien besorgt werden. Die Ausgangsstoffe für Steinholz sind Magnesiumoxid, Magnesiumchlorid, Wasser, Holzfasern oder -mehl und Sand.

3.2.1. Herstellung der Probekörper

Die Formen für die Probekörper wurden anhand des Probekörpers des Herstellers nachgebaut. Die Formen hatten Innenmaße von 29 cm x 29 cm x 3 cm und wurden mit Packpapier als Trennlage ausgekleidet.

Die Mischungen von Holzfasern (ca. 5,4 l) und Sand (3849,5 g) wurden zuerst passend zusammengestellt und gemischt. Dafür wurden die Holzfasern in Volumen (11,5 cm x 17 cm x 27,5 cm, ca. 5,4 l) abgemessen. Das Magnesiumchlorid (MgCl) (4101,8 g) wurde in 7,5 l Wasser aufgelöst, anschließend wurde das Magnesiumoxid (MgO) (5223,3 g) in der Magnesiumchlorid-Lösung eingerührt. Zu der Sand-Holz-Mischung wurde von der Lösung so viel hinzugefügt und eingerührt, bis sich eine leicht körnige, klebrige, relativ homogene Mischung eingestellt hat. Diese Mischung wurde in eine Form gefüllt, verteilt, verdichtet und geglättet. Die übrige Mischung wurde entsorgt. Die gefüllten Formen wurden gewogen und anschließend in der Klimakammer NK1 bei 20 °C / 65 % rel. Lf. zum Abbinden gelagert.

Insgesamt wurden sechs Probekörper mit den Formen hergestellt, deren Mischungsverhältnis und Bezeichnung in Tabelle 1 dargestellt ist.

Nach 21 Tagen Abbinden und Aushärten wurden die Steinholzplatten aus den Formen geholt. Aus den Platten wurden vier Probekörper nach EN 13892-1 mit den Abmessungen 16 cm x 4 cm x 3 cm geschnitten. Nach weiteren 7 Tagen wurden die Oberflächenhärteprüfung und die Biegezugprüfung durchgeführt.

Tabelle 1 Mischungsverhältnis der Probekörper

Nr.	Bezeichnung / Name	Abkürzung	Zusammensetzung		
			Holzanteil (ca. 5,4 l) [g]	Sand [g]	MgCl-MgO-Lösung [l]
1.1	Holzhäcksel, verdichtet	HHv	740,5	3849,5	2,4
1.2	Holzhäcksel, schwach verdichtet	HHs	740,5	3849,5	2,4
2	Lange Sägespäne	LS	179,5	3849,5	2,0
3.1	Gesiebte Sägespäne, verdichtet	GSv	401,8	3849,5	2,2
3.2	Gesiebte Sägespäne, schwach verdichtet	GSs	401,8	3849,5	2,2
4	Hobelspäne	HS	620,7	3849,5	2,4

3.2.2. Untersuchungen

Es wurden verschiedene mechanische Untersuchungen durchgeführt. Diese werden in diesem Kapitel genauer vorgestellt.

Rohdichte

Die gegossenen Probekörper wurden wöchentlich gewogen, sodass die Rohdichte des Materials über die Abbindezeit dargestellt werden kann. Die Abmessungen wurden nach dem Ausschalen gemessen. Die Masse der Form wurde vom Gewicht jeweils abgezogen.

Die zugeschnittenen Prüfkörper wurden direkt nach dem Zuschnitt und vor der Prüfung gewogen. Die äußeren Abmessungen wurden ebenso gemessen und dokumentiert.

Magnesiaestriche bis zu einer Rohdichteklasse von 1,6 werden als Steinholz bezeichnet. Daraus ergab sich die Anforderung, dass Steinholz eine Rohdichteklasse von maximal 1,6 aufweisen darf. Das entspricht einer Rohdichte von $\rho = 1,6 \text{ kg/dm}^3$.

Oberflächenhärte

Die Prüfkörper wurden mit der glattgestrichenen Seite nach oben in die Prüfmaschine eingelegt. Für die Prüfung wurde eine polierte Stahlkugel mit einem Durchmesser von 10 mm, welche an einer Aufnahme der Prüfmaschine befestigt war, auf die Fläche gedrückt. Während der Prüfung wurden Kraft und Weg durchgehend von der Prüfmaschine aufgezeichnet. Die Kugel wurde stoßfrei mit der Vorlast FV von $(10 \pm 0,1) \text{ N}$ aufgebracht. Nach Erreichen der Vorlast FV wurden Kraft und Weg genullt. Anschließend wurde die Kraft bis zum Erreichen der Hauptlast F von $(500 \pm 5) \text{ N}$ konstant gesteigert. Die Hauptlast wurde für 60 Sekunden aufrecht gehalten. Dann wurde auf die Vorlast entlastet und wieder für 60 Sekunden gehalten. Die Eindringtiefe t wurde nach 60 Sekunden Vorlast bestimmt.

Die Oberflächenhärte SH, in N/mm^2 , wird mit folgender Formel berechnet:

$$SH = \frac{F}{d \cdot \pi \cdot t}$$

Dabei ist:

- F Hauptlast [N]
- d Durchmesser der Stahlkugel [mm]
- t Eindringtiefe [mm]

Die Mindestanforderung an die Oberflächenhärte ergab sich aus EN 13813:2002 Tabelle ZA.1.3:
 $SH \geq SH30 = 30 \text{ N/mm}^2$

Biegezugfestigkeit

Die Probekörper der Oberflächenhärteprüfung wurden wieder benutzt und in einem Drei-Punkt-Biegeversuch bis zum Bruch belastet. Sie wurden mit der glattgestrichenen Seite nach oben auf zwei Auflagerrollen mit einem Durchmesser d von 15 mm, die einen Achsabstand von $(100,0 \pm 0,5)$ mm hatten, aufgelegt und mittig mit einer Rolle von 30 mm mit der Kraft belastet. Die Rollen waren parallel zueinander ausgerichtet. Die Last wurde mit einer Geschwindigkeit von (50 ± 10) N/s bis zum Bruch gesteigert. Die Bruchlast F_f in Newton [N], wurde protokolliert. Kraft und Weg wurden durchgehend von der Prüfmaschine aufgezeichnet.

Die Biegezugfestigkeit wird mit folgender Formel berechnet:

$$R_f = \frac{1,5 F_f * l}{b * d^2}$$

Dabei ist

R_f Biegezugfestigkeit [N/mm²]

F_f Bruchlast [N]

l Auflagerabstand [mm]

b Prüfkörperbreite in der Mitte gemessen [mm]

d Höhe des Prüfkörpers in der Mitte gemessen [mm]

Die Mindestanforderung an die Biegezugfestigkeit R_f ergibt sich aus EN 13813:2002 Tabelle ZA.1.3:

$$R_f \quad F1 = 1 \text{ N/mm}^2$$

3.3. Ökobilanzierung

Für den Auftraggeber dieser Untersuchung wurden zur oben angesprochenen Quantifizierung ökologischer Produkteigenschaften wissenschaftlich belegte Ökobilanzdaten unter Verwendung des Programms eLCA des BBSR (*Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung, Referat II 6 Bauen und Umwelt*) verglichen und bewertet. Dabei wurden positive als auch nachteilige Eigenschaften aller untersuchten Wandsysteme betrachtet.

Die Ergebnisse dieser Untersuchung sind zur Veröffentlichung vorgesehen und enthalten entsprechende vergleichende Aussagen zu den Umweltwirkungen der Trocken- und Massivbauweise.

3.3.1. Untersuchte Wandsysteme

Es wurden verschiedene Wandsysteme in Trockenbauweise untersucht. Die Außenwand ist mit Wänden der Trocken- sowie der Massivbauweise verglichen worden.

Für die Außenwände wurden verschiedene Systeme mit außenliegendem Wärmedämmverbundsystem betrachtet. Die Fassaden wurden bei keiner der Wände für die Ökobilanzierung betrachtet. Bei der Innenwand ist das Wärmedämmverbundsystem in der Mitte der Wand positioniert.

Für die geplante tragende Außenwand aus Altholz ist die Fichte auf eine Dicke von 120 mm gebracht worden. Die Fichtenholzwand wird zweiseitig beplankt, auf der Innenseite der Wand mit einer 18 mm dicken Gipsfaserplatte und auf der außenliegenden Seite mit einer 15 mm dicken Gipsfaserplatte. Als Dämmung wird eine 255 mm dicke Mineralwolle verwendet.

Als erste Vergleichswand wird derselbe Wandaufbau verwendet, es wird nur das Altholz mit Brettsperrholz ausgetauscht. Um eine andere Art von Leichtbauwand zu vergleichen wird eine beidseitig beplankte Holzständerwand verwendet. Als Beplankung werden zwei 12,5 mm dicke Gipsfaserplatten verwendet. Das Konstruktionsvollholz und die dazwischenliegende Mineralwolldämmung haben eine Dicke von 140 mm. Zur Außenseite hin wird eine Steinwolle-Dämmung verwendet mit einer Dicke von 40 mm.

Als Massivmauerwand wird eine Kalksandsteinwand verwendet, welche aus einer 10 mm dicken Gipsputzschicht, einer 240 mm dicken Schicht aus Kalksandstein und einer 180 mm dicken Steinwoll-Dämmschicht besteht.

3.3.2. Funktionseinheit

Die tragende Außenwand erfüllt in ihrer technischen Funktion Belange des Wärmeschutzes. Alle aus dem Altholz entwickelten Außenwände haben eine Feuerwiderstandsklasse von R60-EI30/EI30. Die tragende Innenwand hat eine Feuerwiderstandsklasse von REI 60. Die Massivwand aus Kalksandstein ist in die Feuerwiderstandsklasse F 90-A einzuordnen und somit feuerbeständig.

Bei beiden Wandsystemen wurde jeweils ein Wandausschnitt mit den Abmessungen $B / H = 6,0 / 3,0$ m betrachtet. Anschlüsse für seitlich angrenzende Bauteile wurden nicht berücksichtigt. Zusätzlich wird für alle Bauteile eine Lebensdauer definiert. Geht die Nutzungsdauer über diese Lebensdauer hinaus, so müssen diese Bauteile im Rahmen der Erneuerung ausgetauscht werden.

Für die tragende Innenwand wird eine Nutzungsdauer von 100 Jahren zugrunde gelegt. In der aktuellsten Ausgabe des „*Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen*“ zu dem Thema Nutzungsdauern von Bauteilen¹ wird eine Mindestnutzungsdauer von 50 Jahren angegeben. Da das Holz aber immer noch gute mechanische Kenndaten aufweist, ist eine solche Nutzungsdauer angebracht. Vor allem, da Gipsfaserplatten die Wand aussteifen und an der Außenseite ausgetauscht werden können.

¹ <https://www.nachhaltigesbauen.de/austausch/nutzungsdauern-von-bauteilen/> (abgerufen am 9.7.2021)

Bei den Referenz-Außenwänden wurde in Anlehnung an eine alte Studie des Instituts für Tragwerksentwicklung und Bauphysik eine Nutzungsdauer von 80 Jahren zugrunde gelegt. Dies deckt sich mit dem oben genannten „*Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen*“. Da das Altholz seit den 1940ern im Einsatz ist und es in Experimenten zu keiner starken Reduktion der mechanischen Festigkeit kam, wurde hier für beide Außenwände eine Nutzungsdauer von 80 Jahren angenommen. Durch den nur anteiligen Ansatz des Energieaufwands respektive der Wirkgrößen für den Erneuerungszyklus hat der Ansatz der Lebensdauer zudem keinen nennenswerten Einfluss auf die Kernaussage der vergleichenden Studie. Eine Erläuterung zur anteiligen Berücksichtigung der Umweltindikatoren ist unten angefügt.

Für den Erneuerungszyklus wird in der Sachbilanz wie folgt vorgegangen:
Bei der Erstaufstellung wurde für jedes Bauteil der volle Wert der Umweltindikatoren angesetzt, eine Rückrechnung von beispielsweise 80 Jahren Lebenserwartung auf eine Nutzungsdauer von 30 Jahren fand demnach nicht statt. Für den Erneuerungszyklus nach dem Ende der ersten Lebensdauer wurden die Primärenergieaufwände sowie Wirkgrößen anteilig angesetzt. Diese Vorgehensweise des anteiligen Ansatzes wurde analog auch bei den Transporten sowie dem Ansatz zum Lebensende („end-of-life“) angewendet.

3.3.3. Systemgrenzen und Annahmen

Für die Ermittlung des Ressourcenverbrauchs sowie der Wirkgrößen wurde das Programm eLCA des Bundesministeriums für Verkehr, Bau- und Stadtentwicklung (siehe auch www.bauteileditor.de) verwendet. Dieses Programm greift auf die Daten der einzelnen Baustoffe und Produkte aus der Datenbank Ökobau.dat zurück.

Als Systemgrenze wurde ein umfassender Ansatz gewählt, welcher die Herstellung inklusive sämtlicher Vorketten (Energiegewinnung, Rohstofftransporte, eigentliche Herstellung) sowie den Transport vom Werk zur Baustelle erfasst. Weiterhin ist, sofern als Folge einer kürzeren Lebensdauer im Vergleich zur Nutzungsdauer erforderlich, auch die Erneuerung inkludiert. Für den end-of-life sind der Transport vom Objekt zur Deponie, Müllverbrennungsanlage oder dem entsprechenden Werk zur Weiterverarbeitung einbezogen, ebenso wie die eigentliche Entsorgung oder Nachnutzung am „end-of-life“. In dieser Untersuchung wurde eine Deponierung als Bauschutt vorausgesetzt, sofern ein Recycling des Baustoffes nicht möglich ist oder praktisch nicht durchgeführt wird.

Bei dem Transport vom Werk zur Baustelle sowie auch beim Recycling oder der thermischen Verwertung wird von einer mittleren Transportstrecke einschließlich An- und Abfahrt von 400 km für alle Bauprodukte ausgegangen. Für das Altholz wird nur der Abtransport von 100 km angenommen.

Allokationsverfahren

In Sachbilanzen ist es notwendig, grundlegende Prozesse innerhalb eines Produktsystems, welche Energie- und Materialflüsse enthalten, miteinander zu verbinden. Bei der industriellen Herstellung entstehen Produkte aus Zwischenprodukten oder Rohmaterialien, welche durch Recycling aus ausrangierten Produkten gewonnen werden. Die Zuweisung von verwendeten Materialien und Energieflüssen zu Produkten ist hierbei bereits in den verwendeten Umweltdeklarationen beziehungsweise Datensätzen der Ökobau.dat entsprechend hinterlegt.

Wahl der Wirkungskategorien

Daten der Sachbilanz während des Produktlebenszyklus stellen die Basis für die Wirkungsabschätzung dar. Die Zuordnung der Sachbilanzergebnisse zu den Wirkungsindikatoren sowie deren Werteberechnung wurde dabei in den Umwelt-Produktdeklarationen sowie der verwendeten Datenbank Ökobit.dat bereits vorgenommen. Folgende allgemein anerkannte ökologische Parameter wurden betrachtet:

- Treibhauspotential (GWP) in [kg CO₂ - Äquivalent]
- Ozonabbaupotential (ODP) in [kg R11 Äquivalent]
- Versauerungspotential (AP) in [kg SO₂ - Äquivalent]
- Eutrophierungspotential (EP) in [kg PO₄- Äquivalent]
- Photochemisches Ozonbildungspotential (POCP) in [kg C₂H₄ – Äquivalent]

Die Auswahl der Kategorien stellt nur einen Ausschnitt der umfangreichen Faktoren ökologischer Auswirkungen dar. Diese wird allerdings als gängige Schablone bei der Betrachtung von Ökobilanzen angewendet.

Die einzelnen Wirkungskategorien wurden dabei untereinander nicht gewichtet, sondern getrennt bewertet. Im Fokus dieser vergleichenden Bewertung mittels Ökobilanz steht hier der Primärenergiebedarf, unterteilt in erneuerbar (PE) und fossil bzw. nicht erneuerbar (PE ne) sowie das Treibhauspotential.

Datensammlung und Datenherkunft

Die Produktumweltdeklarationen sind der Datenbank „Ökobit.dat“ des Bundesministeriums für Verkehr, Bau- und Stadtentwicklung entnommen und beinhalten die jeweiligen Umweltindikatoren von der Wiege bis zum Tor („cradle to gate“).

Datenqualität und –validierung

Die in dem eLCA verwendeten Daten sind von einer unabhängigen Stelle nach DIN EN 15804 zertifiziert worden und bilden einen Durchschnittswert für Deutschland ab.

Annahmen und Einschränkungen

Zur Beurteilung der Ergebnisse und Ansätze wurden nachfolgend einige Vorgehensweisen sowie Grundlagen kritisch betrachtet und bewertet.

Die Betrachtung des Transports beinhaltet systembedingte Ungenauigkeiten, da bei der Herstellung als auch bei dem end-of-life-Ansatz die Erzeugerwerkdichte sowie Dichte der weiterverarbeitenden Betriebe unberücksichtigt blieb. Hier könnten detailliertere Angaben aus weiterführenden Untersuchungen und Datenerhebungen genauere Ergebnisse liefern. Gleiches gilt für die Berücksichtigung des Abrissgutes, das dem Recycling zugeführt wird, aufgrund fehlender Daten jedoch unberücksichtigt bleibt. Generell ist der tatsächliche Anteil der Nachnutzung heute noch gering und deshalb für diese Untersuchung ohne Relevanz.

Da es für Altholz keine genauen Daten gibt, sind die Standardwerte für die verwendete Fichte verwendet worden. Da das Programm eLCA die Auswahloption „im Bestand“ aufweist, bei dem der Herstellungsprozess wegfällt (A1-A4), wurde diese Option ausgewählt. Die Fichte wird zwar vom Dach heruntergehoben, am Boden bearbeitet und wieder auf das Dach gehoben – dieser Aufwand liegt jedoch deutlich unterhalb des Aufwands der „klassischen“ Herstellung von Holzelementen.

Zur Zeit der Erarbeitung dieser Ökobilanzierung stand nicht fest, von welchen Herstellern die Bauteile verwendet werden, daher sind nur Durchschnittswerte der ÖKOBAUDAT angewandt worden. Bei den betrachteten Wänden wurden die Durchschnittswerte verwendet und sind miteinander vergleichbar.

Kritische Prüfung

Um die Anforderungen der DIN ISO 14040/14044 an vergleichende Ökobilanzierung zu erfüllen, soll das kritische Prüfungsverfahren unter anderem sicherstellen, dass angewendete Methoden mit der Norm übereinstimmen, wissenschaftlich und technisch gültig sowie in Bezug auf das Ziel der Untersuchung hinreichend und zweckmäßig sein. Diesbezüglich ist es von den Auftraggebern vorgesehen, im Falle einer Veröffentlichung die kritische Prüfung durch einen externen Sachverständigen durchführen zu lassen. Das noch ausstehende Gutachten mit den Reaktionen, Stellungnahmen und Empfehlungen ist dieser Studie abschließend beizufügen.

4. Durchgeführte Untersuchungen

Es sind 30 Probekörper vor Ort stichprobenartig ausgewählt worden. Nach der Anlieferung der Proben wurden diese auf das Normklima 20°C/65% relative Luftfeuchte klimatisiert.

4.1. Untersuchung der Holzqualität

4.1.1. Visuelle Bestimmung der Sortierklasse im angelieferten Zustand

Die zu untersuchenden Holzbalken wurden im angelieferten Zustand einer visuellen Prüfung nach DIN 4074-1:2012-06 unterzogen, um die Sortierklasse zu bestimmen. Die Untersuchungen zur Einteilung der Proben in die Sortierklassen wurden zunächst an den rückgetrockneten Proben im Rohzustand durchgeführt.

In Abhängigkeit von der Höhe und Breite der Proben wurden die vorhandenen Äste, Risstiefen und Rissbreiten bewertet. Weitere zu bewertende Merkmale sind die Faserneigungen, Markröhrenanteile, Krümmungen, Druckholzanteile, Verfärbungen und Spuren von Insekten oder Befall durch holzerstörende Pilze.

Je nach Ausprägung der oben genannten Merkmale können die Proben in die Sortierklassen S13, S10 oder S7 eingeteilt werden, da es sich um Nadel-schnitthölzer handelt. Die Sortierklasse des jeweiligen Balkens ist die niedrigste Sortierklasse der untersuchten Kategorien.

Abbildung 3 zeigt die Holzbalken im angelieferten Zustand.



Abbildung 3 Angelieferte Holzbalken

In Abbildung 4 ist ein Balkenquerschnitt zu sehen, welcher Baumkanten und Risse aufweist. In Abbildung 5 wird die Größe eines Astes mittels einer Schablone untersucht.



Abbildung 4 Balken mit Riss und Baumkanten



Abbildung 5 Balken mit Schablone für Sichtprüfung

Tabelle 2 Holzsortierung nach EN 4074-1 - Hölzer im Anlieferungszustand

Nr.	Feuchte [%]	Breite [mm]	Höhe [mm]	Äste	Baumkante	Schwindrisse	Weitere Sortiermerkmale	Sortierklasse	Holzart
1	16,8	100	135	S13	S13	S13	S13	S13	Fichte
2	16,0	100	140	S10	S13	S10	S13 Ringschäle einseitig	S10	Fichte
3	21,5	95	135	S10	S13	S10	S13	S10	Fichte
4	16,6	95	135	S13	S13	S7	S13	S7	Fichte
5	19,1	100	135	S10	S13	S10	S13	S10	Fichte
6	19,3	95	140	S13	S13	S10	S10	S10	Fichte
7	18,6	135	13,5	S10	S13	S10	S10	S10	Fichte
8	16,2	100	140	S13	S13	S7	S13	S7	Fichte
9	16,4	95	140	S13	S13	S7	S13	S7	Fichte
10	16,6	95	160	S10	S13	S10	S10 Faserneigung	S10	Kiefer
11	16,4	95	150	S13	S13	S10	S10 Jahrringbreite	S10	Kiefer
12	19,1	95	135	S13	S7	S13	S13	S7	Fichte
13	16,0	100	140	S10	S13	S13	S13	S10	Fichte
14	19,6	115	155	S13	S13	S10	S13	S10	Fichte
15	19,6	100	140	S10	S13	S13	S13	S10	Fichte
16	17,0	100	140	S10	S13	S10	S10	S10	Fichte

Fortsetzung Tabelle 2 Holzsortierung nach EN 4074-1 - Hölzer im Anlieferungszustand

Nr.	Feuchte [%]	Breite [mm]	Höhe [mm]	Äste	Baumkante	Schwindrisse	Weitere Sortiermerkmale	Sortierklasse	Holzart
17	18,7	100	140	S13	S13	S13	S13	S13	Fichte
18	19,5	75	155	S13	S13	S13	S13	S13	Fichte
19	15,9	100	150	S13	S13	S10	S10 Faserneigung	S10	Fichte
20	16,9	100	155	S10	S13	S10	S13	S10	Fichte
21	19,7	95	160	S13	S13	S10	S13	S10	Kiefer
22	23,6	95	160	S13	S13	S10	S13	S10	Kiefer
23	17,4	115	155	S13	S13	S10	S13	S10	Fichte
24	17,3	100	160	S10	S13	S10	S10 Jahrringbreite	S10	Kiefer
25	21,0	110	160	S10	S13	S10	S10	S10	Fichte
26	19,6	170	180	S13	S13	S10	S13	S13	Fichte
27	19,7	140	145	S13	S13	S10	Braunfäule / Kehlsparren	S10	Fichte
28	24,2	160	180	S13	S13	S13	S13	S13	Fichte
29	16,6	140	180	S13	S7	S13	S13	S7	Fichte
30	18,9	100	120	S10	S13	S10	S13	S10	Fichte

4.1.2. Bestimmung der Festigkeitsklasse, Balken im angelieferten Zustand

Um die Festigkeitsklasse nach DIN EN 338:2016 zu bestimmen, wurden die Balken im angelieferten Zustand einer 4-Punkt-Biegeprüfung nach DIN EN 408:2012 unterzogen. Da an diesen Balken weitere Prüfungen durchgeführt werden sollten, wurden die Balken zerstörungsfrei geprüft und es wurde nur der lokale und globale Elastizitätsmodul bestimmt.

Da zur Bestimmung des Elastizitätsmoduls 10 % und 40 % der Maximallast benötigt wird, wurde die maximale Last angenommen. Es wurde vermutet, dass das vorhandene Holz die Festigkeitsklasse C24 aufweist. Mit den Werten aus der DIN EN 338:2016 wurde die Maximallast für den jeweiligen Balken bestimmt.

Die Versuche sind bis zu 50 % der zu erwartenden Last gefahren. Die Ergebnisse der Prüfungen sind in Tabelle 3 zu sehen.

Tabelle 3 Biegeprüfungen - Hölzer im Anlieferungszustand

Pk.- Nr.	Last F [N]	Globaler Elastizitätsmodul $E_{m,global}$ [N/mm²]	Lokaler Elastizitätsmodul $E_{m,lokal}$ [N/mm²]
1	9.519	9.423	11.014
2	9.229	8.655	11.865
3	9.034	9.411	10.785
4	8.960	9.471	12.921
5	9.208	10.253	12.932
6	9.109	10.341	12.119
7	12.566	8.833	11.424
8	9.268	12.395	18.406
9	9.110	9.444	13.208
10	11.392	9.383	13.681
11	11.396	12.658	17.795
12	9.122	8.176	10.855
13	9.101	9.414	12.403
14	13.495	11.325	18.040
15	9.433	9.704	12.868
16	9.430	8.446	11.853
17	9.382	10.794	12.601
18	9.052	13.522	18.450
19	11.366	11.634	19.270
20	11.331	13.767	19.049
21	11.362	9.097	11.319
22	11.362	13.214	22.147
23	13.369	10.736	17.704
24	11.772	9.626	13.044
25	13.474	10.605	14.833
26	25.174	10.890	20.700
27	16.325	11.019	14.370
28	25.226	8.620	18.441
29	22.194	7.404	8.519
30	7.971	7.738	9.471
Mittelwert $m_{(x)}$			
	11.958	10.200	14.403
Standardabweichung $s_{(x)}$			
	4.570	1.684	3.619
Variationskoeffizient $v_{(x)}$			
	38,2 %	16,5 %	25,1 %

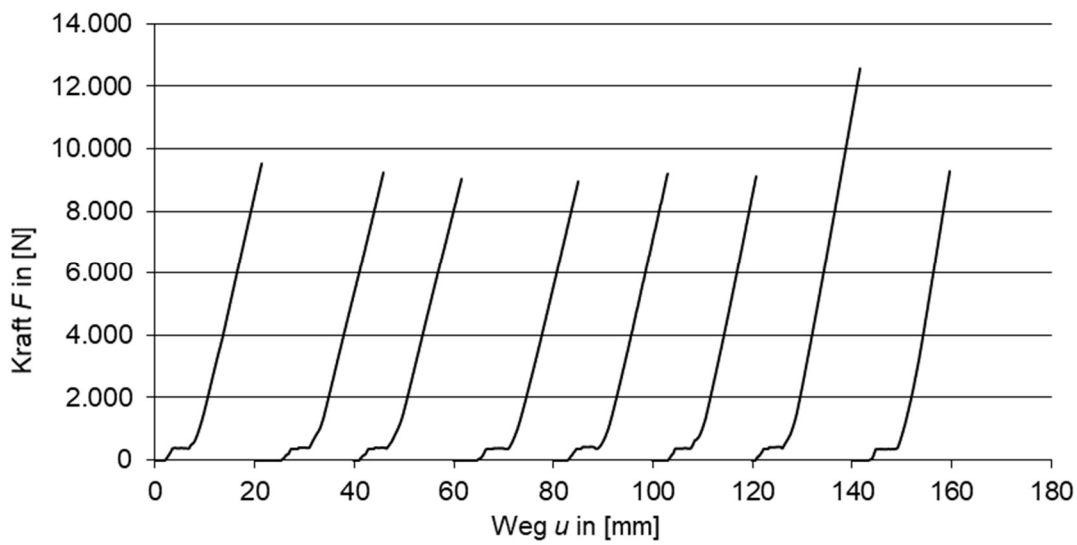


Abbildung 6 Biegeprüfungen- Hölzer im Anlieferungszustand, Prüfungen 1-8

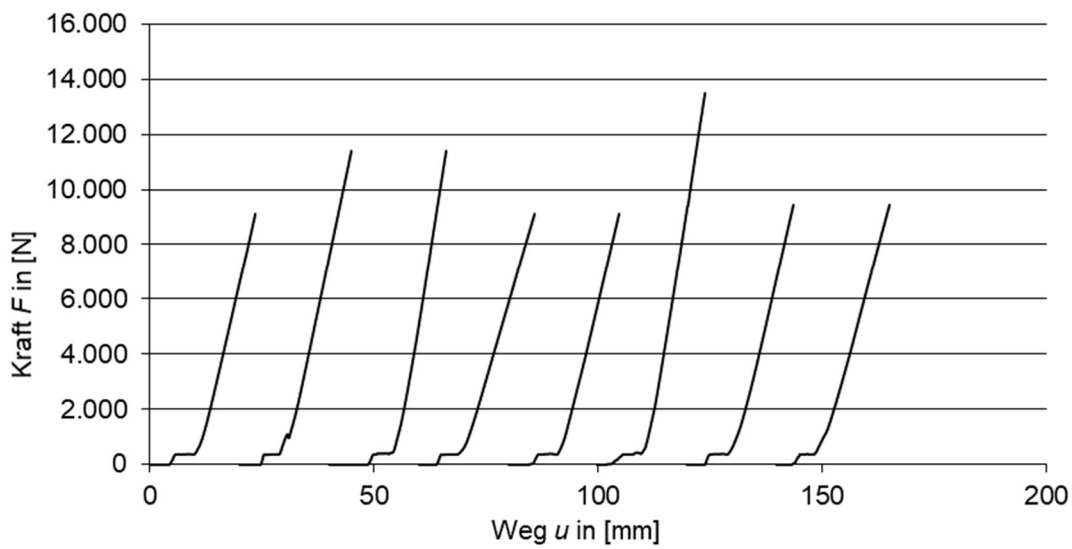


Abbildung 7 Biegeprüfungen- Hölzer im Anlieferungszustand, Prüfungen 9-16

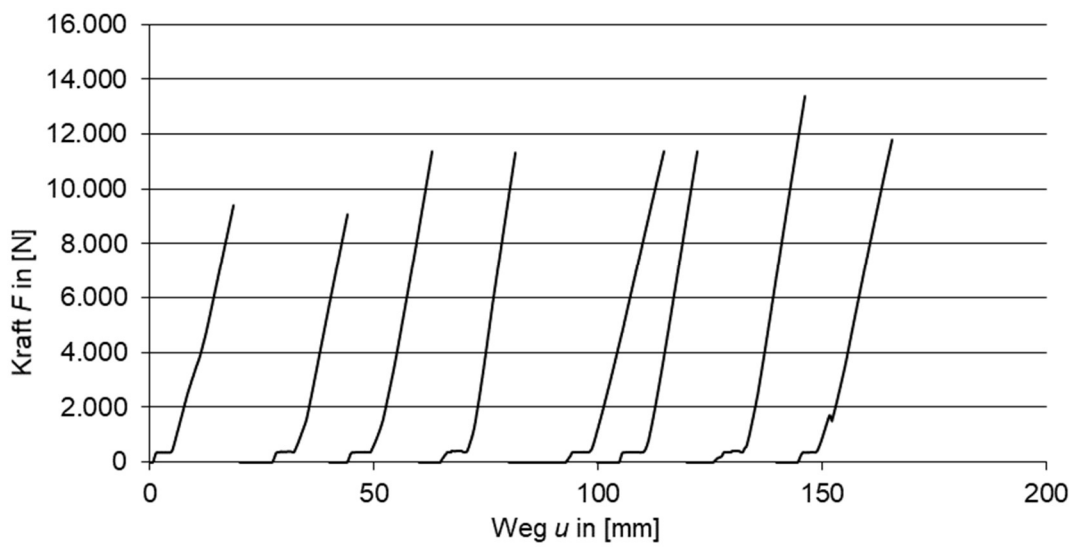


Abbildung 8 Biegeprüfungen- Hölzer im Anlieferungszustand, Prüfungen 17-24

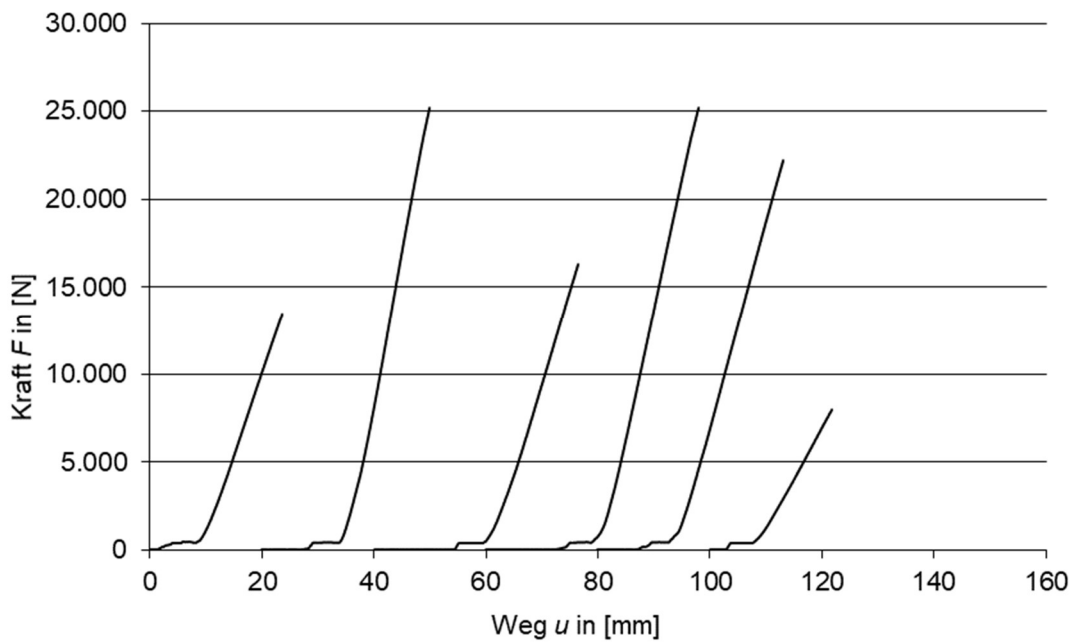


Abbildung 9 Biegeprüfungen- Hölzer im Anlieferungszustand, Prüfungen 25-30

4.1.3. Sortierklasse im gehobelten Zustand

Die Holzbalken sind nach der zerstörungsfreien 4-Punkt-Biegeprüfung auf einen einheitlichen Querschnitt mit einer Breite von rund 90 mm und eine Höhe von rund 120 mm gehobelt worden. Abbildung 10 zeigt einen Balken nach der Bearbeitung. Danach wurde erneut eine visuelle Prüfung nach DIN 4074-1:2012-06 durchgeführt. Die Ergebnisse sind in Tabelle 4 zu finden. Es gab die Hypothese, dass sich durch die Bearbeitung der Oberfläche die Sortierklasse verbessert.



Abbildung 10 Gehobelte Balken

Aus den ursprünglichen 30 Balken sind nur 22 Balken betrachtet worden. Das lag zum einen daran, dass zwei Probekörper Aussparungen aufgewiesen haben, bedingt durch die vorherige Benutzung. Dadurch wäre die Biegefestigkeit verfälscht worden. In Abbildung 11 sind zwei dieser Balken zu sehen. Der zweite Grund ist, dass durch die Angleichung der Querschnitte die Länge des Balkens nicht mehr den Anforderungen der Norm entsprochen hat, da diese zu kurz gewesen sind (vergleiche Abbildung 1).



Abbildung 11 Zwei Balken mit Vertiefungen

Tabelle 4 Sortierklasse - Hölzer im gehobelten Zustand

Pk.-Nr.	Balken-Nr.	Feuchte [%]	Breite [mm]	Höhe [mm]	Äste	Baumkante	Schwindrisse	Weitere Sortiermerkmale	Sortierklasse	Holzart
1	1	13,6	90	119	S13	S13	S13	S13	S13	Fichte
2	2	14,3	90	119	S10	S13	S10	S13 Ringschäle einseitig	S10	Fichte
3	3	16,8	90	120	S10	S13	S10	S13	S10	Fichte
4	4	13,8	90	119	S13	S13	S7	S13	S7	Fichte
5	5	17,2	90	119	S10	S13	S10	S13	S10	Fichte
6	6	16,4	90	119	S13	S13	S10	S10	S10	Fichte
7	8	14,4	90	119	S13	S13	S7	S13	S7	Fichte
8	9	14,1	90	119	S13	S13	S7	S13	S7	Fichte
9	10	12,9	90	119	S10	S13	S10	S10 Faserneigung	S10	Fichte
10	11	13,5	90	120	S13	S13	S10	S10 Jahrringbreite	S10	Kiefer
11	12	16,8	90	119	S13	S10	S13	S13	S10	Kiefer
12	13	13,8	90	120	S10	S10	S13	S13	S10	Fichte
13	14	19,2	109	119	S13	S13	S10	S13	S10	Fichte
14	15	17,3	89	119	S10	S13	S13	S13	S10	Fichte
15	16	15,1	89	120	S10	S13	S10	S10	S10	Fichte
16	17	13,8	91	119	S13	S13	S13	S13	S13	Fichte

Fortsetzung Tabelle 4 Sortierklasse - Hölzer im gehobelten Zustand

Pk.-Nr.	Balken-Nr.	Feuchte [%]	Breite [mm]	Höhe [mm]	Äste	Baumkante	Schwindrisse	Weitere Sortiermerkmale	Sortierklasse	Holzart
17	19	13,5	90	119	S13	S13	S10	S10 Faserneigung	S10	Fichte
18	20	14,0	90	120	S10	S13	S10	S13	S10	Fichte
19	21	15,9	90	120	S13	S13	S10	S13	S10	Kiefer
20	22	17,5	90	119	S13	S13	S10	S13	S10	Kiefer
21	23	17,6	109	120	S13	S13	S10	S13	S10	Fichte
22	24	13,8	90	119	S10	S13	S10	S10 Jahrringbreite	S10	Kiefer

4.1.4. 4-Punkt-Biegung gehobelter Balken

Auch im gehobelten Zustand sind die Holzbalken einer 4-Punkt-Biegung unterzogen worden. Nur sind in diesem Fall die Probekörper zu Bruch gefahren worden.

Nach DIN EN 14358:2006 ist die charakteristische Biegefestigkeit bestimmt worden.

Tabelle 5 Biegeprüfungen - Hölzer im gehobelten Zustand

Pk.- Nr.	Maximal- last F_{\max} [N]	Globaler Elastizitätsmodul $E_{m,global}$ [N/mm ²]	Lokaler Elastizitätsmodul $E_{m,lokal}$ [N/mm ²]	Festigkeit f_m [N/mm ²]
1	28.655	10.620	14.006	48,57
2	20.092	10.367	13.846	33,79
3	20.609	10.055	16.476	34,64
4	23.787	10.379	12.210	40,30
5	20.063	11.382	14.109	33,86
6	27.450	11.210	13.299	46,55
7	35.727	13.803	20.377	60,00
8	34.542	11.481	16.424	58,32
9	20.392	9.959	9.441	34,52
10	18.546	12.462	16.514	31,04
11	21.905	10.174	12.846	36,85
12	26.019	10.404	13.142	43,67
13	28.705	11.767	14.151	39,92
14	16.928	9.865	12.971	28,88
15	23.866	9.577	10.715	40,29
16	29.832	10.490	12.073	49,72
17	29.485	12.473	17.406	49,80
18	34.839	13.158	19.122	58,57
19	12.299	7.676	8.268	20,50
20	36.147	14.351	19.548	61,10
21	36.534	11.789	16.161	50,52
22	18.369	9.601	12.977	30,95
Mittelwert $m_{(x)}$	25.672	11.047	14.367	42,38
Standardabweichung $s_{(x)}$	7.042	1.545	3.127	11,22
Variationskoeffizient $v_{(x)}$	27,4 %	14,0 %	21,8 %	26,5 %
Charakteristische Festigkeit $f_{m,k}$				23,98

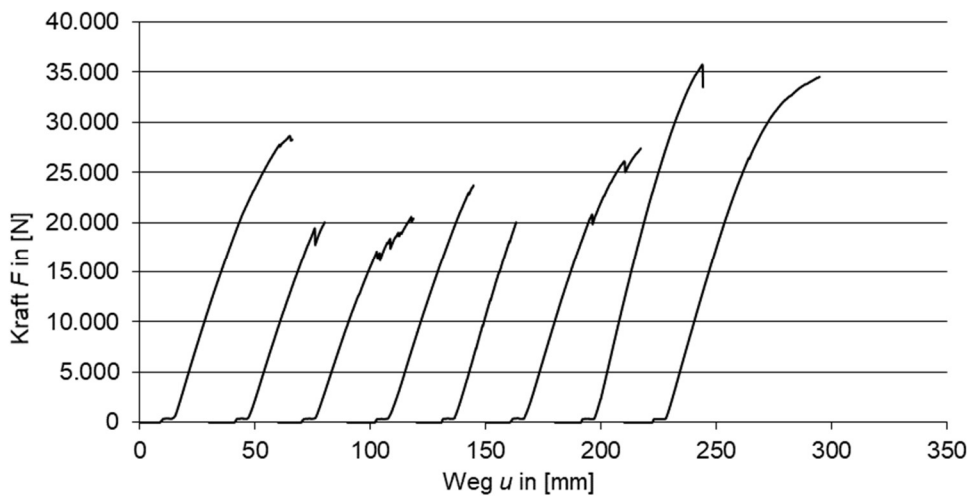


Abbildung 12 Biegeprüfungen- Hölzer nach Zuschnitt, Prüfungen 1-8

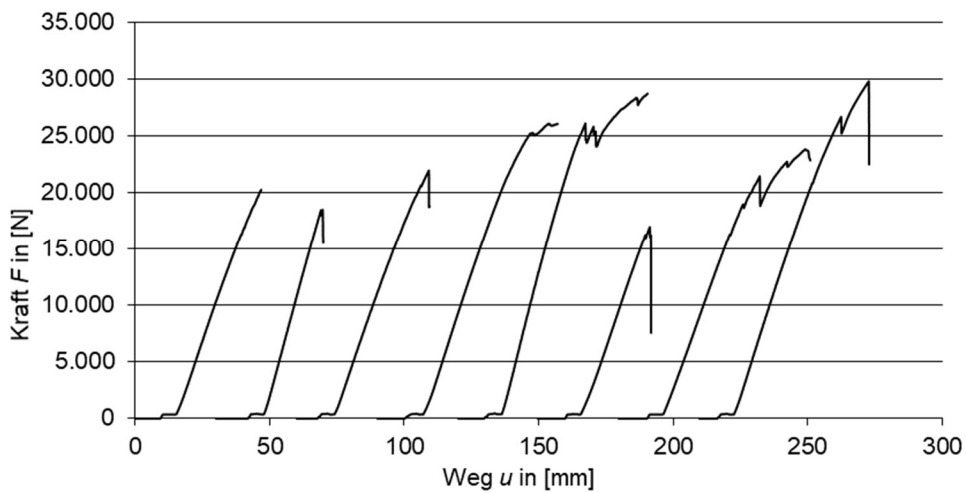


Abbildung 13 Biegeprüfungen- Hölzer nach Zuschnitt, Prüfungen 9-16

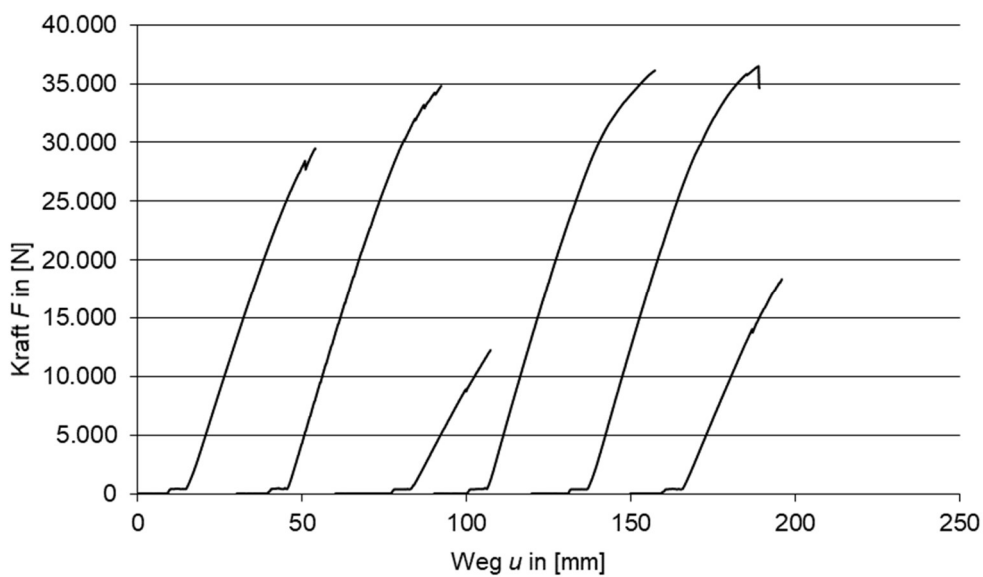


Abbildung 14 Biegeprüfungen- Hölzer nach Zuschnitt, Prüfungen 17-22

4.1.5. Rohdichte

Die Bestimmung der Rohdichte wurde nur an zugeschnittenen Proben aus den gehobelten Balken bestimmt. Zu diesem Zweck wurden diese Proben in ihren Dimensionen vermessen und gewogen.

Tabelle 6 Rohdichte - Hölzer im gehobelten Zustand

Pk.- Nr.	Mittlere Länge l_{mean} [mm]	Mittlere Breite b_{mean} [mm]	Mittlere Höhe h_{mean} [mm]	Gewicht m [g]	Rohdichte ρ [kg/m ³]
1	2.297	89,98	119,01	10.341	420
2	2.296	89,96	119,50	11.584	469
3	2.297	89,90	119,56	11.737	475
4	2.297	89,65	119,25	10.782	439
5	2.297	89,94	119,29	12.177	494
6	2.297	89,68	119,18	12.371	504
7	2.297	90,17	119,43	12.983	525
8	2.296	89,78	119,38	11.114	452
9	2.295	89,66	119,30	12.395	505
10	2.297	89,89	119,82	13.837	559
11	2.297	90,05	119,41	11.260	456
12	2.297	89,99	119,59	10.380	420
13	2.297	109,13	119,30	14.340	480
14	2.297	89,15	119,17	12.948	531
15	2.297	89,43	119,61	11.086	451
16	2.298	90,86	119,43	11.150	447
17	2.297	89,76	119,37	12.094	491
18	2.297	89,92	119,54	12.608	511
19	2.295	89,94	120,04	12.665	511
20	2.296	89,69	119,37	14.450	588
21	2.297	89,98	119,01	10.341	420
22	2.296	89,96	119,50	11.584	469
<hr/>					
Mittelwert $m_{(x)}$	2.297	90,82	119,43	12.115	486
Standardabweichung $s_{(x)}$	0,73	4,32	0,23	1205,1	44,4
Variationskoeffizient $v_{(x)}$	0,03 %	4,8 %	0,2 %	9,9 %	9,1 %

4.2. Steinholz

Die Prüfungsergebnisse werden in diesem Kapitel genauer vorgestellt. In Abbildung 15 ist ein Probekörper aus Steinholz zu sehen.



Abbildung 15 Ein Probekörper aus Steinholz

4.2.1. Rohdichte

Bei Tag 28 wurde der Mittelwert der Rohdichte der einzelnen 4 Prüfkörper ermittelt und angegeben.

Tabelle 7 Rohdichte [kg/dm^3] ermittelt im Abbindezeitraum

	Tage	0 d	3,5 d	7 d	14 d	21 d	28 d
Nr.	Name						
1.1	HHv	1,23	1,19	1,17	1,13	1,12	1,07
1.2	HHs	1,15	1,11	1,09	1,05	1,04	0,99
2	LS	1,54	1,50	1,48	1,45	1,44	1,39
3.1	GSv	1,30	1,26	1,23	1,20	1,18	1,16
3.2	GSs	1,31	1,27	1,25	1,22	1,20	1,14
4	HS	1,23	1,19	1,17	1,14	1,12	1,03
5	O						1,09

4.2.2. Oberflächenhärteprüfung nach EN 13892-6

Die Oberflächenhärte wurde für jeden Einzelversuch bestimmt. An jedem Probekörper sind drei Prüfungen durchgeführt worden, aus denen der arithmetische Mittelwert gebildet wurde. Aus den Mittelwerten der Prüfkörper wurde erneut ein arithmetischer Mittelwert der Versuchsreihe ermittelt.

Tabelle 8 Oberflächenhärte nach EN 13892-6

Nr.	Name	Oberflächenhärte Mittelwerte $SH_{(x)}$ [N/mm ²]	Standardabweichung $s_{(x)}$ [N/mm ²]	Variationskoeffizient $\delta_{(x)}$
1.1	HHv	8,27	1,25	15,2 %
1.2	HHs	10,55	1,99	18,9 %
2	LS	29,27	4,77	16,3 %
3.1	GSv	11,77	1,49	12,6 %
3.2	GSs	7,79	1,69	21,7 %
4	HS	-	-	-
5	O	18,66	0,71	3,8 %

Die erforderliche Mindestoberflächenhärte von SH30 wurde von keinem Probekörper erfüllt. Bei Probekörper 4 war keine Oberflächenhärte feststellbar, da der Prüfkörper zu weich gewesen ist. Die Prüfmaschine konnte die geforderte Last von 500 N nicht konstant halten.

4.2.3. Biegezugprüfung nach EN 13892-2

Die Prüfergebnisse der in Kapitel 3.2.2 beschriebenen Prüfung sind in Tabelle 9 zu finden.

Tabelle 9 Biegezugfestigkeit nach EN 13892-2

Nr.	Name	Mittelwert der Biegezugfestigkeit R_f [N/mm ²]	Standardabweichung $s_{(x)}$ [N/mm ²]	Variationskoeffizient $\delta_{(x)}$
1.1	HHv	2,99	0,28	9,3 %
1.2	HHs	1,96	0,15	7,8 %
2	LS	2,88	0,65	22,6 %
3.1	GSv	2,92	0,46	15,7 %
3.2	GSs	1,36	0,15	10,8 %
4	HS	0,94	0,10	10,1 %
5	O	5,54	0,77	13,8 %

Bestanden haben HHv, HHs, LS, GSv, GSs und O. Diese erfüllen die Mindestbiegezugfestigkeit F1 von 1 N/mm².

4.3. Ökobilanzierung

Untersucht wurden bei den Holz-Wänden zwei Außenwände (einmal tragend, einmal nichttragend) als auch eine tragende Innenwand.

Als Vergleichsbetrachtung für die tragende Außenwand wurden zwei Varianten in Trockenbauweise (eine Holzwand aus BSP und eine Holzständerwand) und eine massive Mauerwerkswand aus Kalksandstein verwendet. Es ist darauf geachtet worden, dass alle Wände den U-Wert der Altholzwand aufweisen.

4.3.1. Wandaufbauten und Sachbilanz der untersuchten Systeme

Nachfolgend sind die technischen Eigenschaften der zu untersuchenden Wände dargestellt bzw. anhand von Grafiken illustriert. Weiterhin sind die verwendeten Produkte und Baustoffe aufgeführt.

4.3.2. Tragende Außenwand Altholzwand

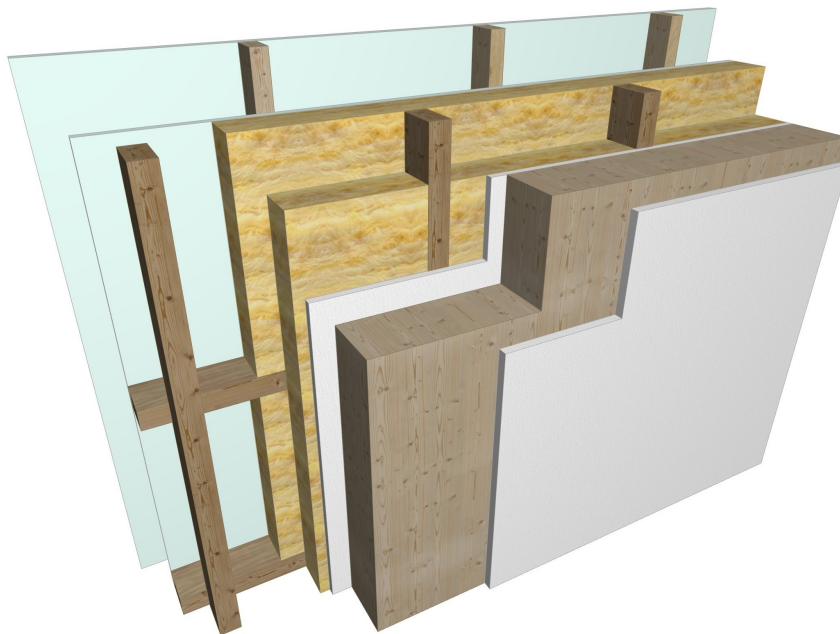
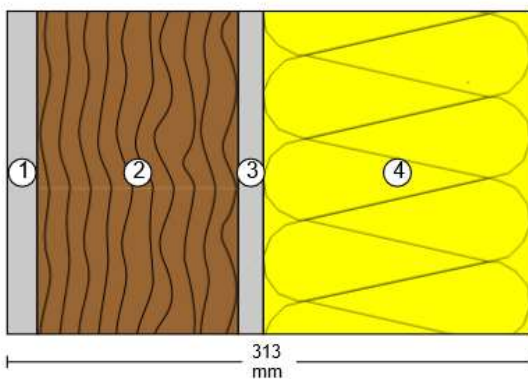


Abbildung 16 Illustrierte tragende Außenwand mit Altholz



- ① Gipsfaserplatte, 18,00mm
- ② Schnittholz Fichte (12% Feuchte/10,7% H₂O), 120,00mm
- ③ Gipsfaserplatte, 15,00mm
- ④ Mineralwolle (Fassaden-Dämmung), 160,00mm

Abbildung 17 Querschnitt tragende Außenwand

Die Abbildung 16 und Abbildung 17 zeigen die tragende Holzaußenwand als Rendering und im Querschnitt. Da die Fassade nicht Teil der Ökobilanzierung ist, taucht diese auch im Querschnitt auf.

Brettsperrholzwand

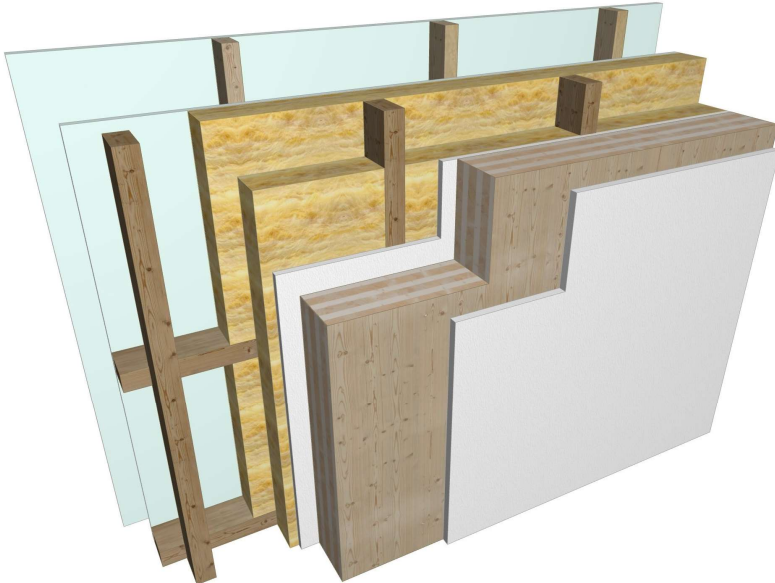


Abbildung 18 Rendering der Massivholzwand mit Brettsperrholz

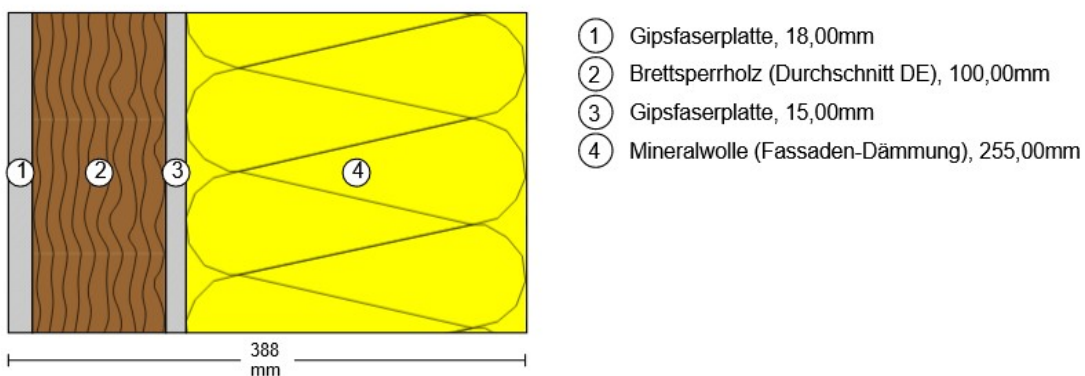


Abbildung 19 Querschnitt Wand mit Brettsperrholz

Die Außenwand mit dem Brettsperrholz ist genauso aufgebaut wie die Wand aus Altholz, nur das Brettsperrholz verwendet wird.

Holzständerwand

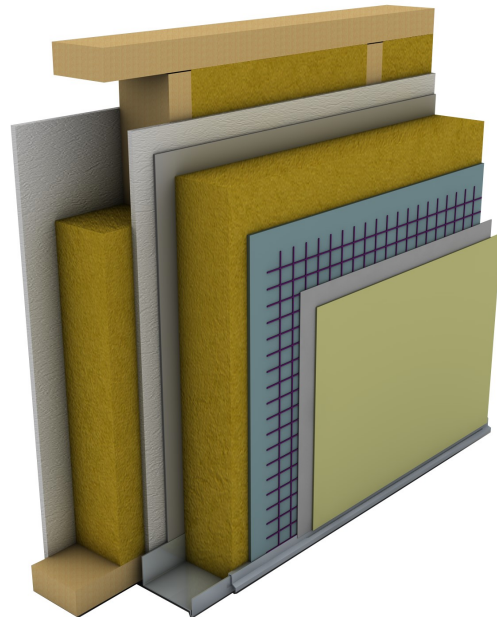
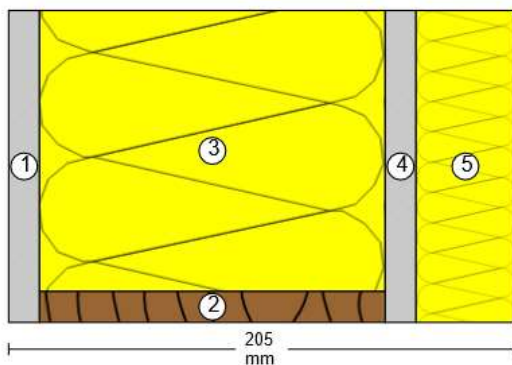


Abbildung 20 Illustrierte Holzständerwand



- ① Gipsfaserplatte, 12,50mm
 - ② Konstruktionsvollholz (Durchschnitt DE), 140,00mm
 - ③ Mineralwolle (Fassaden-Dämmung), 140,00mm
 - ④ Gipsfaserplatte, 12,50mm
 - ⑤ ROCKWOOL Steinwolle-Dämmstoff im hohen Rohdichtebereich, 40,00mm
-
- Aluminiumprofil pressblank, 4,9 kg
 Zementmörtel, 0,036 m³
 Kalkzement Putzmörtel, 0,036 m³
 Glasarmierungsgitter, 18 m²

Abbildung 21 Querschnitt der Holzständerwand mit beidseitiger Beplankung und dem WDVS außen

Die Holzständerwand orientiert sich an einer Studie des Fachgebiets für Tragwerksentwicklung und Bauphysik und wurde auf die aktuelle Studie angepasst. Bei der Holzständerwand ist die Steinwolldämmung von ROCKWOOL verwendet worden, da es sich um die einzige Steinwolldämmung im eLCA gehandelt hat.

Massivbauweise Variante Kalksandstein

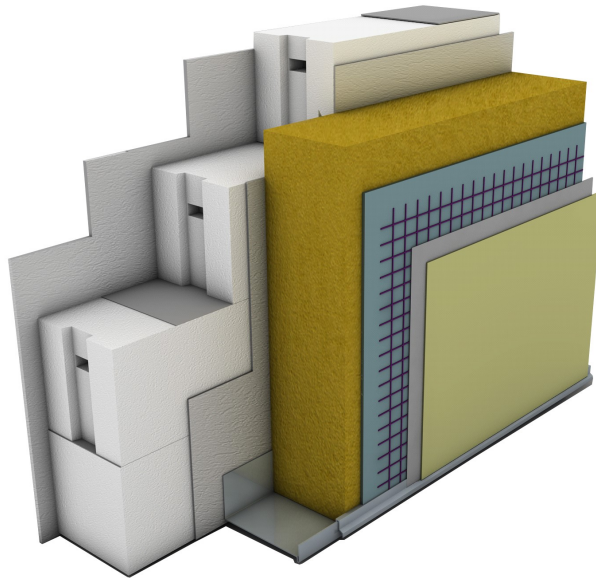


Abbildung 22 Illustrierte Kalksandsteinwand

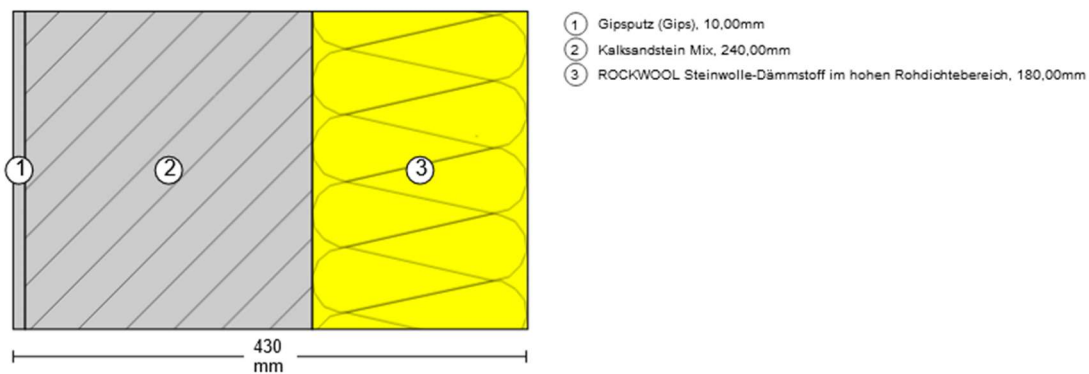


Abbildung 23 Querschnitt Kalksandsteinwand

Die Kalksandsteinwand orientiert sich ebenfalls an der Studie des Fachgebiets für Tragwerksentwicklung und Bauphysik und wurde auf die aktuelle Studie angepasst. Berücksichtigt wurde die ROCKWOOL Steinwolldämmung, die als einzige Steinwolldämmung in dem Programm eLCA zur Auswahl steht.

Nichttragende Außenwand

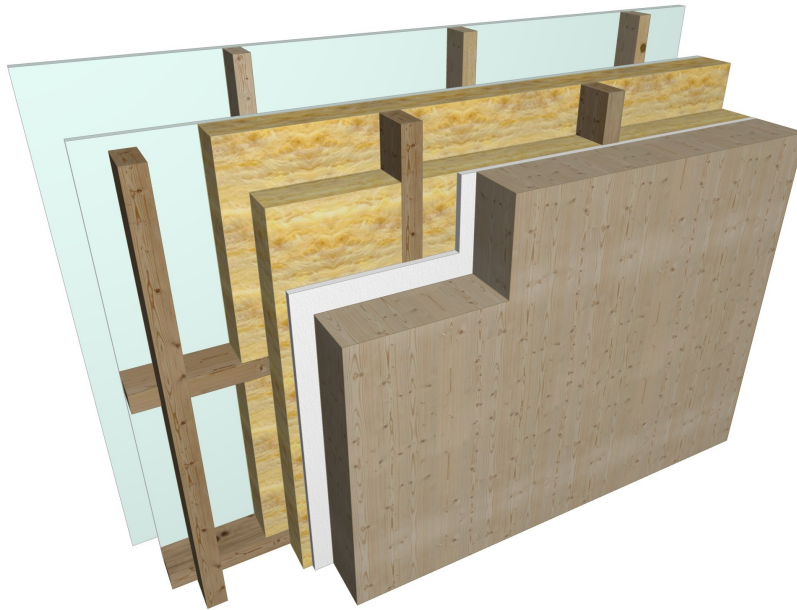
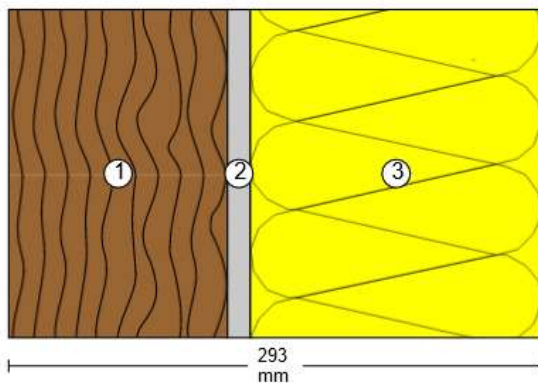


Abbildung 24 Illustrierte nichttragenden Außenwand



- ① Schnittholz Fichte (12% Feuchte/10,7% H₂O), 120,00mm
- ② Gipsfaserplatte, 12,50mm
- ③ Mineralwolle (Fassaden-Dämmung), 160,00mm

Abbildung 25 Querschnitt der nichttragenden Außenwand

In Abbildung 24 und Abbildung 25 sind die nichttragende Außenwände mit den verwendeten Materialien und deren Dicken zu sehen.

4.3.3. Nichttragende Innenwand

Trocken- und Leichtbauweise

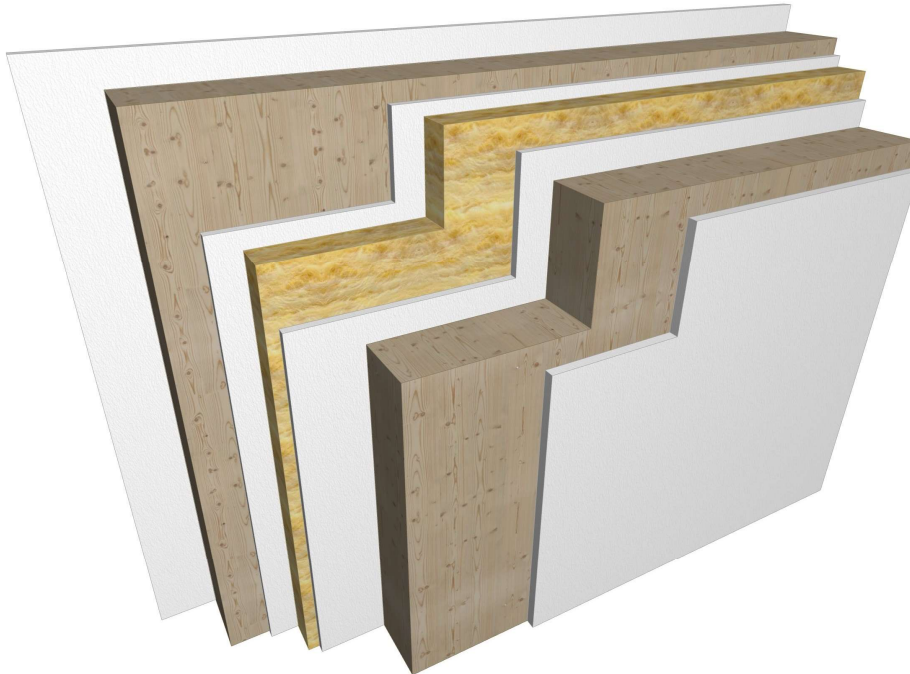
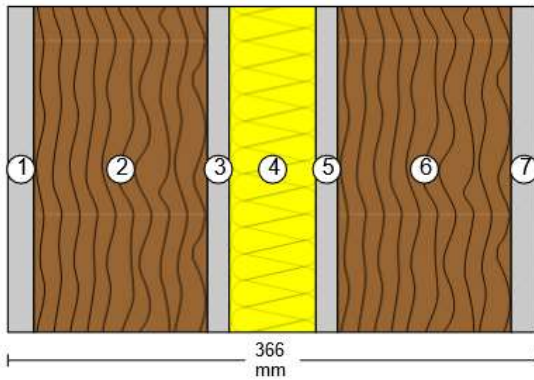


Abbildung 26 Illustrierte tragende Innenwand



- ① Gipsfaserplatte, 18,00mm
- ② Schnittholz Fichte (12% Feuchte/10,7% H₂O), 120,00mm
- ③ Gipsfaserplatte, 15,00mm
- ④ Mineralwolle (Innenausbau-Dämmung), 60,00mm
- ⑤ Gipsfaserplatte, 15,00mm
- ⑥ Schnittholz Fichte (12% Feuchte/10,7% H₂O), 120,00mm
- ⑦ Gipsfaserplatte, 18,00mm

Abbildung 27 Querschnitt der Innenwand

In Abbildung 26 ist die geplante tragende Innenwand als Rendering zu sehen. In Abbildung 27 ist der Querschnitt derselben Wand zu sehen und wurde aus eLCA importiert. Auch sind dort die Materialien und die dazugehörigen Dicken zu sehen.

4.3.4. Ökologischen Eigenschaften der untersuchten Wandsysteme

Auswertung der Ergebnisse für die tragenden Außenwände

Der Primärenergiebedarf ist bei der Wand aus dem Altholz am geringsten. Leicht darüber (+1%) liegt die Holzständerwand, was vor allem an der Herstellung liegt, um ca. 10% geringer als bei der massiven Innenwand. Die Wand mit dem Brettsperrholz liegt mit einem Plus von 117% im Vergleich zu der Wand mit dem Altholz an der nächsten Stelle. Dieses Plus kommt sowohl aus der Herstellung als auch dem Transport. Am schlechtesten schneidet die Kalksandsteinwand ab mit einem Plus von 306%. Dies liegt ebenfalls an der energieaufwändigeren Herstellung und dem Transport.

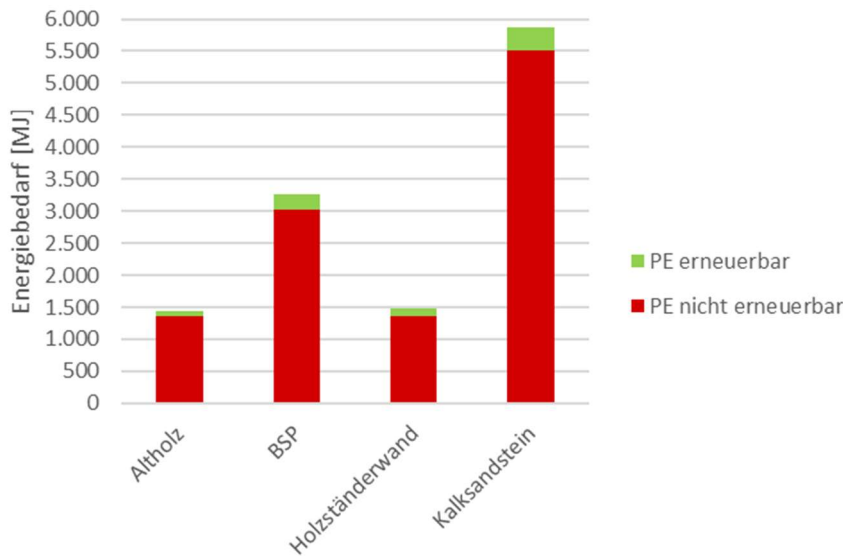


Abbildung 28 Primärenergiebedarf (PE) für den Gesamtlebenszyklus der tragenden Außenwände

Tabelle 10 Primärenergieverbrauch der Wände

	Primärenergie fossil [MJ]	Primärenergie erneuerbar [MJ]	Primärenergie gesamt [MJ]
Altholz	1.350,10	96,05	1.446,14
Brettsperrholz	3.024,21	256,29	3.280,56
Holzständerwand	1.365,64	111,40	1.477,06
Kalksandsteinwand	5.518,67	353,47	5.872,22

Tabelle 11 Wirkungskategorien der tragenden Außenwände

	GWP	ODP	POCP	AP	EP
	kg CO ₂ -Äqv.	kg R11-Äqv.	kg Ethen-Äqv.	kg SO ₂ -Äqv.	kg PO ₄ -Äqv.
Altholz	123,80	1,04E-13	-0,077	0,246	0,058
BSP Wand	224,52	2,93E-11	-0,173	0,554	0,131
Holzständerwand	93,27	4,29E-14	-0,077	0,227	0,054
Kalksandsteinwand	420,24	1,05E-11	-0,322	1,017	0,238

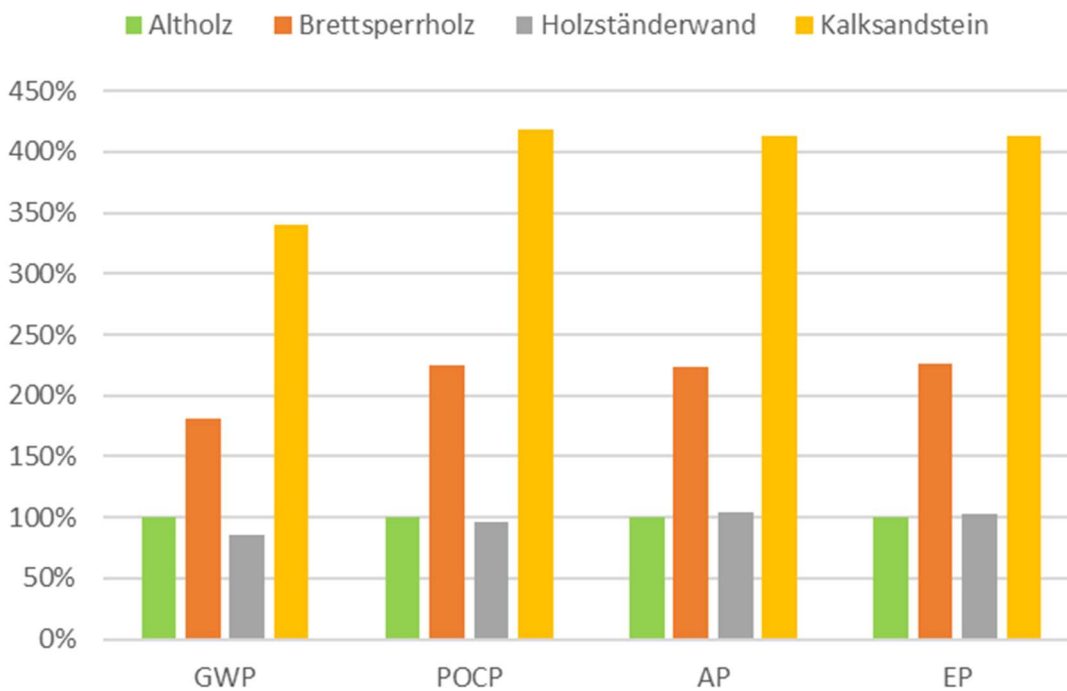


Abbildung 29 Wirkungskategorien der Außenwände in Relation zu der Altholz wand ohne das ODP

In Abbildung 29 sind die Wirkungskategorien der tragenden Außenwände einschließlich des Transportes zu sehen. Das ODP wurde in Abbildung 30 ausgelagert. Wie zu sehen ist, schneidet die Altholz wand gut ab. Während die Holzständer wand ähnlich gut abschneidet wie bei den dort betrachteten Kategorien, schneiden die anderen beiden Wände teilweise deutlich schlechter ab – vor allem die Kalksandstein wand.

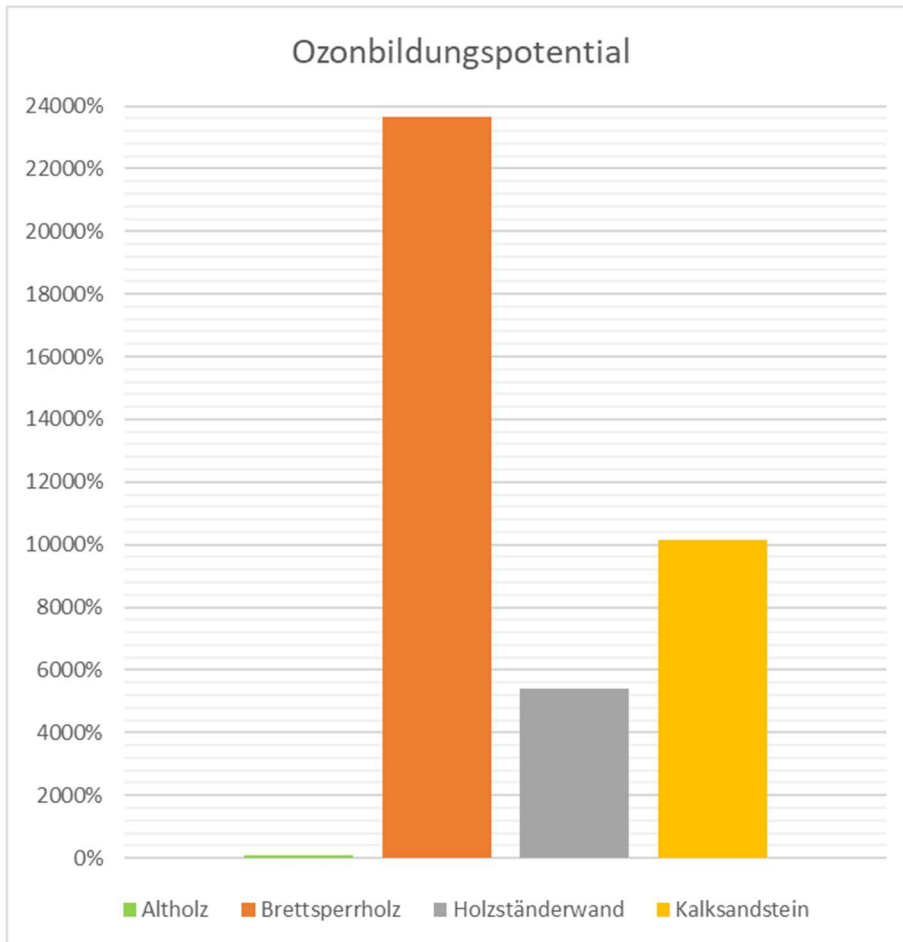


Abbildung 30 relativer Vergleich des Ozonbildungspotentials einschließlich des Transportes

Sowohl in Tabelle 11 als auch in der Abbildung 30 ist zu erkennen, dass das Ozonabbaupotential (ODP) bei der Wand aus dem Altholz deutlich niedriger ist, als bei den anderen Wänden. Dies liegt daran, dass das ODP der Fichte deutlich unterhalb des Brettsperrholzes, des Konstruktionsvollholzes und dem Kalksandstein liegt. Der Abbau von Ozon während des Transportes liegt in derselben Größenordnung (vgl. Tabelle 12). Eine mögliche Erklärung, warum das ODP bei der Altholz wand deutlich unter dem der anderen Wände liegt, ist, dass der Referenzwert für Fichte bei der Herstellung in der Größenordnung von 10^{-12} liegt, während zum Beispiel das BSP in der Größenordnung von 10^{-9} liegt.

Tabelle 12 Ozonabbaupotential der Transporte

	Altholz Wand	BSP Wand	Holzständerwand	Kalksandsteinwand
ODP [kg R11-Äqv.]	4,37E-14	9,89E-14	4,29E-14	1,81E-13

Auch bei der Betrachtung der weiteren Wirkungskategorien ohne den Anteil aus Transport (Abbildung 31) wird für die Metallständerwand ca. 50% weniger Treibhausgas in die Umwelt abgegeben als bei der massiven Wand. Hinsichtlich des Überdüngungspotentials (EP) wird für die reine Herstellung der Kalksandsteinwand ca. 20 % weniger Schadstoffe emittiert. Beim Ozonabbaupotential (ODP) gilt oben genanntes.

Tabelle 13 Wirkungskategorien der tragenden Außenwände ohne den Transport

	GWP	ODP	POCP	AP	EP
	kg CO ₂ -Äqv.	kg R11-Äqv.	kg Ethen-Äqv.	kg SO ₂ -Äqv.	kg PO ₄ -Äqv.
Altholz	28,74	5,99E-14	8,98E-04	1,45E-02	2,26E-03
BSP Wand	8,57	2,44E-11	2,93E-03	2,69E-02	4,92E-03
Holzständerwand	12,25	5,54E-12	2,01E-03	3,06E-02	4,94E-03
Kalksandsteinwand	25,62	1,03E-11	1,21E-03	5,60E-02	8,26E-03

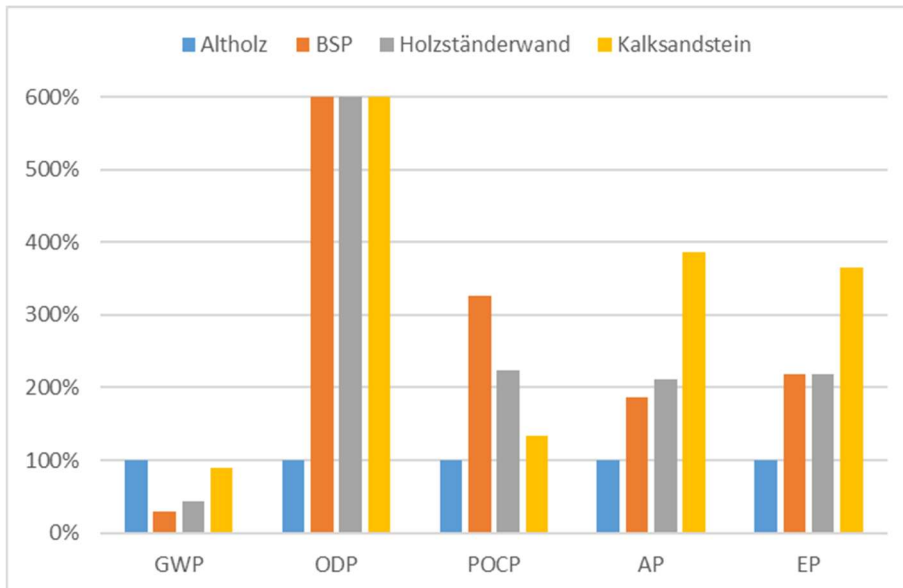


Abbildung 31 relativer Vergleich weiterer Wirkungskategorien für den Gesamtlebenszyklus der Außenwände, ohne den Transport

Wie in Abbildung 31 und Tabelle 13 zu sehen ist, ist die Wand mit dem Altholz abgesehen von dem Erderwärmungspotential (GWP) besser für die Umwelt, als die anderen Wände. Dass der GWP schlechter ist, liegt daran, dass im *eLCA* die Option *Bestand* für die Fichte ausgewählt worden ist und somit der Herstellungsprozess wegfällt. Somit ist die Wand laut dem Programm zwar schlechter, aber über den ganzen Nutzungszeitraum (vor allem beim Holz) deutlich besser.

Auswertung der Ergebnisse für die nichttragenden Außenwände

Für die nichttragende Außenwand wurde ebenfalls die Ökobilanzierung durchgeführt. Bei dem Primärenergiebedarf landet die nichttragende Außenwand (Abbildung 32) in einem ähnlichen Bereich wie die tragende Außenwand.

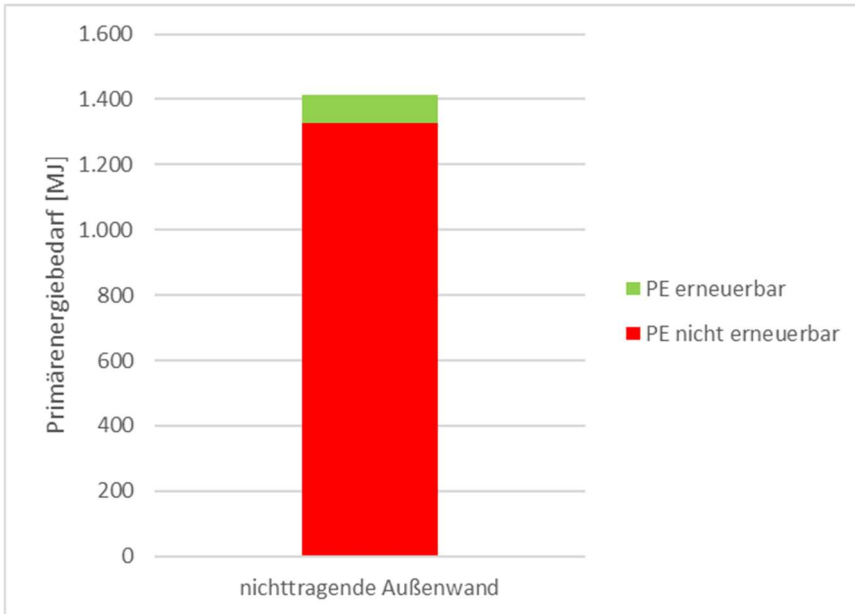


Abbildung 32 Primärenergiebedarf (PE) des Gesamtlebenszyklus der nichttragenden Außenwand

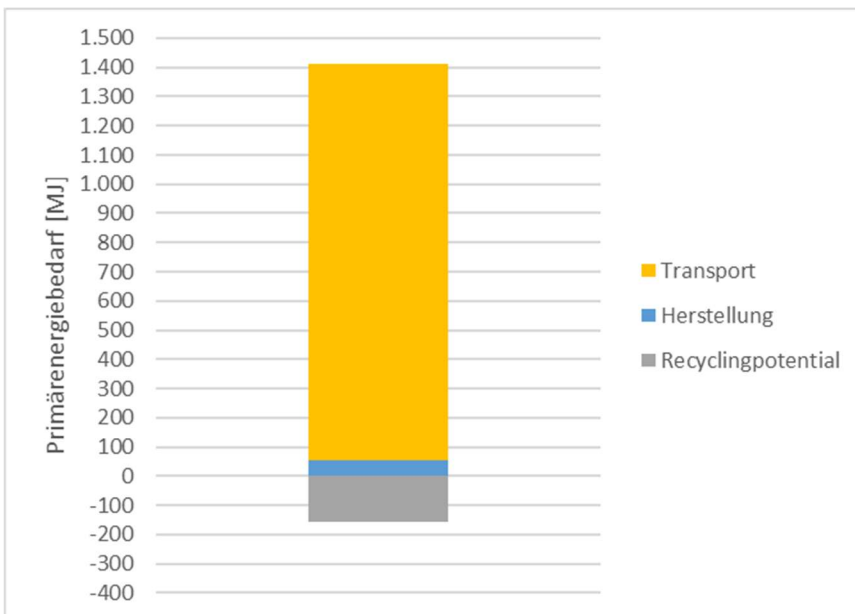


Abbildung 33 Primärenergiebedarf (PE) der nichttragenden Außenwand aufgeteilt nach Transport, Herstellung und Recyclingpotential

Tabelle 14 Wirkungskategorien der nichttragenden Außenwand

	GWP	ODP	POCP	AP	EP
	kg CO ₂ -Äqv.	kg R11-Äqv.	kg Ethen-Äqv.	kg SO ₂ -Äqv.	kg PO ₄ -Äqv.
mit Transport	122,26	9,01E-14	-7,72E-02	2,44E-01	5,73E-02
ohne Transport	27,20	4,64E-14	7,48E-04	1,28E-02	1,89E-03

Sowohl in Abbildung 33 als auch in Tabelle 14 ist zu sehen, dass der Transport den Großteil der untersuchten Wirkungskategorien ausmacht. Das Recyclingpotential der Primärenergie kommt hauptsächlich aus der Fichte. Der Transport hat den hohen Einfluss auf alle Einflussfaktoren

Auswertung der Ergebnisse für die tragende Innenwand

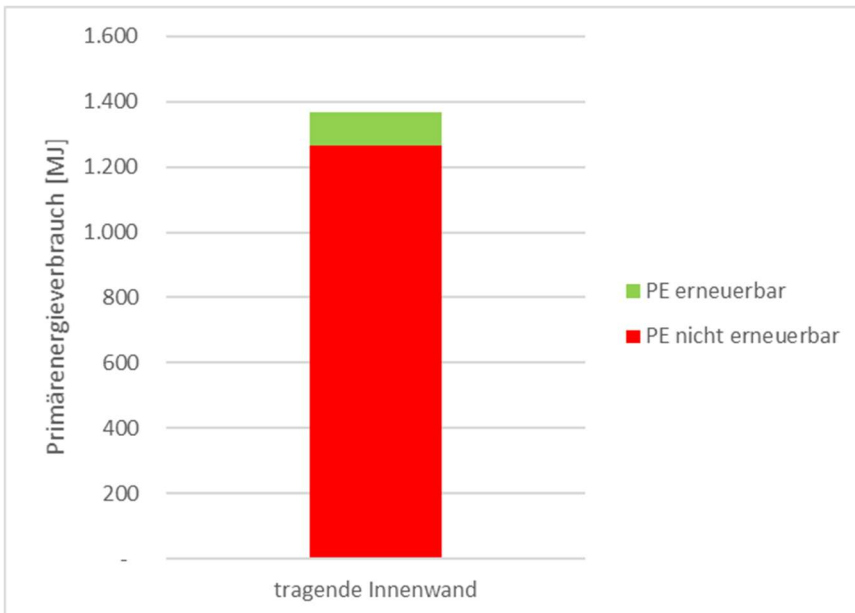


Abbildung 34 Primärenergiebedarf (PE) für den Gesamtlebenszyklus der tragenden Innenwand

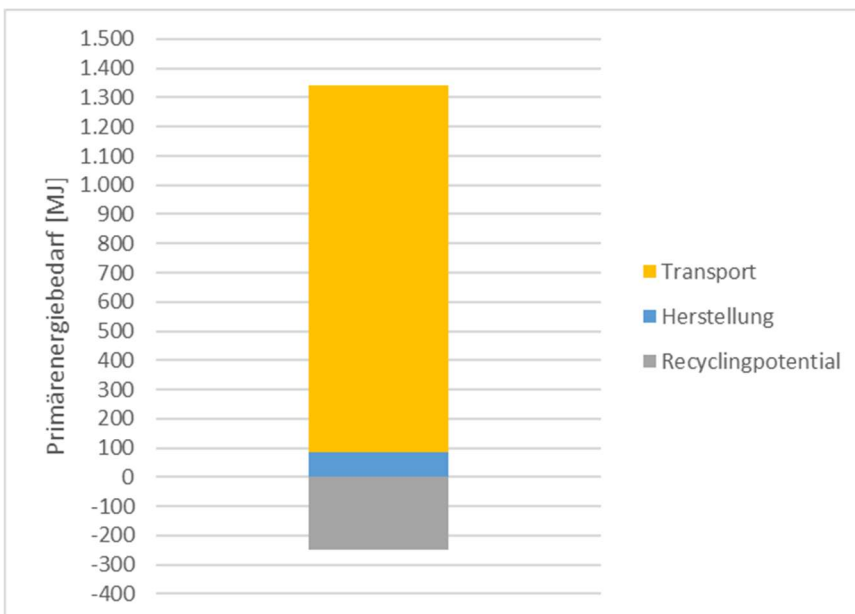


Abbildung 35 Primärenergiebedarf (PE) für die tragenden Innenwand aufgeteilt nach Transport, Herstellung und Recyclingpotential

Die tragende Altholzinnenwand kommt auf einen leicht geringeren Primärenergiebedarf, da der Transport weniger verbraucht im Vergleich zur nichttragenden Außenwand aus Altholz (-102,4 MJ). Dies liegt daran, dass weniger Material zur Baustelle gebracht werden muss. Der Transport kompensiert den erhöhten

Energiebedarf bei der Herstellung (+33,65 MJ). Das erhöhte Recyclingpotential liegt an dem hohen Fichtenanteil an der Wand.

Die Tabelle 15 zeigt, dass der Transport einen hohen Einfluss auf die Wirkungskategorien hat.

Tabelle 15 Wirkungskategorien der tragenden Innenwand

	GWP	ODP	POCP	AP	EP
	kg CO2-Äqv.	kg R11-Äqv.	kg Ethen-Äqv.	kg SO2-Äqv.	kg PO4-Äqv.
mit Transport	140,71	9,40E-14	-7,15E-02	2,22E-01	5,28E-02
ohne Transport	52,82	5,36E-14	6,25E-04	8,01E-03	1,56E-03

4.3.5. Massen der Wände

Tabelle 16 Gesamtmassen der Wände

	Altholz Wand	BSP Wand	Holzständerwand	Kalksandsteinwand	Nichttragende Außenwand (Altholz)	Tragende Innenwand (Altholz)
Masse [kg]	1.767,46	1.687,23	3.253,12	9.304,20	1.398,46	1.398,46

In Tabelle 16 sind die Gesamtmassen der betrachteten Wände in Kilogramm aufgeführt, bezogen auf die Referenzfläche von 18 m². Um zu betrachten wie sich die Massen zusammensetzen, werden in den nachfolgenden Abbildungen die Massen der Materialien der einzelnen Wände aufgeführt.

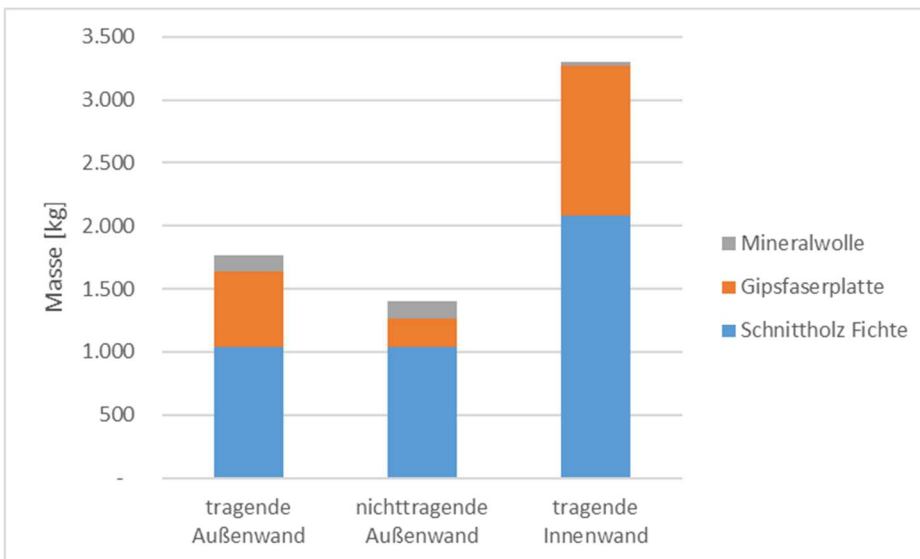


Abbildung 36 Masse [kg] der Materialien der Wände aus dem Altholz

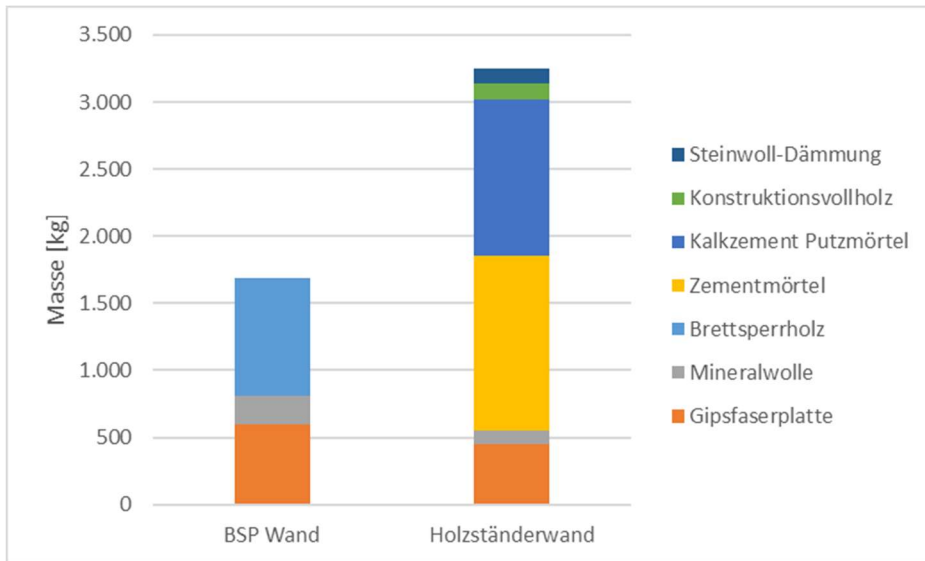


Abbildung 37 Masse [kg] der Materialien der Leichtbau-Holzwälnde

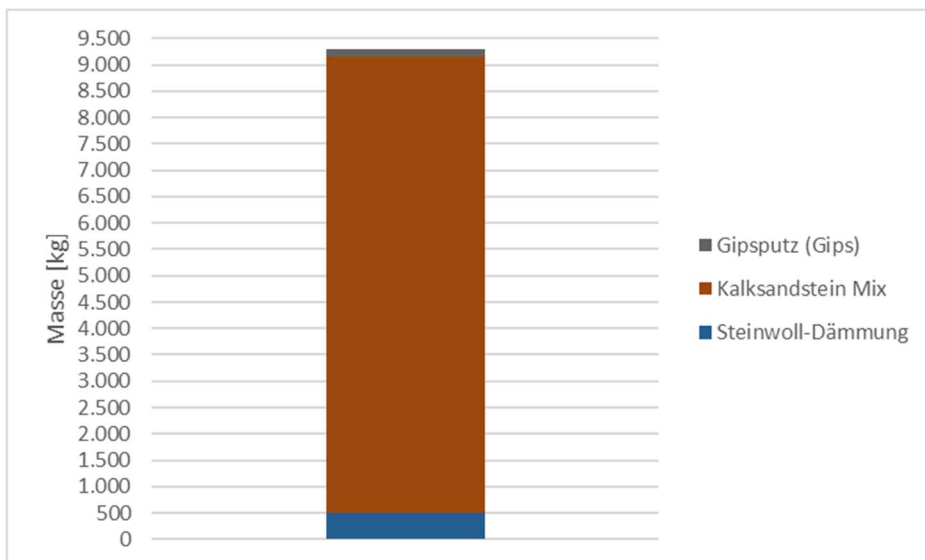


Abbildung 38 Masse [kg] der Materialien der Kalksandsteinwand

Bei den Wänden aus dem Altholz (Abbildung 36) ist zu sehen, dass die Fichte den größten Teil der Masse ausmacht. Die Massendifferenz bei den Außenwänden kommt daher, dass bei der tragenden Außenwand eine zweite Gipsplatte hinzukommt, welche die Wand vor Brand schützt.

Ähnlich zu den Wänden mit der wiederverwendeten Fichte ist auch bei der Wand mit dem BSP (vgl. Abbildung 37) der größte Massenanteil das Holz. Bei der Holzständerwand ist der größte Anteil an der Masse die beiden verwendeten Mörtel mit ca. 40 % (Zementmörtel) und ca. 36% (Kalkzement Putzmörtel).

Bei der Kalksandsteinwand (Abbildung 38) entfallen fast 93 % der Gesamtmasse der Wand auf den Kalksandstein.

5. Fazit

5.1. Festigkeitsuntersuchung der Holzbalken

Durch die in Kapitel 4.1 durchgeführten Untersuchungen konnte nachgewiesen werden, dass die Holzbalken der ehemaligen Kaserne trotz ihrer 80-jährigen Verwendung als Pfettendach immer noch eine gute Festigkeit aufweisen. Die Holzbalken haben eine Tragfähigkeit der Klasse C24, wodurch die Balken immer noch für tragende Holzkonstruktionen verwendet werden können.

Für sichtbare Holzkonstruktionen muss teilweise die Oberfläche bearbeitet werden, da durch zeitliche Einflüsse und Umwelteinflüsse sich die Oberfläche verfärbt und vom zu erwartenden Holzdesign abweicht. Auch sollte immer untersucht werden, ob Holzmittel verwendet worden sind, die potentiell gesundheitsschädlich sein könnten. Oder ob sich Pilze und andere Lebewesen in den Holzbalken eingenistet haben.

Aus den Untersuchungsergebnissen dieser Studie kann geschlossen werden, dass Holz aus alten Bauwerken auch noch zu tragenden Zwecken verwendet werden kann, solange diese keinen zersetzenden Umwelteinflüssen ausgesetzt waren. Vor einer anderweitigen Verwendung ist es zweckmäßig, das Holz einer visuellen Untersuchung auszusetzen, um einzuschätzen, ob diese für tragende oder nichttragende Zwecke eingesetzt werden können. Sofern die Möglichkeiten vorhanden sind, ist es empfehlenswert, mittels zerstörungsfreier Werkstoffprüfung auch die Festigkeitsklasse zu bestimmen.

Aus den Resten der Prüfkörper wurde ein Anschauungsobjekt gefertigt. Dabei handelt es sich um eine nichttragende Außenwand ohne Wärmedämmung. Die Wand weist eine Breite von 560 mm, eine Höhe von 800 mm und eine Dicke von 110 mm. In Abbildung 39 und Abbildung 40 ist die gebaute Wand zu sehen.



Abbildung 39 Kleinformatige nichttragende Außenwand ohne Dämmmaterial



Abbildung 40 Kleinformatische nichttragende Außenwand ohne Dämmmaterial

5.2. Steinholz

5.2.1. Oberflächenhärte

Die erforderliche Mindestoberflächenhärte von SH30 wurde von keinem Probekörper erfüllt.

Bei Serie LS konnten vier Einzelversuche einen Wert von größer als 30 N/mm^2 erreichen. Dennoch lagen sechs Werte unterhalb vom geforderten Wert. Der gebildete Mittelwert lag nur knapp unter den 30 N/mm^2 .

Bei Versuchsreihe HS konnten nur drei Werte ($3,46 \text{ N/mm}^2$; $3,81 \text{ N/mm}^2$; $4,06 \text{ N/mm}^2$) ermittelt werden, diese Versuchsreihe war für die Prüfung zu weich. Die Prüfmaschine konnte die erforderliche Hauptlast von 500 N nicht konstant halten und aufbringen. Deshalb konnte diese Versuchsreihe nicht weiter ausgewertet werden.

Die anderen Serien haben einen Wert geliefert, der zwar bestimmbar war, aber unterhalb der Marke von SH30 lag.

Die Streuung der Versuchswerte untereinander der selbst hergestellten Mischungen war mit einem Variationskoeffizienten von $12,6 \%$ bis $21,7 \%$ deutlich höher als die des Herstellers ($3,8 \%$).

Die glattgestrichene Seite der Probekörper war für diese Prüfungen nicht die beste Variante. Für erneute Prüfungen bzw. für eine optimierte Prüfung sollte die zu prüfende Oberfläche behandelt werden, entweder auf Maß sauber geschnitten oder flächig zu einer Ebene geschliffen. Alternativ könnte auch die Unterseite geprüft werden.

5.2.2. Biegezugprüfung nach EN 13892-2

Die Mindestanforderung an die Biegezugfestigkeit wurde nur von der Serie HS nicht erreicht. Die anderen Versuchsreihen erreichten höhere Biegezugfestigkeiten als 1 N/mm^2 .

Die Originalreihe des Herstellers erreichte den höchsten Wert mit $5,54 \text{ N/mm}^2$, dies entsprach 185 % der besten selbst hergestellten Mischungen.

Die Streuung innerhalb der Versuchsserien spiegelte die normalen Streuungen in Versuchen wieder. Der Variationskoeffizient lag etwa bei 10 %. Nur bei der Versuchsreihe von LS lag er mit 22,6 % deutlich höher.

5.2.3. Bewertung des Steinholzes

Die hergestellten Probekörper erfüllten die Anforderungen an Steinholzestrich nur von der Rohdichte und der Biegezugfestigkeit her. Die geforderte Oberflächenhärte konnte nicht erreicht werden.

Die Probekörper 1.1 HHv, 1.2 HHs und 5 O sind von der Materialmischung her vergleichbar. Probekörper 5 konnte allerdings wesentlich länger abbinden und dadurch eine höhere Festigkeit erreichen. Die Probekörper liegen im Vergleich der Rohdichte in etwa in der gleichen Größenordnung. Nr. 5 hatte in den Prüfungen etwa die doppelte Biegezugfestigkeit und Oberflächenhärte zu den anderen beiden Probekörpern erreicht.

Der Probekörper 2 LS mit den langen Sägespänen hat die höchste Rohdichte mit $1,39 \text{ kg/dm}^3$ erreicht. Bei der Oberflächenhärteprüfung erreichte dieser Probekörper fast die geforderte Schwelle von 30 N/mm^2 . Der Probekörper besaß vom Mischungsverhältnis her mehr Sand als die anderen. Die Holzspäne fungierten als längere Bewehrung. In der Biegeprüfung schnitt dieser Probekörper nur durchschnittlich zu den anderen Probekörpern ab.

Die Probekörper mit den gesiebten Spänen erreichten eine vergleichbare Rohdichte. Bei den Prüfungen schnitt der etwas verdichtete Probekörper besser ab. Bei der Oberflächenhärte erreichte er etwa 150 % des Wertes des schwach verdichteten Probekörpers. Bei der Biegezugfestigkeit war der Wert ca. 210 %. Daraus lässt sich schließen, dass eine Verdichtung der Materialmischung in der Form einen Einfluss auf die Festigkeit nimmt.

Der 4. Probekörper HS mit den Hobelspänen hat beide Prüfungen nicht bestanden. Die Oberflächenhärte war nicht feststellbar, da die Prüfmaschine die erforderliche Last nicht anfahren konnte. Die Prüfkörper waren zu weich für den Versuch. Bei der Biegezugprüfung sind die Prüfkörper bei zu kleinen Lasten gebrochen, sodass die Mindestzugfestigkeit nicht erreicht werden konnte. Hobelspäne eignen sich nicht für die Herstellung von Steinholz.

Die Herstellung der Probekörper war aufwendig, da die anfallenden Späne händisch gesiebt und sortiert worden sind. Für industriell hergestellten Steinholzestrich kommen speziell dafür zerkleinerte Holzhäcksels zum Einsatz, die eine definierte Größe haben. Dies kann mit anfallenden Spänen vom Zuschnitt nicht verglichen werden.

Steinholz ist ein gutes Nischenprodukt, sofern bei der Herstellung die richtigen Späne (Qualität und Größe) verwendet werden. In dieser Studie hatte sich gezeigt, dass Holzspäne, welche bei der Bearbeitung und dem Zuschnitt von Altholzbalken anfallen, nicht optimal für die Produktion von Steinholz sind. Dazu kommt, dass die Sortierung

der Späne sehr aufwändig ist und aus diesem Grund nicht optimal für eine Verwendung an einer Baustelle. Da bis Mitte des 20. Jahrhunderts in Deutschland Holzschutzmittel verwendet worden sind, welche nach heutigem Stand gesundheitlich schädlich sind, ist Altholz mit Vorsicht zu genießen.

5.3. Ökobilanzierung

Im Kapitel 4.3 sind die drei zu betrachtenden Wände in verschiedenen Wirkungskategorien untersucht worden und die tragende Außenwand mit drei Leicht- bzw. Massivbauwänden verglichen worden.

Wie den Ergebnissen im Kapitel 4.3 zu entnehmen ist, schneidet die Massivholzwand aus der wiederverwerteten Fichte in allen Kategorien besser ab als die anderen betrachteten Wände. Dies liegt vor allem durch die lokale Verwertung der Fichte, da sich das Transportvolumen erheblich reduziert und sich die Nutzungsdauer der Fichte verlängert. Durch die Verlängerung des Nutzungszeitraumes der Fichte verbessert sich die Nachhaltigkeit des ursprünglichen Gebäudes. Daneben reduziert sich der Herstellungsaufwand des Holzes (kein Fällen, weniger Bearbeitung des Holzes). Zusätzlich verlängert sich der Nutzungszeitraum des Holzes, wodurch sich die Nachhaltigkeit sowohl des geplanten als auch des ursprünglichen Gebäudes verbessert.

Als Fazit lässt sich zusammenfassen, dass die lokale Verwertung von Holz als Baumaterial für die ökologische Nachhaltigkeit zu empfehlen ist. Dies gilt natürlich unter der Voraussetzung, dass das Holz in einem sehr guten Zustand ist und die normativen Vorgaben erfüllt werden, um in der geplanten Wand eingebaut zu werden.

6. Literaturverzeichnis

EN 384:2019-02 Bauholz für tragende Zwecke – Bestimmung charakteristischer Werte für mechanische Eigenschaften und Rohdichte; Deutsche Fassung EN 384:2016+A1:2018

DIN EN 14081-1:2011-05 Holzbauwerke – Nach Festigkeit sortiertes Bauholz für tragende Zwecke mit rechteckigem Querschnitt – Teil 1: Allgemeine Anforderungen; Deutsche Fassung EN 14081-1:2005+A1:2011

EN 408:2012-10 Holzbauwerke – Bauholz für tragende Zwecke und Brettschichtholz – Bestimmung einiger physikalischer und mechanischer Eigenschaften; Deutsche Fassung EN 408:2010+A1:2012

EN 4074-1:2008-12 Sortierung von Holz nach der Tragfähigkeit Teil 1: Nadelschnittholz

EN 4074-1:2008-12 Sortierung von Holz nach der Tragfähigkeit Teil 5: Laubschnittholz

Ökobilanzierungstool eLCA: www.bauteileditor.de/

DIN EN ISO 14040:2021-02 „Umweltmanagement–Ökobilanz–Grundsätze und Rahmenbedingungen (ISO 14040:2006)“; Deutsche Fassung EN ISO 14040:2006

DIN EN ISO 14044:2021-02 „Umweltmanagement–Ökobilanz–Anforderungen und Anleitungen (ISO 14044:2006)“; Deutsche Fassung EN ISO 14044:2006

Nutzungsdauern von Bauteilen für Lebenszyklusanalysen nach Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen (BNB) Stand: 24.02.2017