

FG Entwerfen und Konstruieren - Verbundstrukturen  
FG Tragwerksentwurf und -konstruktion  
FG Konstruktives Entwerfen und Klimagerechte Architektur  
Technische Universität Berlin

# **Neubau des Museums-Pavillons der TU Berlin als Reallabor-Bauen**

Abschlussbericht über ein Forschungsprojekt,  
gefördert unter dem Az: 38392/01 von der  
Deutschen Bundesstiftung Umwelt

von

Prof. Dr.-Ing. Volker Schmid, Prof. Dr.-Ing. Kerstin Wolff, Prof. Eike  
Roswag-Klinge, Jonas Bonhage, Hakan Gülay, Jonas Müller, Sina Jansen

Januar 2024

# Inhaltsverzeichnis

INHALTSVERZEICHNIS.....	I
ABBILDUNGSVERZEICHNIS.....	II
TABELLENVERZEICHNIS.....	III
SYMBOLVERZEICHNIS.....	IV
VERZEICHNIS VON ABKÜRZUNGEN.....	IV
ZUSAMMENFASSUNG.....	V
<b>1. EINLEITUNG.....</b>	<b>1</b>
<b>2. HAUPTTEIL.....</b>	<b>4</b>
2.1    WIEDERGEWINNUNG UND -VERWENDUNG VON ALTHOLZ ALS BAUSTOFF FÜR TRAGWERKE.....	4
2.1.1    Wiederverwendbarkeit gemäß aktueller Rechtslage und Stand der Technik.....	4
2.1.2    Altholzgewinnung im Rahmen des Forschungsvorhabens.....	9
2.1.3    Beurteilung der Qualität und Wiederverwendbarkeit von Altholz.....	10
2.1.4    Ausblick auf die 2. Phase des Forschungsvorhabens.....	18
2.2    KREISLAUFGERECHTE ALTHOLZNUTZUNG - TRAGWERKSENTWURF.....	19
2.2.1    Weit spannende Tragkonstruktionen aus Altholz.....	19
2.2.2    Rahmenbedingungen und Anforderungen für den Fachwerkträger im Realisierungsprojekt 19	
2.2.3    Studie zu weit spannenden Trägertypologien.....	20
2.2.4    Studie zu rückbaubaren, stahlarmen Fachwerkknoten.....	21
2.2.5    Tastversuche an Kleinteilprobekörpern.....	23
2.2.6    Auswertung und Empfehlungen für das Realisierungsprojekt.....	27
2.2.7    Brettschichtholzträger aus Altholz.....	29
2.2.8    Ausblick 2. Forschungsabschnitt.....	29
2.3    BETON- UND STAHLARME GRÜNDUNG.....	30
2.3.1    Einleitung und Zielsetzung.....	30
2.3.2    Aufgabe der Gründung.....	30
2.3.3    Anforderungen aus der äußeren Standsicherheit.....	30
2.3.4    Gründungsarten.....	31
2.3.5    Der Baugrund vor Ort.....	31
2.3.6    Rahmenbedingungen für den tragwerksplanerischen Entwurf der Gründung.....	32
2.3.7    Variante 1: Kreisrunder Stahlkorb mit Füllmaterial als Einzelfundament.....	33
2.3.8    Variante 2: Betonring mit Füllmaterial als Einzelfundament.....	36
2.3.9    Ausblick auf die nächste Forschungsphase.....	37
2.4    KREISLAUFGERECHTE PLANUNG UND REALISIERUNG, BEWERTUNG.....	38
2.4.1    Reallabor für kreislaufgerechtes Planen und Bauen in den planetaren Grenzen.....	38
2.4.2    Analyse und Nachhaltigkeitsbewertung kreislaufgerechter Planung.....	40
2.4.3    Ausblick auf die 2. Stufe des Forschungsvorhaben.....	47
<b>3. FAZIT.....</b>	<b>1</b>
<b>ANHANG.....</b>	<b>3</b>
LITERATURVERZEICHNIS.....	4

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Kreislaufgerechter Einsatz von Altholz.....	7
Abbildung 2: Optimierter kreislaufgerechter Einsatz von Altholz.....	8
Abbildung 3: Sortierung der Altholzbalken: Zum Ausschluss führende Kriterien mechanische Schädigung, Insektenfraß, Baumkante, Verdrehung.....	12
Abbildung 4: Theoretisch nutzbarer Restquerschnitt eines Balkens der Reihe I.....	12
Abbildung 5: Versuchsaufbau zur Ultraschall-Impulslaufzeitmessung in Anlehnung an [14].....	13
Abbildung 6: Bestimmung des Elastizitäts-Moduls und der Festigkeitsklasse mit dem Timber Grader.....	14
Abbildung 7: Versuchsanordnung zur Ermittlung des globalen Biege-E-Moduls nach DIN-EN-408 [6].....	14
Abbildung 8: Probe während der Versuchsdurchführung in der Plattenbiegemaschine der TU Berlin.....	15
Abbildung 9: Versagensbild und Arbeitslinie eines Probekörpers.....	15
Abbildung 10: Ablauf zur Aufbereitung von Altholz.....	18
Abbildung 11: Strebenfachwerk, links mit diagonalen Druck- und Zugstreben aus Holz, rechts mit diagonalen Zugstreben aus Stahl und Druckstreben aus Holz.....	20
Abbildung 12: links: Pfostenfachwerk mit Druckpfosten aus Holz und Zugdiagonalen aus Stahl; rechts: Howe-Träger mit Druckstreben aus Holz und vertikalen Stahlzuggliedern.....	20
Abbildung 13: Knotendetails mit Zugstreben aus Holz.....	21
Abbildung 14: Knotendetails mit Zugstreben aus Stahl.....	21
Abbildung 15: Betrachtete Varianten der Anschlussdetails; Links: Zuganschluss analog zum „Schwalbenschwanzanschluss“; Rechts: Zuganschluss analog zum „Treppenversatzanschluss“.....	21
Abbildung 16: Schematische Darstellung der Probekörper unter Druckbeanspruchung, inkl. exemplarischem Stabwerkmodell bei Geometrie II.....	24
Abbildung 17: Belastungsschema der Kleinteilversuche.....	24
Abbildung 18: Kraft-Weg-Diagramme der Druckversuche an den Probekörpern.....	25
Abbildung 19: Beispielhaftes Versagensbild der Geometrie I-b, Versagen in der Scherfuge.....	26
Abbildung 20: Beispielhaftes Versagensbild der Geometrie III-b, Versagen in der Scherfuge.....	26
Abbildung 21: Beispielhaftes Versagensbild der Geometrie IV-c, Querdruckversagen bei der Lagesicherung.....	26
Abbildung 22: Vergleich der Bruchlasten inkl. zugehöriger Kolbenweg.....	27
Abbildung 23: Darstellung der empfohlenen Fachwerkkonstruktion.....	28
Abbildung 24: Vorentwurf GRW-Projekt, Grundriss Fundamentanordnung, Stand 04.04.2023.....	30
Abbildung 25: Einzellasten der Gründung gem. Vorentwurfsplanung GRW-Projekt, Stand: 04.04.2023.....	30
Abbildung 26: Baugrundmodell Grundbruch eines Einzelfundamentes.....	31
Abbildung 27: Auszug aus [3], Tabelle 7.....	32
Abbildung 28: Schnitt: Gründung aus rundem Stahlkorb mit Bruchsteinen.....	33
Abbildung 29: Aufbau Deckel und Boden Stahlkorb ohne Darstellung Füllmaterial (h) u. Stahlrost (a).....	33
Abbildung 30: Prinzip-Skizze Stabstatik-Modell.....	34
Abbildung 31: Detail: Eingekeilter Bruchstein mit abstützenden Drucktrajektorien.....	34
Abbildung 32: Umlenkkräfte aus vorspannen der Umschnürungen.....	35
Abbildung 33: Druckkräfte aus vorspannen der vertikalen Stabeisen.....	35
Abbildung 34: Prinzip-Skizze: Anschluss Schubknagge an Holzrost.....	36
Abbildung 35: Schnitt: Gründung aus Betonring.....	36
Abbildung 36: Interdisziplinäre Lehrveranstaltung im WiSe2023 am Institut für Architektur.....	40
Abbildung 37: Messestand zum Forschungs- und Bauvorhaben auf der BAU Messe 2023.....	40
Abbildung 38: Überblick über Methoden zur LCA Ermittlung nach DeWolf et al. (2020) [46].....	41
Abbildung 39: Vergleichende Übersicht der GWP der vier Bauteile gem. der LCA-Methoden nach DeWolf et al. ....	43
Abbildung 40: Angepasste Berechnungsmethode nach Schaubild gem. DeWolf et al. ....	44
Abbildung 41: Darstellung der Ergebnisse der Ökobilanz für das Treibhauspotenzial der Gründungsvarianten.....	45
Abbildung 42: Darstellung der Ergebnisse der Ökobilanz für das Treibhauspotenzial der Trägervarianten. Grün: Konventionelle Referenz-Bauteile; Blau: Bauteil-Varianten aus dem Forschungsprojekt. ....	45

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Betrachtete Rückbauprojekte im Rahmen des Forschungsvorhabens .....	9
Tabelle 2: Visuelle Ersteinschätzung der gewonnenen Altholz Balken.....	10
Tabelle 3: Logistische Einbindung in die Rückbauvorhaben.....	10
Tabelle 4: Querschnitte des Probenmaterials nach Altholzquelle .....	11
Tabelle 5: Rohdichte $\rho_{\text{mean}}$ und Holzfeuchte $w$ der Balken .....	11
Tabelle 6: Ergebnisse der visuellen Sortierung der Balken.....	12
Tabelle 7: Ergebnisse der direkten und indirekten Ultraschallimpulslaufzeitmessungen.....	13
Tabelle 8: Ergebnisse der Messungen mit dem Timber Grader MTG 920.....	14
Tabelle 9: Ergebnisse der globalen Biege-E-Moduln .....	15
Tabelle 10: Zuordnung des untersuchten Probenmaterials zu den Festigkeitsklassen nach DIN EN 338 [10] nach visueller Sortierung, apparativ unterstützter visueller Sortierung [14] und Sortierung über den Biege-E-Modul .....	17
Tabelle 11: Aufbauten der Bauteilvarianten, Zuordnung von Nutzungszyklen und Datensätzen der ÖKOBAUDAT .....	43

## Symbolverzeichnis

A	Ästigkeit
b	Prüfkörperbreite
E	Biege-E-Modul
$E_{\text{dyn}}$	dynamischer E-Modul
F	Kraft
FN	Faserneigung
$g_k$	Eigengewicht, charakteristisch
h	Prüfkörperhöhe
L	Prüfkörperlänge
$\rho_{\text{mean}}$	Rohdichte
$q_k$	Nutzlast, charakteristisch
R	Risse
$R^2$	Bestimmtheitsmaß
s	Prüfzeit
t	Temperatur
u	Weg
U	elektrische Spannung
$v_{\text{mean}}$	Schallgeschwindigkeit
$\omega$	Holzfeuchtigkeit

## Verzeichnis von Abkürzungen

BSH	Brettschichtholz
KVH	Konstruktionsvollholz
MFH	Mehrfamilienhaus
VHÖB	Versuchsanstalt für Holzbau und ökologische Bautechnik
AP	Arbeitspaket
UBA	Umweltbundesamt
LCA	Lebenszyklusanalyse
LCC	Lebenszykluskostenberechnung
GWP	Treibhauspotenzial (Global Warming Potential)
BSI	British Standards Institution
NZ	Nutzungszyklus
RC	Recycling

## Zusammenfassung

Der vorliegende Abschlussbericht stellt die Ergebnisse des durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt geförderten Forschungsprojekts „Neubau des Museums-Pavillons der TU Berlin als Reallabor-Bauen“ vor. Die 12-monatige erste Stufe des Forschungsprojekts ist in vier Forschungsbereiche und Arbeitspakete gegliedert, die in diesem Bericht zusammengefasst werden. Die Fortführung, Detaillierung und Umsetzung des Forschungsvorhabens in einer zweiten Stufe ist geplant und beantragt.

In Arbeitspaket 1 – Wiedergewinnung und -verwendung von Altholz als Baustoff für Tragwerke – werden die gegenwärtigen juristischen Grundlagen der Altholzwiederverwendung zusammengefasst und dargelegt. Weiterhin werden mithilfe von Altholz aus drei Berlin bzw. berlinnahen Rückbauvorhaben exemplarisch die Gewinnung, der Transport, die Aufbereitung sowie die Sortierung von Altholz in Festigkeitsklassen durchgeführt. Die Sortierung erfolgt vergleichend mit mehreren visuellen bzw. maschinengestützten Verfahren. Anhand der Ergebnisse und Erfahrungswerte aus der exemplarischen Durchführung der Altholzakquise wird ein allgemeingültiger Ablauf erarbeitet, mit dessen Hilfe Planer:innen und Bauherr:innen in der Lage sind, Altholz in ihren Bauvorhaben einzusetzen. In Bezug auf die Thematik der Altholzsortierung wird ein Bedarf für weiterführende Forschung festgestellt.

In Arbeitspaket 2 – Kreislaufgerechte Altholznutzung - Tragwerksentwurf – werden weitspannende Tragwerkstypologien, wie sie im Museumspavillon zum Einsatz kommen sollen, hinsichtlich der Verwendbarkeit von Altholz und der Rückbaubarkeit der notwendigen Verbindungen untersucht und optimiert. Es wird eine Parameterstudie hinsichtlich der notwendigen Querschnitte und auftretenden Schnittgrößen anhand eines 12 Meter spannenden Holzfachwerkträgers durchgeführt. Weiterhin werden für das Realisierungsvorhaben infrage kommende Holz-Holz-Verbindungen untersucht, indem ein theoretisches Bemessungsmodell entwickelt und anschließend Kleinteilprobekörper exemplarisch mithilfe von Druckversuchen beprobt werden.

In Arbeitspaket 3 – Beton- und stahlarme Gründung – werden zwei Varianten von Einzelfundamenten anhand der Lasten aus dem Realisierungsprojekt entworfen. Beide Varianten minimieren den Einsatz von Stahlbeton im Vergleich zu konventionellen Einzelfundamenten. Für die Varianten werden mögliche Bemessungskonzepte vorgestellt und konstruktive, ausführungsrelevante Details erörtert.

In Arbeitspaket 4 – Kreislaufgerechte Planung und Realisierung, Bewertung – werden die Rahmenbedingungen des neuartigen Reallabor-Ansatzes zusammengefasst, die die Grundlage für die kreislaufgerechte Planung und die Ausrichtung des Forschungsprojekts bilden. Zur Bewertung der ökologischen Vorteile der in dem Forschungsprojekt entwickelten Bauteile aus wiederverwendeten Materialien werden aktuelle Bewertungsansätze anhand der Umweltauswirkungen (LCA) vergleichend angewendet und daraus ein eigener Ansatz abgeleitet. Die Unschärfe der Ergebnisse zeigt einen Forschungsbedarf auf; empfohlen wird die Weiterentwicklung zu einem mehrdimensionalen Bewertungsansatz unter Einbezug zusätzlicher Faktoren in der zweiten Phase des Forschungsprojekts.

Das Forschungsprojekt wurde in einem interdisziplinären Konsortium von drei Fachgebieten der Technischen Universität Berlin bearbeitet: Fachgebiet Entwerfen und Konstruieren - Verbundstrukturen, Prof. Dr.-Ing. Volker Schmid (Projektleitung), Jonas Bonhage, Fachgebiet Tragwerksentwurf und -konstruktion Prof. Dr.-Ing. Kerstin Wolff, Jonas Müller, Hakan Gülay sowie Fachgebiet Konstruktives Entwerfen und Klimagerechte Architektur, Prof. Eike Roswag-Klinge, Julian Mönig, Sina Jansen. Das Forschungsprojekt kooperierte mit dem Fachgebiet Grundbau und Bodenmechanik, Prof. Dr.-Ing. Frank Rackwitz, sowie dem Realisierungsprojekt „Pavillon und Wissenspfade“ der TU Berlin und dem Generalplanungsteam des Vorhabens ZRS Architekten und Ingenieure.

Diese 1. Stufe des Vorhabens ist gefördert durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt, Az. 38392/01.

# 1. Einleitung

Zur Erreichung der Klimaziele im Bausektor bis 2050 bedarf es einer radikalen Transformation der Art, in der gegenwärtig geplant und gebaut wird. Vor dem Hintergrund schwindender Ressourcen und den ökologischen Negativwirkungen der Herstellung von neuen Baumaterialien kommt der hochwertigen Wieder- und Weiterverwendung von Baustoffen und Bauteilen eine besondere Bedeutung zu. Für die Erreichung einer Kreislaufbauwirtschaft müssen die Inanspruchnahme von Rohstoffen maßgeblich reduziert, Lebenszyklen von Ressourcen, Bauteilen und ganzen Gebäuden längst möglich gestaltet und Abfall fast gänzlich vermieden werden. Hierfür sind im Bausektor radikale Innovationsschübe auf allen Ebenen notwendig – von der Material- und Bauteilentwicklung aus wiederverwendeten Materialien bis hin zur kreislaufgerechten Konzeption ganzer Gebäude. [1]

Das Forschungsprojekt „Neubau des Museums-Pavillons der TU Berlin als Reallabor-Bauen“ verfolgt das Ziel, das große Potenzial bestehender Sekundärbaustoffe und -produkte im anthropozänen Lager effizient auszuschöpfen und dafür notwendige, bislang fehlende Rahmenbedingungen zu erforschen und zu schaffen.

Gemäß einer Studie des Umweltbundesamtes werden die ökologischen und wirtschaftlichen Vorteile des Materialrecyclings und der Nachnutzung ganzer Bauteile bislang nur unzureichend oder gar nicht berücksichtigt. Beim Abbruch bzw. Rückbau anfallende mineralische Baustoffe werden größtenteils verwertet, allerdings nur zu einem Bruchteil in hochwertiger Form als Substitution in Primärbaustoffen. Andere anfallende, nicht mineralische Bauabfälle wie Kunststoffe und Holz werden primär thermisch und in nur wenigen Ausnahmen stofflich verwertet. Der vermehrte Einsatz von Baustoffen in Materialverbänden macht eine sortenreine Trennung zur Weiterverwendung nach derzeitigem Stand unmöglich. [2]

Kern des Forschungsvorhabens sind die Konzeption und Entwicklung von innovativen Tragsystemen, optimiert für die Herstellung aus wiederverwendeten Rohstoffen, die eine sortenreine Trennung und spätere Wiederverwendung vereinfacht ermöglichen. Für die Umsetzung dieser Ansätze abseits gängiger Standards bedarf es neben technischen Innovationen auch Anpassungen auf prozessualer Ebene: Herkömmliche Prozesse von der Forschung über die Entwicklung bis zur Umsetzung sind an vielen Stellen nicht mehr praktikabel, um die notwendige Geschwindigkeit der Transformation des Bausektors zu erreichen. Die direkte Zusammenarbeit von Forschung und Praxis für einen beschleunigten Wissenstransfer ist dafür von besonderer Bedeutung. Hierfür fehlt es in der Baupraxis an methodischen Rahmenbedingungen.

Das Forschungsprojekt kooperiert mit dem Realisierungsvorhaben „Museums-Pavillon“ der Technischen Universität Berlin, in dem die erforschten Bauteile aus Sekundärmaterialien in die Planung integriert und baulich umgesetzt werden. Durch die enge Kooperation dieses Forschungsvorhabens mit dem Realisierungsprojekt wird ein neuartiger Reallabor-Ansatz für das Planen und Bauen in planetaren Grenzen formuliert und erprobt. Diese besondere Konstellation ermöglicht die Entwicklung und erstmalige Umsetzung eines zukunftsweisenden Pilotprojekts für einfaches, schadstofffreies Bauen in Holz, das Abfall fast gänzlich vermeidet. Durch ein klimaangepasstes Design, die Entwicklung zirkulärer Bausysteme unter Einsatz wiederverwendeter Materialien sowie ein innovatives Low-Tech-Konzept entsteht ein kreislaufgerechtes, klima- und ressourceneffektives Gebäudeprinzip.

Die Wiederverwendung von Ressourcen im Bausektor findet aufgrund der aktuellen Rechtslage nur von ausgewählten Gebäudekomponenten wie bspw. dem Innenausbau, Fassaden und Mobiliar statt. Diese machen allerdings nur einen geringen Anteil der in der gebauten Umwelt gebundenen Ressourcen aus. Vor allem tragende Bauteile müssen per Gesetz zumeist aus neuen Materialien oder mit nur sehr geringen Recyclinganteilen realisiert werden. Gleichzeitig machen diese ressourcenintensiven Bauteile einen Großteil der jährlich anfallenden Bauabbruchabfälle aus. Dem Ingenieurholzbau kommt im Bauwesen zum Erreichen der Klimaziele eine besonders bedeutende Rolle zu. Im Holzbau wird bis dato annähernd

ausschließlich neues Schnittholz verwendet. Das Forschungsvorhaben treibt deshalb die Verwendung innovativer Tragwerkskonzepte voran, bei denen hauptsächlich Holz aus Bau- und Abbruchabfällen zum Einsatz kommt und die zudem mittels reversibler Verbindungsmittel vollständig rückbau- und wiederverwendbar sind.

Der Verzicht bzw. die signifikante Reduktion des Betons durch die innovative Gründungsart stehen im starken Gegensatz zur aktuell gängigen Baupraxis, bei der Fundamente standardmäßig ressourcenintensiv aus Stahlbeton ausgeführt werden. Mithilfe der im Rahmen dieses Forschungsvorhabens vorgestellten Art der Gründung kann bestehender Grünraum weitgehend erhalten und die Bauteilkomponenten deutlich einfacher rückgebaut und gleichwertig wiederverwendet werden. Zusätzlich werden Baustellen- und Abbruchabfälle minimiert bzw. vorgebeugt, die üblicherweise anfallen.

Der Fokus des Forschungsprojekts liegt somit auf der Produktion von tragenden Bauteilen aus lokal verfügbaren, wiederverwendeten Altholz-Bauteilen aus Berliner Bau- und Abbruchabfällen sowie der ökologischen Optimierung der klassischen Gebäudegründung durch die Entwicklung von beton- und stahlarmen Fundamenten aus Recycling-Materialien. Dieser Ansatz geht über herkömmliche Urban Mining-Konzepte hinaus und stellt eine innovative Antwort auf die großen Herausforderungen im Bauwesen dar. Besonders hervorzuheben ist dabei die Wiederverwendung von Altholz in einem Neubauvorhaben und in tragender Funktion.

Die oben beschriebenen Themenfelder werden im Rahmen des Forschungsprojekts in vier Aufgabenbereiche aufgeteilt. Alle Aufgabenbereiche beschäftigen sich mit konkreten Fragestellungen des Realisierungsprojekts Museums-Pavillon, geben aber gleichzeitig Antworten auf allgemeine, gegenwärtig relevante Fragen der Kreislaufwirtschaft, wie sie täglich im Zuge zahlreicher Neu- und Umbauvorhaben auftreten.

Der Aufgabenbereich der Altholzgewinnung beschäftigt sich mit der Frage, wie Altholz auf einer praktischen Ebene in tragender Funktion wiederverwendet und dadurch mit geringstmöglichem Downcycling im Stoffkreislauf erhalten bleiben kann. Insbesondere relevant ist dafür, was die gegenwärtige Rechtsgrundlage in Bezug auf die Wiederverwendbarkeit von Holz ist. Weiterhin spielt für die Wiederverwendung als Tragwerk die Einsortierung des Holzes in Sortier- und damit Festigkeitsklassen eine entscheidende Rolle. Da es für Altholz kein festes Regelwerk und nur wenige vorherige Forschungsergebnisse für die Festigkeitssortierung gibt, werden hier verschiedene Verfahren erprobt und verglichen. Schließlich ist es das Ziel dieses Aufgabenbereichs, einen möglichst allgemeingültigen Ablauf zu beschreiben, mit dessen Hilfe Planer:innen und Bauherr:innen in der Lage sind, Altholz in Ihren Bauvorhaben zum Einsatz zu bringen.

Der Aufgabenbereich der kreislaufgerechten Altholznutzung im Tragwerksentwurf knüpft an die oben beschriebene Fragestellung der Altholzgewinnung und -bereitstellung an: Was ist im Rahmen des Tragwerksentwurfs, hier mit Fokus auf dem Realisierungsprojekt, zu beachten, um möglichst flächendeckend Altholz einsetzen zu können? Die wichtigsten Fragestellungen sind dabei einerseits, welche Querschnitte und Geometrien in Altholz zur Verfügung stehen und welche Tragwerkstypologien daher im Neubau zum Einsatz kommen sollten, und andererseits, wie Knotenpunkte und Fügungen im Holzbau derartig optimiert werden können, damit eine bestmögliche Rückbaubarkeit und Wiederverwendbarkeit der Querschnitte garantiert werden kann.

Der Entwurf des Museums-Pavillons sieht vor, dass Fundamente zum Einsatz kommen, die sowohl auf wiederverwendete Materialien zurückgreifen als auch möglichst rückbaubar sein sollen. Mit den damit verbundenen Fragestellungen beschäftigt sich der Aufgabenbereich der beton- und stahlarmen Gründung. Konventionelle Fundamente von Hochbauten werden heutzutage fast ausschließlich aus Stahlbeton gefertigt und nur in Ausnahmen wiederverwendet – bzw. ist die Wiederverwendung mit einem großen Energieaufwand und massiven Downcycling verbunden. Um im Realisierungsprojekt innovative, beton-



und stahlarme Fundamente zum Einsatz bringen zu können, werden zwei alternative Varianten von Einzelfundamenten hinsichtlich ihres vertikalen Lastabtrags untersucht. Dabei stehen vor allem Fragen der inneren Standsicherheit im Mittelpunkt.

In dem Forschungsgebiet „Kreislaufgerechte Planung und Realisierung, Bewertung“ steht die Ableitung übertragbarer Leitlinien zur Umsetzung kreislaufgerechter Reallabore im Bausektor auf Grundlage der Forschungsergebnisse und die Bewertung der veränderten Umweltauswirkung durch den Einsatz wiederverwendeter Materialien in translozierbaren, tragenden Bauteilen im Fokus.

Zur Stärkung kreislaufgerechter Ansätze und Legitimation des aktuell noch notwendigen Mehraufwandes für das Planen und Bauen mit wiederverwendeten Materialien braucht es adaptierte Bewertungsansätze, um die Vorteile der Wiederverwendung für eine nachhaltige Planungspraxis messbar zu machen. Die meisten etablierten Instrumente zur Ökobilanzierung (LCA) sind jedoch nicht geeignet, um die Umweltauswirkungen eines Gebäudes zu beurteilen, dessen Komponenten wiederverwendet sind und/oder in zukünftigen, noch nicht geplanten Gebäuden wiederverwendet werden können. Für langlebige Bauteile, die über mehrere Nutzungszyklen hinweg eingesetzt werden können, braucht es einen anderen Berechnungsansatz, der die Verzögerung der CO<sub>2</sub>-Emissionen rechnerisch berücksichtigt und wertschätzt. Ziel des Vorhabens ist die Entwicklung eines mehrdimensionalen Bewertungskonzepts unter Berücksichtigung der Umweltauswirkungen und Umweltfolgekosten (LCA und LCC), der Ressourceneffizienz (VDI 4800), der zirkulären Materialnutzungsraten CMU oder Rezyklateinsatzquote, des Zeit- und Kostenaufwandes sowie der baupraktischen Umsetzung. In der ersten Stufe des Vorhabens wurde eine vergleichende Analyse in der Wissenschaft bestehender Ansätze zur Berechnung der Ökobilanz wiederverwendeter Materialien und Bauteile in Anlehnung an die LCA gemäß DIN EN 15978 erstellt und auf die verschiedenen Bauteilvarianten des Forschungsvorhabens angewendet. Daraus wurde ein eigener Ansatz abgeleitet, der die entwickelten Bauteile – bestehend aus Materialien in unterschiedlichen Nutzungszyklen – bestmöglich erfasst und auf dieser Grundlage im Vergleich zu konventionellen Bauteilen bewertet.

## 2. Hauptteil

### 2.1 Wiedergewinnung und -verwendung von Altholz als Baustoff für Tragwerke

#### 2.1.1 Wiederverwendbarkeit gemäß aktueller Rechtslage und Stand der Technik

Um Altholz wieder als Bauprodukt und insbesondere in tragender Funktion einsetzen zu können, ist ein rechtssicheres, der aktuellen Normung und dem aktuellen Stand der Technik entsprechendes Konzept notwendig. Eine zentrale Herausforderung in der Wiederverwendung von Altholz aus Abbrüchen bzw. Rückbauten besteht darin, dass dieses Holz gegenwärtig in nahezu allen Fällen die Abfalleigenschaft erhält. Damit fallen die Bauprodukte in einen separaten, komplexen Rechtsbereich: Das Abfallrecht. Dies führt dazu, dass für die Wiederverwendung zusätzliche Hürden zu überwinden sind.

#### Vermeidung der Abfalleigenschaft

Im Rahmen einer vom Hauptverband der Deutschen Bauindustrie in Auftrag gegebenen juristischen Studie [3] wurde 2022 der Themenkomplex der Weiter- und Wiederverwendung von Bauprodukten und Baustoffen untersucht. Die Studie gibt einen Überblick über die gegenwärtige Rechtslage, wobei aber primär allgemeine Aussagen zu Baustoffen getroffen werden und der Fokus nicht auf dem Baustoff Holz liegt. Im Folgenden werden die für den Umgang mit Altholz relevanten Aussagen der Studie zusammengefasst. Konkret bedeutet eine Abfalldeklarierung des Holzes, das für einen Neubau verwendet werden soll, gemäß [3] die folgenden Hürden:

1. Im Allgemeinen sind im Umgang mit Bauabfällen die Regelungen des Abfallrechts zu beachten, die üblicherweise andere und/oder deutlich strengere Maßnahmen vorsehen als es mit neuen Produkten der Fall ist. In der Regel spielt das Abfallrecht bei konventionellen Neubauten keine Rolle, wodurch bei den meisten Bauvorhaben die notwendigen Vorerfahrungen und Rahmenbedingungen zum ordnungsgemäßen Umgang mit Abfall nicht gegeben sind.
2. "Um das Material anschließend wieder als Produkt oder auch als Rohstoff in den Bereich des Produktrechts zu überführen, müssen erst die im Abfallrecht festgelegten [...] Materialeigenschaften gütegesichert erfüllt werden." [3] Um sicherzustellen, dass die Materialeigenschaften erfüllt sind, sind aufwändigere Maßnahmen notwendig als bei der Einstufung von Bauprodukten, da das Material a) die Abfalleigenschaft verlieren und b) die Zulassung als Produkt erreichen muss.
3. Die zu beachtenden Regularien und Gesetze sind gegenwärtig derart umfangreich und komplex, dass ökonomisch orientierte Bauherr:innen die Auseinandersetzung damit vermutlich eher vermeiden und den "einfachen", konventionellen Weg gehen werden.
4. Selbst wenn die vollständige Dokumentation des rückgebauten Gebäudes bzw. der Quelle des zu recycelnden Materials vorhanden ist, hat sich seit dem Zeitpunkt des Baus ggf. die Normung und Rechtsprechung geändert, sodass die Dokumente teilweise oder vollständig nicht zu gebrauchen sind oder sodass auf deren Basis zumindest keine verlässliche Beurteilung vorgenommen werden kann.

Die genannten Hindernisse führen dazu, dass der "Umweg" über das Ende der Abfalleigenschaft in der Realität in den wenigsten Fällen bzw. annähernd nie beschritten wird. Im Folgenden wird dieser Fall daher nicht weiter betrachtet.

Die Strategie, die im Rahmen des gegenwärtig geltenden Rechts zielführend erscheint, um Altholz wiederverwenden zu können, ist die Vermeidung der Abfalleigenschaft bzw. die Abfallvermeidung. Ist die Abfallvermeidung erfolgreich, wird das Holz im Prozess der Weiterverwendung nie zu Abfall und damit auch nie zu „Altholz“ im juristischen Sinne. (Im Rahmen dieses Berichts wird dennoch ausschließlich die Bezeichnung „Altholz“ verwendet, wenn von altem, wieder zu verwendendem Holz die Rede ist.) Gemäß [3] sei die Verhinderung der Abfalleigenschaft eine im geltenden Recht verankerte Strategie, die gemäß Abfallhierarchie Vorrang habe.

Bei einem konventionellen Rückbauvorgang wird in der Regel bezüglich der einzelnen Baumaterialien mehr oder weniger pauschal ein Entsorgungswille bekundet und im selben Moment wird das zu entsorgende Material zu Abfall. Die Bekundung des Entsorgungswillens erfolgt üblicherweise in Form des Bauantrags für den Rückbau. Zentraler Aspekt der Abfallvermeidung ist damit der zeitliche Ablauf, in dem mit dem Material umgegangen wird: Bereits bei der Erstellung eines (Teil-)Rückbaukonzepts, in der Regel durch die Architektur, ist darauf zu achten, dass die Abfalleigenschaft der anfallenden Stoffe vermieden wird.

Grundlegende Voraussetzung für die Abfallvermeidung ist, dass ein Gefahrenpotenzial für Mensch und Umwelt durch das Material sicher ausgeschlossen wird. Die Beurteilung des Gefahrenpotenzials passiert üblicherweise in Form eines Schadstoffgutachtens. Weiterhin notwendig für die Abfallvermeidung ist, den weiteren Verwendungszweck der Materialien frühzeitig - bereits vor deren Rückbau - festzulegen. Als infrage kommender Verwendungszweck bestehen zwei Optionen: a) Eine Weiterverwendung mit den gleichen Eigenschaften und unter denselben Bedingungen; b) als Ressourcenquelle für die Herstellung materialgleicher Bauprodukte [3].

Es sei darauf hingewiesen, dass gemäß der erwähnten juristischen Studie die beiden genannten Optionen alle anderen theoretisch infrage kommenden Verwendungszwecke mit dem zurückgebauten Holz ausschließen, sofern die Abfalleigenschaft vermieden werden soll. Es ist beispielsweise nicht möglich, Abfall zu vermeiden, indem als zukünftiger Verwendungszweck eine rein finanzielle Veräußerung des Materials vorgesehen ist oder eine thermische Verwertung.

Geschieht eine finanzielle Veräußerung ohne Angabe des zukünftigen Verwendungszwecks, wird das Holz auf der Stelle zu Abfall [4]. Weiterhin erscheint es gemäß der aktuellen Gesetzeslage nicht möglich, das anfallende Holz auf unbestimmte Zeit zu lagern, ohne dass der konkrete zukünftige Verwendungszweck feststeht.

Bereits vor dem Zeitpunkt des tatsächlichen Rückbaus aus dem Bestandsgebäude muss der künftige Verwendungszweck des Holzes feststehen. Diese Vorgehensweise wird, je nach Bauvorhaben, ggf. dadurch deutlich erschwert, dass eine Bestandsaufnahme des Holzes in situ nur schwierig bzw. gar nicht möglich ist.

Die juristische Studie weist darauf hin, dass für die ordnungsgemäße Übergabe der Materialien, bspw. von der Bauherr:innenenschaft des Rückbaus zur Bauherr:innenenschaft des Neubaus, und für die kontinuierliche Abfallvermeidung eine feste Vertragsbeziehung sichergestellt sein muss. Weiterhin ist es für die kontinuierliche Vermeidung der Abfalleigenschaft notwendig, dass die weitere Verwendung der gebrauchten Bauprodukte rechtmäßig ist. Insbesondere müssen sie – ggf. nach Prüfung, Reinigung, Reparatur oder einer weitergehenden (Vor-) Behandlung bzw. Wiederaufbereitung – alle für die beabsichtigte Verwendung geltenden Produkt-, Umwelt- und Gesundheitsschutzanforderungen erfüllen und dürfen nicht zu schädlichen Auswirkungen auf Menschen und Umwelt führen [3].

### Ablauf der Altholzgewinnung nach aktuellem Stand der Technik

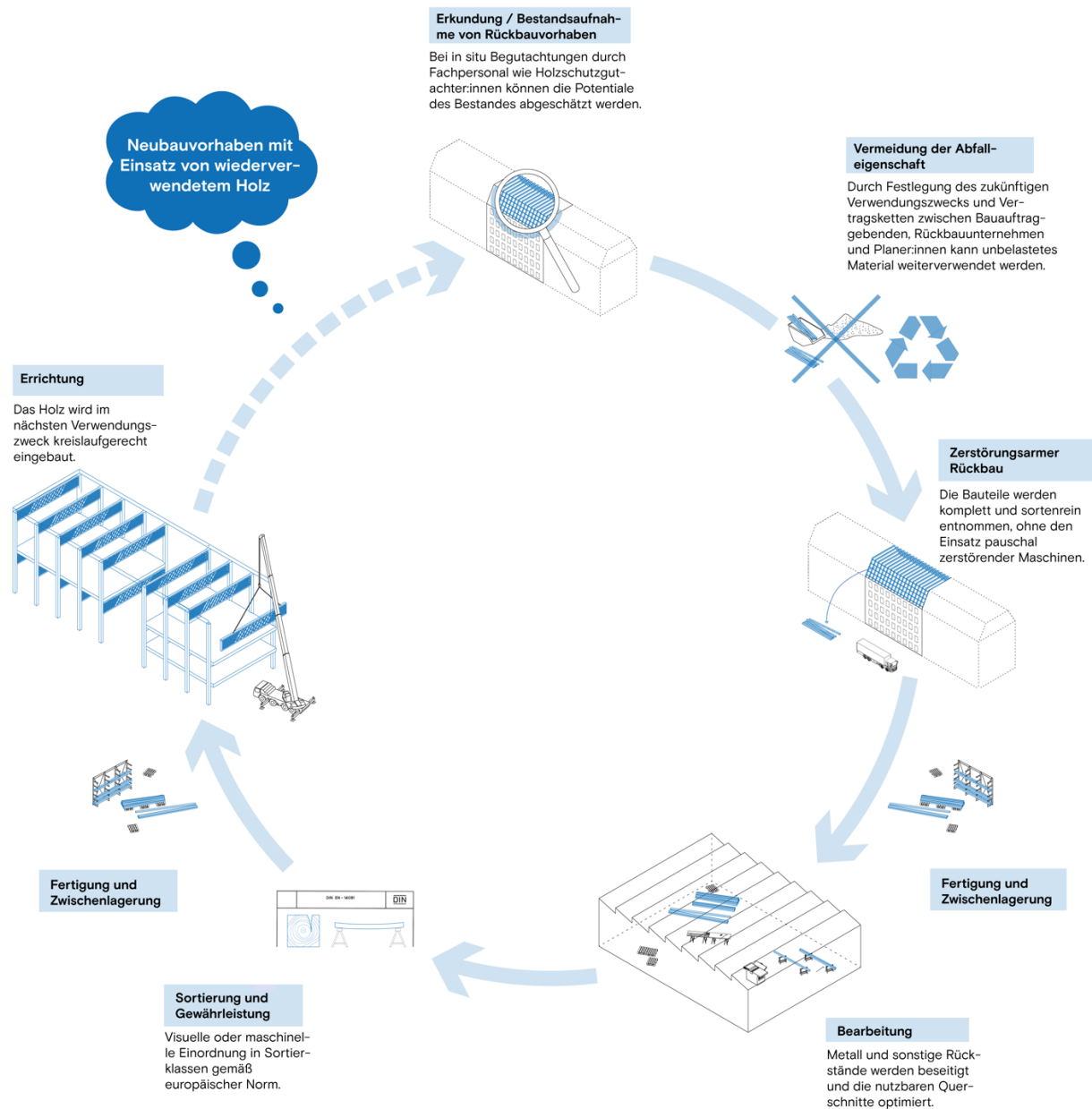
Die im Folgenden beschriebene Vorgehensweise zur Gewinnung von Altholz, die auf dem aktuellen Stand der Technik und Gesetzgebung basiert, geht auf die oben genannten Herausforderungen ein. Prinzipiell liegt die Verantwortung hinsichtlich der ordnungsgemäßen Gewinnung von Altholz und der Abfallvermeidung - sofern diese gewünscht ist - bei der Bauherr:innenschaft. Sie kann die einzelnen Teilaufgaben an die übrigen Planungsbeteiligten delegieren.

- Generelle Erkundung des Bestandes hinsichtlich der vorhandenen Einzelbauteile und Materialien
- Oberflächliche Ersteinschätzung hinsichtlich der Möglichkeit der allgemeinen Weiterverwendbarkeit der einzelnen Bauteile *in situ*. Durch Fachpersonal sind insbesondere die folgenden potenziellen Ausschlusskriterien zu untersuchen:
  - o Großflächige biologische Schädigung durch holzerstörende Pilze (Weißfäule & Braunfäule)
  - o Holzerstörende Schädlinge (z. B. Insektenfraß)
  - o Großflächige Feuchteschäden

Ist die Ersteinschätzung *in situ* nicht möglich, ist die Möglichkeit der Vermeidung der Abfalleigenschaft zumindest in Frage gestellt. Eine pauschale Bekundung, dass sämtliche Bauteile zukünftig weiterverwendet werden sollen, ist prinzipiell möglich. Allerdings ist eine konkrete Benennung des zukünftigen Verwendungszwecks erschwert, sofern keine konkreten Informationen über die Bauteile vorliegen.

- Beprobung hinsichtlich Belastung durch alte Holzschutzmittel und Schwermetall nach Altholzverordnung [5] *bereits in situ* und ein darauf basierendes Holzschutzgutachten.
- In Hinsicht auf die zu diesem Zeitpunkt ggf. nicht abschließend sichergestellte Wiederverwendbarkeit des Materials erscheint eine Einstufung in Altholzkategorien *bereits in situ* durch ein Holzschutzgutachten sinnvoll. Sollte das Material im weiteren Verlauf wider Erwarten zu Abfall werden, ist damit bereits festgelegt, welche weiteren Verwendungszwecke infrage kommen.
- Festlegung eines spezifischen zukünftigen Verwendungszwecks des Holzes *vor* dem Rückbau, dokumentiert und belegt durch eine Vertragskette, bspw. zwischen ehemaligen und zukünftigen Bauherr:innen.
- Vorsehen eines provisorischen Lagerplatzes der Bauteile am Ort des Rückbaus, unbedingt wettergeschützt und nicht erdberührt.
- Ausschreibung des geplanten Rückbaus für infrage kommende Rückbauunternehmen, wobei explizit darauf hingewiesen werden muss, dass die betreffenden Holzbauteile vollständig zu erhalten und nicht zu entsorgen sind. Ein frühzeitiges Miteinbeziehen des Rückbauunternehmens erscheint sinnvoll, da bei den meisten konventionellen Rückbauvorhaben nicht zwangsläufig Wert auf die Wiederverwendbarkeit der Tragwerkselemente (aus Holz) gelegt wird.
- Entnahme beim Rückbau nach Möglichkeit als komplettes Bauteil, ohne oder mit minimaler Veränderung der Gesamtgeometrie des Bauteils oder der Struktur des Materials; Vermeidung des Einsatzes von pauschal zerstörenden Maschinen; "selektiver Rückbau" [3], sortenreine Trennung der Materialien.
- Provisorische, wettergeschützte Zwischenlagerung vor Ort, derart gestapelt, dass eine Luftzirkulation zwischen den Bauteilen möglich ist. Die Zwischenlagerung der brauchbaren Hölzer erfolgt unmittelbar nach der eventuellen Aussortierung derjenigen Bauteile, die nach Inaugenscheinnahme nicht zur Weiterverwendung taugen. Diese untauglichen Bauteile werden, trotz des ursprünglichen Willens der Weiterverwendung, zu Abfall.
- Bearbeitung der brauchbaren Bauteile und Feststellung der Materialeigenschaften (Sortierung), siehe dazu Abschnitt 2.1.3
- Temporäre, sachgerechte Lagerung des Altholzes, bevor es dem spezifischen Verwendungszweck zugeführt wird.

Der so ermöglichte kreislaufgerechte Einsatz von Altholz in tragender Funktion ist in Abbildung 1 visualisiert. Sollte sich die Gesetzeslage hinsichtlich der Vermeidung der Abfalleigenschaft in Zukunft verändern, behält der oben genannte Ablauf grundsätzlich weiterhin seine Gültigkeit, da er auch über den Aspekt der Abfallvermeidung hinaus als geeigneter Ablauf nach aktuellem Stand der Technik im Umgang mit Holz, das weiterverwendet werden soll, betrachtet werden kann.



**Abbildung 1: Kreislaufgerechter Einsatz von Altholz**

Der oben dargestellte Prozess beschreibt die nach gegenwärtiger Gesetzeslage und dem Stand der Technik notwendige und geeignete Vorgehensweise. Dieser Prozess ließe sich an mehreren Stellen optimieren, sofern sich die Gesetzeslage und die allgemeine Baupraktik ändern würden (siehe Abbildung 2). Beispielhaft werden hier vier Stellen genannt, an denen der Prozess der Altholzbeschaffung zukünftig erleichtert werden könnte:

- Die Wiederverwendung von Baustoffen sollte legislativ verankert werden und Baustoffe sollten auch ohne spezifischen zukünftigen Verwendungszweck nicht pauschal als Abfall deklariert, sondern als potenzielle Ressource für Neubauvorhaben genutzt werden dürfen;

- der konsequente Einsatz reversibler Verbindungen würde den Rückbauprozess erleichtern und die Bergung möglichst vollständiger Einzelbauteile ermöglichen;
- ebenso würde die Verpflichtung zum Erstellen einer Rückbaustrategie bereits in der Planung für einen erleichterten späteren Rückbau sorgen;
- die vollständige Dokumentation der verwendeten Baustoffe in Form eines Gebäudepasses würde die Identifikation der Einzelbauteile und die Feststellung der Werkstoffeigenschaften erleichtern und beschleunigen.

Diese Punkte wären wichtige Schritte hin zu einem optimierten kreislaufgerechten Umgang mit Altholz, der den Potenzialen des Werkstoffs gerecht wird.

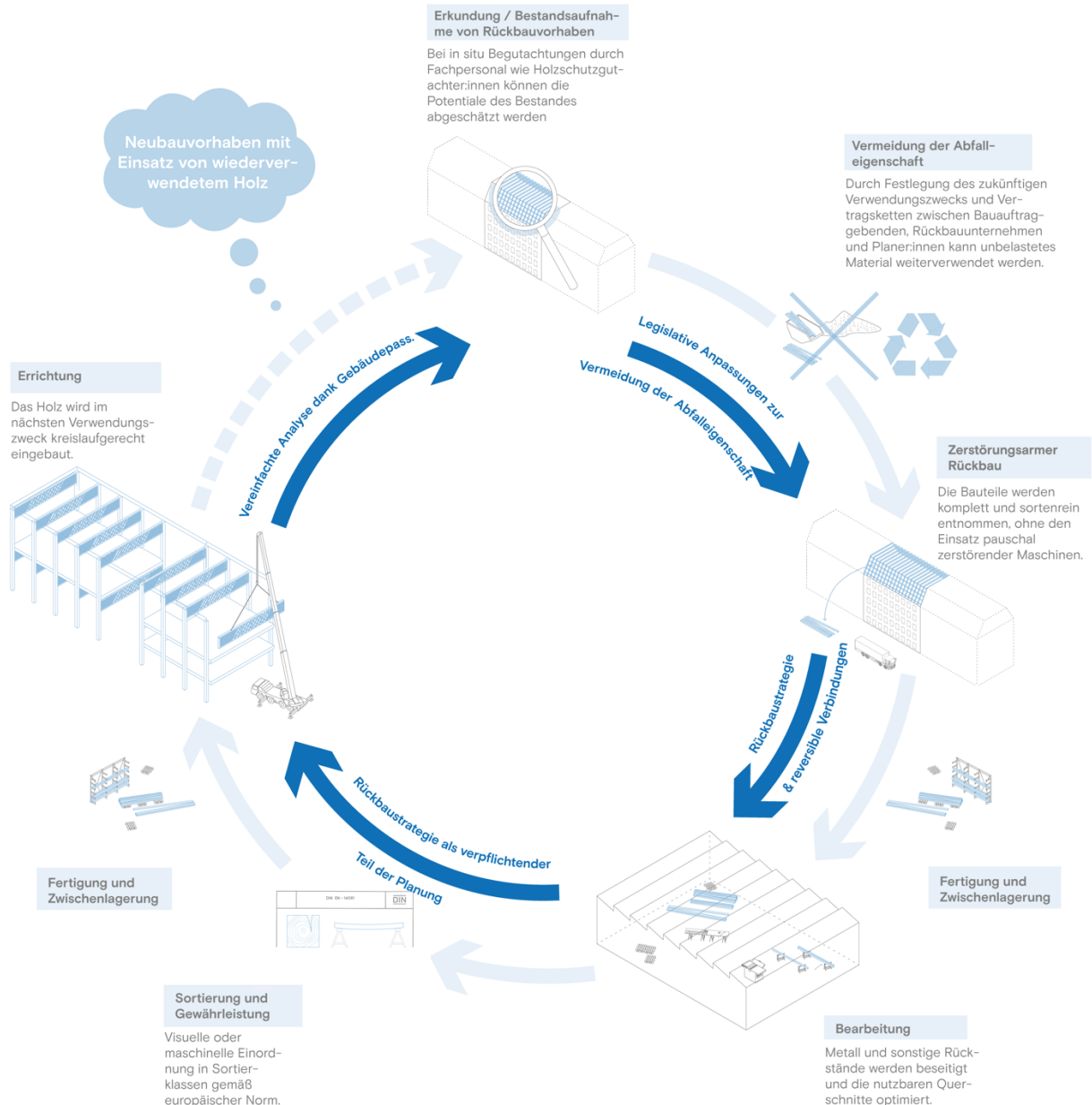


Abbildung 2: Optimierter kreislaufgerechter Einsatz von Altholz

### Gewährleistung durch CE-Kennzeichnung und Inverkehrbringen

Sofern Holzbauteile ausgebaut und an einem anderen Ort als tragende Holzbauteile wieder eingebaut werden sollen, ist eine Einstufung des Holzes in eine Festigkeitsklasse nach DIN EN 408 [6] erforderlich. Beim Einsatz von Frischholz erfolgt eine solche Leistungserklärung sowie unter Umständen eine CE-Kennzeichnung durch das herstellende Unternehmen. Mit dieser CE-Kennzeichnung verpflichtet sich das

herstellende Unternehmen, dass das Bauprodukt den produktspezifisch geltenden Harmonisierungsvorschriften entspricht und die gesetzlich zulässigen Mindestanforderungen einhält [7].

Da eine herstellerseitige CE-Kennzeichnung von Altholz gegenwärtig nicht vorgesehen oder geregelt ist, erfordert es für aktuelle Baumaßnahmen und das Realisierungsprojekt alternative Wege. Bauen mit Baustoffen ohne CE-Kennzeichen ist gemäß des Auskunftsservice des „Informationsdienst Holz“ in zwei Fällen möglich, die im Rahmen des TU-Pavillons Anwendung finden könnten [8]:

a) „Das Bauprodukt wird als Sonderanfertigung im Rahmen einer Nicht-Serien-Fertigung gefertigt und in einem bestimmten einzelnen Bauwerk von seinem Hersteller eingebaut.“ Der Hersteller übernimmt dabei die Gewährleistung über den sicheren Einbau des Produkts.

b) „Das Bauprodukt wird auf der Baustelle [...] nach den geltenden nationalen Bestimmungen gefertigt.“

Für die im Rahmen des Realprojekts angedachte Herstellung von Brettschichtholzträgern aus Altholz wäre es erstrebenswert, dass das herstellende Unternehmen die Gewährleistung und CE-Kennzeichnung für das entstehende Produkt übernimmt. Bei der Wiederverwendung einzelner Balken ist voraussichtlich die Beauftragung eines Gutachtens eines mit der Thematik vertrauten Unternehmens notwendig, das die Qualität des Holzes bescheinigt bzw. das die im Rahmen der zweiten Phase des Forschungsvorhabens ermittelten Untersuchungsergebnisse bestätigt. Weiterhin ist die frühzeitige Abstimmung mit dem bzw. der für das Bauvorhaben zuständigen Prüflingenieur:in für Standsicherheit von elementarer Wichtigkeit. Nur durch eine rechtzeitige Absprache mit allen an der Tragwerksplanung des Projekts beteiligten Stellen kann sichergestellt werden, dass Altholz in tragender Funktion zum Einsatz kommen kann.

### 2.1.2 Altholzgewinnung im Rahmen des Forschungsvorhabens

Im Rahmen des Forschungsvorhabens werden die im Abschnitt 2.1.1 beschriebenen materialtechnischen und logistischen Aspekte erprobt. Dabei spielt insbesondere die repräsentative Auswahl typischer (Teil-)Rückbauvorhaben eine Rolle, um möglichst allgemeingültige Rückschlüsse ziehen zu können. Es werden die in Tabelle 1 aufgeführten Bauobjekte gewählt:

Gebäude / Projekt	Verortung	Grund Rückbau	Typologie	Baujahr	Anzahl / Länge	Querschnitte b/h
Dachstuhl MFH Schererstraße [S]	Innenstadt	Neubebauung	Balken	1905	3 / 2-3 m	ca. 12 / 12 cm
Versammlungsstätte HZL [H]	Suburban	Neubebauung	Dachbalken	1955-58	25 / 5-6 m	ca. 10 / 21 cm
Scheune Ihlow [I]	Ländlich	Neubebauung	Balken	n. a.	20 / 4-5 m	ca. 12 / 20 cm

**Tabelle 1: Betrachtete Rückbauprojekte im Rahmen des Forschungsvorhabens**

#### Zustand

Für die gewonnenen Altholz-Balken erfolgt eine visuelle Ersteinschätzung hinsichtlich des Zustands, vgl. Tabelle 2. Nach der visuellen Ersteinschätzung der im Innenraum verbauten Holzquellen (HZL und Schererstraße) erscheint eine Weiterverwendung möglich. Bedingt durch den Einbauzustand in einer letztlich baufälligen Scheune sowie die unsachgemäße Zwischenlagerung (Feuchte, Dauer) der Bauteile sind Zweifel hinsichtlich der Wiederverwendbarkeit der Balken aus Ihlow gegeben. Diese Balken wurden bei einer ersten Begehung, bei der sie in situ begutachtet wurden, gegebenenfalls nicht in der notwendigen Tiefe hinsichtlich ihrer Wiederverwendbarkeit beurteilt.

Gebäude / Projekt	visuelle Ersteinschätzung	Verbindungsmittel	sonstige mechanische Schädigungen	biologische Schädigungen
Schererstraße [S]	gut	wenige Verbindungsmittel, nicht verrostet, leicht entfernbar	-	-
HZL [H]	gut	über gesamte Länge, kaum verrostet, leicht entfernbar	lokale Auflagernahe Schäden durch Rückbau	-
Ihlow [I]	schlecht	über gesamte Länge, stark verrostet, schwer vollständig entfernbar	lokale Auflagernahe Schäden durch Rückbau	Schimmelpilz, holzzerstörenden Insektenfraß

**Tabelle 2: Visuelle Ersteinschätzung der gewonnenen Altholz Balken**

### Logistik

Die Abstimmung mit oftmals an enge Terminpläne gebundene Rückbauunternehmen ist herausfordernd. Da die Bergung des Altholzes in einem konventionellen Rückbauprozess keine Priorität hat, ist im Zuge der Altholzgewinnung ein hohes Maß an terminlicher Flexibilität erforderlich – insbesondere, da bei innerstädtischen Baustellen oftmals kaum bis keine Flächen zur Zwischenlagerung zur Verfügung stehen. Weiterhin ist es auf den Baustellen zumeist notwendig, das Holz händisch zu bewegen. Dies ist personalintensiv und birgt durch unhandliche Dimensionen, im Holz verbliebene Verbindungsmittel und das Gewicht der Bauteile Verletzungsgefahren. In Tabelle 3 sind die logistischen Herausforderungen der drei Bauobjekte zusammengefasst.

Gebäude / Projekt	Zwischenlagerung	Abtransport / "Handling"	Terminliche Einbindung in Rückbauprozess
Schererstraße [S]	nicht möglich, keine Lagerfläche	Zerstörungsfreie Bergung aus Dachgeschoss MFH z.T. nicht möglich	geringes Zeitfenster für Abtransport, hohe Flexibilität erforderlich durch Verzögerungen im Bauablauf
HZL [H]	Ausreichend Fläche	unhandliche Dimensionen, Verletzungsgefahr durch herausstehende Verbindungsmittel	geringes Zeitfenster für Abtransport
Ihlow [I]	Ausreichend Fläche, unsachgemäß ausgeführt	unhandliche Dimensionen, Verletzungsgefahr durch herausstehende Verbindungsmittel	Rückbau bereits erfolgt

**Tabelle 3: Logistische Einbindung in die Rückbauvorhaben**

### Fazit der beispielhaft durchgeführten Altholzgewinnung im Forschungsprojekt

Es lässt sich festhalten, dass es für die Skalierung der Altholzgewinnung für das Realprojekt einer Professionalisierung aller Einzelabläufe bedarf. Im Zuge der exemplarischen Beschaffung und Bearbeitung von Altholz traten diverse Hindernisse auf: Zum Beispiel der händische Transport großer Einzelbauteile, die in Teilen unsachgemäße Zwischenlagerung oder die vereinzelt unzulängliche Voruntersuchung. Um diese Hindernisse im Realisierungsprojekt aus dem Weg gehen zu können, sollten im Rahmen der weiteren Forschung ein gut strukturierter und für das Bauvorhaben TU-Pavillon geeigneter Gesamttablauf der Altholzgewinnung konzipiert und festgelegt werden.

#### 2.1.3 Beurteilung der Qualität und Wiederverwendbarkeit von Altholz

##### Ausgangssituation

Holz weist als natürlich gewachsener Rohstoff von Baum zu Baum variierende Eigenschaften auf. Die Erfassung der wesentlichen Holzcharakteristika gibt Aufschluss über die Qualität und Eignung des Werkstoffs [9]. Dabei ist zu berücksichtigen, dass sich Teile der Holzcharakteristika im Zuge des Einbaus bzw. während des Rückbaus verändern können. Dazu zählen zum Beispiel Schwindrisse, die im Trocknungsprozess auftreten können, oder mechanische Schädigungen am Holz, die durch das Entfernen metallischer Verbindungsmittel bzw. einen nicht zerstörungsfreien Rückbau auftreten. Daher sind standardisierte Abläufe zur Beurteilung der Tragfähigkeit und somit der Wiederverwendbarkeit von Altholz erforderlich – auch bei Vorliegen der ursprünglichen Leistungserklärung zum Holz.

Ziel des Ablaufs ist es zum einen, eine gesicherte Zuordnung des Materials zu den Festigkeitsklassen nach DIN EN 338 [10] zu schaffen, damit die Bauteile den allgemeinen Anforderungen an Bauholz für tragende Zwecke gemäß DIN EN 14081-1 [11] entsprechen. Zum anderen muss das Verfahren den spezifischen



Charakteristika von Altholz gerecht werden und in rechtfertigbarem Umfang durchführbar sein. In der Literatur [[12], [13]] mit Bezug zum Bauen im Bestand deutet sich ein Konsens dazu an, dass eine sich in der Forschung befindliche Kombination aus visueller Untersuchung mit zerstörungsfreien/-armen, apparativen Prüfmethode eine sinnvolle Erfassung der Materialeigenschaften darstellt. Des Weiteren wird im Rahmen des Forschungsvorhabens ein zur Sortierung von Frischholz zugelassenes Handgerät getestet. Anhand der drei exemplarischen Altholzquellen wird überprüft, inwiefern sich die in der Literatur dargestellten Abläufe für die Problemstellungen des Reallabors übertragen lassen.

### Untersuchungsmethodik

Bei dem Probenmaterial handelt es sich um 11 Balken aus den drei oben genannten Quellen mit Querschnitten und Prüfkörperlängen gemäß Tabelle 4. Die Holzart ist jeweils makroskopisch als Kiefer identifiziert worden [14].

Serie	Schererstraße [S]	HZL [H]	l <sub>hlow</sub> [l]
Prüfkörperanzahl [-]	5	3	3
Nennquerschnitt b/h [mm]	120/120	100/210	140/200
Prüfkörperlänge L [mm]	2370...2530	4160...4620	4150...4960

**Tabelle 4: Querschnitte des Probenmaterials nach Altholzquelle**

Im Rahmen des Forschungsvorhabens werden folgende materialtechnische Untersuchungen vorgenommen:

1. Ermittlung der Holzfeuchtigkeit  $\omega$  nach DIN EN 13183-2 [15]
2. Ermittlung der Rohdichte  $\rho_{\text{mean}}$  nach DIN EN 408 [6] und DIN 52182 [16]
3. Zuordnung zu Sortierklassen und korrespondierenden Festigkeitsklassen mittels visueller Sortierung von Holz nach DIN 4074-1 [17]
4. Zerstörungsfreie Ultraschall-Impulslaufzeitmessungen
5. Zerstörungsfreie Bestimmung des Elastizitäts-Moduls und der Festigkeitsklasse mit dem Gerät Timber Grader
6. Ermittlung der Biegefestigkeit (Vier-Punkt-Biegeversuch) nach DIN EN 408 [6]

### Durchführung der Untersuchungen und Ergebnisse

Die Holzfeuchtigkeit wird am 23.06.2023 im Zuge der visuellen Sortierung in der Holzwerkstatt des Instituts für Architektur der TU Berlin (Umgebungstemperatur  $t = 25^\circ\text{C}$ ) mittels elektrischer Widerstandsmessung nach DIN EN 13183-2 [15] mit dem Gerät GANN Hydromette RT 600 aufgenommen. Die Balken lagerten zu diesem Zeitpunkt seit drei Wochen in der Halle. Die Rohdichte wird nach DIN EN 408 [6] ermittelt. Die Messwerte sind in Tabelle 5 festgehalten.

Serie	Schererstraße [S]					HZL [H]			l <sub>hlow</sub> [l]		
	S1	S2	S3	S4	S5	H1	H2	H3	l1	l2	l3
Rohdichte $\rho_{\text{mean}}$ [kg/m <sup>3</sup> ]	555	510	581	478	513	607	488	511	-	-	-
Holzfeuchte $\omega$ [%]	11,5	11,2	10,2	11,7	10,8	14,8	14,5	13,9	19,5	19,1	18,8

**Tabelle 5: Rohdichte  $\rho_{\text{mean}}$  und Holzfeuchte  $\omega$  der Balken**

### Visuelle Sortierung von Altholz

Die visuelle "Trockene Sortierung" erfolgt hinsichtlich der Sortiermerkmale gemäß DIN 4074-1 [17]. Die für das jeweilige untersuchte Merkmal ungünstigste Stelle des Schnittholzes ist für die Klassifizierung maßgebend. Lokale Schädigungen, die aus der Entfernung metallischer Verbindungsmittel resultieren, werden als Astlöcher betrachtet. Auf dieselbe Art werden Schäden beurteilt, die aus dem Rückbauprozess resultieren. In Abbildung 3 sind zum Ausschluss führende Kriterien der visuellen Sortierung exemplarisch dargestellt. Da die Kriterien der Sortierung normativ für eine Holzfeuchte von weniger als 20 % festgelegt sind, erfolgt die Sortierung nicht in situ.



**Abbildung 3: Sortierung der Altholzbalken: Zum Ausschluss führende Kriterien mechanische Schädigung, Insektenfraß, Baumkante, Verdrehung**

Bei Heranziehen aller Sortierparameter gemäß DIN 4074-1 [17] kann keiner der elf Balken einer Sortierklasse zugeordnet werden, siehe Tabelle 6.

	Schererstraße [S]					HZL [H]			Ihlow [I]			Grenzwert S10
	S-1	S-2	S-3	S-4	S-5	H-1	H-2	H-3	I-1	I-2	I-3	
Äste [-]	0,39	0,48	0,36	0,33	0,25	0,27	0,17	0,31	0,43	0,39	0,33	< 0,6
Faserneigung [%]	8	0,67	9,6	5,7	1,66	0,6	0,71	0,67	8,8	5	6,2	< 12
Markröhre [-]	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Nein	Ja	Ja	Ja	Ja	zulässig
Jahresringbreite [mm]	4,5	2,4	2,3	2	2,5	1,8	2,1	1,9	4,3	3,33	4	< 6,0
Schwindrisse [-]	0,43	0,32	0,13	0,39	0,34	0,32	0,29	0,19	<b>0,7</b>	0,36	<b>0,73</b>	< 0,5
Blitzrisse/ Ringschäle [-]	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	unzulässig
Baumkante [-]	0,18	0	0	0,2	0,1	<b>0,66</b>	<b>0,45</b>	<b>0,42</b>	<b>0,43</b>	<b>0,35</b>	<b>0,3</b>	< 0,25
Längskrümmung [mm]	5	7	4	4	6	0	0	0	0	5	5	< 8
Verdrehung [mm je 25mm Höhe]	<b>3</b>	<b>2,9</b>	<b>3,3</b>	<b>3,6</b>	<b>1,3</b>	0	0	0,3	0,57	<b>1,9</b>	0,63	< 1
Bläue [-]	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	zulässig
braune und rote Streifen [-]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	< 0,4
Braunfäule/ Weißfäule [-]	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	unzulässig
Druckholz [-]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	< 0,4
Insektenfraß [mm]	<b>10</b>	0	0	0	0	0	0	0	<b>10</b>	<b>10</b>	<b>10</b>	< 2
Sortierklasse [-]	nicht sortierbar					nicht sortierbar			nicht sortierbar			

**Tabelle 6: Ergebnisse der visuellen Sortierung der Balken**

Erkennbar ist, dass je Altholzquelle unterschiedliche Charakteristika zum Ausschluss führen. Balken der Reihe S weisen jeweils eine zu große Verdrehung auf. Weiterhin ist an Balken S-1 nicht zulässiger Insektenfraß festzustellen. Bei Reihe H überschreitet die vorhandene Baumkante den normativ zulässigen Wert. Für Balken der Reihe I verhindert neben zu großen Schwindrissen und vorhandenen Baumkanten vor allem der massive Insektenfraß eine Zuordnung zu einer Sortierklasse. Für diese Balken ist eine Weiternutzung ohne vorherige Querschnittsanpassungen nicht möglich. Wie in Abbildung 4 erkennbar, beschränkt sich der effektive Restquerschnitt der Balkenreihe I nach Entfernung des beschädigten Holzes auf den Bereich des Kernholzes. Aufgrund des geringen Restquerschnitts, dessen Dimensionen für den tragenden Einsatz kaum geeignet sind, wird Reihe I nicht weiter untersucht.

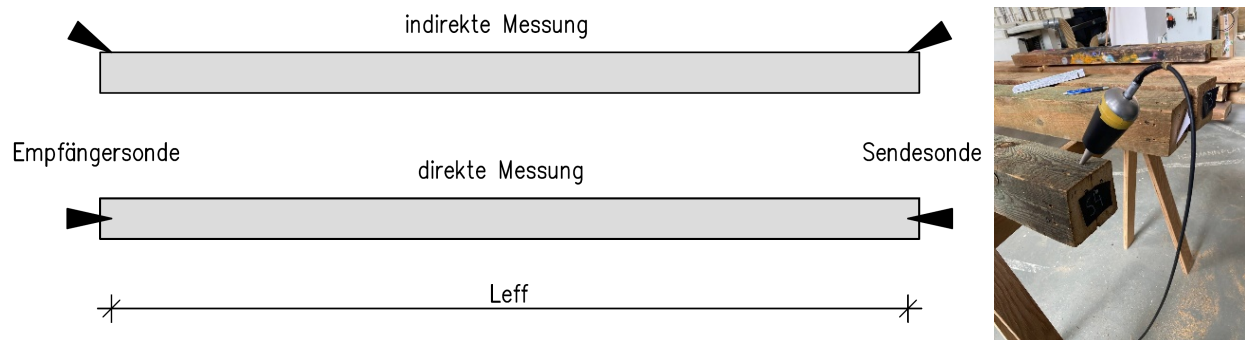


**Abbildung 4: Theoretisch nutzbarer Restquerschnitt eines Balkens der Reihe I**

### Zerstörungsfreie Ultraschall-Impulslaufzeitmessung

Durch die Versuchsanstalt für Holzbau und ökologische Bautechnik (VHÖB) werden an den Prüfkörpern Ultraschall-Impulslaufzeitmessungen durchgeführt. Dieses zerstörungsfreie Prüfverfahren basiert auf der Erzeugung hochfrequenter mechanischer Schwingungen mittels Piezoelektrizität, deren Laufzeit zwischen Sendekopf und Empfänger gemessen werden [18].

Bei dem Versuchsaufbau werden mittels direkter (d. h. Sonden im Hirnholz) und indirekter (d. h. Sonden im Winkel von 30°) Längsdurchschallung gemäß Abbildung 5 die Laufzeit und Ausbreitungsgeschwindigkeit eines Ultraschall-Impulses mit dem Gerät Sylvatest Trio der Firma CBT CBS gemessen. Dabei eignet sich die indirekte Messung insbesondere zur Erkennung von Fehlstellen wie Ästen und Rissen [14].



**Abbildung 5: Versuchsaufbau zur Ultraschall-Impulslaufzeitmessung in Anlehnung an [14]**

Die Ergebnisse [14] der Ultraschall-Impulslaufzeitmessung sind in Tabelle 7 dargestellt. Die Ergebnisse werden im Rahmen der Auswertung auf die Referenzbedingungen der Holzfeuchte von  $w = 12\%$  und der Umgebungstemperatur von  $t = 20^\circ$  gemäß der in [19] angegebenen Beziehungen umgerechnet. Die Ultraschall-Impulslaufzeitmessung liefert einen Mittelwert über die ganze Balkenlänge hinweg, mit dem Nachteil, dass örtliche Schwächungen nicht signifikant werden.

Serie Messung	Schererstraße [S]									
	S1		S2		S3		S4		S5	
	i	d	i	d	i	d	i	d	i	d
Schallgeschwindigkeit $v_{\text{mean}}$ [m/s]	5259	5458	4781	5049	4993	5188	5114	5318	5514	5638
elek. Spannung U [V]	67	355	116	337	135	407	89	303	103	436
dynam. E-Modul $E_{\text{dyn}}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	15350	16532	11658	13001	14487	15637	12499	13520	15597	16305

Serie Messung	HZL [H]						Ihlow [I]					
	H1		H2		H3		I1		I2		I3	
	i	d	i	d	i	d	i	d	i	d	i	d
Schallgeschwindigkeit $v_{\text{mean}}$ [m/s]	5836	6051	6381	6489	6007	6173	4745	5040	4996	5226	4832	5144
elek. Spannung U [V]	25	434	9	187	17	309	16	286	14	318	11	263
dynam. E-Modul $E_{\text{dyn}}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	20672	22228	19868	20548	18442	19471	-	-	-	-	-	-

**Tabelle 7: Ergebnisse der direkten und indirekten Ultraschallimpulslaufzeitmessungen**

### Zerstörungsfreie Bestimmung des Elastizitäts-Moduls und der Festigkeitsklasse mit dem Timber Grader

Es erfolgen Messungen zur Bestimmung des E-Moduls und Festigkeitsklasse mit dem mobilen Handgerät Timber Grader MTG 920 der Firma Brookhuis in der Holzwerkstatt des Instituts für Architektur. Erforderliche Eingangsparameter sind neben der Geometrie der Bauteile die Holzfeuchte und die Rohdichte. Die Messung erfolgt durch Ansetzen des Geräts am Stirnholz (siehe Abbildung 6). Bei Aktivierung sendet das Handgerät einen Schallwellenimpuls in Längsrichtung durch die Balken. Dieser wird am Balkenende reflektiert und von einem Sensor im Handgerät detektiert.



**Abbildung 6: Bestimmung des Elastizitäts-Moduls und der Festigkeitsklasse mit dem Timber Grader**

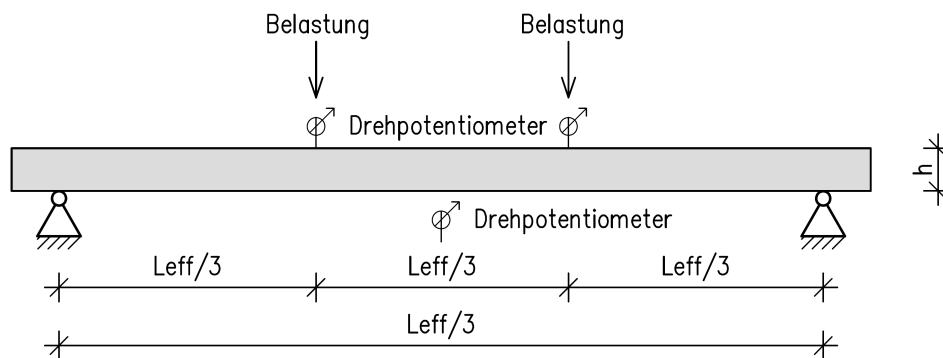
Über die ermittelte Laufzeit des Signals in Längsrichtung des Holzes wird von der zugehörigen Software der Firma Brookhuis der dynamische E-Modul ermittelt. Aufbauend darauf schlägt die Software in Abhängigkeit von der Holzsorte und der Balkengeometrie die Festigkeitsklasse des Prüfkörpers vor [20]. Der zu untersuchende Prüfkörper muss so gelagert werden, dass er möglichst frei schwingen kann. Um Messungenauigkeiten auszugleichen, werden fünf Messungen je Prüfkörper durchgeführt und die Mittelwerte ausgegeben. Die Ergebnisse der Messungen sind in Tabelle 8 dargestellt.

Balken-Nr.	Schererstraße [S]					HZL [H]		
	S-1	S-2	S-3	S-4	S-5	H-1	H-2	H-3
Mittelwert E-Modul $E_{\text{mean}}$	14030	9375	11549	-	13021	17622	-	18166
Festigkeitsklasse [-]	C35	C18	C24	-	C30	C35	-	C35

**Tabelle 8: Ergebnisse der Messungen mit dem Timber Grader MTG 920**

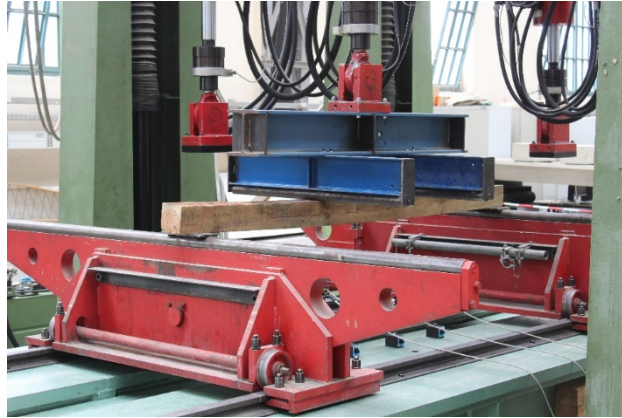
### Messung des statischen Biege-Elastizitäts-Moduls

Der Versuchsaufbau zur experimentellen Bestimmung des globalen statischen Biege-Elastizitäts-Moduls mit Vorgaben hinsichtlich der Geometrie der Prüfkörper, der Lasteinleitung, etc. wird gemäß DIN-EN-408 [6] umgesetzt. Die Versuchsanordnung ist in Abbildung 7 dargestellt.



**Abbildung 7: Versuchsanordnung zur Ermittlung des globalen Biege-E-Moduls nach DIN-EN-408 [6]**

In der Versuchsvorbereitung werden zur Gewährleistung einer zentrischen Lasteinleitung und einer gleichmäßigen Auflagerung Balken mit ausgeprägter Baumkante lokal bearbeitet. Die Lasteinleitung erfolgt weggesteuert (0,1 mm/s) mittels hydraulischer Prüfcylinder. Die Verformung wird mit vertikal angeordneten Drehpotentiometern unmittelbar im Bereich der Lasteinleitung sowie in Feldmitte aufgenommen. Das maximale Belastungsniveau wird auf Basis von Voruntersuchungen festgelegt. Abbildung 8 zeigt die Versuchsdurchführung.



**Abbildung 8: Probe während der Versuchsdurchführung in der Plattenbiegemaschine der TU Berlin**

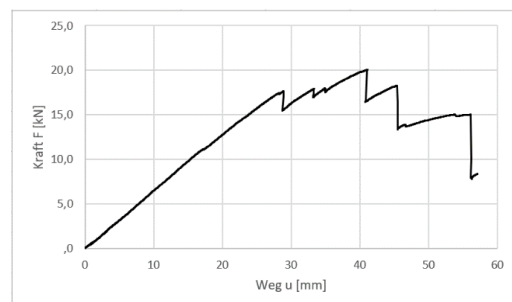
Aus einer linearen Regression der Arbeitslinien der Vier-Punkt-Biegeversuche wird in Anlehnung an DIN-EN 408 [6] der globale Biege-E-Modul berechnet. Alle Arbeitslinien weisen eindeutig linear-elastische Verläufe auf. Der Wert des Korrelationskoeffizienten im Quadrat der Regressionsgerade ( $R^2$ ) ist dabei jeweils größer als 0,99. Die beschriebene Ermittlung des statischen Biege-E-Moduls liefert einen Mittelwert über die ganze Balkenlänge hinweg, mit dem Nachteil, dass örtliche Schwächungen nicht signifikant werden.

Die ermittelten Biege-E-Moduln liegen für die Balken der Reihe S im Bereich zwischen 8000 - 11500 N/mm<sup>2</sup>. Die Balken der Reihe H weisen höhere Biege-E-Moduln auf, die im Wertebereich zwischen 13500 N/mm<sup>2</sup> - 16500 N/mm<sup>2</sup> liegen (siehe Tabelle 9).

Balken-Nr.	Schererstraße [S]					HZL [H]		
	S-1	S-2	S-3	S-4	S-5	H-1	H-2	H-3
globaler Biege-Elastizitätsmodul E [N/mm <sup>2</sup> ]	8622	8172	9454	8073	11491	16369	13872	13726
Bestimmtheitsmaß $R^2$ [-]	0,9996	0,9999	0,9998	0,9995	0,9998	0,9983	0,9998	0,9999

**Tabelle 9: Ergebnisse der globalen Biege-E-Moduln**

Zusätzlich zur Ermittlung des globalen Biege-E-Moduls wurde für die Balken S4 und H2 die Bruchlast ermittelt. Das spröde Versagen ist jeweils durch Risse in der Biegezug-Zone in Feldmitte geprägt (siehe Abbildung 9). Die zur maximalen Bruchlast zugehörigen maximalen charakteristischen Biegezugspannungen erreichen 31,9 N/mm<sup>2</sup> für Balken S4 und 41,5 N/mm<sup>2</sup> für Balken H2.



**Abbildung 9: Versagensbild und Arbeitslinie eines Probekörpers**

### Auswertung

Eine Verwendung des Probenmaterials als Bauholz für tragende Zwecke ist über eine ausschließlich visuelle Sortierung nicht möglich. Sämtliche der untersuchten Bauteile können keiner der Sortierklassen nach DIN 4074-1 [17] zugeordnet werden. Somit kann keine Zuordnung der untersuchten Probekörper zu den Festigkeitsklassen der DIN EN 338 [10] erfolgen. Grund hierfür sind vor allem geometrische Kriterien der Sortierung (Baumkante und Verdrehung) sowie ein Befall durch holzerstörende Insekten, vgl. Tabelle 6.

Wie Untersuchungen [[21], [13]] zur Festigkeitssortierung von Holzbauteilen zeigen, ist die strikte Anwendung der Sortiervorschriften nach DIN 4074 [17] nur bedingt zur zuverlässigen Abschätzung der Tragfähigkeit von Holzbauteilen geeignet [14].

In der Literatur [[22], [12]] wurde basierend auf dieser Herausforderung eine mehrstufige Methodik für Bestandsbauteile entwickelt, die aus der Kombination der visuellen Sortierung und der apparativen Messung von Materialkennwerten eine Abschätzung der Tragfähigkeit von Holzbauteilen ermöglicht. Im Wesentlichen werden im Rahmen dieser Methode, je nach Anwendungsbereich, Beanspruchungsgrad und Kenntnisstand über Materialparameter, drei Sortierstufen unterschieden:

1. Sortierstufe 1 - visuelle Festigkeitssortierung: Erfassung der Ästigkeit, der Faserneigung und der Risse (A/FN/R)
2. Sortierstufe 2 - apparativ unterstützte Festigkeitssortierung: Erfassung der Ästigkeit, der Faserneigung und der Risse (A/FN/R) und der Ultraschall-Impulslaufzeitmessung (v/U)
3. Sortierstufe 3 - apparativ unterstützte Festigkeitssortierung: Erfassung der Ästigkeit, der Faserneigung und der Risse (A/FN/R), der Rohdichte  $\rho_{\text{mean}}$  und des dynamischen Elastizitätsmodul  $E_{\text{dyn}}$

Da in den Sortierstufen lediglich Wuchsmerkmal mit festigkeits- und tragfähigkeitsminderndem Einfluss (Ästigkeit, Faserneigung sowie Risse) berücksichtigt werden, müssen die übrigen Sortiermerkmale dennoch erfasst werden. Diese fließen in die Bemessung der Bauteile beispielsweise über die Berücksichtigung von Fehlflächen durch Baumkanten und Außermittigkeit durch Verformungen ein [22].

In dem Prüfbericht der VHÖB [14] wird das untersuchte Probenmaterial in den drei Sortierstufen Festigkeitsklassen nach DIN EN 338 [10] zugeordnet. Tabelle 10 zeigt die Ergebnisse mit dem Abgleich der Sortierung mit dem Handgerät Timber Grader und auf Grundlage der durchgeführten Biegeversuche.

In allen Sortierstufen können die Balken der Reihe S und H einer Festigkeitsklasse nach DIN EN 338 [10] zugeordnet werden. Dabei ergeben sich, unter Einbeziehung apparativ gemessener Materialkennwerte in der Sortierstufe 2 (Schallgeschwindigkeit durch Ultraschall-Impulslaufzeitmessungen) und in der Sortierstufe 3 (Rohdichte und dynamischer E-Modul), jeweils höhere Festigkeitsklassen. Durch eine genauere Untersuchung des Probenmaterials wird im Vergleich zur rein visuellen Sortierung eine wesentlich bessere Sortierausbeute erreicht [14].

Die Zuverlässigkeit der Ergebnisse aus der apparativ unterstützten visuellen Sortierung ergibt sich über den Vergleich mit der Sortierung auf Grundlage des Biege-E-Moduls. Auch bei einer Sortierung über den Biege-E-Modul kann für die Balken der Reihen S und H eine Festigkeitsklasse nach DIN EN 338 [10] ermittelt werden. Für Reihe H ergibt sich insofern eine Übereinstimmung, als dass die Prüfkörper H2 und H3 mit dem Biege-E-Modul den normativen Grenzwert der Festigkeitsklasse C40, die mittels Sortierstufe 2 und 3 (apparativ unterstützte visuelle Sortierung) festgestellt wurde, um nur etwa 2% unterschreiten. Bei der Serie S hingegen überschätzt die apparativ unterstützte visuelle Sortierung die Festigkeit der Bauteile gemäß Biege-E-Modul jedoch deutlich. Dies steht potentiell in Verbindung mit der Lage der Wuchs- und Bauteilmerkmale sowie deren möglichen Einfluss auf das Trag- und Bruchverhalten [14].

Bei der Messung mit dem Handgerät Timber Grader wird für die beiden Probekörper der Reihe HZL die Festigkeitsklasse C35 ausgegeben. Hier ergibt sich eine Übereinstimmung mit der Sortierung anhand der Biegeversuche. Für die Prüfkörper der Reihe S werden für die Prüfkörper Festigkeitsklassen zwischen C18 und C35 ausgegeben. Ähnlich der apparativ unterstützten visuellen Sortierung liegt bei der Reihe S eine Überschätzung der Festigkeit der Bauteile gemäß Biege-E-Modul vor, wenn gleich die Überschätzung hier jeweils geringer ausfällt. In Tabelle 10 sind die Messergebnisse zusammengestellt.

Balken-Nr.	Messung	Schererstraße [S]					HZL [H]			Ihlow [I]		
		S-1	S-2	S-3	S-4	S-5	H-1	H-2	H-3	I1	I2	I3
visuelle Sortierung (Alle Parameter)	-	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
visuelle Sortierung (A, FN, R)	-	C24	C18	C24	C24	C24	C24	C30	C24	-	C24	-
apparativ unterstützte visuelle Sortierung - visuelle Parameter (A, FN, R)	direkte	C40	C24	C40	C40	C40	C40	C40	C40	C35	C35	C40
- Ultraschall-Impulslaufzeitmessung (v/U)	indirekt	C40	C18	C30	C35	C40	C40	C40	C40	C24	C30	C30
apparativ unterstützte visuelle Sortierung - visuelle Parameter (A, FN, R)	direkte	C40	C30	C40	C40	C40	C40	C40	C40	keine Durchführung		
- Ultraschall-Impulslaufzeitmessung (v/U)	indirekt	C40	C24	C30	C40	C40	C40	C40	C40	keine Durchführung		
- Rohdichte ( $\rho_{\text{mean}}$ ); dynamischer E-Modul												
Sortierung über Timber Grader	-	C35	C18	C24	-	C30	C35	-	C35	keine Durchführung		
Sortierung über E-Modul (Biegeversuch)	-	C16	C16	C18	C16	C24	C40	C35	C35	keine Durchführung		

**Tabelle 10: Zuordnung des untersuchten Probenmaterials zu den Festigkeitsklassen nach DIN EN 338 [10] nach visueller Sortierung, apparativ unterstützter visueller Sortierung [14] und Sortierung über den Biege-E-Modul**

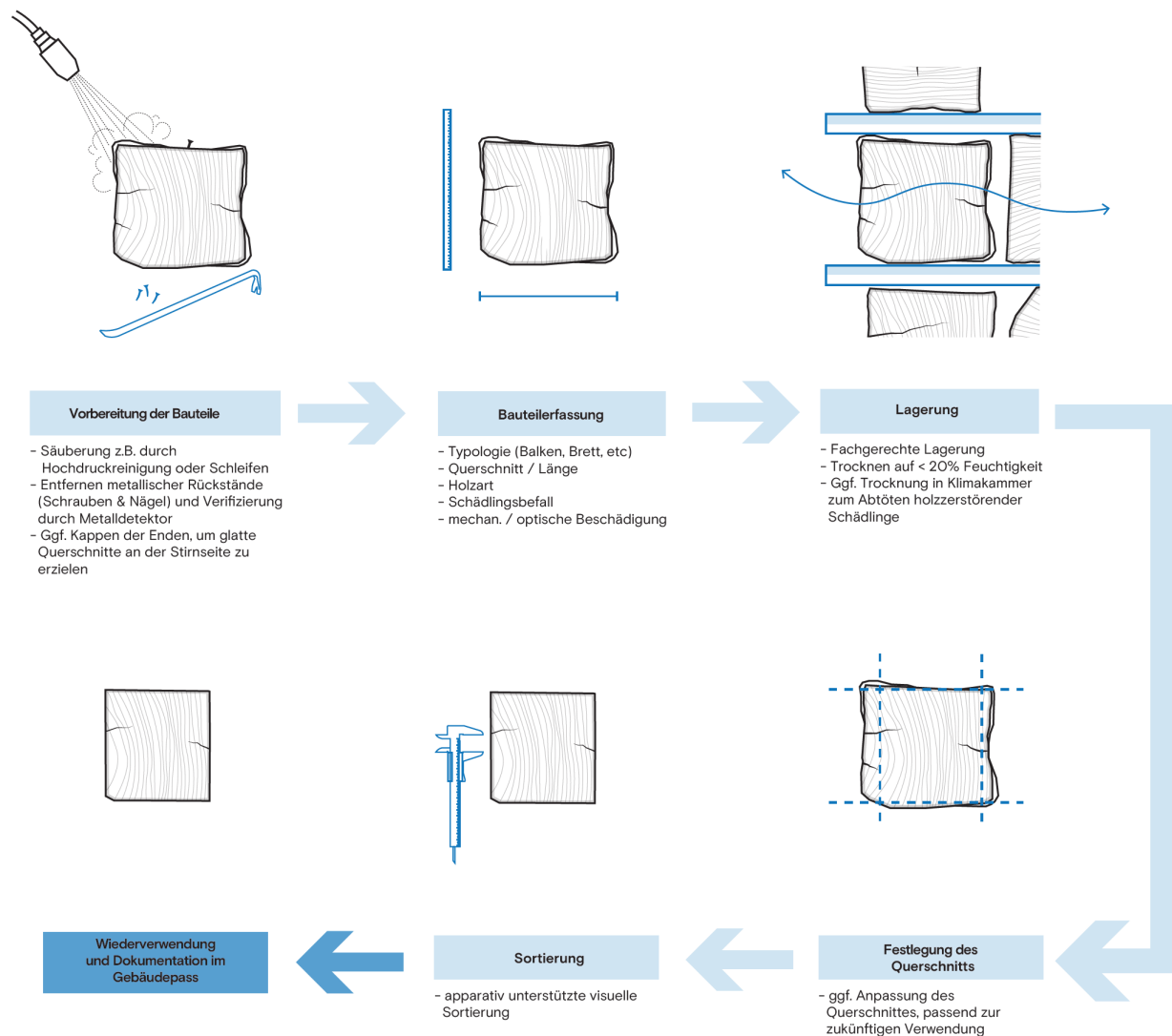
In Bezug auf den Ablauf der Untersuchung und wegen der einfachen Handhabung des Geräts wird für das weitere Vorgehen bei der Sortierung von Altholz im Forschungsprojekt – und gegebenenfalls im Realisierungsprojekt – empfohlen, das Handgerät Timber Grader zu nutzen. Die Ergebnisse sollten zusätzlich anhand der visuellen Sortierparameter Äste, Faserneigung, Risse überprüft werden.

Üblicherweise wird in der Tragwerksplanung von Hochbauten C24 als Festigkeitsklasse des verwendeten Bauholzes vorausgesetzt. Auf dieser Grundlage kann davon ausgegangen werden, dass auch für das Realprojekt die Festigkeitsklasse C24 ausreichend und eine Beschaffung von Altholz höherer Festigkeitsklassen nicht erforderlich sein wird. Bei den durchgeführten Untersuchungen wurden in Teilen höhere Festigkeitsklassen als C24 festgestellt. Aufgrund der geringen Stichprobengröße und dem bislang nicht ausreichenden Kenntnisstand zur Festigkeitsentwicklung bei Altholz, kann – über die ohnehin berücksichtigenden materialeitigen Teilsicherheitsbeiwerte hinaus – dennoch nicht von einer zusätzlich vorhandenen Sicherheit ausgegangen werden.

Im weiteren Forschungsverlauf sollte die Thematik der potentiellen Überschätzung der Tragfähigkeit durch die apparativ unterstützte, visuelle Sortierung und der Messung mit dem Timber Grader anhand einer größeren Stichprobe weiter betrachtet werden, da die bis dato betrachtete Prüfkörperanzahl nicht statistisch signifikant ist. Sollte die Überschätzung der Tragfähigkeit auch bei einer deutlich größeren Zahl von Probekörpern auftreten, könnten beispielsweise zusätzliche Sicherheitsfaktoren bei der Berechnung der Sortierparameter berücksichtigt werden (siehe dazu bspw. [12]).

#### **Ablauf im Rahmen des Realprojekts**

In Abbildung 10 ist der für das Realprojekt vorgeschlagene Ablauf zwischen der Gewinnung des Altholzes und dem Wiedereinbau dargestellt. Der Ablauf beinhaltet die Bauteilerfassung, die Vorbereitung der Bauteile, die Lagerung, die Festlegung des Querschnitts, die Sortierung sowie die letztendliche Wiederverwendung. Grundvoraussetzung für die Durchführbarkeit des Ablaufes ist, dass die in Kapitel 2.1.1 beschriebene Vorgehensweise im Rahmen der Altholzgewinnung (z. B. hinsichtlich der Vermeidung der Abfalleigenschaft) umgesetzt wurde.



**Abbildung 10: Ablauf zur Aufbereitung von Altholz**

Für den Fall, dass die Altholz-Bauteile zu Holzwerkstoffen verarbeitet werden (bspw. zu Brettschichtholzträgern), ist der Ablauf entsprechend anzupassen. In diesem Fall werden die Bauteile nach der Einordnung in Sortierklassen an ein Unternehmen übergeben, das Holzwerkstoffe herstellt. Die weitere Be- und Verarbeitung bis zum Einbau geschieht unter der Aufsicht und Verantwortung dieses Unternehmens.

#### 2.1.4 Ausblick auf die 2. Phase des Forschungsvorhabens

Für die Vertiefung der Forschungsergebnisse aus der ersten Forschungsphase und um Umsetzbarkeit im Realisierungsprojekt zu gewährleisten, sind im Bereich der kreislaufgerechten Altholznutzung und Gewinnung die im Folgenden beschriebenen weiteren Arbeitsschritte notwendig.

Aufbauend auf den Ergebnissen der ersten Forschungsphase wird ein Konzept hinsichtlich der Infrastruktur und der Logistik für die Beschaffung von Altholz entwickelt. Dabei stehen explizite Festlegungen für den Planungs- und Bauprozess mit Altholz im Fokus. Das vorgenannte Konzept wird in der Anwendung erprobt, um Altholz für den Bau eines prototypischen Fachwerkträgers im Maßstab 1:1 vorzubereiten. Schließlich sind Untersuchungen an Altholz an einer statistisch signifikanten Stichprobenmenge in anwendungsbezogenen Abmessungen durchzuführen, um eine Vertiefung und Validierung der Ergebnisse aus dieser Forschungsphase zu erreichen.



## 2.2 Kreislaufgerechte Altholznutzung - Tragwerksentwurf

### 2.2.1 Weit spannende Tragkonstruktionen aus Altholz

Der Entwurf des Museums-Pavillons erfordert ein weit spannendes Tragwerk mit einer Stützweite von zwölf Metern. Soll möglichst viel Altholz eingesetzt werden, muss in dem Tragwerksentwurf berücksichtigt werden, dass insbesondere die Längen, aber auch die Querschnitte von Altholz in der Regel begrenzt sind. Fachwerkartige Träger eignen sich dabei besonders für den Einsatz von Altholz, da diese aus mehreren Einzelbauteilen zusammengesetzt sind und mit einem geringen Materialverbrauch ein effizientes Tragverhalten aufweisen. Fachwerkträger setzen sich dabei aus durchlaufenden Ober- und Untergurten – z. B. als Brettschichtholzträger (BSH) aus Altholz – und relativ kurzen Streben zusammen.

Der Anschluss der Streben an den Ober- bzw. Untergurt ist ein wesentliches Merkmal des Fachwerkträgers, insbesondere wenn der Träger hinsichtlich seiner Rückbaubarkeit und Wiedernutzbarkeit optimiert werden soll. Für den Anschluss von Druckstreben gibt es geeignete moderne Lösungen, wie zum Beispiel den Treppenversatz. Bei Zuganschlüssen im industriellen bzw. konventionellen Holzbau sind hingegen Anschlüsse zwischen den Einzelbauteilen mithilfe von Stabdübelverbindungen Stand der Technik [23]. Da bei derartigen Verbindungsmittelgruppen während der Nutzung zum Teil einzelne Verbindungsmittel eine plastische Verformung erfahren, bevor sich die Last gleichmäßig verteilt, erschweren diese Anschlüsse einen kreislaufgerechten Rückbau in der Regel erheblich. Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens wird für das Realisierungsprojekt daher ein fachwerkartiger Träger aus Altholz konzipiert, der weitestgehend auf den Einsatz von Verbindungsmittelgruppen aus Stahl verzichtet und kreislaufgerecht rückbaubar ist.

Neben den Herausforderungen durch rückbaubare Verbindungen entsteht durch den Einsatz von Altholz eine weitere Besonderheit: Durch die heterogenen, optischen Alterungserscheinungen der einzelnen Hölzer und den potenziellen Wechsel der Holzart innerhalb eines Fachwerkträgers ist keine einheitliche Optik der Bauteile zu erwarten.

### 2.2.2 Rahmenbedingungen und Anforderungen für den Fachwerkträger im Realisierungsprojekt

Die Konzeption des Fachwerkträgers aus Altholz und der zugehörigen Anschlüsse geschieht auf Grundlage der in der Planung des Realisierungsprojekts festgelegten Rahmenbedingungen. Neben allgemeinen Anforderungen, wie zum Beispiel dem Einsatz möglichst stahlarmer und rückbaubarer Anschlüsse, gelten die folgenden Rahmenbedingungen:

- Höhe des Trägers: 1,50 m;
- Spannweite zwischen den Achsen der Auflager: 12,0 m;
- Belastung des Trägers: Eigengewicht  $g_k = 20$  kN/m und Nutzlast  $q_k = 20$  kN/m;
- Klasse der Lasteinwirkungsdauer: kurz
- Material des Ober- und Untergurts: BSH GL28h (aus Altholz), einteilig;
- Material der Streben: C24 (Altholz) und/oder Baustahl, potenziell mehrteilig.

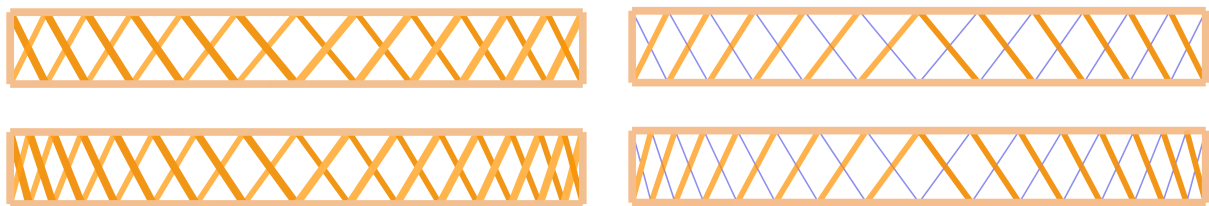
Die folgenden Parameter sind variabel und werden im Zuge der Tragwerksoptimierung für den maximalen Einsatz von Altholz sowie für den Einsatz verbindungsmittelarmer Anschlüsse angepasst:

- Typologie des Trägers (Strebenfachwerk / Pfostenfachwerk / Howe'scher-Träger)
- Abstand der Streben;
- Neigung der Streben ( $45^\circ - 90^\circ$ );
- Querschnittsabmessungen und Geometrien der Einzelbauteile;
- Breite des gesamten Trägerpakets;
- Art der Anschlüsse.

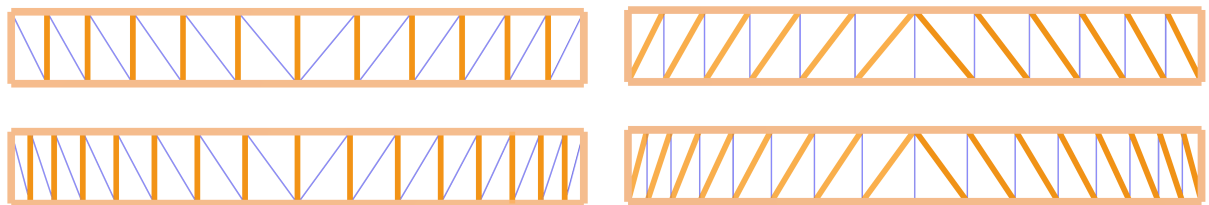
Diese erste Forschungsphase konzentriert sich auf die wichtigsten Tragwerkselemente. Deshalb werden lediglich die hauptsächlichen Abmessungen der höchstbelasteten Einzelteile des Trägers sowie die Regelanschlüsse betrachtet. Die Lastweiterleitung im Anschluss an die Stütze ist im weiteren Verlauf der Planung zu detaillieren.

### 2.2.3 Studie zu weit spannenden Trägertypologien

Es werden, basierend auf dem vorhandenen Tragwerksentwurf der Leistungsphase 2 (Vorplanung), verschiedene Tragwerkstypologien weit spannender Träger betrachtet und hinsichtlich ihrer zugehörigen Schnittgrößen und den daraus resultierenden Geometrien der Anschlüsse untersucht. Abbildung 11 und Abbildung 12 zeigen die betrachteten Fachwerkvarianten.



**Abbildung 11: Strebenfachwerk, links mit diagonalen Druck- und Zugstreben aus Holz, rechts mit diagonalen Zugstreben aus Stahl und Druckstreben aus Holz**



**Abbildung 12: links: Pfostenfachwerk mit Druckpfosten aus Holz und Zugdiagonalen aus Stahl; rechts: Howe-Träger mit Druckstreben aus Holz und vertikalen Stahlzuggliedern**

Bei allen untersuchten Tragwerkstypologien werden die Einzelbauteile hauptsächlich durch Normalkräfte beansprucht. Die Schnittgrößen in den Ober- bzw. Untergurte sind bei allen Varianten fast ausschließlich durch die vorgegebenen Parameter wie der Stützweite, der äußeren Belastung sowie der Trägerhöhe bestimmt und unterscheiden sich zwischen den Varianten dementsprechend nur geringfügig. Die Streben leiten die Schubbelastung des Trägers als Normalkräfte - sowohl per Zug- als auch Druckkräfte - zu den Auflagern. Die Belastung der Streben nimmt entsprechend der Schubbelastung des Gesamtsystems in Richtung der Auflager zu. Auf größere bzw. kleinere aufzunehmende Schubkräfte des Gesamtsystems und damit Normalkräfte der Einzelbauteile kann zu Zwecken der Optimierung zum einen mit der Anordnung der Streben reagiert werden: Je geringer der Strebenabstand in Richtung des Auflagers wird bzw. je steiler die Streben angeordnet sind, desto geringer ist die maximale Last in der Strebe. Zum anderen lässt sich eine Optimierung durch unterschiedliche Querschnittsgeometrien je nach Belastungssituation realisieren.

Im Holzbau werden die Bauteilabmessungen maßgeblich vom Platzbedarf der Verbindungen definiert. So werden auch die Vor- und Nachteile der einzelnen Fachwerksvarianten, neben den gestalterischen Belangen, vorrangig durch die Vor- und Nachteile der jeweils notwendigen Anschlussdetails bestimmt. Eine Beurteilung der einzelnen Fachwerke erfolgt daher in den folgenden Abschnitten im Rahmen der Betrachtung der Anschlussvarianten. Diese haben einen maßgeblich Einfluss auf die endgültige Wahl des Fachwerksystems.

### 2.2.4 Studie zu rückbaubaren, stahlarmen Fachwerkknoten

Die erforderlichen Querschnitte der Einzelbauteile sind, außer durch die globale Bemessung des Gesamtträgers, maßgeblich durch das zugehörige Anschlussdetail bestimmt, sodass die Ausbildung der Knotenpunkte in die Konzeption des Gesamttragwerks des Trägers einfließen muss. In Abbildung 13 und Abbildung 14 sind die parametrisch entworfenen und anschließend vorläufig bemessenen Optionen für die Konstruktion des Anschlusses dargestellt. Das Bemessungskonzept ist analog zu bestehenden Nachweiskonzepten ausgearbeitet. Eine Verifizierung des Bemessungskonzepts ist teilweise in Form tiefergehender Forschung notwendig.

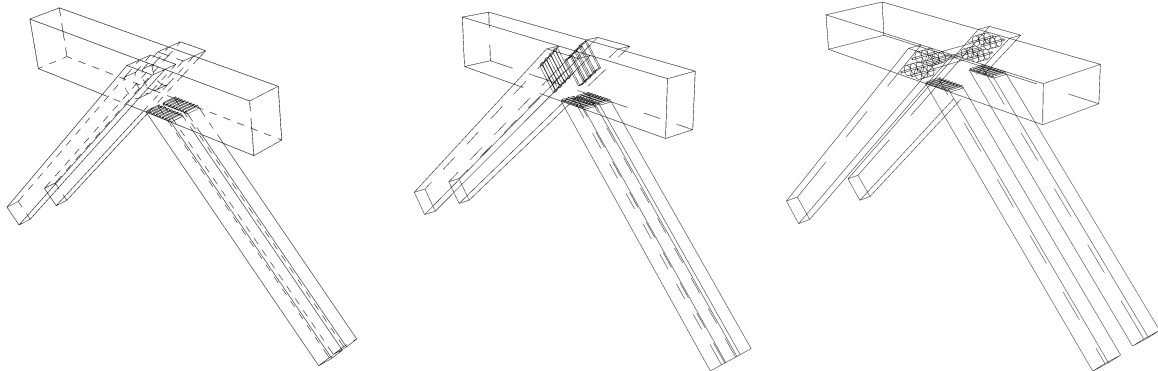


Abbildung 13: Knotendetails mit Zugstreben aus Holz

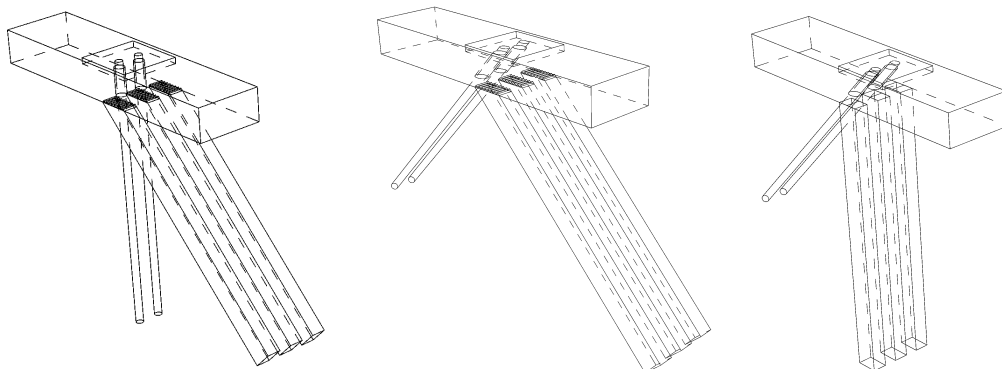


Abbildung 14: Knotendetails mit Zugstreben aus Stahl

#### Formschlüssige, stahlarme Holz-Holz Anschlüsse

Bei diesen Anschlussvarianten werden zwei Zugstäbe aus Holz jeweils seitlich in passende Einfräsungen in den Ober- bzw. Untergurt eingesetzt, wobei die Form des Anschlusses in dem einen Fall analog zum sogenannten Schwalbenschwanzanschluss geschieht und in dem anderen Fall an Treppenversatzanschlüsse angelehnt ist (Abbildung 15). Schwalbenschwanz- und Treppenversatzanschlüsse sind zwar per Zulassung bzw. normativ geregelt, [[24], [25], [26], [27], [28]] die im Realprojekt auftretenden Lasten und Geometrien, wie z.B. Winkel zwischen Kraft- und Faserrichtung, liegen allerdings außerhalb der jeweiligen Anwendungsgrenzen.

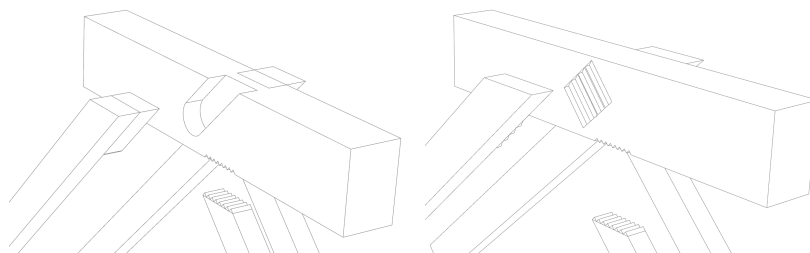


Abbildung 15: Betrachtete Varianten der Anschlussdetails; Links: Zuganschluss analog zum „Schwalbenschwanzanschluss“; Rechts: Zuganschluss analog zum „Treppenversatzanschluss“

Beide Varianten des Anschlussdetails erfordern eine hohe Genauigkeit in der Herstellung und sind allgemein mit einem großen Fertigungsaufwand verbunden. Der Schwalbenschwanz muss möglichst exakt der Ausfräsung im Gurt entsprechen, um eine gleichmäßige, flächige Kraftübertragung ohne Belastungsspitzen zu gewährleisten. Dasselbe gilt für den Treppenversatz, wobei durch die größere Anzahl an Kontaktflächen eine noch größere Komplexität des Anschlusses gegeben ist.

Der Schwalbenschwanz wird seitlich an die Zugstrebe geleimt und das jeweilige Gegenstück im Druck- und Zuggurt ausgefräst, was eine massive Querschnittsschwächung der Gurte bedeutet und hinsichtlich der Wiederverwendbarkeit des Einzelbauteil negativ zu bewerten ist.

Das Einfräsen des Treppenversatzes in die Zugstrebe ist ebenfalls mit einem Materialverlust verbunden. Die Einfräsungen in die Gurte fallen aber im Vergleich zum Schwalbenschwanzanschluss deutlich geringer aus, was als positiv für eine potentielle Wiederverwendbarkeit zu bewerten ist. Aufgrund der Form der beim computergesteuerten Abbund verwendeten Fräsen ist das negative Gegenstück des Treppenversatzes am Gurt nur mit Übermaß herstellbar.

Die Tragfähigkeit des Schwalbenschwanzanschlusses hängt primär von der Kontaktpressung am Anschluss an den Gurt und dem Schubnachweis im „Schwalbenschwanz“ ab. Zur Erfüllung des Schubnachweises sind Gurte mit großer Höhe erforderlich. Dadurch entsteht ein eher opakes Fachwerk, da die Gurte im Vergleich zur Gesamthöhe des Trägers verhältnismäßig hoch sind. Dasselbe gilt bei dem Anschluss mit seitlichem Treppenversatz: Hier hängt die Tragfähigkeit maßgeblich von der Einleitung des Schubes in die Zugstrebe bzw. in den Gurt und der vorhandenen Vorholzlänge ab. Bei beiden Anschlussarten ließe sich die Höhe der Gurte reduzieren, indem die Zugdiagonalen über die Oberkante des Obergurtes bzw. unter die Unterkante des Untergurtes überstehen, um eine größere Vorholzlänge in der Diagonalen zu erzielen.

Nachteilig ist bei beiden Anschlussarten zu bewerten, dass sich das Tragverhalten ohne Versuche nicht mit Sicherheit prognostizieren lässt und durch Schlupf in den Verbindungen unter Umständen eine hohe Anfangsverformung des Gesamtsystems zu erwarten ist.

Für die betrachteten, formschlüssigen Anschlüsse zwischen zwei Holzbauteilen gilt, dass stets eine seitliche Lagesicherung und eine konstruktive Sicherung gegen Verkrümmung einseitig beanspruchter Zugstäbe mittels durchgesteckter Bolzen notwendig sind. Diese Lagesicherung wird mithilfe von Stahlbauteilen gewährleistet.

#### **Anschluss mit Einlassdübeln aus Stahl**

Als Alternative zu den formschlüssigen Holz-Holz-Zuganschlüssen können Einlassdübel aus Stahl verwendet werden, mit deren Hilfe die Zugstreben seitlich mit dem Ober- bzw. Untergurt verbunden werden. Der für die Fertigung notwendige Abbund ist einfach realisierbar und Querschnittsschwächungen sind nur in einem geringen Maß notwendig.

Die Tragfähigkeit des Anschlusses ist maßgeblich durch die Anzahl der Verbindungsmittel beeinflusst, die sich, bei Einhaltung der erforderlichen Mindest- und Randabstände, in den Querschnitten unterbringen lassen. Für Einlassdübel liegt eine bauaufsichtliche Zulassung vor und es ist keine weitere Forschung zur Erfassung der Tragfähigkeit notwendig. Im Vergleich zu den oben genannten Varianten ist eine geringere Höhe der Gurte erforderlich, bei Stahlringdübeln ist die Menge an Stahl im Anschluss jedoch größer. Da im Rahmen des Realisierungsprojekts ein nach Möglichkeit vollständig rückbaubarer Anschluss zum Einsatz kommen soll, und da Verbindungen mit Einlassdübel vermutlich nicht rückbaubar sind, wird diese Art des Anschlusses nicht weiter betrachtet.

#### **Anschluss mit Zugstreben aus Stahl**

Alternativ zur Konstruktion mit Zugstreben aus Holz können die Streben aus - nach Möglichkeit wiederverwendeten - Baustahl oder Betonstahl konzipiert werden. Aufgrund der höheren Zugfestigkeit des Stahls im Vergleich zu Holz ergeben sich bei denselben Lasten deutlich kleinere Querschnitte. Um einen

möglichst rückbaubaren Anschluss zu ermöglichen, werden die Zugstreben durch die Gurte geführt und auf der Rückseite mithilfe von in vorgefräste Öffnungen eingelassene Stahlplatten gekontert. Die Platten dienen der Verteilung der einzuleitenden Last. Im Vergleich zu den Holz-Holz-Anschlüssen sind die Fertigung und der Abbund der Anschlüsse mit Zugstreben aus Stahl ökonomischer.

Die Tragfähigkeit des Anschlusses mit Stahlstreben lässt sich auf Basis bestehender Regelungen beurteilen. Maßgebend für die Dimensionierung des Anschlusses ist die Lasteinleitung der Zugkraft der Strebe über Querpressung in den Gurt. Es kann festgestellt werden, dass aus der Verwendung von Zugstreben aus Stahl kleinere Querschnitte der Gurte resultieren. Weiterhin kann während des Zusammenbaus des Fachwerkträgers durch die Stahlbauteile eine Vorspannung eingebracht werden, die Verformungen bzw. den Schlupf vermindert.

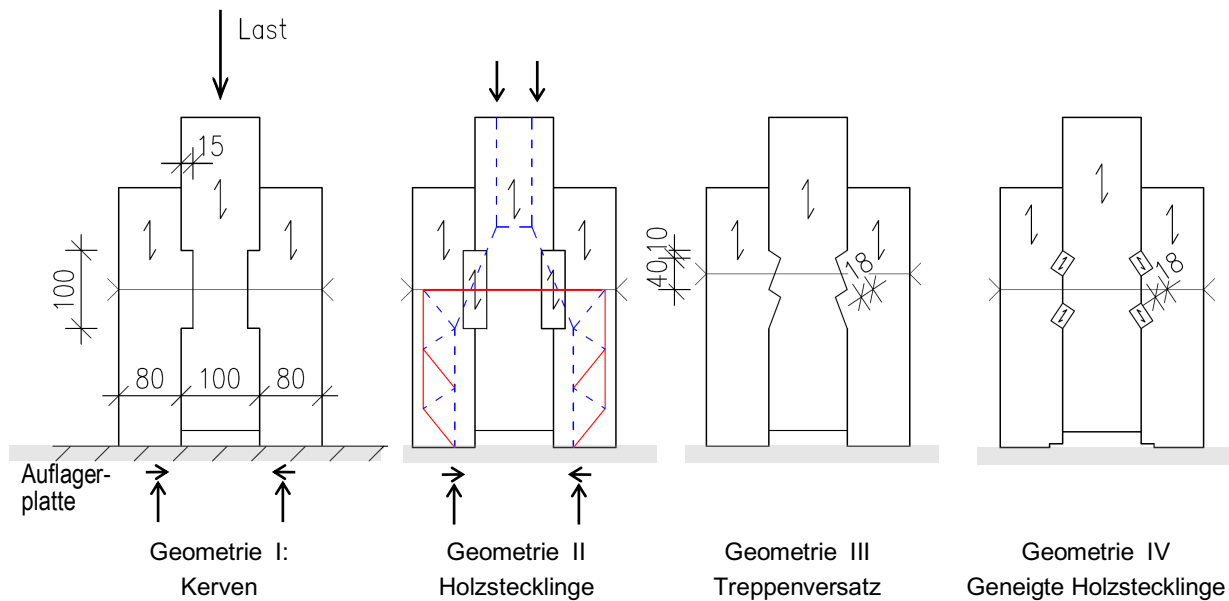
Besonderes Augenmerk muss bei der Verwendung von tragenden Stahlbauteilen auf die Sicherstellung des Brandschutzes gelegt werden. Da eine Heißbemessung von innenliegenden Stahlbauteilen in der Regel nicht zielführend ist und da Brandschutzanstriche bei runden Stahlquerschnitten nicht zulässig sind, müssen die Zugstreben konstruktiv gegen Brand geschützt werden.

### **2.2.5 Tastversuche an Kleinteilprobekörpern**

Formschlüssige, hochbelastete Zuganschlüsse stellen im Ingenieurholzbau eine besondere Herausforderung dar. Von den in Kapitel 2.2.4 betrachteten, formschlüssigen Zuganschlüssen aus Holz birgt die Variante mit seitlichem Treppenversatz in den Rahmenbedingungen des Realisierungsprojekts das voraussichtlich größte Potenzial, da hier bei verhältnismäßig geringer Querschnittsschwächung eine große Verzahnungsfläche im Anschluss entsteht.

Um das gewählte Bemessungskonzept des Anschlusses hinsichtlich der Versagensformen und Bruchlasten zu überprüfen, werden im Rahmen des Forschungsvorhabens Tastversuche durchgeführt. Dazu wird die oben beschriebene Geometrie des Anschlusses mit seitlichen Treppenversatz geometrisch angepasst und abstrahiert, um Kleinteilversuche mit möglichst einfacher Herstellung und Lasteinleitung durchführen zu können.

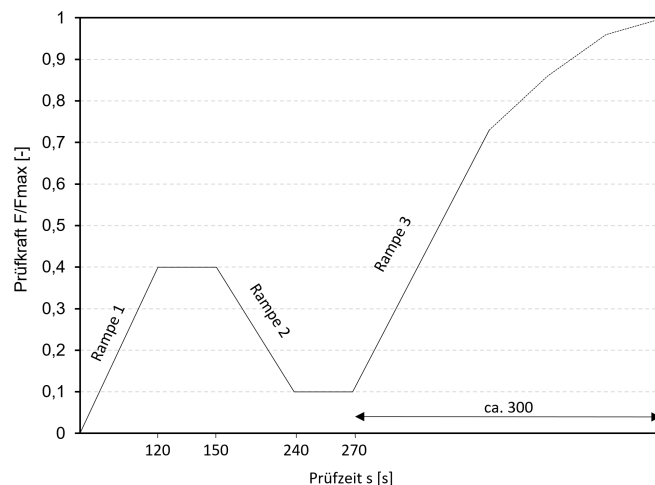
Die Versuche sind als Druckversuche konzipiert und werden an der TU Berlin in einer Versuchshalle des Instituts für Bauingenieurwesen an einer Druckprüfmaschine „Tonitechnik I“ durchgeführt. Die Herstellung der Versuchskörper erfolgt in einer Holzwerkstatt des Instituts für Architektur. Die Versuchskörper werden unter Zuhilfenahme üblicherweise in Holzwerkstätten vorhandener Maschinen sowie mit händischer Detailbearbeitung hergestellt. Der Fertigungsprozess entspricht demnach nicht einem industriellen Ablauf, wie er im Rahmen eines größeren Bauprojekts zu erwarten ist. Die erzielte Präzision in der Fertigung für die Versuche wird als akzeptabel eingestuft.



**Abbildung 16: Schematische Darstellung der Probekörper unter Druckbeanspruchung, inkl. exemplarischem Stabwerkmodell bei Geometrie II**

Es werden vier unterschiedliche Anschlussformen in je dreifacher Ausführung untersucht. Die Probekörper der in Abbildung 16 schematisch dargestellten Versuche setzen sich jeweils aus einem Mittelholz, an dessen oberer Stirnseite die Last eingeleitet wird, sowie zwei Seitenhölzern zusammen. Die Versuchskörper wurden aus Frischholz, Fichte, C24 hergestellt. Gemeinsam bilden die drei Bauteile in allen drei Varianten ein symmetrisches System, sodass die Verbindungen zwischen Mittel- und Seitenhölzern annähernd identisch belastet werden. Geringfügige Unterschiede in der Belastung der beiden Seiten lassen sich durch Ungenauigkeiten in der Herstellung sowie die natürlichen, inhomogenen Wuchseigenschaften des Holzes nicht vermeiden.

Die vier gewählten Anschlussvarianten unterscheiden sich in Bezug auf den Winkel der Kontaktflächen sowie in Bezug auf den Einsatz von Stecklingen (ebenfalls Fichte, C24) in der Scherfuge. Als Referenz dient Geometrie I mit einem rechtwinkligen Versatz. Geometrie III bildet einen seitlichen Treppenversatz nach. Die Geometrien I und III resultieren in einem hohen Maß an Verschnitt in den seitlichen Hölzern. Bei den Geometrien II und IV kommen daher Stecklinge zum Einsatz. Versuchsreihe II ist geometrisch identisch mit der Geometrie I. Geometrie IV bildet den Treppenversatz aus Geometrie III nach. Bei allen Geometrien wird ein Versagen infolge von Schub erwartet.



**Abbildung 17: Belastungsschema der Kleinteilversuche**

Die Belastung wird mittels eines hydraulischen Prüfzylinders weggesteuert in die Probekörper eingeleitet. Die Kraft und die vertikale Position des Hydraulikzylinders werden maschinell durch die Prüfmaschine erfasst.

Das Belastungsschema inklusive der Zylindervorschubgeschwindigkeit wird in Anlehnung an DIN EN 383 festgelegt, siehe Abbildung 17. Die Versagenslast wird auf Basis von Vorbemessungen prognostiziert. Vor der Belastung bis zum Versagen wird ein Vorlastzyklus bis zu einer Belastung von ca. 40% der zu erwartenden Versagenslast durchgeführt. Ziel des Vorlastzyklus ist es, nicht-elastische Anfangsverformungen wie zum Beispiel Schlupf im Versuchskörper aus der Messung zu eliminieren.

### Ergebnisse der Kleinteilversuche

In Abbildung 18 sind die Kraft-Weg-Diagramme aller Versuche dargestellt. Nicht dargestellt sind hier die Vorlastzyklen: Während der Vorlastzyklen („Rampe 1“ in Abbildung 17) entstanden bei den Versuchskörpern Verformungen zwischen 0,2 und 0,5 mm. Alle Probekörper ohne Stecklinge (Geometrie I und III) zeigen sowohl im Vorlastzyklus als auch in der finalen Belastungsrampe ein weitestgehend linear elastisches Materialverhalten bis zum Bruch. Das Versagen findet dabei in der Scherfuge im Übergang zwischen dem Seiten- und Mittelholz statt. Bei Geometrie I erfolgt der Bruch spröde ohne Resttragfähigkeit. Bei Geometrie III mit Treppenversatz bleibt nach Versagen eines Versatzes zum Teil eine Resttragfähigkeit bestehen (siehe Abbildung 20).

Bei Versuchsreihe II (Steckling mit horizontalem Anschnitt) treten duktile Verformungen in der Kontaktfläche auf, bevor es schließlich zu einem Scherversagen kommt. Das Versagen bei Versuchsreihe IV ist geprägt von einer Aufweitung der Fuge und einem Querdruckversagen in der Lagesicherung.

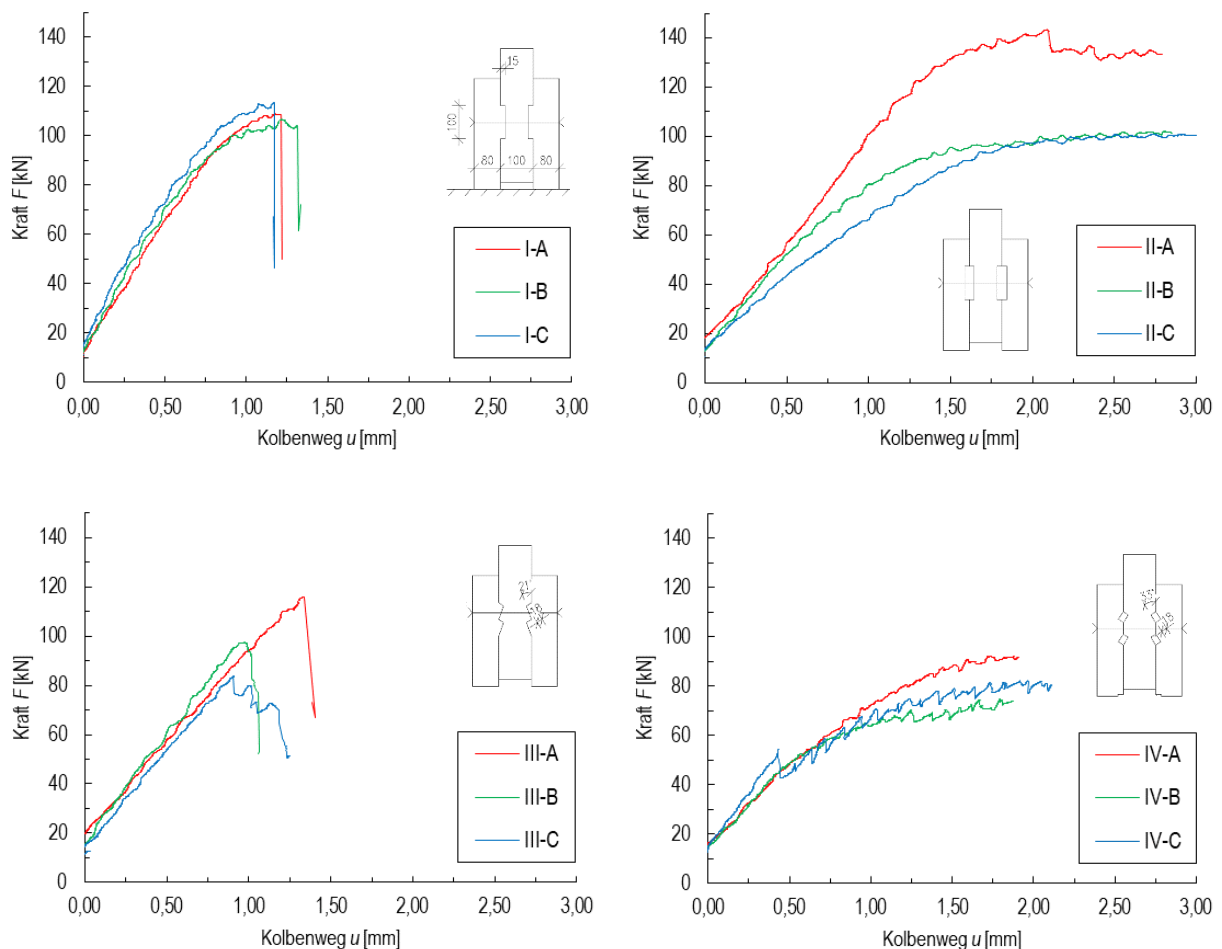


Abbildung 18: Kraft-Weg-Diagramme der Druckversuche an den Probekörpern



Abbildung 19: Beispielhaftes Versagensbild der Geometrie I-b, Versagen in der Scherfuge

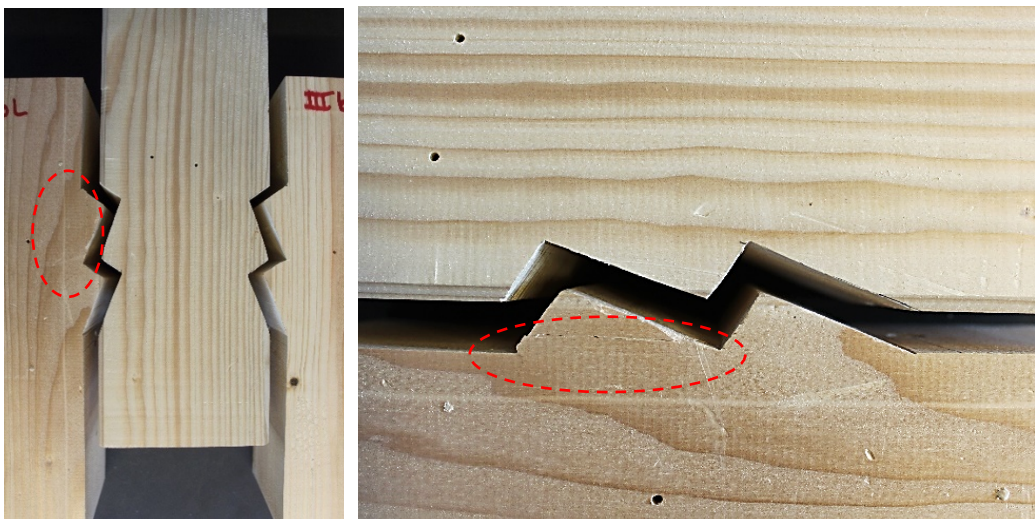


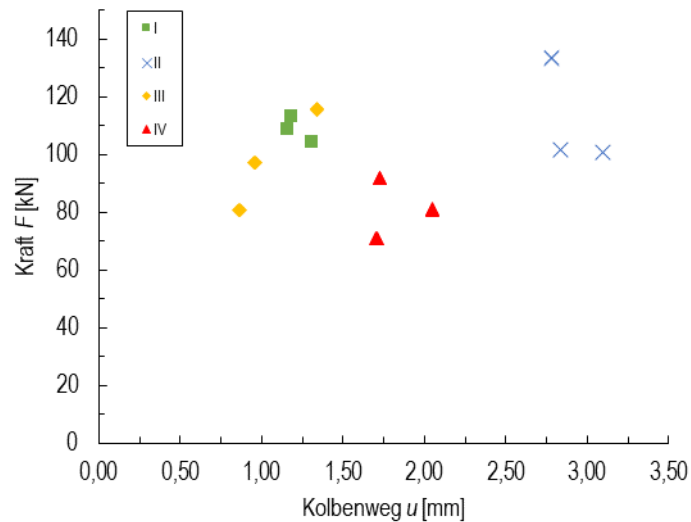
Abbildung 20: Beispielhaftes Versagensbild der Geometrie III-b, Versagen in der Scherfuge



Abbildung 21: Beispielhaftes Versagensbild der Geometrie IV-c, Querdruckversagen bei der Lagesicherung

In Abbildung 22 ist die Bruchlast der Probekörper mit der zugehörigen maximalen Verformung beim Bruch dargestellt. Bei den Geometrien ohne Stecklinge (Geometrien I und III) werden geringere Verformungen beobachtet. Die Bruchlast bei dem geraden Versatz liegt etwas höher als bei dem schrägen Versatz. Bei den Versuchsreihen II und IV mit Stecklingen sind die Verformungen größer. Reihe II erzielt die höchsten Bruchlasten, allerdings ist dort auch die größte Verformung zu beobachten.





**Abbildung 22: Vergleich der Bruchlasten inkl. zugehöriger Kolbenweg**

Die Tastversuche zeigen, dass Stecklinge und mehrteilige Versätze ein hohes Maß an Genauigkeit in der Fertigung erfordern, um eine möglichst gleichmäßige Belastung aller Kontaktstellen zu gewährleisten. Diese Genauigkeit ist ohne den Einsatz computergesteuerter Maschinen allgemein nur mit großem Aufwand und stellenweise nicht erreichbar. Die beobachteten Versagensbilder deuten teilweise auf Ungenauigkeiten in der Herstellung hin, wodurch das Potential der Tragfähigkeit der Verbindung nicht voll ausgeschöpft wurde.

Wie das Stabwerkmodell in Abbildung 16 zeigt, müssen in den Verbindungen immer Kräfte senkrecht zur Lasteinleitung durch Verbindungsmittel aufgenommen werden. Dabei ist darauf zu achten, dass die auftretende Verformung möglichst gering ist. Eine rein konstruktive Lagesicherung ist in diesem Fall nicht ausreichend und es muss eine größere Menge an Stahl in der Verbindung eingesetzt werden.

Aufgrund der geringen Stichprobenmenge ist lediglich eine qualitative Bewertung der Belastbarkeit der Anschlusstypen möglich. Bei konventionellen Druckanschlüssen mit Treppenversatz, tritt die Belastung normal zur Kontaktfläche der Druckstrebe und gleichzeitig parallel zur Faserrichtung auf. Demgegenüber tritt die Belastung hier in einem Winkel zur Faserrichtung der Hölzer auf und in Versuchen I und II auch in einem Winkel zur Kontaktfläche.

Wie das Stabwerk in Abb. 15 zeigt, entstehen in allen Versuchen horizontale Zugkräfte, die zu einer Horizontalverschiebung und damit einer Fugenöffnung zwischen den Hölzern führen. Dadurch entstehen bei dem untersuchten "seitlichen Treppenversatz" Zugkräfte quer zur Faserrichtung in den Holzzähnen. Diese reduzieren die Schubtragfähigkeit im Zahn und sind vermutlich der Grund für dafür, dass dort die prognostizierten Bruchlasten nicht erreicht wurden. Um diese Verformungen zu minimieren, müssen die horizontalen Abtriebskräfte kurzgeschlossen werden. Diese horizontale Halterung würde bei dem Fachwerkträger des Realisierungsprojekts zu einer größeren Menge an Anschlussmitteln führen, die diese Variante im Sinne einer stahlarmen Verbindung nach jetzigem Kenntnisstand als weniger sinnvoll erscheinen lassen. Falls im Realisierungsprojekt dennoch formschlüssige Holz-Holz-Anschlüsse umgesetzt werden sollen, sind hierfür tiefere Untersuchungen notwendig.

## 2.2.6 Auswertung und Empfehlungen für das Realisierungsprojekt

Im Folgenden werden eine Ausführung des Fachwerkträgers mit formschlüssigen, verbindungsmittelarmen Holz-Holz-Anschlüsse und eine Ausführung mit Zugstreben aus Stahl auf Grundlage der durchgeführten Vorbemessungen und Versuche qualitativ verglichen.

Anschlüsse mit Zugdiagonalen aus Holz führen im Vergleich zu Anschlüssen mit Zugdiagonalen aus Stahl zu größeren erforderlichen Höhen des Ober- und Untergurts und sind somit voraussichtlich durch den höheren Materialeinsatz sowie in architektonischer Hinsicht nicht sinnvoll. Weiterhin ist festzustellen, dass die im Rahmen der Vorbemessung ermittelten und voraussichtlich notwendigen Querschnitte realistischerweise nicht in Altholz verfügbar sind.

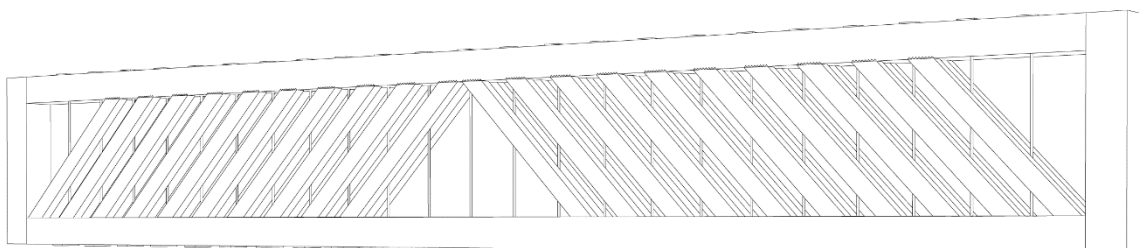
Formschlüssige Holz-Holz-Verbindungen lassen ein gewisses Maß an Schlupf zu, der auch mit einer sehr hohen Präzision in der Fertigung nicht vermieden werden kann. Bei einem Fachwerkträger, der ausschließlich mit dieser Art von Verbindung hergestellt wird, ist dementsprechend eine große Anfangsverformung zu erwarten. Es ist zu erforschen, wie sich diese Anfangsverformung bei einer CNC gestützten Industriefertigung reduzieren würde und inwiefern sie durch eine entsprechend überhöhte Fertigung des Fachwerkträgers ausgeglichen werden kann. Insgesamt lässt sich das Verhalten des Gesamtsystems, insbesondere in Bezug auf die Verformung und Gebrauchstauglichkeit, nur durch 1:1-Versuche verifizieren.

Der "seitliche Treppenversatz" sowie Schwalbenschwanzverbindungen bedeuten einen erheblichen Aufwand im Abbund, der bei konventionellen Verbindungen nicht auftritt. Schwalbenschwanzverbindungen können auf rationale Weise nur hergestellt werden, wenn der Schwalbenschwanz qualitätssicher an den Zugstab geklebt wird. Dazu wären weitergehende Versuche notwendig.

Fachwerke mit Zugdiagonalen aus Stahl stellen eine den speziellen Eigenschaften der Werkstoffe angemessene Verwendung dar. Durch die Vorspannbarkeit der Zugstreben aus Stahl entsteht weiterhin eine geringere Erstverformung nach dem Zusammenbau und die Rückbaubarkeit der Anschlussdetails ist bei entsprechender Planung gegeben. Die Stahlbauteile erfordern allerdings einen aufwendigen Brandschutz, der voraussichtlich nur durch konstruktive Maßnahmen zu lösen ist. Weitere Forschungen sind notwendig, um die Einpressung der Ankerplatten quer zur Faser in die Ober- und Untergurte und die zugehörigen Kriechverformungen zu studieren. Diese beeinflussen entscheidend die Größe der Vorspannkraft über die Nutzungsdauer hinweg und damit die zu erwartenden Vergrößerungen der Ausgangsverformung des Trägers.

Fazit: Aufbauend auf vorstehenden Abwägungen wird für die weitere Planung im Realisierungsprojekt und für die zweite Phase des Forschungsvorhabens empfohlen, einen Fachwerkträger mit durchlaufenden Ober- und Untergurten mit BSH-Trägern aus Altholz, vertikalen Zugstreben aus Stahl und diagonalen Druckstreben aus Altholzbalken weiter zu verfolgen und für eine ausführungsgerechte Planung zu erforschen. Die Anschlüsse der Zugstreben könnten beispielsweise wie in Abschnitt 2.2.4 beschrieben mit konternden Stahlplatten auf den Rückseiten der Gurte ausgeführt werden. In Abbildung 20 ist ein entsprechender Fachwerkträger beispielhaft schematisch dargestellt.

Bei dem beschriebenen Fachwerkträger muss im Rahmen der Planung eine Optimierung oder Staffelung der Strebenabstände und -winkel, basierend auf dem Schnittkraftverlauf, durchgeführt werden. Hierbei ist zu untersuchen, inwiefern der gesteigerte Fertigungsaufwand den reduzierten Materialaufwand rechtfertigt.



**Abbildung 23: Darstellung der empfohlenen Fachwerkkonstruktion**

### 2.2.7 Brettschichtholzträger aus Altholz

Bauteile aus Altholz, die aufgrund von Schädigungen nicht mehr als vollständiges Bauteil weiterverwendet werden können, können zu Lamellen aufgetrennt und für die Produktion von Brettschichtholzträgern genutzt werden. Diese Weiterverwendung von Holz entspricht den Zielen einer Kaskadennutzung [29].

Im Rahmen der ersten Forschungsphase wurde ein Industriepartner gefunden, der die Herstellung von Brettschichtholzträgern aus Altholz in der zweiten Forschungsphase übernimmt. Die Herstellung von Brettschichtholz im Allgemeinen geschieht in einem etablierten, industriellen Herstellungsprozess, der für den Einsatz von Lamellen aus Altholz nicht wesentlich verändert werden muss.

Um Altholz möglichst reibungslos in diesen industriellen Herstellungsprozess einfügen zu können, werden herstellerseitig Angaben zu der notwendigen Geometrie der Altholzlamellen gemacht. Diese Geometrie berücksichtigt insbesondere die zu erwartenden größeren Maßabweichungen im Vergleich zu frischem Schnittholz. Die Anforderungen lauten wie folgt:

- Mindestlänge der Lamellen: 2,50 m;
- Dicke der Einzellamellen: 45 mm bis 50 mm;
- Breite der Lamellen: 10 bis 20 mm breiter als die finale Sollbreite des Brettschichtholzträgers.

Die Sortierung der Altholzlamellen erfolgt, wie auch bei Lamellen aus Frischholz, maschinell unterstützt durch das herstellende Unternehmen. Die automatisierte Keilzinkung der kurzen Lamellen zur „Endloslamelle“ für die BSH-Binder kann im Werk mit den angegebenen Altholzlamellen durchgeführt werden. Für den Fall, dass für einen Brettschichtholzträger eine größere Breite erforderlich ist, als sie üblicherweise durch Altholzlamellen erzielt werden kann, ist eine Blockverleimung auch mit Trägern aus Altholz möglich.

Im Rahmen eines Forschungsvorhabens der Universität Madrid [30] wurden Tastversuche zu BSH-Trägern aus Altholz durchgeführt. Dabei wurde eine Reduktion der Tragfähigkeit im Vergleich zu Trägern aus Frischholz festgestellt. Auf diesen Ergebnissen aufbauend soll in der zweiten Forschungsphase anhand von Versuchen sowohl das Tragverhalten als auch die Umweltwirkung des Herstellungsprozesses, zum Beispiel hinsichtlich des Verschnitts und des Verschleißes beim Sägen der Lamellen, weiter erforscht werden.

### 2.2.8 Ausblick 2. Forschungsabschnitt

Zur Umsetzung der Forschungsergebnisse aus der ersten Forschungsphase bei dem Realprojekt sind im Bereich der weit spannenden und rückbaubaren Konstruktionen aus Altholz die im Folgenden beschriebenen Forschungen und Entwicklungen notwendig.

In Kooperation mit einem herstellenden Unternehmen werden Brettschichtholzträger aus Altholz gefertigt und beprobt. Die Ergebnisse werden mit Versuchen an baugleichen BSH-Trägern aus Frischholz sowie den ersten Ergebnissen in der Literatur (Universität Madrid) verglichen und validiert.

Aufbauend auf den Ergebnissen dieser Forschungsphase werden die Knotendetails für den Fachwerkträger des Realprojekts in Abstimmung mit dem Planungsteam erforscht, entwickelt und definiert. Dabei liegt der Fokus zusätzlich zur analytischen und experimentellen Bestimmung der Tragfähigkeit vor allem auf der Rückbaubarkeit des Anschlusses und der Verwendung von Altholz.

Basierend auf den neu entwickelten Knotendetails und den neu entwickelten Brettschichtholzträgern aus Altholz wird ein Prototyp des Fachwerkträgers im Maßstab 1:1 gefertigt. Die beschriebene detaillierte Entwicklung und die wissenschaftliche Verifikation des Trägers hinsichtlich des Tragverhaltens, der Versagensform und der Verformung stellt die unumgänglich notwendige Grundlage für dessen spätere qualitätssichere Fertigung und den sicheren Einbau im Realisierungsprojekt dar.

## 2.3 Beton- und Stahlarme Gründung

### 2.3.1 Einleitung und Zielsetzung

In diesem Arbeitspaket werden nachhaltige Alternativen zu herkömmlichen Gründungsvarianten untersucht. Dabei werden ausschließlich Einzelfundamente unter Vertikalbelastung betrachtet. Das Tragverhalten unter Horizontallasten wird Bestandteil des zukünftigen Forschungsabschnitts sein.

Die aktuelle Planung des Museums-Pavillons sieht eine Gründung mithilfe von Einzelfundamenten in vier Längsachsen vor, wobei in Querrichtung des Gebäudes die Rahmenachsen aufgegriffen werden. Die Designlasten variieren zwischen 100 kN und 925 kN, vgl. Abbildung 25.

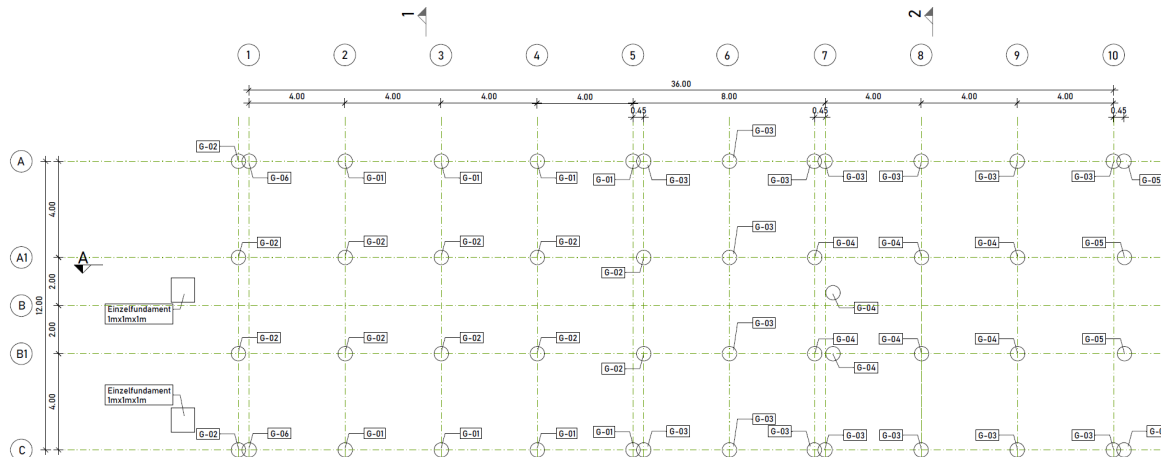


Abbildung 24: Vorentwurf GRW-Projekt, Grundriss Fundamentanordnung, Stand 04.04.2023

G-01:	Gk = 330 kN/ Qk = 320 kN/ NEd = 925 kN
G-02:	Gk = 60 kN/ Qk = 60 kN/ NEd = 175kN
G-03:	Gk = 50 kN/ Qk = 90 kN/ NEd = 200 kN
G-04:	Gk = 110 kN/ Qk = 180 kN/ NEd = 420 kN
G-05:	Gk = 30 kN/ Qk = 40 kN/ NEd = 100 kN
G-06:	Gk = 165 kN/ Qk = 160 kN/ NEd = 465 kN

Abbildung 25: Einzellasten der Gründung gem. Vorentwurfsplanung GRW-Projekt, Stand: 04.04.2023

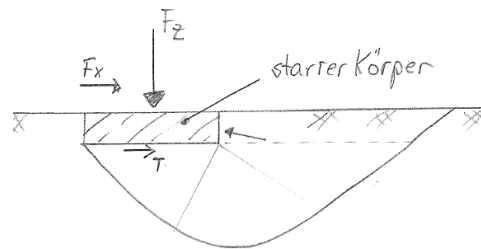
### 2.3.2 Aufgabe der Gründung

Die Gründung eines Gebäudes hat die Aufgabe, alle vertikalen und horizontalen Lasten des Gebäudes derart in den Boden bzw. den Baugrund zu leiten, dass der Baugrund nicht versagt und dass keine großen Setzungen des Baugrunds auftreten. Die dafür notwendigen tragwerksplanerischen Nachweise sind die der „äußeren Standsicherheit“ der Gründung.

Das Gründungsbauteil selbst darf im Zuge der Lastverteilung nicht versagen. Es muss in der Lage sein, den Belastungen aus dem Gebäude und den Gegenreaktionen aus dem Baugrund standzuhalten. Die dafür notwendigen tragwerksplanerischen Nachweise sind die der „inneren Standsicherheit“ der Gründung.

### 2.3.3 Anforderungen aus der äußeren Standsicherheit

Bodenmechanische Kennwerte wie Erddruck (aktiver Erddruck, passiver Erddruck und ruhender Erddruck) und Bettungen (Steifemoduln, horizontale Bettungen bei Pfählen, etc.) resultieren aus den Interaktionen zwischen Gründungskörper und Baugrund. Je nach Gründungskörper, Verformungsrichtung und Baugrund wurden im Laufe der Jahre geotechnische Kennwerte aus diesen Interaktionen gesammelt. Auf Basis dieser Kennwerte werden Gründungskörper geplant und bemessen. Aus geotechnischer Sicht ist ein Gründungsbauteil ein Baukörper (Wand, Pfahl bzw. Stab, Balken und Platte).



**Abbildung 26: Baugrundmodell Grundbruch eines Einzelfundamentes**

Für die Nachweise der äußeren Standsicherheit (Grundbruch, Geländebruch, Setzung, etc.) ist es zwingend notwendig, dass die Gründungselemente des Museums-Pavillons jeweils, in mechanischer Hinsicht, als ein starres Bauteil ausgeführt werden. Ein Gründungsbauteil kann z. B. eine Platte, ein Balken oder ein Stab (bzw. Pfahl) sein. Es kann nicht aus lose zusammengesetzten Einzelementen (z. B. Kieshaufen) bestehen. Sofern diese Bedingung eingehalten wird, kann die äußere Standsicherheit über die gängigen Bemessungsmethoden nachgewiesen werden.

### 2.3.4 Gründungsarten

In der Geotechnik wird primär zwischen zwei Arten von Gebäudegründungen unterschieden: Flachgründungen (Plattenfundament, Streifenfundament, Sohlplatten) und Tiefgründungen. Flachgründungen werden für Gebäude mit geringeren resultierenden Fundamentlasten verwendet und haben in der Regel einen, im Verhältnis zu ihrer Höhe, großen Grundriss. Sie liegen in geringer Tiefe unter der Geländeoberkante. Tiefgründungen sind bei Gebäuden mit außergewöhnlich hohen Lasten oder in Bereichen mit schlechten Bodenkennwerten erforderlich. Unter Tiefgründungen fallen bspw. Bohrpfähle oder Pfahlgründungen, bei denen die Fundamente in tiefere Bodenschichten reichen. Die Wahl der richtigen Gründungsart hängt von verschiedenen Faktoren ab, einschließlich des Bodentyps, des Gewichts des Gebäudes und der örtlichen Bauvorschriften.

### 2.3.5 Der Baugrund vor Ort

Für das Projekt Museums-Pavillon wurden am 30.07.2020 eine „Orientierende Baugrunderkundung“ [31] und am 01.12.2022 ein „Geotechnischer Bericht“ erstellt [32]. Die Untersuchungsbereiche beider Erkundungen sind nicht identisch, aber unmittelbar nebeneinander bzw. benachbart.

Die Auswertung der Untersuchungen [31] zeigt, dass ab einer Tiefe von ca. 2 m bis zu einer Tiefe von ca. 7 m die Spitzenwiderstände der Drucksondierung derart niedrig sind, dass Pfahlmantelreibungen für etwaige Pfahlgründungen nicht ansetzbar wären. Bei einer Pfahlgründungsvariante müssten die Pfähle die Tiefe von 7 m überwinden, sodass nennenswerte Mantelreibungswerte angesetzt werden können. Sofern keine aufwendigen Baugrundverbesserungen vorgenommen werden, haben Vorberechnungen gezeigt, dass mit ca. 10 m langen Stahlbetonpfählen gerechnet werden muss.

Gegen eine etwaige Flachgründungsvariante spricht sich das Orientierende Baugrunderkundung [31] nicht aus. Es erklärt für Einzel- und Streifenfundamente ab einer Einbindetiefe von 1 m Bemessungswerte des Sohldrucks von  $\sigma_{R,d} = 350 \text{ kN/m}^2$  und bei einer etwaigen Bodenplatte ein Bettungsmodul von  $k_s = 10 \text{ MN/m}^3$  als ansetzbar für die Bemessung.

Laut Geotechnischem Bericht [32] wurden im Untersuchungsbereich überwiegend mitteldichte Sande vorgefunden. Nur an einem der Bohrpunkte liegt eine lockere Lagerung vor. Es wurden Kleinrammbohrungen und leichte Rammsondierungen bis maximal 3 m Tiefe vorgenommen, sodass keine belastbaren Kennwerte für Pfahlgründungen und Flachgründungen herangezogen werden können. Für erste Vorbemessungen von Streifen- und Einzelfundamente können jedoch nachfolgende Tabellenwerte der zulässigen Sohldrücke verwendet werden.

Tabelle 7: Bemessungswerte  $\sigma_{R,d}$  des Sohlwiderstandes für Streifenfundamente auf nichtbind. Boden (auf der Grundlage einer ausreichenden Grundbruchsicherheit mit den Voraussetzungen nach Tabelle A.6.3 gemäß DIN 1054)

Kleinste Einbindetiefe des Fundamentes m	Bemessungswerte $\sigma_{R,d}$ des Sohlwiderstandes [kN/m <sup>2</sup> ] <i>b bzw. b'</i>					
	0,50 m	1,00 m	1,50 m	2,00 m	2,50 m	3,00 m
0,50	280	420	560	700	700	700
1,00	380	520	660	800	800	800
1,50	480	620	760	900	900	900
2,00	560	700	840	980	980	980
bei Bauwerken mit Einbindetiefen $0,30 \text{ m} \leq d \leq 0,50 \text{ m}$ und mit Fundamentbreiten $b$ bzw. $b' \geq 0,30 \text{ m}$	210					
Achtung – Die angegebenen Werte sind Bemessungswerte des Sohlwiderstands, keine aufnehmbaren Sohlrücke nach DIN 1054:2005-01 und keine zulässigen Bodenpressungen nach DIN 1054:1976-11						

**Abbildung 27: Auszug aus [3], Tabelle 7**

Der Bericht [32] weist darauf hin, dass die vorgenommenen Untersuchungstiefen nicht ausreichend sind und verweist auf die Empfehlung der DIN EN 1997-2. Demnach sollten Untersuchungstiefen mindestens 6 m unter Gründungssohle liegen.

### 2.3.6 Rahmenbedingungen für den tragwerksplanerischen Entwurf der Gründung

Die Rahmenbedingungen für den Entwurf der Gründung bestehen aus den Bedingungen der Zielsetzung, aus den Anforderungen der geotechnischen Nachweise und aus den Erkenntnissen aus den Baugrunduntersuchungen.

#### a) Bedingungen aus der Zielsetzung des Planungsvorhabens

1. Ökologisch: Indem das Gebäude ohne Keller und das Erdgeschoss punktförmig auf Einzelfundamente oder Pfahlgründungen aufgeständert über dem Erdreich ausgeführt werden soll.
2. Nachhaltig: Durch Verwendung von energieeffizienten Baumaterialien und oder recycelbaren oder nachhaltig beschafften Baumaterialien.
3. Klimagerecht: Durch Minimierung des Einsatzes von Zement bzw. Beton und Stahl
4. Realisierbarkeit bzw. Genehmigungsfähigkeit: Durch Verwendung von durch Normung und Zulassungen geregelte Materialien und Nachweisverfahren

#### b) Anforderungen aus der Geotechnik

1. Gründungbauteil soll sich mechanisch wie ein starres Bauteil verhalten, vgl. Abbildung 26

#### c) Erkenntnisse aus den Baugrunduntersuchungen

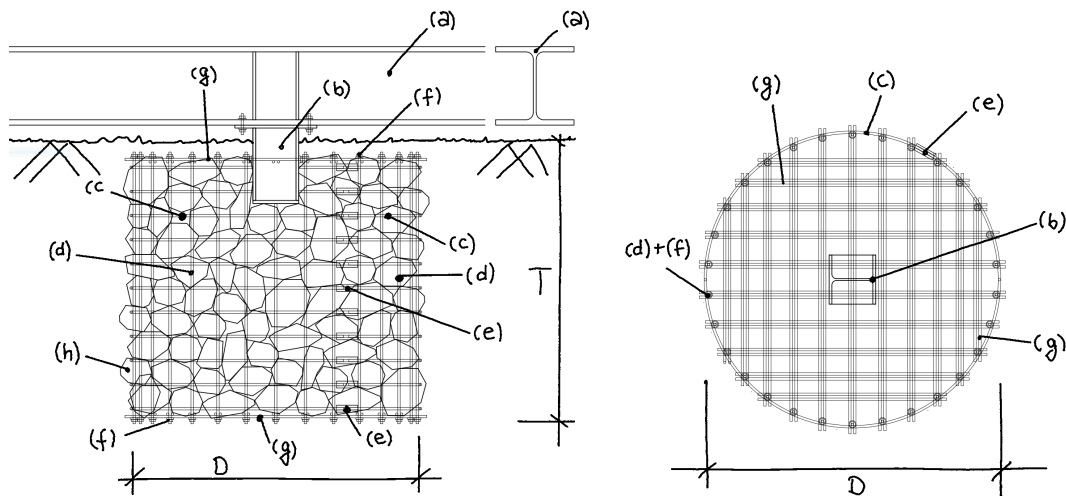
1. Kenndaten für Pfahlgründungen liegen nur für einen Teilbereich vor und dort ist der Baugrund für Pfahlgründungen ungünstig
2. Kenndaten für Einzel- und Streifenfundamente liegen für Vorbemessungen vor
3. Kennzahlen für eine Bodenplatte liegen für einen Teilbereich vor

Auf Grundlage der Baugrunduntersuchungen sind Flachgründungen gegenüber Tiefgründungen vorzuziehen und da aus ökologischer Sicht das Gebäude punktförmig aufgeständert werden soll, werden die beiden im Folgenden dargestellten Einzelfundamentvarianten untersucht.

In Abschnitt 2.4 „Kreislaufgerechte Planung und Realisierung, Bewertung“ wird ein Vergleich zwischen der betrachteten Gründungsvarianten und einem konventionellen Einzelfundament anhand einer LCA durchgeführt.

### 2.3.7 Variante 1: Kreisrunder Stahlkorb mit Füllmaterial als Einzelfundament

#### Aufbau und Material



**Abbildung 28: Schnitt: Gründung aus rundem Stahlkorb mit Bruchsteinen**  
**Abbildung 29: Aufbau Deckel und Boden Stahlkorb ohne Darstellung Füllmaterial (h) u. Stahlrost (a)**

- (a) Unterkonstruktion des Hochbaus, hier Stahlrost z.B. HEB450, S235
  - (b) Schubknagge, hier HEA180, S235. Anschluss mit überstehenden Stirnplatte
  - (c) Umschnürung, hier: Stabstahlring Ø10/100 mm, BSt500NR
  - (d) Vertikale Stabeisen BSt500NR oder Gewindestangen Ø10mm
  - (e) Spannschloss zum Vorspannen der zugehörigen Umschnürung (c)
  - (f) Mutter + Unterlegscheibe zum Vorspannen des zugehörigen vertikalen Stabeisens (d)
  - (g) Orthogonale Doppelstabeisen Ø10 mm, BSt500NR
  - (h) Füllmaterial, hier Bruchstein kleinste Sieblinie 90 mm
- T = Einbindetiefe / D = Außendurchmesser Stahlkorb

#### Beschreibung

Das Gebäude kann über die Schubknagge (b) punktförmig und aufgeständert aufliegen. Durch den Luftspalt ist der Gasaustausch zwischen Boden und Atmosphäre gewährleistet. Die ökologische Rahmenbedingung wird dadurch eingehalten.

Der Stahlkorb setzt sich zusammen aus den Umschnürungen (c), den vertikalen (d) und orthogonalen (g) Stabeisen und zugehörigen Anschlüssen (f) und (e). Die einzelnen Elemente des Stahlkorbs bestehen aus – vorzugsweise recyceltem – nicht rostendem Stahl. Stahl ist hier für die erforderlichen Vorspannmaßnahmen bzw. Aufnahme der Zugkräfte erforderlich und ist aktuell das einzige Material, welches auf Grundlage der gegenwärtigen Normung für die Bemessung der inneren Standsicherheit herangezogen werden kann. Mit der Verwendung von nicht rostendem Stahl sind Kontaminationen aus Korrosionsschutzmaßnahmen (z. B. Korrosionsschutzanstrich) und aus Korrosionsvorgängen ausgeschlossen. Damit können alle Teile des Stahlkorbs nach einem etwaigen Abriss wiederverwendet oder zu 100% recycelt werden. In Bezug auf Recyclingfähigkeit und Lebensdauer ist hier nichtrostender Stahl unter den gegebenen Randbedingungen ein nachhaltiger Werkstoff, auch wenn für seine Herstellung und Verarbeitung verhältnismäßig viel Energie aufgewandt werden muss.

Als Füllmaterial werden vorerst Bruchsteine angesetzt, deren Materialkennwerte durch Normen abgedeckt sind. Es ist vorgesehen, letztlich Füllmaterialien aus aufbereitetem Bauschutt verwenden zu können. Die Lagesicherheit der Bruchsteine erfolgt ohne chemische Verbindungen und damit ohne Zement und ausschließlich über Vorspannungsmaßnahmen am Stahlkorb.

Die geotechnische Anforderung, dass sich das Fundament wie ein starrer Körper zu verhalten hat, wird indirekt über die Bemessung der inneren Standsicherheit belegt. Das Bemessungskonzept für die innere Standsicherheit ist ein Stabstatik-Modell bestehend aus Zug- und Druckstreben. Die Druckstreben werden über das Füllmaterial und die Zugstreben über den Stahlkorb nachgewiesen. Die Stahlkorbvariante ist, nach jetzigem Stand der theoretischen Untersuchungen, in der Lage, sowohl vertikale als auch horizontale Lasten abzutragen.

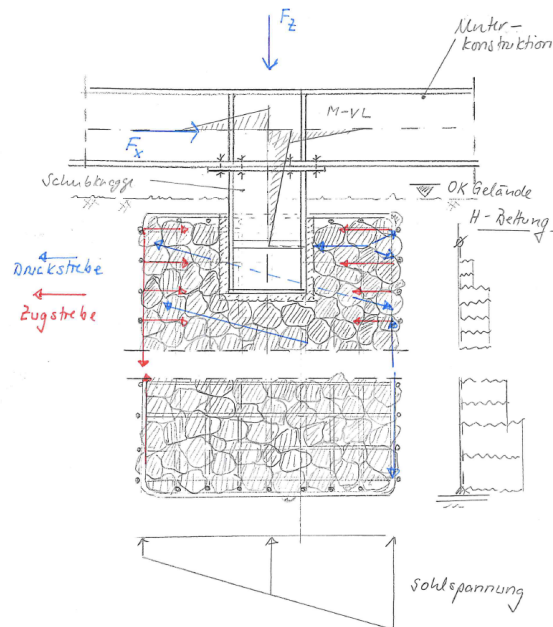


Abbildung 30: Prinzip-Skizze Stabstatik-Modell

Sofern die innere Standsicherheit belegt ist, darf die äußere Standsicherheit über die bodenmechanischen Kennwerte nachgewiesen werden (z. B. über die zul. Sohldruckspannung).

#### Lagesicherheit des Füllmaterials und der Schubknagge

Ist die Lage der einzelnen Körper des Füllmaterials gesichert, ist auch sichergestellt, dass sich die einzelnen Körper gegeneinander kraftschlüssig und schlupffrei abstützen. Dies ist die Voraussetzung für die Nachweise der inneren Standsicherheit. Über die Schubknagge (b) werden die Lasten punktförmig in das Fundament eingeleitet. Die Schubknagge (b) muss dafür allseitig kraftschlüssig an dem Füllmaterial (h) anliegen. Dieses wird durch Vorspannmaßnahmen an den Umschnürungen (c) und vertikalen Stabeisen (d) sichergestellt. Die Vorspannungsmaßnahmen am äußeren Korb müssen sicherstellen, dass sich die Bruchsteine derart verkeilen, dass keine Verschiebungen und Verdrehungen der einzelnen Steine stattfinden können.

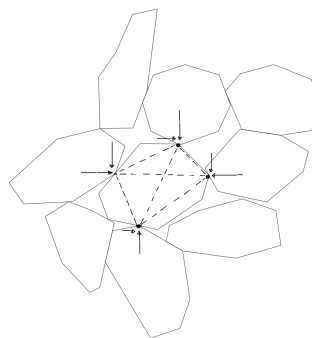


Abbildung 31: Detail: Eingekeilter Bruchstein mit abstützenden Drucktrajektorien

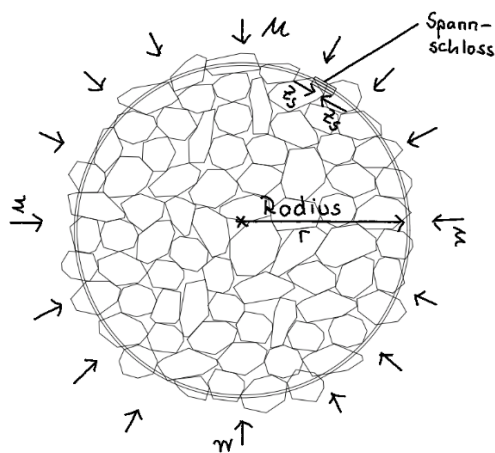
Die Vorspannungen erfolgen mehraxial: Zum einen über die horizontal liegenden Umschnürungen (c) und zum anderen über die vertikalen Stabeisen (d). Damit ist die Lagesicherheit sowohl für vertikale als auch horizontale Lasten sichergestellt.



Solange sich die Bruchsteine im Zuge der Vorspannmaßnahmen bewegen können, herrscht kein Kräftegleichgewicht und der benötigte Widerstand für die Vorspannung fehlt. Sobald sich die Bruchsteine derart verkeilt haben, dass eine Drehung oder Verschiebung nicht mehr stattfinden, herrscht Kräftegleichgewicht und ein Widerstand baut sich auf, welcher über die Vorspannkraft gemessen und damit vor Ort überprüft werden kann. Grundsätzlich dürfen die Bruchsteine während der Vorspannmaßnahmen brechen und sich erneut verkeilen oder durch die Maschen des Stahlkorbes fallen. Sobald sich die Vorspannkraft dauerhaft aufgebaut haben, ist der Prozess der Verkeilung abgeschlossen und die Lagesicherheit der Bruchsteine ist sichergestellt.

### Vorspannung über die Umschnürung

Die Umschnürungen werden jeweils mithilfe eines Spannschlusses vorgespannt. Dabei entstehen Umlenkkraften, die horizontal allseitigen Druck auf das Füllmaterial (Bruchsteine) ausüben.

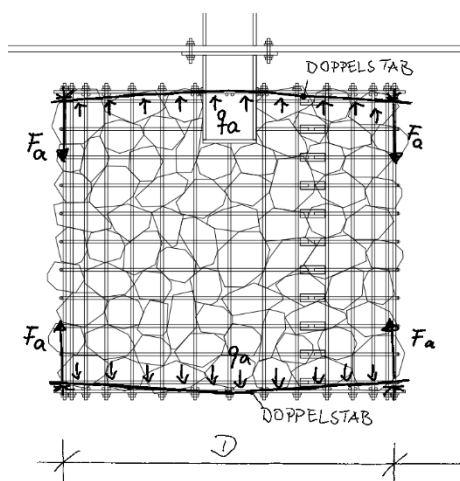


$$\begin{aligned} Z_s &= \text{Vorspannkraft [kN]} \\ r &= \text{Radius [m]} \\ u &= \text{Umlenkkraft [kN/m]} \\ u &= Z_s / \text{Radius} \end{aligned}$$

Abbildung 32: Umlenkkräfte aus vorspannen der Umschnürungen

### Vorspannung über die vertikalen Stabeisen

Der Deckel sowie der Boden des Stahlkorbes bestehen aus horizontalen und orthogonal zueinander liegenden Doppelstabeisen (g). Die Doppelstabeisen werden jeweils durch das Zuziehen der Muttern gegen das Füllmaterial (Bruchsteine) gedrückt. Die Druckbeanspruchung auf das Füllmaterial muss über die Biegung des Doppelstabs sichergestellt werden.



$$\begin{aligned} F_a &= \text{Ankerkraft [kN]} \\ D &= \text{Durchmesser [m]} \\ q_a \text{ [kN/m]} &= 2 * F_a / D \end{aligned}$$

Abbildung 33: Druckkräfte aus vorspannen der vertikalen Stabeisen

### Alternative Anbindung am Kopf

Die Unterkonstruktion des Hochbaus (a) wurde in den bisherigen Untersuchungen und Abbildungen als Stahlrost dargestellt. Grundsätzlich kann die Schubknagge auch an eine Holzkonstruktion (Holzrost)

angeschlossen werden, siehe folgende Abbildung. Dies gilt für die beiden betrachteten Varianten gleichermaßen.

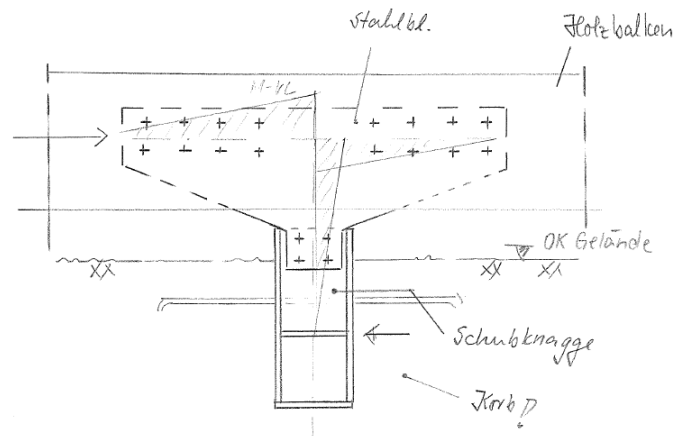


Abbildung 34: Prinzip-Skizze: Anschluss Schubknagge an Holzrost

### 2.3.8 Variante 2: Betonring mit Füllmaterial als Einzelfundament

#### Aufbau und Material

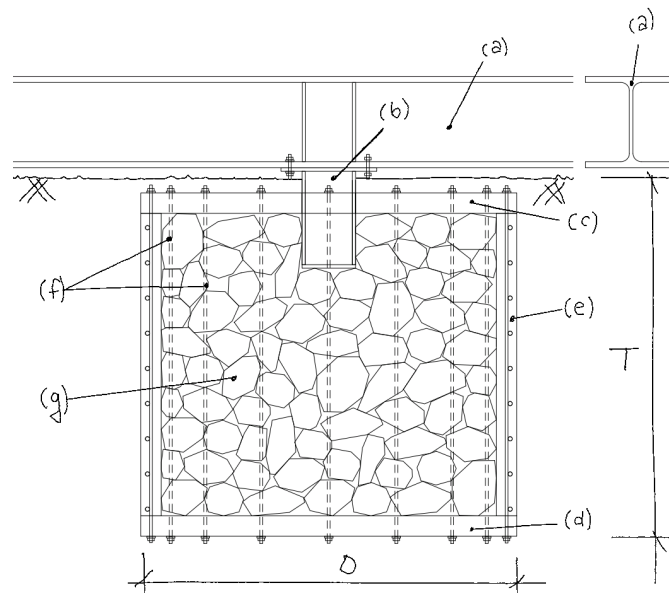


Abbildung 35: Schnitt: Gründung aus Betonring

- (a) Unterkonstruktion des Hochbaus, hier Stahlrost z.B. HEB450, S235
  - (b) Schubknagge, hier HEA180, S235. Anschluss mit überstehenden Stirnplatte
  - (c) Stahlbetondeckel, hier:  $d = 8$  cm
  - (d) Stahlbetonboden, hier:  $h = 8$  cm
  - (e) Stahlbetonring, hier:  $h = 8$  cm
  - (f) Anker, hier Gewindestange M12 (beidseitig) mit Mutter + Unterlegscheibe
  - (g) Füllmaterial, hier Bruchsteine
- T = Einbindetiefe  
D = Außendurchmesser Betonring

#### Beschreibung

Das Gebäude kann über die Schubknagge (b) punktförmig und aufgeständert aufliegen. Durch den Luftspalt ist auch hier der Gasaustausch zwischen Boden und Atmosphäre gewährleistet. Die ökologische Rahmenbedingung wird dadurch eingehalten. Der Stahlbetonring (e) wird oben und unten mit Stahlbetonplatten (c) + (d) kraftschlüssig durch Anker (f) gedeckelt.

Die Bewehrung im Stahlbetonring und die Anker (f) sind zur Aufnahme der Zugkräfte erforderlich. Die Anker (f) bestehen aus nicht rostendem Stahl, vorzugsweise aus recyceltem nicht rostendem Stahl. Beide Stahlsorten sind mit Beton ummantelt, sodass bei einem Abriss der Stahl mit einem gewissen Energieaufwand bereinigt werden muss, um es wiederzuverwenden.

Als Füllmaterial werden vorerst Bruchsteine angesetzt, deren Materialkennwerte durch Normen abgedeckt sind. Es ist vorgesehen, letztlich Füllmaterialien aus aufbereitetem Bauschutt zu verwenden zu können. Die Lagesicherheit der Bruchsteine erfolgt ohne chemische Verbindungen und damit ohne Zement. Die Lagesicherheit soll durch die lagenweise Verdichtung während des Einbaus sichergestellt werden.

Die geotechnische Anforderung, sich wie ein starrer Körper zu verhalten, ist derzeit noch nicht zweifelsfrei sichergestellt. In der Theorie soll dies indirekt über die Bemessung der inneren Standsicherheit belegt werden. Das Bemessungskonzept für die innere Standsicherheit soll auch hier aus einem Stabstatik-Modell bestehen. Die Druckstreben werden über das Füllmaterial und die Zugstreben über die Anker (f) und Betonstahlbewehrung nachgewiesen. Die baupraktische Prüfung vor Ort, wie bei Variante 1 über die Vorspannkräfte, ist hier noch nicht geklärt.

#### **Lagesicherheit des Füllmaterials und der Schubknagge**

Im Gegensatz zur Variante 1 ist aktuell die Lagesicherheit der einzelnen Körper des Füllmaterial nur für vertikalen Lasten nachgewiesen. Diese Lagesicherheit wird durch die lagenweise Verdichtung während des Einbaus sichergestellt. Die Lagesicherheit für horizontale Lasten ist nach jetzigem Kenntnisstand nicht gegeben.

#### **2.3.9 Ausblick auf die nächste Forschungsphase**

Im nächsten Forschungsabschnitt wird für die Stahlkorbvariante (vgl. 2.3.7) ein anwendbares Bemessungskonzept für vertikale und horizontale Lasten aufgestellt, anhand dessen die Gründungskörper entworfen, genehmigungsfähig geplant und ausgeführt werden können. Im Zuge dessen werden konzeptionelle Lösungen für die fehlende Lagesicherheit der Füllkörper bei der Betonring-Variante (siehe Abschnitt 0) gesucht. Bei Erfolg wird das Bemessungskonzept der Stahlkorbvariante auf die Betonring-Variante modifiziert.

## 2.4 Kreislaufgerechte Planung und Realisierung, Bewertung

Der drängende Klimawandel, schwindende Ressourcen und schrumpfende Deponieräume erfordern ein grundlegendes gesellschaftliches Umdenken im Umgang mit Rohstoffen und Abfällen. Laut der RESCUE Studie des Umweltbundesamts (2019) muss – zur Erreichung der Klima- und Ressourcenziele – die Inanspruchnahme von Rohstoffen bis 2050 um 60% reduziert werden.[1] Vor diesem Hintergrund muss insbesondere der Bausektor sein bisheriges, lineares Wirtschaftsmodell kurzfristig überwinden hin zu einer Kreislaufbauwirtschaft. Hierfür sind radikale Innovationsschübe auf allen Ebenen notwendig: Von der Material- und Bauteilentwicklung bis hin zur kreislaufgerechten Konzeption ganzer Gebäude. [33]

Das Forschungs- und Bauvorhaben als Reallabor für den Bausektor ist auf Grundlage verschiedener, nachhaltigkeitsorientierter Prinzipien konzipiert, die im Folgenden zusammengefasst werden. Dieser Reallabor-Ansatz ist als projektbezogene Strategie zur Umsetzung der ökologischen Zielstellungen zu verstehen und bildet am Ende der ersten Stufe einen Zwischenstand ab. Ziel ist es diesen, in der beantragten zweiten Stufe des Forschungsvorhabens, weiter zu detaillieren und in die Umsetzung zu bringen. Dafür wird zum Abschluss des Gesamtprojekts ein Leitfaden mit übertragbaren Leitlinien für die vereinfachte Umsetzung und Verstetigung der entwickelten Maßnahmen im Bausektor erarbeitet.

### 2.4.1 Reallabor für kreislaufgerechtes Planen und Bauen in den planetaren Grenzen

In Wissenschaft, Politik und Wirtschaft [34] [35] [36] haben sich Reallabore in den letzten Jahren als methodischer Rahmen etabliert, um experimentelle, koproduzierte und transformative Ansätze sowohl wissenschaftlich als auch politisch zu erproben und nachhaltig zu etablieren. [2]

Im Bausektor verspricht dieser Ansatz die notwendige schnelle Entwicklung von Materialien und Bautechniken und gleichzeitige Wertschätzung der kommunikativen Austausch- und Transferprozesse, durch die diese Fortschritte gesellschaftlich und wissenschaftlich mitproduziert, validiert, legitimiert und implementiert werden können. Durch das gezielte Absenken hindernder Normen und Gesetzesvorgaben ermöglichen Reallabore Sprunginnovationen und stellen über die wissenschaftliche Begleitung der Planungs- und Realisierungsprozesse fachliche Sicherheit her. [37]

Der Museums-Pavillon als Reallabor für das Planen und Bauen in den planetaren Grenzen formuliert ein zukunftsweisendes Konzept für einfaches, schadstofffreies Bauen aus Altholz mit schlanker Gebäudetechnik, das Abfall fast gänzlich vermeidet. Durch ein klimaangepasstes Design, die Entwicklung kreislaufgerechter Bausysteme unter Einsatz wiederverwendeter Materialien sowie ein innovatives Low-Tech-Konzept entsteht ein kreislaufgerechtes, klima- und ressourceneffektives Gebäudeprinzip.

Laut einer Studie des Umweltbundesamtes (UBA) [2] können langfristige Veränderungen im Bausektor nur dann einen Beitrag zum Erreichen der Klimaziele und Ressourceneffizienz leisten, wenn eine ganzheitliche Betrachtung des Bauprozesses, also von der Gewinnung der Rohstoffe bis zu ihrer Entsorgung, erfolgt und etabliert wird. Im Sinne der Kreislaufbauwirtschaft [38] werden alle Phasen des Vorhabens – Entwurf, Nutzung, Wartung, Reparatur, Sanierung, Wiederverwendung und Wiederaufbereitung – genutzt, um Energie- und Materialkreisläufe zu schließen und gleichzeitig den Ressourcenverbrauch, das Abfallaufkommen und die Treibhausgasemissionen zu minimieren. Dieses Konzept bildet einen Gegensatz zu dem vorherrschenden linearen Modell von Extraktion, Produktion und Entsorgung. [39]

Das kreislaufgerechte Gebäudekonzept für das Bauvorhaben weicht als planerische Behauptung an verschiedenen Stellen von aktuell gängigen Standards im Planen und Bauen ab. Durch die wissenschaftliche Begleitung dieses Realisierungsvorhabens werden simultan zur Planung rechtliche, technische und logistische Fragen bearbeitet und durch das Reallabor-Konzept realisierbar. Die grundlegenden Prinzipien des Reallabor dienen als Zielstellungen der Bauteilkonzeption im Forschungsvorhaben und Leitthemen der Planung im Realisierungsvorhaben.

### *Robustheit und Langlebigkeit*

Das Bundesinstitut für Bau-, Stadt-, und Raumforschung [33] beschreibt den langfristigen Erhalt bestehender Ressourcen auf Ebene des Materials, von Bauteilen, aber auch ganzer Gebäude und Quartiere als übergeordnetes Ziel der Kreislaufwirtschaft. In dem Gebäudekonzept des Pavillons wird dies aufgegriffen, indem von Beginn an die adaptive Wiederverwendung und Umgestaltung des Gebäudes berücksichtigt werden. Durch die weitspannenden Fachwerkträger und stützenfreien Grundrisse wird der Museums-Pavillon als endlos nutzbares Gebäude konzipiert, das nicht nur aktuellen Anforderungen entspricht, sondern langfristig flexibel umgenutzt werden kann. Die ergänzenden Außenbauteile, insbesondere die Außenwände und Bekleidungen der Dach- und Geschossdecken, werden nicht nach den spezifischen Anforderungen der ersten Nutzungsphase konzipiert, sondern ermöglichen unterschiedliche Nutzungsszenarien.

### *Ressourcenpositiver Materialeinsatz & reversible Baukonstruktionen*

In der Kreislaufbauwirtschaft wird die gebaute Umwelt als Ressourcenspeicher und Bauteillager verstanden – Materialien werden nicht verbraucht, sondern in Gebäuden genutzt. [33]

Das Reallabor beabsichtigt die Potenziale dieses antropozänen Lagers effizient zu nutzen. Der Pavillon wird aus wiederverwendeten Materialien als reversibles, wartungsfreundliches Gebäude geplant. Bauteile oder Bauteilschichten, die das Ende des Nutzungszyklus erreicht haben, sind größtenteils recyclingfähig und zerstörungsfrei rückbaubar, um die Lebenszyklen der eingesetzten Ressourcen möglichst langfristig zu gestalten und Abfälle signifikant zu reduzieren. Das Gebäude ist translozier- und an anderem Ort als Ganzes nachnutzbar konzipiert. Für die Fachwerkträger und Gründung werden im Rahmen dieses Forschungsvorhabens neue Recyclingprodukte aus Altholz und anderen Abfallstoffen konzipiert und in der zweiten Stufe gemeinsam mit Industriepartner:innen weiterentwickelt und hergestellt.

### *Nachhaltiger Gebäudebetrieb – LowTech*

Der Museums-Pavillon wird anhand der lokalen, klimatischen Bedingungen mit einem angemessenen Glasanteil entworfen, der ganzjährig im Spannungsfeld zwischen optimalem Wärmeschutz im Winter, unerwünschten Gewinnen im Sommer sowie Tages- und Kunstlicht vermittelt. Anstelle eines technisch erzeugten „neutralen“ Raumklimas werden anhand thermischer Simulationen unterschiedliche klimatische Aufenthaltsbereiche geplant. Die thermische Aktivierung der Wand- und Bodenflächen als Speichermasse aus Naturbaustoffen ermöglicht einen fast vollständigen Verzicht auf Lüftungs- und Klimatisierungstechnik. Adaptive raumklimatische Anforderungen werden mit den späteren Betreiber:innen differenziert entwickelt und geplant. Der stark reduzierte Energiebedarf wird weitgehend über PV-Kollektoren der eigenen Gebäudehülle und insgesamt möglichst klimaneutral gedeckt.

### *Kooperative Planungsprozesse*

Zunehmend komplexe Anforderungen an das Planen und Bauen im Hochbau führen in der Praxis zu vielfältigen Akteur:innenkonstellationen, diversen miteinzubeziehenden Expert:innen sowie komplexen Abläufen und Interdependenzen. [33] Die notwendigen Innovationen im klimagerechten Bauen werden in der Praxis durch diese Komplexität häufig erschwert und spezifisch gewonnenes Wissen bleibt lokal in einzelnen Projekten gebunden. Um die Langlebigkeit des Vorhabens zu garantieren, werden frühzeitig spätere Nutzer:innen und Vertreter:innen aus Forschung und Wissenschaft sowie der Stadtgesellschaft in den Planungsprozess einbezogen und alternative Prozessmodelle für eine zukunftsweisende Planungspraxis erprobt. Dieser Modellprozess wird begleitend analysiert, evaluiert und dokumentiert. Partizipative und transdisziplinäre Workshops ermöglichen die Umsetzung von Schnittstellen zwischen Zivilgesellschaft, Forschung und Planung.

### *Transfer und Wissenschaftskommunikation*

Das Reallabor zielt darauf ab, durch einen konkreten Beitrag oder Intervention zu der Transformation in Richtung Nachhaltigkeit beizutragen. Es bietet ein langfristiges Erprobungs- und Entwicklungsfeld für Forschende und Praktizierende mit regelmäßiger Reflexion und Auswertung der Ergebnisse. [36] Um die

spätere Anwendung und Verbreitung der Ansätze im Bausektor sicherzustellen, wird das Reallabor in Planung, Bau und Betrieb wissenschaftlich begleitet und die inhaltlichen Ansätze werden dokumentiert und ausgewertet. Die Ergebnisse der Forschung zum kreislaufgerechten Entwerfen, Planen und Konstruieren wurden und werden in der Lehre des Instituts für Architektur der TU Berlin sowie in Weiterbildungsangeboten der Architektenkammer aufgenommen. Durch die Teilnahme an Fachveranstaltungen wie Messen und Konferenzen werden die Ergebnisse der Fachwelt zugänglich gemacht. Nach Fertigstellung werden die innovativen Forschungsthemen für eine breite Öffentlichkeit im Museum sichtbar und erfahrbar sein.

*Lehrveranstaltung Master Architektur & Jahresausstellung des Instituts für Architektur  
Sommer- und Wintersemester 2023*



**Abbildung 36: Interdisziplinäre Lehrveranstaltung im WiSe2023 am Institut für Architektur**

*BAU Messe 2023 in München*

Bau von zwei prototypischen Feldern des Tragwerks aus Altholz im Maßstab 1:5 als Ausstellungsobjekt und -infrastruktur für die BAU Messe 2023 in München, Vorstellung der Zwischenergebnisse des Forschungsvorhabens vor einem nationalen Fachpublikum.



**Abbildung 37: Messestand zum Forschungs- und Bauvorhaben auf der BAU Messe 2023**

*wsbe24 – world sustainable built environment conference 2024*

Erfolgreiche Einreichung zweier Abstracts zu den Ergebnissen der ersten Stufe des Forschungsvorhabens auf der world sustainable built environment conference in 2024 und Einreichung eines wissenschaftlichen Papers und öffentliche Präsentation des Forschungsprojekts vor einem internationalen Wissenschafts- und Fachpublikum im Jahr 2024.

## 2.4.2 Analyse und Nachhaltigkeitsbewertung kreislaufgerechter Planung

Das Bundesministerium für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung [40] definiert als Ziel der Nachhaltigkeit „die Bedürfnisse der Gegenwart so zu befriedigen, dass die Möglichkeiten zukünftiger Generationen nicht eingeschränkt werden“. Weiterhin sind die Dimensionen nachhaltiger Entwicklung wirtschaftlich effizient, sozial gerecht und ökologisch tragfähig. Durch den breit geführten Diskurs in Praxis, Wissenschaft und Politik [33] [41] [42] und vielfältigen Ansätze zu kreislaufgerechter Planung wird auch die Frage nach der Messbarkeit von Nachhaltigkeit im Planen und Bauen in den Fokus gerückt. Zur Stärkung kreislaufgerechter Ansätze und Legitimation des aktuell noch notwendigen Mehraufwandes für das Planen und Bauen mit wiederverwendeten Materialien sind robuste Messungen erforderlich, um die Vorteile der Wiederverwendung für eine nachhaltige Planungspraxis messbar zu machen.

In den vergangenen Jahren hat sich eine Vielzahl von Zertifizierungssystemen etabliert, die unter Berücksichtigung verschiedener Aspekte Nachhaltigkeitsbewertungen durchführen. Im Bereich der ganzheitlichen Betrachtung ökologischer Auswirkungen von Planungsentscheidungen, Materialien und Gebäuden hat sich die Lebenszyklusanalyse (LCA) als methodischer Beurteilungsansatz in der Planungspraxis etabliert. Der Lebenszyklus wird gemäß DIN EN 15978 klassischerweise in die

Herstellungsphase (A1-3), Errichtungsphase (A4-5), Nutzungsphase (B1-7) inklusive Instandsetzung und Modernisierung sowie die Entsorgungsphase (C1-4) unterteilt. Darüber hinaus werden im Modul D der Ökobilanzierung Vorteile und Belastungen außerhalb der Systemgrenzen, also Potenziale für Wiederverwendung, Rückgewinnung und Recycling erfasst und verrechnet. [13] Die meisten Instrumente zur Ökobilanzierung sind jedoch nicht geeignet, um die Umweltauswirkungen eines Gebäudes zu bewerten, dessen Komponenten wiederverwendet sind und/oder in zukünftigen, noch nicht konkret geplanten Gebäuden wiederverwendet werden können. Gut nachzuvollziehen ist dies anhand des Beispiels Holz: Gemäß der normkonformen Ökobilanzierung wird der gespeicherte Kohlenstoff von Holz in der Herstellung als negatives Treibhauspotenzial (GWP) berücksichtigt, dieser wird rechnerisch am Lebenszyklusende wieder ausgebucht. Das trifft auf die thermische Verwertung von Holz zu, da der Kohlenstoff nur temporär im Material gebunden war und im Rahmen der Verbrennung wieder freigesetzt wird, nicht aber für langlebige Holzbauteile, die über mehrere Nutzungszyklen hinweg verwendet werden können. Hier braucht es einen anderen Berechnungsansatz, der die Verzögerung der CO<sub>2</sub> Emissionen rechnerisch berücksichtigt. Nur so können, gemäß dem Ansatz des Österreichischen Instituts für Bauen und Ökologie, positive Effekte für die Abminderung des Klimawandels aufgezeigt werden. [44]

Bei der Ökobilanzierung von Materialien die über mehrere Nutzungszyklen hinweg verwendet werden, ist die Frage nach der Zuordnung der verursachten Emissionen im Berechnungsmodell essentiell. In Literatur und Wissenschaft [45] werden derzeit alternative Konzepte zur Berechnung der Ökobilanz wiederverwendeter Materialien und Bauteile diskutiert. Hier sind teils deutliche konzeptionelle Abweichungen zwischen den verschiedenen methodischen Ansätzen zu beobachten, die zu einer großen Varianz von Ergebnissen führen. Im Vergleich zur etablierten Ökobilanzierung nach DIN EN 15978, fehlt es noch an einer einheitlichen Berechnungsmethode. [46] Zur Abbildung des Standes der Forschung werden im Folgenden fünf ausgewählte methodische Ansätze exemplarisch analysiert und auf jeweils zwei Bauteilvarianten der Arbeitspakete 2 und 3 angewendet. Ziel ist es, das Spektrum der Berechnungsansätze zu visualisieren, um anhand dessen aktuelle Potenziale und Herausforderungen von Ökobilanzierungen zusammenzufassen. Auf Grundlage dieser Ergebnisse soll in der zweiten Stufe des Forschungsvorhabens ein mehrdimensionaler Bewertungsansatz unter Einbezug der Umweltauswirkungen und Umweltfolgekosten (LCA und LCC), der Ressourceneffizienz (VDI 4800), der zirkulären Materialnutzungsraten CMU, des Zeit- und Kostenaufwandes sowie der baupraktischen Umsetzung entwickelt werden.

**Ökobilanzierung wiederverwendeter Materialien und Bauteile gemäß aktuellem Stand der Forschung**

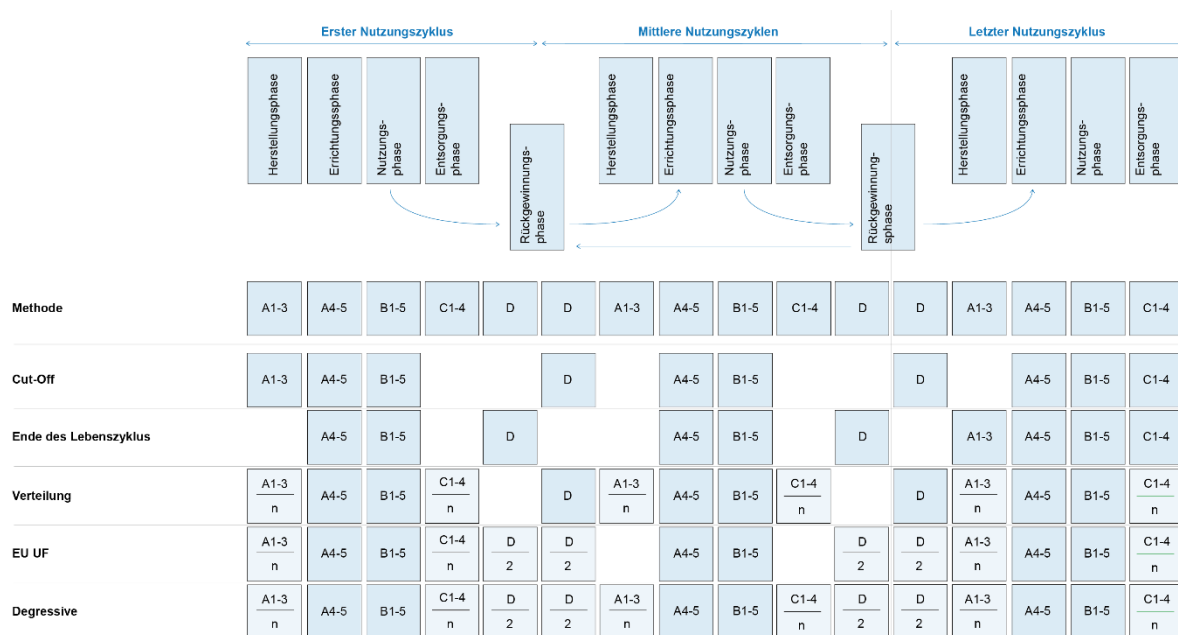


Abbildung 38: Überblick über Methoden zur LCA Ermittlung nach DeWolf et al. (2020) [46]

Nach Allacker et al. (2017) [45] und DeWolf et al. (2020) [46] werden fünf exemplarische Ansätze ausgewählt und vergleichend analysiert: Die Cut-Off Methode (nachfolgend CO), die Ende-des-Lebenszyklus-Methode (nachfolgend EdL), die Verteilungsmethode (nachfolgend V), die Europäische Kommission Umwelt-Fußabdruck-Methode (nachfolgend EUUF) und die degressive Methode (nachfolgend D).

#### **Cut-Off-Methode**

In der Cut-off-Methode (nach BSI, 2008) [47] werden Umweltauswirkungen innerhalb desjenigen Lebenszyklus gezählt, in dem sie tatsächlich auftreten – das Modul C wird nur in der letzten Phase angerechnet. Sie ermutigt so, bereits verwendete Bauteile wiederzuverwenden, schafft aber kaum Anreize, Bauteile und Materialien derart zu verbauen, dass sie in Zukunft leichter wiederverwendet werden können. [15] [46]

#### **Ende-des-Lebenszyklus-Methode**

In der EdL-Methode (BSI, 2008) [47] werden die Produktionsauswirkungen nicht dem ersten, sondern nur dem letzten Nutzungszyklus zugeordnet (Frischknecht, 2010; Allacker et al., 2017), ebenso die Entsorgung. In der Berechnung früherer Nutzungszyklen wird in der Berechnung davon ausgegangen, dass die Gebäudekomponenten wiederverwendet werden. Durch diese Form der Bewertung wird dazu ermutigt, eine zukünftige Wiederverwendung der Bauteile zu planen, die Vorhersage der Wiederverwendungsmöglichkeiten ist jedoch spekulativ. [15] [46]

#### **Verteil-Methode**

Bei dieser Methode werden die Umweltauswirkungen der Produktions- und Ende des Lebenszyklus-Phase gleichmäßig auf alle Lebenszyklen verteilt. Die Ergebnisse der Methode hängen von der Anzahl der Nutzungszyklen ab, die nur spekulativ vorherzusagen sind. Die Zuverlässigkeit und Wettbewerbsfähigkeit der Ergebnisse hängen von der Menge und tatsächlichen Umsetzung der angenommenen Nutzungszyklen ab. [15] [46]

#### **Umwelt-Fußabdruck-Methode der Europäischen Kommission**

Die von Allacker et al. (2017) vorgeschlagene EUUF-Methode verteilt die Umweltauswirkungen der Produktions- und Entsorgungsphasen gleichmäßig auf den ersten und letzten Nutzungszyklus. Die Auswirkungen der Wiederverwendung werden gleichmäßig unter den dazwischen liegenden, aufeinanderfolgenden Nutzungszyklen verteilt. So wird ein Anreiz geschaffen, mit wiederverwendeten Materialien zu planen oder die Planung auf eine zukünftige Wiederverwendung auszurichten. Ähnlich wie bei den vorherigen Methoden hängt auch hier die Zuverlässigkeit der Ergebnisse von der Richtigkeit der Annahmen bezüglich der zukünftigen Wiederverwendungen ab. [15]

#### **Degressive Methode**

Die degressive Methode nach Allacker et al. (2017) wurde von DeWolf et al. (2020) für die Wiederverwendung von Bauteilen angepasst. Sie sieht eine gleichmäßige Verteilung der Umweltauswirkungen der Produktions- und Entsorgungsphasen sowie die Auswirkungen der Wiederverwendung auf alle Nutzungszyklen vor. Auch diese Methode ist von der Genauigkeit der Vorhersage bezüglich Zukunftsszenarien abhängig. [15] [46]

Konträr zur etablierten Ökobilanzierung gemäß DIN EN 15978 variieren die Berechnungen in Abhängigkeit von der Anzahl der Nutzungszyklen die das Material haben kann. Die Verfassenden unterscheiden zwischen dem ersten Nutzungszyklus, einem oder mehreren (Anzahl n) mittleren Nutzungszyklen der Wiederverwendung sowie dem letzten Nutzungszyklus, der die Entsorgung beinhaltet.

#### **Ökobilanz der Bauteile aus wiederverwendeten Materialien gemäß Stand der Forschung**

Die Berechnung der Ökobilanz der Bauteile des Forschungsvorhabens erfolgte mithilfe des eLCA-Tools und auf Grundlage der Datensätze der ÖKOBAUDAT in der Version OBD\_2023\_I\_A2. [48]. Da nicht für alle im Forschungsvorhaben gewählten, teils wiederverwendeten und experimentellen Materialien vollständige Datensätze in der ÖKOBAUDAT zur Verfügung stehen, wurden für die Berechnung vergleichbare Datensätze angenommen, siehe Tabelle 11, Zeile 3. Für die entwickelten Bauteile der Arbeitspakete 2 und 3 werden folgende bauliche Varianten betrachtet. Eine Übersicht der Bauteilaufbauten und Materialzusammensetzungen sind in der Tabelle 11, Zeile 2 erfasst:



Gründung V01 - Edelstahlkorb mit RC-Betonbruch (GR V01)  
 Gründung V02 - Stahlbeton-Ring mit RC-Betonbruch (GR V02)  
 Fachwerkträger V01 - Altholz-Fachwerkträger mit minimalem Stahleinsatz (FT V01)  
 Fachwerkträger V02 - Altholz-Fachwerkträger ohne Stahleinsatz (FT V02)

Bauteil	Gründung Variante 01:	NZ	Gründung Variante 02:	NZ	Fachwerkträger Variante 01:	NZ	Fachwerkträger Variante 02:	NZ
<i>Gem. Planung AP 2+3</i>	Edelstahlkorb mit RC-Betonbruch	1	Stahlbeton-Ring mit RC-Betonbruch	1	Altholzträger mit Zugstäben aus Stahl	2	Stahlfreier Altholzträger	2
	Umschnürung	1	<b>Stahlbetondeckel, Ortbeton</b>	1	<b>Altholz-BSH*</b>	2	<b>Altholz-BSH*</b>	2
	Stabstahling	1	<b>Stahlbetonboden, Ortbeton</b>	1	<b>Altholz KVH*</b>	2	<b>Altholz KVH*</b>	2
	Vertikale Stabeisen	1	<b>Stahlbetonring</b>	1	Gewindestangen	1		
	Orthogonale Doppelstabeisen	1	Anker Gewindestange M12	1				
	RC-Beton-Bruch*	2	RC-Beton-Bruch*	2				
<i>Verwendete Datensätze ÖKOBAUDAT [48]</i>	Edelstahlteile: Befestigungsmittel/ Schrauben Edelstahl  Kies 2/32		Beton Druckfestigkeitsklasse C35/45 Betonrohr bewehrt Befestigungsmittel/ Schrauben Edelstahl Kies 2/32		Brettschichtholz - Standardformen (Durchschnitt DE) Konstruktionsholz generisch  Befestigungsmittel/ Schrauben Edelstahl		Brettschichtholz - Standardformen (Durchschnitt DE) Konstruktionsholz generisch	

\* = Materialien im zweiten Nutzungszyklus

dick = Materialien, für die Datensätze der ÖKOBAUDAT vorliegen

**Tabelle 11: Aufbauten der Bauteilvarianten, Zuordnung von Nutzungszyklen und Datensätzen der ÖKOBAUDAT**

Die fünf LCA-Methoden wurden auf alle vier oben benannten Bauteilvarianten angewendet und die LCA jeweils für den ersten, einen mittleren und letzten Nutzungszyklus berechnet.



**Abbildung 39: Vergleichende Übersicht der GWP der vier Bauteile gem. der LCA-Methoden nach DeWolf et al.**

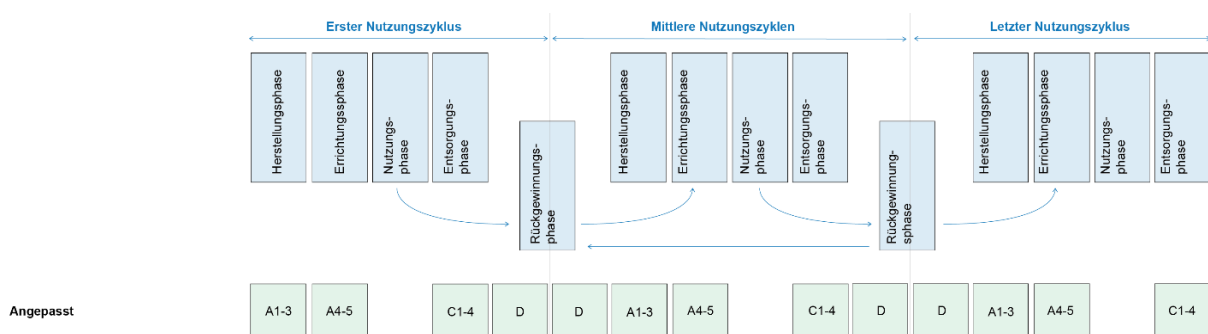
Abb. 39 zeigt die Bandbreite der Ergebnisse der Berechnung des GWP in Abhängigkeit von der gewählten Methode der Bestimmung, dem Nutzungszyklus und Materialzusammensetzung des Bauteils. Es sind signifikante Unterschiede zwischen den Ergebnissen der Holz- und Beton-Bauteile nach Nutzungszyklen und Varianten festzustellen.

In der Cut-Off-Methode werden die Umweltauswirkungen der Produktionsphase (A1-A3) nur dem ersten Nutzungszyklus und die Entsorgung nur dem letzten zugeordnet, in der End-of-Life-Methode (C1-C4) hingegen wird beides dem letzten Nutzungszyklus zugesprochen. Die Ergebnisse in der unteren Reihe verdeutlichen, dass beide Methoden für die Holzbauteile positiv im ersten und mittleren Nutzungszyklus, im finalen Nutzungszyklus hingegen nachteilig ausfallen, da hier der Kohlenstoffspeicher des Holzes entfällt. Die EdL-Methode zeigt eine ähnliche Ergebnisentwicklung für die Gründungsvarianten aus mineralischen Baustoffen, da in den vorderen Nutzungszyklen die Auswirkungen der Herstellung in der Rechnung entfallen. Auch hier sind die errechneten Auswirkungen im letzten Lebenszyklus enorm. In beiden Fällen wird versucht, Anreize für die Planung der Wiederverwendung in der Zukunft und Wiederverwendung bereits vorhandener Komponenten zu schaffen. Die Ansätze der V- und EUUF-Methode vermitteln stärker über den gesamten Lebenszyklus hinweg, um gleichmäßige Anreize für alle Nutzungszyklen zu schaffen. Unabhängig vom Material und Bauteil sind deutlich ausgeglichene Ergebnisse über alle Nutzungszyklen hinweg zu beobachten. Die degressive Methode scheint eine Mischung aus der V- und EUUF-Methode.

### Anpassung der Berechnungsmethode

Die oben dargestellten Ergebnisse repräsentieren hypothetische Ansätze, in denen vollständige Lebenszyklen von Materialien simuliert werden, um daraus verhältnismäßige Auswirkungen für die verschiedenen Nutzungszyklen abzuleiten. Die ganzheitliche Betrachtung bleibt auf einer konzeptionellen Ebene, die rechnerische Anreize für die kreislaufgerechte Planung schafft. Eine große Herausforderung besteht in dem hohen spekulativen Anteil der Berechnungen, durch die Prognose zukünftiger Einsatzformen. Aufgrund der langen Nutzungszyklen und komplexen Akteur:innenkonstellationen im Bausektor kann eine zukünftige Wiederverwendung des Materials zwar angenommen, aber nicht sichergestellt werden.

Um die veränderten Auswirkungen der entwickelten Bauteile dieses Forschungsvorhabens im Vergleich zu konventionellen Referenzbauteilen erfassen und beurteilen zu können, bedarf es einer an die Zielstellung des Forschungsprojekts angepassten Berechnungsmethode. Anstelle des Vergleichs aller Nutzungszyklen, schlägt der eigens entwickelte Ansatz vor, die Umweltauswirkungen jeden Materials des Bauteils möglichst direkt in derjenigen Phase anzurechnen, in der sie auch tatsächlich anfallen. Diese Differenzierung der Berechnung jedes Bauteils nach Materialien entspricht der tatsächlichen Konzeption der Bauteile. Ziel der Berechnung ist es, die Varianten so realistisch wie möglich einzuschätzen und die verschiedenen Bauteilausführungen anhand dessen vergleichen und bewerten zu können. Abhängig von dem Nutzungszyklus des Materials im Bauteil werden unterschiedliche Lebenszyklusphasen betrachtet. Für Materialien, die sich im ersten Nutzungszyklus befinden, werden die Module A, C und D rechnerisch berücksichtigt, für wiederverwendete Materialien im zweiten Nutzungszyklus die Module D, A, C und D, siehe Abbildung 40.



**Abbildung 40: Angepasste Berechnungsmethode nach Schaubild gem. DeWolf et al.**

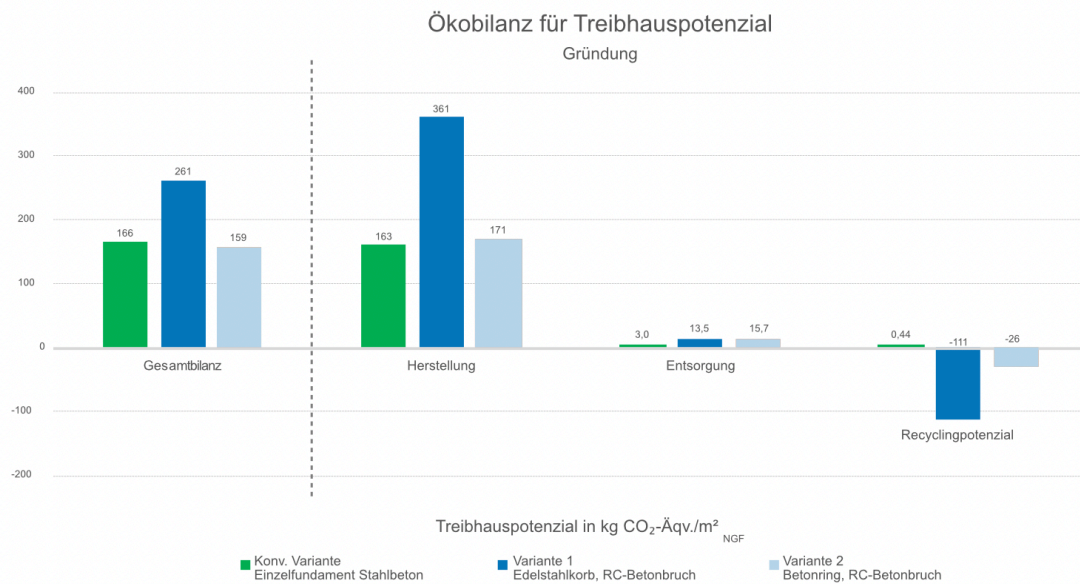
Im Bereich der Fundamente verfolgt das Reallabor das Ziel, gängige Standards zu hinterfragen und durch alternative Planungsansätze – mit reduziertem Stahl- und Zement-Einsatz – die Umweltauswirkungen der Gebäudegründung zu reduzieren. Das Gebäude wird aufgeständert und so eine flächige Versiegelung durch eine klassische Bodenplatte vermieden. Gleichzeitig wird so die Ausführung der Bodenplatte aus Holz, statt klassischerweise aus Stahlbeton, ermöglicht. Ergänzend dazu wurden in dem Forschungsvorhaben Konzepte für reversible Fundament-Ausführungen mit geringem Einsatz von Stahl

und Zement entwickelt. Als Referenz-Bauteil für die vergleichende Rechnung der Ökobilanz wurde ein konventionelles Einzelfundament aus Stahlbeton angenommen.

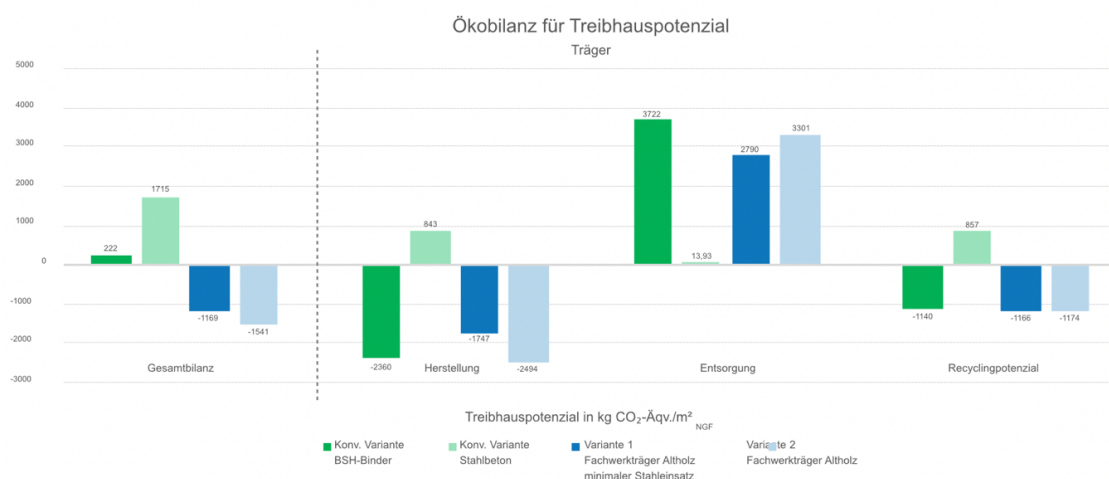
Im Bereich Träger wurden zwei unterschiedliche Referenz-Bauteile berechnet – ein konventioneller BSH-Binder aus Frischholz und ein Stahlbeton-Träger.

**Auswertung**

In den Abbildungen 41 und 42 sind die Ergebnisse der angepassten Berechnung der Ökobilanz für das Treibhauspotenzial der drei Bauteilvarianten zu sehen. Den Bauteilvarianten der Fachwerkträger und Gründung aus den Arbeitspaketen 2 und 3 (blau) wurde als Referenzobjekt ein konventionelles Bauteil aus Primärmaterialien (grün) gegenübergestellt.



**Abbildung 41: Darstellung der Ergebnisse der Ökobilanz für das Treibhauspotenzial der Gründungsvarianten**



**Abbildung 42: Darstellung der Ergebnisse der Ökobilanz für das Treibhauspotenzial der Trägervarianten. Grün: Konventionelle Referenz-Bauteile; Blau: Bauteil-Varianten aus dem Forschungsprojekt.**

In der linken Spalte sind die Ergebnisse der Gesamtbilanz aller Bauteil-Varianten in kg CO<sub>2</sub>-Äqv /m<sup>2</sup> NGF nach dem oben formulierten Berechnungsansatz dargestellt. Sie erfasst die Materialien aller Bauteile in dem jeweiligen spezifischen Nutzungszyklus. In den drei rechten Spalten sind die Ergebnisse nach Phasen gemäß der klassischen Ökobilanzierung abgebildet die die Material-bezogene Spezifizierung nach Nutzungszyklus vernachlässigt. Die Abweichungen der Gesamtbilanz zu den Einzelphasen verdeutlicht die angepasste Berechnungs- und Betrachtungsweise des entwickelten Ansatzes.

Bei den Gründungsvarianten ist in der Gesamtbilanz anhand des Treibhauspotenzials die Gründungsvariante 02 die rechnerisch nachhaltigste Bauteilvariante, wenn auch die konventionelle Variante nur leicht größere Umweltauswirkungen aufweist. Die Gründungsvariante 01 schneidet gesamtheitlich am schlechtesten ab. Durch die ähnlichen Aufbauten und Umfang der Bauteile ist dies vor allem auf die großen Umweltauswirkungen der Herstellung des Edelstahlkorbes zurück zu führen. Die zu erwartende deutliche Verbesserung der Ökobilanz durch die reversible Bauweise und den Verzicht auf Stahlbeton in Gründungsvariante 01 und 02, bestätigt sich im rechnerischen Nachweis zunächst nicht. Deutlich werden aber die Grenzen der angenommenen Betrachtungs- und Berechnungsweise. Diese Berechnungsmethode führt zu einem quantitativ nachteiligem oder nur leicht vorteiligem Ergebnis für die stoffliche Verwertung und stützt so die lineare Logik der Bauwirtschaft. Die positiven Effekte für die Abminderung des Klimawandels durch die verzögerte Entsorgung von Materialien hingegen, werden nicht ausreichend aufgezeigt, sodass konventionelle kurzlebigere Ausführungen rechnerisch besser abschneiden. Die Ergebnisse können auch mit den fehlenden Datensätzen und dem notwendigen Ausweichen auf andere Materialgruppen zusammenhängen – anstelle von Recycling-Beton-Bruch wurde mit dem vorhandenen Datensatz von Kies 2/32 gerechnet. In der 2. Stufe des Vorhabens werden die hier vorliegenden Ergebnisse aufgegriffen und bilden den Anlass für die Abwägung weiterer Materialien in der Detaillierung des Gründungskonzepts sowie der Weiterentwicklung des Bewertungsansatzes. Dabei werden neben ökologischen Aspekten auch ökonomische und baupraktische Faktoren berücksichtigt.

Im Bereich der Träger ist eine deutliche Verbesserung der berechneten Gesamtbilanz für das Treibhauspotenzial der Bauteilvarianten mit wiederverwendetem Holz zu beobachten. Die Fachwerkträger-Varianten des Forschungsvorhabens weisen deutlich geringere Umweltauswirkungen als die konventionellen Bauteile auf. Durch den optimierten Entwurf und daraus resultierenden geringen Materialeinsatz kann ein positiver Einfluss bewirkt werden. Der Träger aus Stahl-Beton schneidet durch die aufwändige Herstellung und geringes Recycling-Potenzial am schlechtesten ab.

Der entwickelte Berechnungsansatz scheint im Bereich der Wiederverwendung von Holz nachvollziehbare Ergebnisse zu produzieren. In der klassischen LCA wird aktuell hauptsächlich die thermische Verwertung von Holzprodukten bilanziert, was zu einer Verrechnung der Freisetzung der gespeicherten CO<sub>2</sub> Emissionen in den Holzprodukten in der Phase C führt. Die vermiedenen Emissionen durch die Verbrennung des Holzes als Ersatzbrennstoff werden im Modul D wieder gutgeschrieben. In dem Szenario der Wiederverwendung von Holz wird also Primärmaterial durch Sekundärmaterial ersetzt. Da die Emissionen für das Altholz geringer sind, kommt es zu einer Gutschrift in Phase D. Dennoch führt die klassische Methode zu einem quantitativ nachteiligen Ergebnis für die stoffliche Verwertung, da die Gutschriften bei thermischer Verwertung signifikant höher sind. Insofern scheint der gewählte Ansatz zur Berücksichtigung von wiederverwendeten Materialien im Bereich Holz zunächst sinnvoll. Zur fundierten Einschätzung und Bewertung des Ansatzes ist eine Anwendung auf weitere Szenarien und Fälle notwendig. Darüber hinaus sollen weitere Einflussfaktoren in der Beurteilung der Maßnahmen in der zweiten Stufe des Vorhabens aufgegriffen und das Bewertungskonzept weiterentwickelt werden.

Zusammenfassend ist zu sagen, dass Ökobilanzierungen inzwischen etablierte Orientierungshilfen zur Bewertung von Planungsvarianten sind und gleichzeitig fiktive Szenarien mit einem mehr oder weniger großen spekulativen Anteil abbilden. Grundlage der Bilanzierungen bilden wenige, standardisierte, teils unvollständige, Datensätze von Materialien und Berechnungsverfahren, die die tatsächliche Planung im Detail nicht erfassen können. Abhängig von dem Tool, der Dateneingabe und Auslegung des Verfahrens entstehen Ergebnisse, die sich deutlich voneinander unterscheiden, die die Realität stark vereinfachen und unterschiedlich zu interpretieren sind. Die Ergebnisse dieser Berechnungen sind immer von dem Hintergrund des spezifischen Kontextes zu beurteilen.

### 2.4.3 **Ausblick auf die 2. Stufe des Forschungsvorhaben**

Bei der LCA für Gebäude mit wiederverwendeten Materialien und Bauteilen sind die Ergebnisse der Ökobilanzierung, da es hier noch keinen einheitlich definierten Ansatz gibt, besonders kritisch zu hinterfragen. Darüber hinaus kann und sollte die Bewertung der Nachhaltigkeit von Planungsansätzen nicht ausschließlich anhand ihrer Umweltauswirkungen geschehen. Die sozialen und ökonomischen Komponenten der Nachhaltigkeit ebenso wie die baupraktischen Aspekte der Umsetzung finden in den üblichen Verfahren und klassischen Planungsprozessen kaum Berücksichtigung. Aufbauend auf der ersten Stufe des Forschungsvorhabens soll in der zweiten Stufe ein Konzept zur Beurteilung der gewählten Bauteilvarianten unter Einbezug der Ökobilanz im Lebenszyklus, des Zeit- und Kostenaufwandes und der baupraktischen Umsetzung entwickelt werden.

### 3. Fazit

Im Rahmen des Forschungsprojekts „Neubau des Museums-Pavillons der TU Berlin als Realprojekt-Bauen“ wurden in vier Arbeitspaketen Fragestellungen untersucht, die für die Umsetzung des Bauprojekts „TU Museums Pavillons“ als wegweisendes Leuchtturmprojekt im Rahmen der Bauwende essentiell sind. Ziele des Bauvorhabens sind ein möglichst großflächiger Einsatz von Altholz in tragender Funktion, rückbaubare Verbindungen im Holztragwerk sowie die Verwendung von Fundamenten mit einem möglichst geringen Anteil an Beton und Stahl sowie mit einer sortenreinen Rückbaubarkeit.

Hin zum Erreichen der oben genannten Ziele wurden im Rahmen dieses Projekts in allen Arbeitspaketen wichtige Schritte getan, wobei gleichzeitig festzustellen ist, dass eine vollständige Zielumsetzung zum jetzigen Zeitpunkt und nach jetzigem Kenntnisstand nicht gesichert oder nur begrenzt möglich ist. In allen betrachteten Gebieten sind weitere Forschungsschritte und Untersuchungen notwendig, die in der beantragten 2. Stufe des Forschungsvorhabens weiterführend bearbeitet werden sollen.

Die Gewinnung des Altholzes, aus dem erneut tragende Bauteile hergestellt werden können, wird im Rahmen des Projekts beispielhaft durchgeführt. Es wird dabei festgestellt, dass Altholz aus Rückbauvorhaben in Mengen vorhanden ist, die für das Realprojekt relevant sind. Weiterhin wird, als zentrales und wegweisendes Forschungsergebnis, festgestellt, dass die Wiederverwendung von Altholz nach jetzigem Kenntnisstand grundsätzlich möglich ist – sofern der in diesem Bericht beschriebene Ablauf befolgt wird. Um die Altholzgewinnung derart zu skalieren, dass Projekte in der Größe des TU Pavillons damit realisiert werden können, bedarf es einer Professionalisierung aller Einzelabläufe. Hierfür ist die Vernetzung des Forschungs- und Bauvorhabens mit Partner:innen aus der Industrie maßgebend, um die Herstellung der Bauteile aus Altholz aus dem Labor- in den Industriemaßstab zu heben. Die angetroffenen Hemmnisse müssen im Rahmen des Realprojekts gänzlich umgangen werden, um eine materialgerechte Beschaffungs- und Sortierungskette zu gewährleisten.

Insbesondere für die Sortierung des Altholzes in Festigkeitsklassen bedarf es weiterführender Forschung, die auf größeren Stichprobenmengen basiert. Eine reine visuelle Sortierung erscheint zum jetzigen Zeitpunkt und mit Holz in ähnlicher Qualität der bisher untersuchten Quellen nicht zielführend. Im Rahmen weiterführender Forschung sollte festgelegt werden, wie die im vorliegenden Bericht beschriebenen Verfahren der Sortierung möglichst zielführend miteinander kombiniert werden können, um die Festigkeit von Altholz zuverlässig beurteilen zu können.

Basierend auf dem Bemessungskonzept, der durchgeführten Untersuchungen sowie den typischerweise vorhandenen Querschnitten des Altholzes werden die in Arbeitspaket 2 betrachteten formschlüssigen Holz-Holz-Anschlüsse für den weitspannenden Träger im Realprojekt für die Übertragung von Druckkräften empfohlen. Für die Übertragung von Zugkräften werden Bauteile aus Stahl empfohlen, die einen materialgerechten Materialeinsatz bedeuten und die für den Rest des Trägers einen wirtschaftlicheren und architektonisch ansprechenden Tragwerksentwurf ermöglichen. Forschungsbedarf besteht an dieser Stelle insbesondere zur Anfangsverformung des Gesamtträgers bei Verwendung von Zugelementen aus Stahl. Weiterhin gilt es im weiteren Verlauf zu untersuchen, inwiefern der Einsatz von Altholz bei der Herstellung von BSH-Bindern möglich ist.

Die untersuchten Holz-Holz-Anschlüsse zur Übertragung von Zugkräften stellen, auch wenn sie für das Realprojekt nicht empfohlen werden, einen innovativen Ansatz dar, den es in weiterführender Forschung zu untersuchen gilt. In Kombination mit geeigneten Tragwerkstypologien und Eingangsparametern handelt es sich bei diesen reinen Holz-Anschlüssen um eine valide Alternative zu Anschlüssen mit Verbindungsmitteln aus Stahl.

Im Rahmen des dritten Arbeitspakets wurden zwei mögliche Gründungsvarianten für den Abtrag von Vertikallasten durch Einzelfundamente untersucht. Nach jetzigem Kenntnisstand ist für Variante 1 – ein mit

Bruchstein gefüllter, kreisrunder Stahlkorb – der vorrangig wichtige Nachweis der inneren Standsicherheit auf einer theoretischen Ebene möglich. Bei Variante 2 sind Fragen zur Lagesicherung des Füllmaterials aufgetreten, die zum jetzigen Zeitpunkt auf theoretischer Ebene unbeantwortet sind und in vertiefter Forschung untersucht werden müssen.

Für beide Gründungsvarianten wird ein Bedarf für weitere Forschung festgestellt. Es soll daher im zweiten Forschungsabschnitt ein insgesamt größerer Fokus auf das Arbeitspaket „Betonarme Gründung“ gelegt werden, um die bisher erzielten Ergebnisse verifizieren und vertiefen zu können. Besonderer Fokus soll dabei auf der experimentellen Untersuchung der letztlich gewählten Gründungsvariante sowie auf den Abtrag der Horizontallasten gelegt werden.

Für den Nachweis der verbesserten ökologischen Auswirkungen der neu entwickelten Bauteile aus wiederverwendeten Materialien konnte kein zufriedenstellender Berechnungsansatz gefunden oder entwickelt werden, anhand dessen die positiven Auswirkungen kreislaufgerechter Planungsentscheidungen und Forschungsinnovationen abgebildet werden können. Für die Kommunikation und Verbreitung der zukunftsweisenden Forschungsergebnisse des Reallabors in der Baupraxis bedarf es neben der erfolgreichen Umsetzung der Maßnahmen im Museums-Pavillon robuste Fakten, die die Relevanz dieser unterstreichen.

Für die Entwicklung des Leitfadens zur Verbreitung der Ergebnisse dieses innovativen Vorhabens in der zweiten Phase des Forschungsprojekts wird, anknüpfend an die Ergebnisse der ersten Phase, ein mehrdimensionaler Bewertungsansatz zur Beurteilung im Vergleich zu konventioneller Planung und Bauteilen abgeleitet.

Übergeordnetes Ziel des Forschungsprojekts und der Kooperation mit dem Realisierungsvorhaben der TU Berlin ist die Entwicklung kreislaufgerechter, innovativer Tragwerke, die erfolgreiche Umsetzung der Forschungsergebnisse im Neubau auf dem Campus der TU Berlin sowie die Skalierung der Erkenntnisse und Übertrag auf den Bausektor. Hierfür spielen der oben beschriebene Leitfaden, sowie Zielgruppenspezifische Veranstaltungen zur Vorstellung und Verbreitung der Ergebnisse eine übergeordnete Rolle. Bestandteil der beantragten zweiten Stufe des Forschungsprojekts ist die Integration der Ergebnisse in das Ausstellungskonzept des Museum-Pavillons, die Aufnahme in verschiedene Lehr- und Weiterbildungsangebote der TU Berlin sowie der Architekten- und Ingenieurskammer, sowie die Organisation öffentlicher Veranstaltungen zu dem Vorhaben und Projekt.

# **ANHANG**



## Literaturverzeichnis

- [1] K. Purr, J. Günther, H. Lehmann, und P. Nuss, „RESCUE Studie - Wege in eine ressourcenschonende Treibhausgasneutralität“, Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau, Nov. 2019.
- [2] U. Dechantreiter *u. a.*, „Instrumente zur Wiederverwendung von Bauteilen und hochwertigen Verwertung von Baustoffen“, Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau, Okt. 2015.
- [3] M. Halstenberg und G. Franßen, „Regelwerke des Normungs- und technischen Zulassungswesens anhand des Themenkomplexes Recyclingverfahren und Weiter-/Wiederverwendung von Bauprodukten und Baustoffen“. Düsseldorf, November 2022.
- [4] *Urteil des BVerwG 7 C 34.15*. 2018.
- [5] *Altholzverordnung vom 15. August 2002 (BGBl. I S. 3302), die zuletzt durch Artikel 120 der Verordnung vom 19. Juni 2020 (BGBl. I S. 1328) geändert worden ist*. 2002.
- [6] „DIN EN 408:2012-10, Holzbauwerke - Bauholz für tragende Zwecke und Brettschichtholz - Bestimmung einiger physikalischer und mechanischer Eigenschaften“.
- [7] Informationsverein Holz e.V., „Baustoffe für den konstruktiven Holzbau“. Informationsdienst Holz spezial, Januar 2022.
- [8] J. Bühler, „Re: CE-Zertifizierung von altem Holz / Altholz“, 10. Juli 2023.
- [9] U. A. Meierhofer und K. Richter, „Sortierung und Qualität von Bauholz. Teil 1: Holzeigenschaften und Sortierung“, S. 810 ff., Juli 1988.
- [10] „DIN EN 338:2016-07, Bauholz für tragende Zwecke - Festigkeitsklassen“.
- [11] „DIN EN 14081-1:2019-10, Holzbauwerke - Nach Festigkeit sortiertes Bauholz für tragende Zwecke mit rechteckigem Querschnitt - Teil 1: Allgemeine Anforderungen“.
- [12] G. Linke, „In-situ-Festigkeitsortierung von Holzbauteilen in bestehenden Konstruktionen – eine Fallstudie“. Doktorandenkolloquium Holzbau Forschung und Praxis, Universität Stuttgart, 10. März 2022.
- [13] G. Linke, „Apparativ unterstützte Festigkeitssortierung von Bauholz in historischen Gebäuden“. Doktorandenkolloquium Holzbau Forschung und Praxis, Universität Stuttgart, 5. März 2020.
- [14] G. Linke, „Prüfbericht - Festigkeitssortierung von Altholz-Bauteilen - Neubau eines Ausstellungspavillons, Technische Universität Berlin“. VHÖB - Versuchsanstalt für Holzbau und ökologische Bautechnik UG, 1. September 2023.
- [15] „DIN EN 13183-2:2002-07, Feuchtegehalt eines Stückes Schnittholz - Teil 2: Schätzung durch elektrisches Widerstandsmessverfahren“.
- [16] „DIN 52182:1976-09, Prüfung von Holz; Bestimmung der Rohdichte“.
- [17] „DIN 4074-1:2012-06, Sortierung von Holz nach der Tragfähigkeit - Teil 1: Nadelschnittholz“.
- [18] U. Meierhofer und K. Richter, „Sortierung und Qualität von Bauholz. Teil IV: Apparative Möglichkeiten zur Erfassung der Holzcharakteristika“. Verlags-AG der akademischen technischen Vereine, September 1990.
- [19] J. L. Sandoz, „Moisture content and temperature effect on ultrasound timber grading“, *Wood Sci. Technol.*, Bd. 27, Nr. 5, Juli 1993, doi: 10.1007/BF00192223.
- [20] BROOKHUIS Applied Data Intelligence, Hrsg., „Timber Grader MTG, Operating instructions“. Februar 2019.
- [21] G. Linke, W. Rug, und H. Pasternak, „Festigkeitsortierung von Bauholz in historischen Gebäuden – Untersuchungen zur Anwendbarkeit der Ultraschall-Impulslaufzeitmessung“, *Holzbau Im Bestand – Hist. Holztragwerke Beispiele Für Subst. Erhalt.*, Bd. Beuth Verlag GmbH, S. S. 193-222, 2018.
- [22] G. Linke, W. Rug, und H. Pasternak, „Strength Grading of Structural Timber in Existing Structures – Study on the Apparatus Supported Grading with the Ultrasonic Time-of-Flight Measurement“, in *Protection of Historical Constructions*, Bd. 209, I. Vayas und F. M. Mazzolani, Hrsg., Cham: Springer International Publishing, 2022, S. 3–19.
- [23] H. J. Blaß und M. Enders-Comberg, *Fachwerkträger für den industriellen Holzbau*. in Karlsruher Berichte zum Ingenieurholzbau, no. 22. Karlsruhe: KIT Scientific Publishing, 2012.
- [24] Verband High-Tech-Abbund, „Schwalbenschwanz-Verbindung in Bauteilen, Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung“. Deutsches Institut für Bautechnik, 5. Oktober 2017.
- [25] „DIN EN 1995-1-1:2010-12, Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten - Teil 1-1: Allgemeines - Allgemeine Regeln und Regeln für den Hochbau; Deutsche Fassung EN\_1995-1-1:2004 + AC:2006 + A1:2008“.
- [26] „DIN EN 1995-1-1/A2:2014-07, Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten - Teil 1-1: Allgemeines - Allgemeine Regeln und Regeln für den Hochbau; Deutsche Fassung EN\_1995-1-1:2004/A2:2014“.
- [27] „DIN EN 1995-1-1/NA:2013-08, Nationaler Anhang - National festgelegte Parameter - Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten - Teil 1-1: Allgemeines - Allgemeine Regeln und Regeln für den Hochbau“.
- [28] M. Enders-Comberg, „Leistungsfähige Verbindungen des Ingenieurholzbaus - Einsatzmöglichkeiten für Nadel- und Laubholz“.
- [29] H. Fehrenbach *u. a.*, „BIOMASSEKASKADEN, Mehr Ressourceneffizienz durch Kaskadennutzung von Biomasse - von der Theorie zur Praxis“, Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau, Feb. 2017.
- [30] D. Fernandez Llana, V. González-Alegre, M. Portela, J. Garcia-Navarro, und G. Íñiguez-González, „Engineered Wood Products Manufactured from Reclaimed Hardwood Timber“, in *World Conference on Timber Engineering (WCTE 2023)*, Oslo, Norway: World Conference on Timber Engineering (WCTE 2023), 2023, S. 3594–3599.
- [31] „Orientierende Baugrunderkundung TU Berlin Museumspavillon“, IUP.Ingenieure, Lützowstraße 102 – 104, 10785 Berlin, Berlin, Baugrundgutachten, Juli 2020.
- [32] „Geotechnischer Bericht; Museums-Pavillon und Touristische Wissenspfade auf dem TU Campus“, KWS Geotechnik Beratende Gesellschaft für Hydrologie und Umweltschutz mbH, Lützowstraße 102 – 104, 10785 Berlin, Berlin, Geotechnischer Bericht, Dez. 2022.
- [33] K. Hasche, H. Kühnhenrich, E. Herrmann, C. Hellstern, A. Scheuermann, und Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung, Hrsg., *Bauwende: klimabewusst erhalten, erneuern, bauen: Zukunft Bau Kongress 2021*. in Zukunft bauen: Forschung für die Praxis, no. Band 31. Bonn: Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR), 2022.
- [34] N. Schaepeke und F. Stelzer, „Reallabore im Kontext transformativer Forschung“, S. 75, 2017.
- [35] Die Bundesregierung 2021, „Koalitionsvertrag 2021 – 2025 zwischen der Sozialdemokratischen Partei Deutschlands (SPD), BÜNDNIS 90 / DIE GRÜNEN und den Freien Demokraten (FDP)“, Berlin, 2021.
- [36] Federal Ministry for Economic Affairs and Energy (BMWi) Public Relations, Hrsg., *Making space for innovation. The handbook for regulatory sandboxes*. Berlin, 2019. [Online]. Verfügbar unter: [https://www.bmwi.de/Redaktion/EN/Publikationen/Digitale-Welt/handbook-regulatory-sandboxes.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=2](https://www.bmwi.de/Redaktion/EN/Publikationen/Digitale-Welt/handbook-regulatory-sandboxes.pdf?__blob=publicationFile&v=2)

- [37] S. V. Jansen, N. Pawlicki, M. Crabbe, und E. Roswag-Klinge, „Real-world Laboratories in the Building Sector - Strategies for Transformation and Leap Innovations“, *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, Bd. 1078, Nr. 1, S. 012109, Sep. 2022, doi: 10.1088/1755-1315/1078/1/012109.
- [38] A. Achatz, E. Margelik, T. Romm, T. Kasper, und D. Jäger, „KREISLAUFBAUWIRTSCHAFT. Projektendbericht.“, Wien, 2021.
- [39] „RE4 Research Project / REuse and REcycling of CDW materials and structures in energy efficient pREfabricated elements for building REfurbishment and construction“. Zugegriffen: 22. April 2020. [Online]. Verfügbar unter: <http://www.re4.eu/>
- [40] Bundesministerium für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (BMZ), *Lexikon der Entwicklungspolitik*. Berlin, 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.bmz.de/de/service/lexikon#lexicon=13916>
- [41] N. Blank, A. Koller, und M. Rubel, „Forschen für die Bauwende“, 2022, Zugegriffen: 21. August 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.competitionline.com/de/news/schwerpunkt/forschen-fuer-die-bauwende-4105.html>
- [42] „Nachhaltige Entwicklung in Deutschland - Indikatorenbericht 2022“, *Nachhalt. Entwickl.*, 2022.
- [43] „DIN EN 15978:2012-10, Nachhaltigkeit von Bauwerken - Bewertung der umweltbezogenen Qualität von Gebäuden - Berechnungsmethode; Deutsche Fassung EN\_15978:2011“, Beuth Verlag GmbH. doi: 10.31030/1917049.
- [44] F. Dolezal, „Ökobilanzierung von Holzprodukten bei Reuse und Recycling“, *Zuschnitt*, Nr. 88, [Online]. Verfügbar unter: <https://www.proholz.at/fileadmin/flippingbooks/Zuschnitt88/Zuschnitt88.pdf>
- [45] K. Allacker, F. Mathieux, D. Pennington, und R. Pant, „The search for an appropriate end-of-life formula for the purpose of the European Commission Environmental Footprint initiative“, *Int. J. Life Cycle Assess.*, Bd. 22, Nr. 9, S. 1441–1458, Sep. 2017, doi: 10.1007/s11367-016-1244-0.
- [46] C. De Wolf, E. Hoxha, und C. Fivet, „Comparison of environmental assessment methods when reusing building components: A case study“, *Sustain. Cities Soc.*, Bd. 61, S. 102322, Okt. 2020, doi: 10.1016/j.scs.2020.102322.
- [47] *PAS 2050:2011: Specification for the assessment of the life cycle greenhouse gas emissions of goods and services*. London: BSI, 2011.
- [48] Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen, „ÖKOBAUDAT. Informationsportal Nachhaltiges Bauen“. Juni 2023. [Online]. Verfügbar unter: [https://www.oekobaudat.de/no\\_cache/datenbank/suche.html](https://www.oekobaudat.de/no_cache/datenbank/suche.html)