

Stuttgart 210

weiterdenken - weiterbauen!

Potenziale der Weiterverwendung von Schalungselementen
des Stuttgarter Hauptbahnhofs (Stuttgart 21)



Autoren

Prof. Dipl.-Ing. Stefan Krötsch

M. A. Roman Kreuzer

Prof.-Dr.-Ing. Robert Pawlowski

M. Sc. Christian Engel-Götz

Prof. Dr.-Ing. Thomas Stark

Dr. Viola John

Prof. Dipl.-Ing. Andreas Kretzer

Rechtsanwalt Michael Halstenberg

Gefördert durch:

 **Baden-Württemberg**
Ministerium für Ernährung,
Ländlichen Raum und Verbraucherschutz

 **HOLZBAU**
OFFENSIVE
BADEN-WÜRTTEMBERG

Kurzfassung

In keinem anderen Wirtschaftsbereich werden ähnlich große Stoffströme umgesetzt wie im Bauwesen. Der Übergang zur Kreislaufwirtschaft ist daher hier besonders relevant. Das Projekt Stuttgart 210 untersucht vor diesem Hintergrund die Verwendung von Bauhilfsmitteln als Primärkonstruktion für neue Gebäude am Beispiel der Schalungselemente des Stuttgarter Hauptbahnhofs (Stuttgart 21) aus blockverleimten Brettspertholz. Statt thermischer Verwertung wird der stoffliche Erhalt der Ressource Holz und die Wertsteigerung der Elemente im Sinne des Upcycling erforscht.

Dazu wurden unterschiedliche Architektur- und Tragwerksentwürfe auf Grundlage einer umfassenden Analyse der Schalungselemente erarbeitet und verglichen.

Durch die Vorbereitung und Durchführung von vier Reallaboren setzt sich das Projekt den Anforderungen des realen Bauens aus. Die daraus gewonnenen Erkenntnisse lassen sich wiederum übertragen und in einer Planungshilfe verallgemeinern. Ein prototypisches Gebäude aus zwölf Schalungselementen wurde bereits errichtet und in Betrieb genommen. Für drei weitere Reallabore sind die Elemente übergeben und eingelagert.

Das Verwenden komplexer, vorgegebener Bauteile erfordert es, den Entwurfsprozess in der Architektur neu zu denken und zu strukturieren. Üblicher Weise steht die Funktion des Gebäudes am Ausgangspunkt der Entwurfsüberlegungen, zu einem späteren Zeitpunkt folgt eine möglichst entwurfsgerechte Materialisierung. Bei der Verwendung der Schalungselemente dreht sich dieser Prozess um: Die Re-Use-Komponenten als Primärtragwerk prägen von Anfang die Möglichkeiten des Gebäudeentwurfs.

Einerseits entstanden nutzungsneutrale Gebäude, die durch zukünftige Bauherren einfach und auf sehr unterschiedliche Weise genutzt werden können (Reallabor Mannheim und Marbach). Andererseits ergaben sich aus der Form der Schalungselemente sehr plausible Gebäudegeometrien, für die sehr spezifisch Nutzer gefunden wurden (Reallabore Stuttgart Vaihingen und Ingersheim).

Um die Reallabore umsetzen zu können, sind auch die aktuellen juristischen Rahmenbedingungen, die meist auf den Einsatz neuer Materialien ausgerichtet sind und die Wiederverwendung von Bauteilen nicht vorsehen, Gegenstand der Untersuchung. Die rechtlichen Hürden in Bereichen wie Vergaberecht, Bauordnungsrecht, und Werkvertragsrecht und Bauproduktenrecht sind ebenso dargestellt wie mögliche Vorgehensweisen am Beispiel der Verwendung der Schalungselemente des Stuttgarter Hauptbahnhofs. Außerdem wurden Empfehlungen zur Änderung der rechtlichen Rahmenbedingungen erarbeitet, um die Wiederverwendung von Bauteilen zu fördern bzw. mit angemessenem Aufwand möglich zu machen.

Im Rahmen des Forschungsprojekts wurde aufgezeigt, dass die aktuellen Methoden der

Ökobilanzierung generell deutliche Schwächen aufzeigen, insbesondere im Hinblick darauf, dass sowohl der Zeitpunkt der Entstehung von Emissionen als auch die unterschiedliche Qualität der Datengrundlage der Module A (konkrete Planung), B (Szenario auf Grundlage konkreter Planung) und C (rein spekulative Annahmen) keine Berücksichtigung finden.

In Bezug auf biogene Baustoffe ist es nach den aktuellen Bilanzierungsmethoden nicht möglich, das dauerhafte CO₂-Speicherpotenzial abzubilden.

Das benachteiligt diese gegenüber mineralischen und anderen abiotischen Baustoffen deutlich, insbesondere bei der Wieder-/Wiederverwendung. Werden Bauteile aus Rückbau in Neubauprojekten wiederverwendet, werden in der Ökobilanz für diese Elemente im Neubau keine Emissionen in Modul A angesetzt, was das Gesamtergebnis bei nicht-biogenen Bauteilen in der Regel verbessert. Allerdings führt dies dazu, dass bei biogenen Bauteilen das CO₂-Bindungspotenzial, das sonst in Modul A berücksichtigt würde, in der Ökobilanz des Neubaus entfällt. Dennoch müssen die Belastungen für biogene Bauteile weiterhin im Modul C angesetzt werden.

Am Beispiel der Berechnungen zum Reallabor Stuttgart Vaihingen wurde daher das CO₂-Bindungspotenzial der wiederverwendeten Schalungselemente im Modul A berücksichtigt.

Die Ergebnisse zeigen einen entsprechend positiven Effekt, dennoch wird aus den oben genannten Gründen das volle Potenzial nicht abgebildet.

Vorwort

Die Idee zu diesem Forschungsprojekt geht auf die Initiative von Dennis Röver, dem damaligen Geschäftsführer von ProHolz Baden-Württemberg, zurück und nahm während eines Gesprächs auf der Fachtagung Holzbau in Stuttgart 2021 zwischen ihm, Stephan Mederle von Züblin Timber und Stefan Krötsch konkrete Formen an. Stefan Krötsch hatte in dem Forschungsprojekt „Recycling von Brettspertholz-Produktionsabfällen“ [1], das er 2019 zusammen mit Jürgen Graf (TU Kaiserslautern) durchgeführt hatte, bereits Erfahrungen mit Konzepten zur Weiterverwendung von Abfall-Holzwerkstoffen gesammelt. Röver und Krötsch entwickelten darauf hin das Konzept für einen Förderantrag bei der Holzbauoffensive Baden-Württemberg und stellten das Forschungsteam der HTWG Konstanz, der HFT Stuttgart und der HKA Karlsruhe zusammen.

Inspiziert ist das Projekt Stuttgart 210 von der technischen und ästhetischen Qualität der Schalungselemente des Stuttgarter Hauptbahnhofs, deren materieller und ideeller Wert unbedingt erhalten werden sollte. Während sich aktuell viele Forschungsprojekte mit der Nutzung des Abbruchmaterials von Abrissgebäuden (urban mining) beschäftigen oder die zukünftige Wiederverwendung von Material oder Bauteilen heutiger Neubauten planen, untersucht das Projekt Stuttgart 210 die Wieder- und Weiterverwendung materieller Ressourcen des Bauprozesses, die häufig übersehen werden.

Besonderer Dank gilt der Fa. Züblin Timber für die fachliche Mitarbeit und das Bereitstellen der Planungsunterlagen, der Fa. Ed Züblin AG für die Bereitstellung der Schalungselemente und das Mitwirken beim Abtransport sowie der Deutschen Bahn AG für die Zustimmung zur Verwendung der Planungsunterlagen.

Außerdem danken wir allen beteiligten wissenschaftlichen Hilfskräften, insbesondere Alessandro MacNelly für seinen Einfallsreichtum beim 3D-Druck der Elemente. Vor allem aber danken wir Katharina Raabe und Maximilian Stemmler, die das Forschungsprojekt von Anfang bis Ende mit Kreativität und herausragendem Engagement begleitet haben.

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	1
1.1 Hintergrund	1
1.2 Ausgangssituation	2
1.2.1 Nachnutzung als Kunstobjekte	3
1.2.2 Übertragbarkeit	4
1.3 Projektziele	6
1.4 Projektbeteiligte	9
2. Grundlagenermittlung	12
2.1 3D-Daten	13
2.2 Herstellungsprozess und Konstruktionsaufbau	15
2.3 Sicherung der Schalungselemente	21
2.3.1 Bestandsaufnahme	22
2.3.2 Vorgehensweise bei der Sicherung	22
2.3.3 Gesicherte Elemente	24
2.3.4 Erkenntnisse aus der Sicherung der Elemente	27
2.4 Tragwerksplanung – relevante Grundlagen	29
2.4.1 Systematik und Bemessungsgrundlagen	29
2.4.2 Regelkelchelemente	31
2.4.3 Schwindgassenelemente	36
2.4.4 Hohlkastenträgerelemente	37
2.4.5 Potenziale im Hochbau - Parameterstudie	39
3. Entwurfsprozess	41
3.1 Ermittlung von Bauaufgabe und Bauherr	43
3.2 Entwurf und Material	45
3.3 Verwendung von künstlicher Intelligenz als Entwurfswerkzeug	46
3.4 Erkenntnisse aus dem Entwurfsprozess	47
4. Tragwerksplanung	48
4.1 Rahmenbedingungen	48
4.2 Allgemeine Anforderungen	51
4.3 Umgang mit Schädigungen der Schalungselemente	53
4.4 Holzbaubemessung von wiederverwendeten Bauteilen	55
4.4.1 Kalibrierung der Teilsicherheitsbeiwerte	56
4.4.2 Anpassung der Festigkeitssortierung	57
4.5 Reversible Bauteilverbindungen	59
4.5.1 Bewertung der Lösbarkeit von Verbindungen	59
4.5.2 Wiederverwendung von Verbindungen	61
5. Rechtliche Rahmenbedingungen	63
5.1 Rechtliche Bewertung des Forschungsprojekts Stuttgart 210	64

5.1.1 Wiederverwendung von Bauprodukten und Bauteilen	64
5.1.2 Vermeidung der Abfalleigenschaft	65
5.1.3 Folgen der Geltung des Abfallrechts	66
5.1.4 Verwendungszweck der Schalungselemente	67
5.1.5 Re-Use von Bauprodukten und Bauteilen aus baurechtlicher Sicht	67
5.2 Zustimmung im Einzelfall	72
5.2.1 Allgemeines	72
5.2.2 Anforderungen der LfB	73
5.2.3 Theoretischer Weg zur Zustimmung im Einzelfall	75
6. Ökobilanzierung	77
6.1 Einleitung	77
6.2 Möglichkeiten und Grenzen der Ökobilanzierung im Bauwesen	77
6.3 Besonderheiten bei biogenen Baustoffen	80
6.4 Besonderheiten bei der Wiederverwendung von Baustoffen	82
6.4.1 Status Quo: QNG-Methodik	82
6.4.2 Zukünftige Methodik	84
6.4.3 Alternative Methoden	84
6.5 Ökobilanzberechnung für das Reallabor Circuleum	87
6.5.1 Darstellung der Ergebnisse	88
6.6 Zusammenfassung	92
7. Reallabore	93
7.1 Reallabor Stuttgart Vaihingen	94
7.1.1 Entwurf	94
7.1.2 Tragwerk	103
7.2 Reallabor Mannheim	106
7.2.1 Entwurf	106
7.2.2 Tragwerk	112
7.3 Reallabor Marbach	115
7.3.1 Entwurf	115
7.4 Reallabor Ingersheim	121
7.4.1 Projektbeschreibung	121
7.4.2 Tragwerk	126
7.5 Machbarkeitsstudien	129
7.5.1 Überdachung	130
7.5.2 Markthalle	131
7.5.3 Aussichtspavillon	134
8. Ausstellung	136
9. Literaturverzeichnis	142
10. Anlagen	144

1. Einleitung

1.1 Hintergrund

Gebäude verursachen in Deutschland durch die Herstellung von Baumaterialien, durch ihre Errichtung, ihren Betrieb und ihren Abbruch etwa 40% der Treibhausgase [2], etwa 46% aller von der Erde entnommenen Materialien [3] und etwa 54% des Abfalls [4]. In keinem anderen Wirtschaftsbereich werden ähnlich große Stoffströme umgesetzt. Der Einstieg in einen geschlossenen Materialkreislauf, der weder auf neue, nicht-erneuerbare Ressourcen angewiesen ist, noch zu einem hohen Abfallaufkommen oder gar zur Erzeugung persistenter Schadstoffe führt, ist daher im Bau- und Gebäudesektor besonders relevant. Der „Übergang zur Kreislaufwirtschaft“ (Art. 13, TR VO (EU) 2020/852) ist neben „Klimaschutz“ (Art. 10), „Anpassung an den Klimawandel“ (Art. 11), „Nachhaltige Nutzung und Schutz von Wasser- und Meeresressourcen“ (Art. 12), „Vermeidung und Verminderung der Umweltverschmutzung“ (Art. 14) und „Schutz sowie Wiederherstellung der Biodiversität und der Ökosysteme“ (Art. 15) eines der sechs Umweltziele, anhand derer die EU-Taxonomieverordnung [5] seit 2020 ökologische Nachhaltigkeit einer wirtschaftlichen Tätigkeit definiert. Als ökologisch nachhaltig gelten Wirtschaftstätigkeiten zukünftig, wenn sie zur Verwirklichung eines oder mehrerer Umweltziele ein wesentlicher Beitrag leisten und zu keiner erheblichen Beeinträchtigung der übrigen Umweltziele führt (Art. 3). Die beiden für den Bau- und Gebäudesektor maßgeblichen Umweltziele werden zukünftig „Klimaschutz“ und „Übergang zur Kreislaufwirtschaft“ sein. Das Projekt Stuttgart 210 untersucht vor diesem Hintergrund exemplarisch die Verwendung von Bauhilfsmitteln (Schalungselementen) aus Holz als Primärkonstruktion für neue Gebäude.

1.2 Ausgangssituation

Für das Tragwerk des neuen Hauptbahnhofs in Stuttgart (Stuttgart 21) werden geometrisch hochkomplexe Betonschalungen aus 8-achsgefrästen, mehrfach blockverleimtem Brettsperrholz verwendet, um die Trichter der Stützen und um die Oberlichter bzw. die Gewölbe der Bahntunnel und Randanschlüsse nach dem Entwurf des Architekturbüros ingenhofen associates herstellen zu können [6].

Für jede der 28 Kelchstützen werden etwa 80 Schalelemente benötigt, insgesamt kommen etwa 550 einzelne Elemente zum Einsatz. Diese Elemente werden für sich wiederholende Geometrien wie die Kelchstützen mehrmals verwendet, in den Anschlussbereichen der Dachkonstruktion an die Seitenwände oder im Bereich der Stützenfüße jedoch vielfach als Unikate zur einmaligen Verwendung hergestellt. Die Produktion der Schalungen erfolgte bei Züblin Timber in Aichach, indem Rohlinge aus mehreren Lagen Brettsperrholz zu einer Grobform verleimt wurden, aus der ein Roboterarm mit einem in acht Achsen beweglichen Fräskopf die exakte Form der mehrfach gekrümmten Schalelemente herausarbeitete. Dadurch kann Geometrie des 3D-Modells aus der Planung des Bahnhofs millimetergenau auf die Betonschalungen übertragen werden. Um die geforderte Betonoberfläche zu erhalten, ist die Holzoberfläche der Schalelemente mit einem speziell hergestellten Bootslack aus glasfaserarmiertem Polyurethan überzogen.

Das Volumen aller Schalelemente, die zum Bau von Stuttgart 21 eingesetzt werden, beläuft sich auf etwa 5.000 m³ Brettsperrholz.

Nach Fertigstellung der Betonierarbeiten sind die Schalungen ein Abfallprodukt, die auf Grund der einmaligen Geometrie an keiner anderen Stelle mehr als Schalungen eingesetzt werden können. Nachdem jedoch allein das Material Holz in dieser Menge einen beträchtlichen Wert darstellt, war es ursprünglich geplant, die Schalungen stofflich zu verwerten und beispielsweise zu Holzfaserdämmung zu verarbeiten. Dazu wurden im Laufe des Baufortschritts einige nicht mehr benötigte Elemente zu einem Dämmstoffhersteller in die Niederlande transportiert. Diese Vorgehensweise erwies sich jedoch als zu aufwendig und beschränkte sich auf einzelne Elemente. Auch Versuche, den Bootslack durch Abfräsen mit dem Roboterarm wieder zu entfernen, um die Elemente als Altholz entsorgen zu können, erwiesen sich als zu aufwändig. Denn nicht nur der relativ weite Transport der großen Elemente zurück nach Aichach, sondern auch die Bearbeitung (Zeitaufwand Elemente unter dem Roboterarm Einmessen und Abfräsen der Oberfläche) erwiesen sich als unangemessen aufwändig. Letztendlich wurden die meisten Schalungen im weiteren Verlauf nach Gebrauch der Baustelle in kleinere Stücke zersägt, abtransportiert und als Sondermüll entsorgt.



Abb. 1: Schalungselement und bereits betonierte Kelchstützen auf der Baustelle des Stuttgarter Hauptbahnhofs; Foto: Roman Kreuzer

Dieses end-of-life-Szenario der thermischen Verwertung oder stofflichen Nutzung als down-cycling ist weder der Hochwertigkeit und Leistungsfähigkeit des Materials noch der geometrischen Besonderheit der Schalelemente angemessen. Daher untersucht das Forschungsprojekt „Stuttgart 210, weiterdenken, weiterbauen!“ die Weiterverwendung der Schalelemente als Primärkonstruktion von Gebäuden. Indem vormalige Bauhilfsmittel als Konstruktionsbestandteile neuer Gebäude verwendet werden, entsteht eine Nachnutzung, die hochwertiger ist als die ursprüngliche Nutzung – also upcycling. Für die neu entstehenden Gebäude ergibt sich dadurch nicht nur eine besonders vorteilhafte Ökobilanz, indem der biogene Baustoff Holz länger stofflich erhalten bleibt, CO₂ bindet und andere Baustoffe substituiert, sondern auch die Möglichkeit zur Nutzung geometrisch einzigartiger Konstruktionsbestandteile, die unter normalen Umständen für vergleichbare Projekt unbezahlbar wären.

1.2.1 Nachnutzung als Kunstobjekte

Das Künstlerkollektiv Umschichten, bestehend aus Peter Weigand, Lukasz Lendzinski und Alper Kazokoglu, nutzt einige Schalungselemente des neuen Stuttgarter Hauptbahnhofs bereits seit 2022 als Kunstobjekte, beispielsweise im Rahmen des Projekts „Platzprobe“. Dafür wurden 2023 fünf Schalungselemente auf dem Kleinen Schlossplatz in Stuttgart als Skulpturen im Stadtraum aufgestellt. „Das Projekt (...) aktualisiert Hajeks Vision einer sozialen, demokratischen und künstlerischen Gestaltung des öffentlichen Raums, 54 Jahre nach der

Realisierung des »Platzmals«. Ausgehend von den Fragen, wem dieser gehört und wer ihn wie nutzen darf, will die Intervention die Potenziale des Kleinen Schlossplatzes erkunden und zu seiner Neuentdeckung einladen.“ [7]

Auch weitere Projekte wie die Entwürfe des Künstlerkollektivs für den Pavillon des MLR auf der BUGA 2023 in Mannheim sahen eine Verwendung der Schalungselemente vor. Damit ergibt sich eine äußerst sinnvolle und hochwertige Nachnutzung, die andere Materialien substituiert, die Schalungen im Sinne des Upcycling nutzt und die Elemente stofflich erhält.

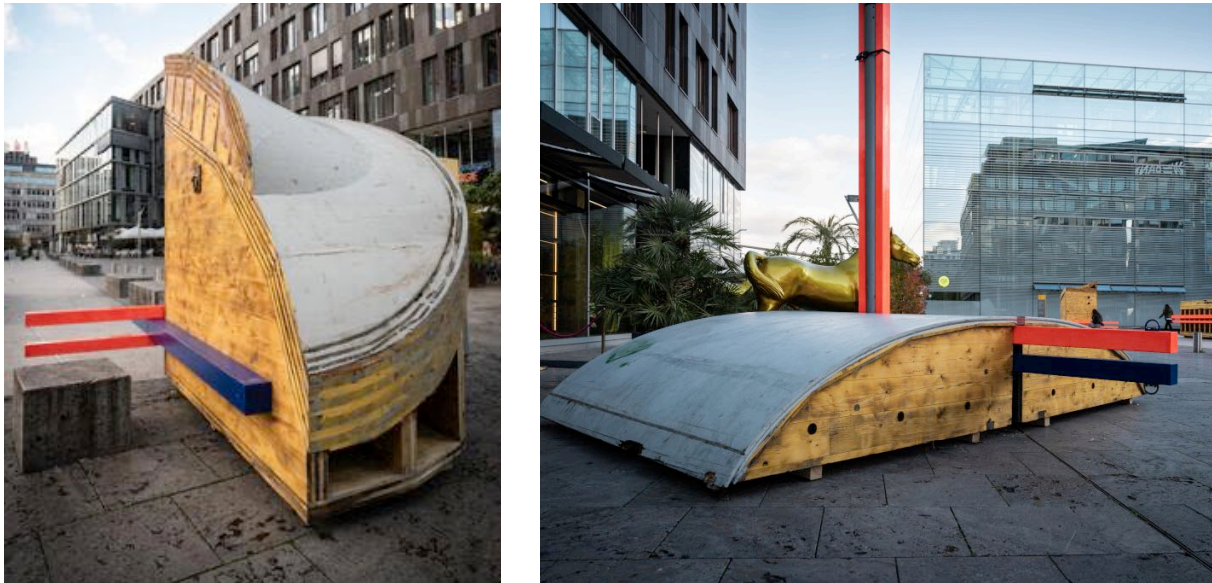


Abb. 2: Kunstprojekt „Platzprobe“ des Künstlerkollektivs Umschichten, das fünf Schalungselemente als Skulpturen verwendet;
Foto: Kunstmuseum Stuttgart

1.2.2 Übertragbarkeit

Bei den Schalungen des Stuttgarter Bahnhofs handelt es sich um sehr spezielle Konstruktionselemente, die jedoch stellvertretend für Sonderschalungen betrachtet werden können, wie sie im Tief- oder Brückenbau bisweilen vorkommen. Während beispielsweise Tunnelröhren meist über die gesamte Länge einen einheitlichen Querschnitt aufweisen, werden für die Zugänge häufig Spezialschalungen benötigt, die den geometrischen Anschluss an die umgebende Topografie herstellen. Nach der Fertigung der Schalungen für den Stuttgarter Bahnhof erhielt Züblin Timber verschiedene Anfragen für die Herstellung ebensolcher Spezialschalungen. [8]

Die Übertragbarkeit der Ergebnisse des Forschungsprojekts sind vor dem Hintergrund zu sehen, dass die Verwendung von Spezialbauteilen untersucht wurde. Die meisten Erkenntnisse lassen sich jedoch verallgemeinern, denn in vielerlei Hinsicht unterscheiden sich die entwerferische Herangehensweise, die Notwendigkeiten der Logistik und Organisation, die

ökobilanzielle und juristische Einordnung sowie der Planungs- und Bauprozess nicht von anderen Projekten, die Re-Use-Komponenten als Bauteile neuer Gebäude verwenden.

Nicht zuletzt untersucht das Forschungsprojekt allgemein die Wiederverwendung von biogenen Baustoffen am Beispiel der vorliegenden Schalungselemente aus Brettsperrholz. Insbesondere die rechtlichen und ökobilanziellen Erkenntnisse lassen sich direkt auf die Wiederverwendung anderer Konstruktion aus Holz übertragen und verallgemeinern.

1.3 Projektziele

Ziel des Forschungsprojektes ist es einen Beitrag zu einer nachhaltigen Transformation des Bausektors zu leisten. Der Lebenszyklus von Bauteilen aus Holz soll verlängert werden, indem Bauteile oder – wie im Fall der Schalungselemente des Bahnhof Stuttgart 21 – Bauhilfsmittel nach Ende ihrer ersten Verwendung nicht als Abfall behandelt, sondern als wertvolle Ressourcen für neue Gebäude die im Forschungsprojekt integrierten Reallabore vorgesehen sind.

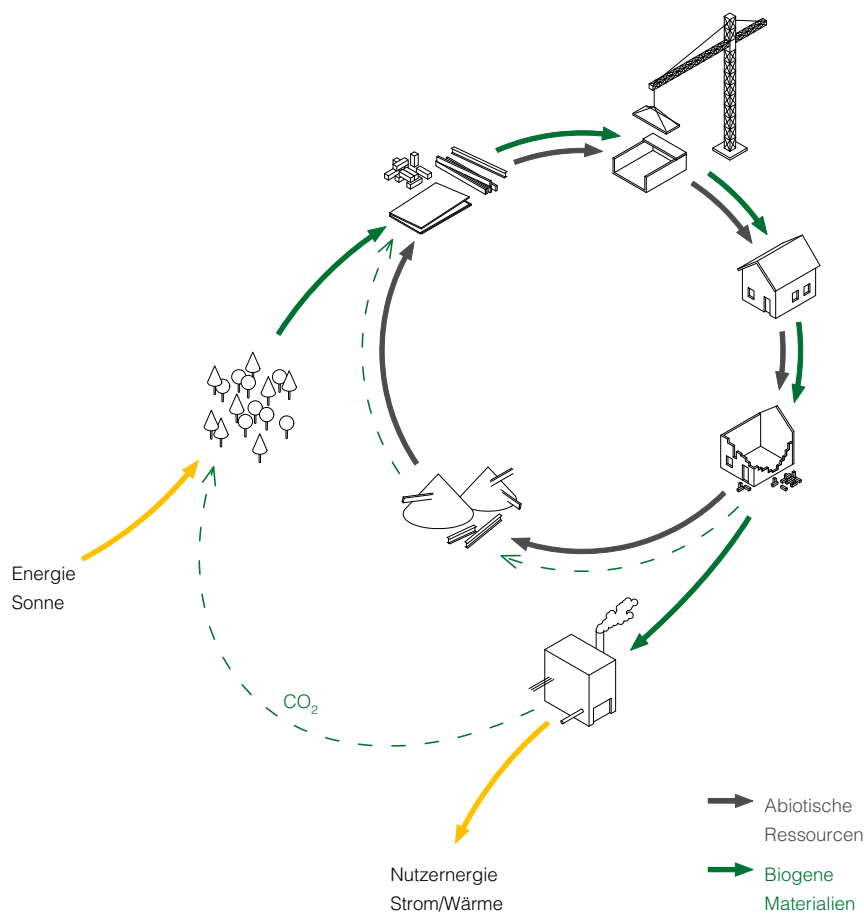


Abb. 3: kreislaufgerechte Stoffströme abiotischer und biogener Ressourcen im Bauwesen

An sich ist Holz ein kreislauffähiger und CO₂-neutraler Baustoff. Wird Holz am Ende seiner Nutzungsdauer thermisch verwertet oder verrottet, wird dessen Energieinhalt sowie der Großteil der stofflichen Substanz als CO₂ freigesetzt. Dieses CO₂ können Bäume über Photosynthese wieder zu Holz verstoffwechseln, das dann erneut genutzt werden kann. Auf diese Art wird der Baustoff auch üblicher Weise in der Ökobilanz – als annähernd klimaneutral – betrachtet (siehe Kapitel 6). Wenn dem Holz als Werkstoff keine Zusatzstoffe (Leime, Lacke, Farben, Holzschutzmittel etc.) beigemischt werden, ist es stofflich vollständig kreislauffähig.

Die Notwendigkeit, vollständig geschlossene Materialkreisläufe zu organisieren, besteht daher in erster Linie für abiotische Ressourcen, denn sie sind endlich und werden aktuell weit über ein nachhaltiges Maß hinaus ausgebeutet. In einem geschlossenen Kreislauf abiotischer Ressourcen ließen sich erneuerbare Ressourcen einspeisen und entnehmen, so dass nachhaltiges Wirtschaften möglich wäre (Abb. 3). Für den Bau- und Gebäudesektor, der die größten Stoffströme umsetzt, wäre das besonders relevant (siehe Kapitel 1.1).

Hinsichtlich der Bekämpfung der Klimakrise ist es jedoch sehr sinnvoll, das im Holz gespeicherte CO₂ möglichst lange stofflich gebunden zu halten und eine Freisetzung zu verhindern, um über einen langen Zeitraum das Klima zu entlasten.

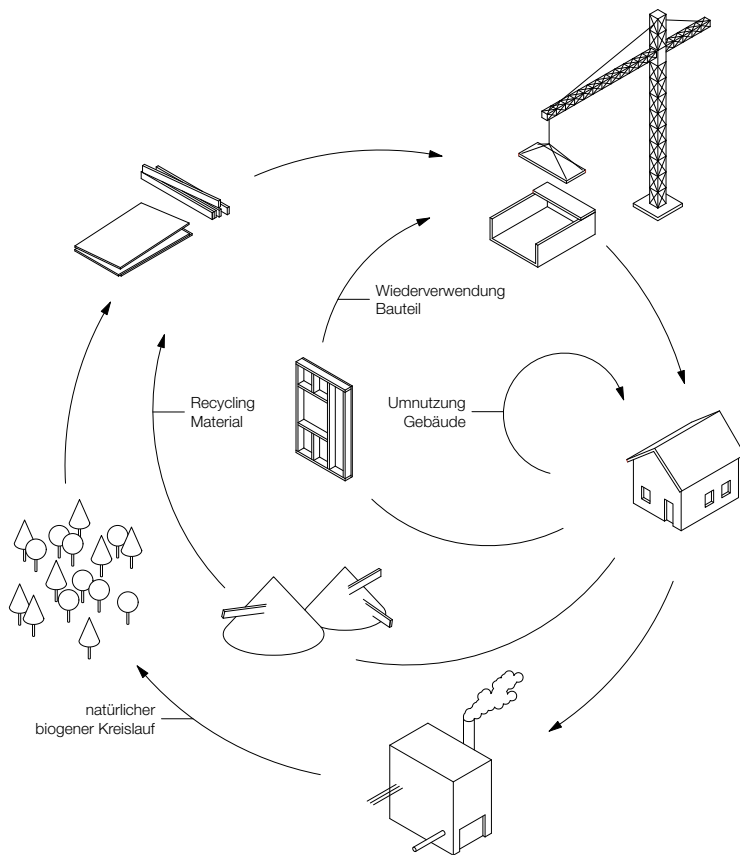


Abb. 4: Verschiedene Möglichkeiten der kreislaufgerechten Nutzung von Holz und Holzwerkstoffen im Bauwesen

Das kann prinzipiell auf drei Arten geschehen (Abb. 4):

- (1) Verwendung von Altholz, um daraus neue Holzwerkstoffe herzustellen (OSB-Platten, Spanplatten, etc.)
- (2) Verwendung ganzer Bauteile (Wände, Decken, Stützen, Träger, etc.)
- (3) Bestandserhalt ganzer Gebäude durch Weiter- oder Umnutzung

Das Vorgehen nach (1) ist zweckmäßig und praktikabel, führt aber meist zu einer minderwer-

tigen Nutzung (downcycling) und zu einer Beimischung von Zusatzstoffen (Leime, etc.). Das Bauen im Bestand (3) ist ein wichtiger Teil der Architektur und in Europa der wichtigste Baustein der Ressourcenwende im Bauwesen. Nachdem es eine wichtige und lange Tradition hat, gibt es klare Rahmenbedingungen für den Umgang mit alten Bauteilen und –stoffen. In Deutschland hinsichtlich seiner technischen und juristischen Einordnung weitgehend ungeklärt ist die Weiterverwendung ganzer Bauteile (2). Gleichzeitig verbirgt sich hier jedoch ein großes Potential, denn die Verwendung von Bauteilen ermöglicht meist einen gleichwertigen Einsatz des Materials – und im Fall von Holz einen vollständigen Erhalt des gespeicherten CO₂. Im Fall von Bauhilfsmitteln wie hochkomplexen Schalungen ist sogar ein deutliches Upcycling möglich, wenn sie in ihrer zweiten Zweckbestimmung als Primärtragwerk eingesetzt werden. Das ist die hochwertigste und werterhaltendste Weiterverwendung, die in diesem Fall möglich ist.

Indem genau dieser Weg beschritten wird, versucht das Forschungsprojekt Stuttgart 21 am Beispiel der hölzernen Betonschalungen des Bahnhof Stuttgart 21 verallgemeinerbare Erkenntnisse zu einem Weiterverwendungsprozess im Sinne des Upcycling zu erarbeiten. Dazu wurden konkrete Weiterverwendungsmöglichkeiten für die Schalelemente des Stuttgarter Hauptbahnhofs zu entwickeln, um damit neue Gebäude zu erstellen zu können. Wesentlicher Bestandteil des Forschungsprojekts ist außerdem die Initiierung und konkrete Vorbereitung von Reallaboren (Pilotprojekten). Denn nur durch diese 1:1-Umsetzung der Forschungskonzepte können alle relevanten Fragestellungen identifiziert und dokumentiert werden. Grundlage der Betrachtung waren folgende Prämissen:

- Möglichst vollständiger Erhalt der Geometrie der verwendeten Elemente
- Werterhalt und möglichst Wertsteigerung (Upcycling) der mit hohem Aufwand hergestellten Elemente
- Konkreter Nachweis der Weiterverwendbarkeit im Rahmen der untersuchten Konzepte durch Initiierung von Reallaboren
- Verwendung möglichst für Gebäude mit alltäglichen Nutzungen und thermischer Gebäudehülle, um die Verwendbarkeit von Re-Use-Komponenten im Alltag nachzuweisen
- Weiterverwendung von möglichst vielen Schalelementen

Folgende Aspekte standen im Fokus der Erforschung:

- Technische Potenziale der Weiterverwendung von Brettsperrholz
- Ökologische Potentiale der stofflichen Weiterverwendung von Holz
- Juristische Rahmenbedingungen der Verwendung von Re-Use-Elementen als Bauteile
- Ästhetische und gestalterische Potenziale der geometrischen und materialspezifischen Besonderheiten der Stuttgart 21-Schalungen

1.4 Projektbeteiligte

Das Forschungsprojekt wurde als Kooperation der Hochschulen HTWG Konstanz (Projektleitung), HKA Karlsruhe und HFT Stuttgart durchgeführt. Öffentlichkeitsarbeit und Koordination externer Projektpartner erfolgte durch ProHolz Baden-Württemberg. Fördergeber war das Ministerium für ländlichen Raum und Verbraucherschutz (MLR) Baden-Württemberg im Rahmen der Holzbau-Offensive. Als externe Partner stellten die Fa. Züblin Timber die Plangrundlagen und die Fa. Ed Züblin die Schalungselemente zur Verfügung. RA Michael Halstenberg ist mit der juristischen Beratung des Forschungsprojekts und der Reallabore beauftragt.

Projektbeteiligte:

HTWG Konstanz, Fakultät Architektur und Gestaltung

AG 1 Fachgebiet Baukonstruktion und Entwerfen

Prof. Dipl.-Ing. Stefan Krötsch

Projektleitung des Forschungsprojekts, Koordination der Forschungsinhalte und Bearbeitung entwurflicher und baukonstruktiver Themen

Projektleitung: Roman Kreuzer M.A.

Wissenschaftliche Hilfskräfte: Katharina Raabe B.A., Maximilian Stemmler B.A., Alessandro Mac-Nelly B.A.

AG 2 Fachgebiet Energieeffizientes Bauen

Prof. Dr.-Ing. Thomas Stark

Entwicklung eines Ökobilanzierungsverfahrens für Re-Use-Baukomponenten, Ökobilanzierung des Projekts, Energiekonzept

Projektleitung: Dr.-Ing. Viola John

HfT Stuttgart, Fakultät Architektur und Gestaltung

AG 3 Fachgebiet Entwerfen, Digitale Gestaltung und Darstellung

Prof. Dipl.-Ing. Andreas Kretzer

Grundlagenermittlung, Darstellung der Forschungsinhalte und Bearbeitung entwurflicher Themen

Projektleitung: Prof. Dipl.-Ing. Andreas Kretzer

HKA Karlsruhe, Fakultät für Architektur und Bauwesen

AG 4 Fachgebiet Baukonstruktion, Baustatik und Holzbau

LESS - Labor für effiziente und suffiziente Strukturen

Prof. Dr.-Ing. Robert Pawlowski

Projektleitung: Prof. Dr.-Ing. Robert Pawlowski

Akademischer Mitarbeiter: B.Eng. Christian Engel-Götz

Kanzlei Franßen und Nusser, Düsseldorf

Rechtsanwalt Michael Halstenberg

Analyse und Erarbeitung der rechtlichen Rahmenbedingungen

ProHolz Baden-Württemberg

Koordination und Öffentlichkeitsarbeit

Bearbeitung: Esther Reinwand

Ed. Züblin AG, Stuttgart

Bereitstellung der Schalungselemente der Baustelle Stuttgart 21

Züblin Timber, Aichach

Bereitstellung der 3D-Produktionsdaten

Projektleitung: Dipl.-Ing. Stefan Mederle

Die Umsetzung der Reallabore erfolgt in unterschiedlicher Zusammensetzung weiterer Projektbeteiligter. Die Nutzungsrechte des Urheberrechts der im Forschungsprojekt erarbeiteten Entwürfe werden an die Bauherren der Reallabore übertragen, die Planungsbüros mit der Erarbeitung von Genehmigungs- und Ausführungsplanungen beauftragen. Es werden vier Reallabore in Ingersheim, Stuttgart, Marbach und Mannheim umgesetzt, die in der Projektdokumentation detailliert beschrieben sind.

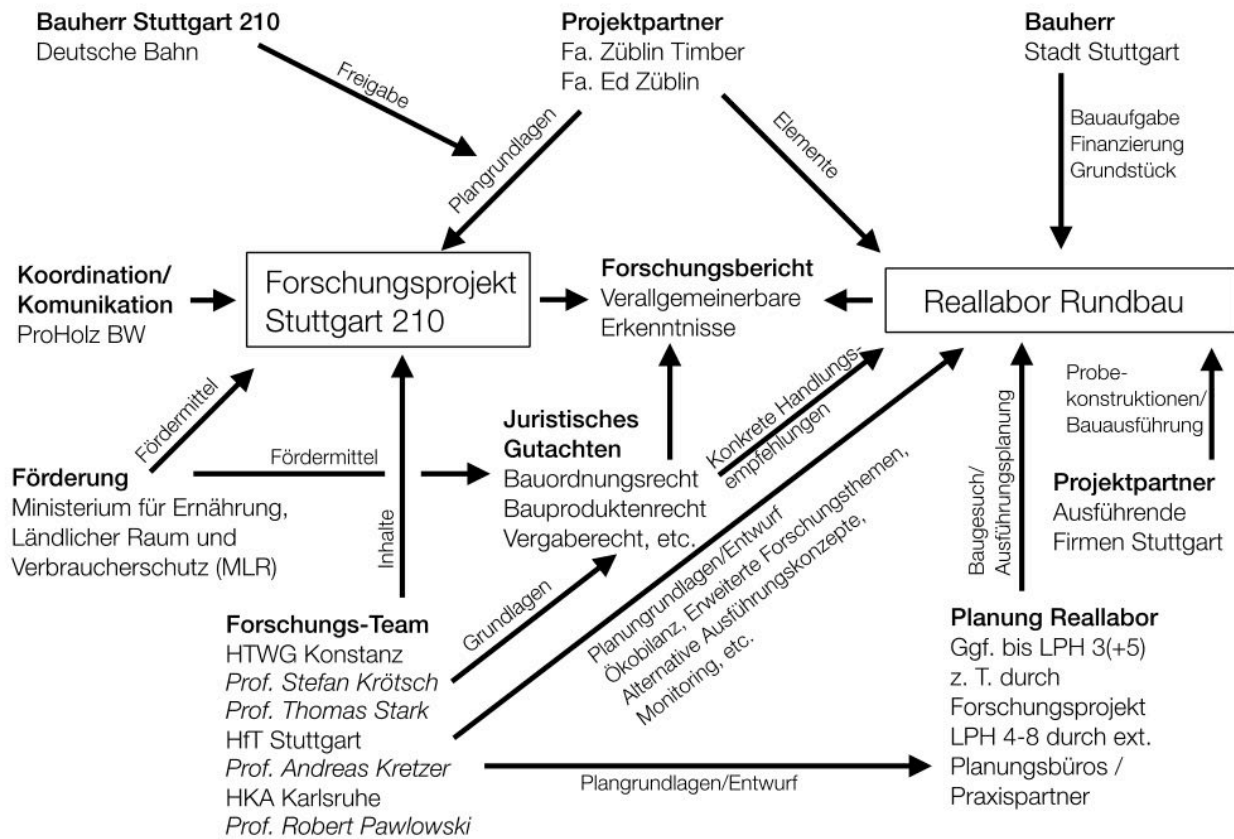


Abb. 5: Projektbeteiligte am Forschungsprojekt und an den Reallaboren (Beispiel Runbau, Stuttgart)

2. Grundlagenermittlung

Als Praxispartner im Forschungsprojekt und Hersteller der Schalungselemente überlies die Firma Züblin Timber dem Forschungsteam sowohl ihre 3D-Dateien der Schalungsgeometrie als auch ihre eigens für die Schalkonstruktion erstellten statischen Berechnungen und dazugehörigen Rechenmodelle der einzelnen Elementtypen. Der Bauherr des Stuttgarter Hauptbahnhofs, die Deutsche Bahn AG, sowie der Hauptauftragnehmer, die Ed Züblin AG erteilten dazu ihre Freigabe, so dass die Daten im Einvernehmen mit allen Rechteinhabern für das Forschungsprojekt zur Untersuchung von Nachnutzungspotenzialen der Schalungselemente zur Verfügung standen.

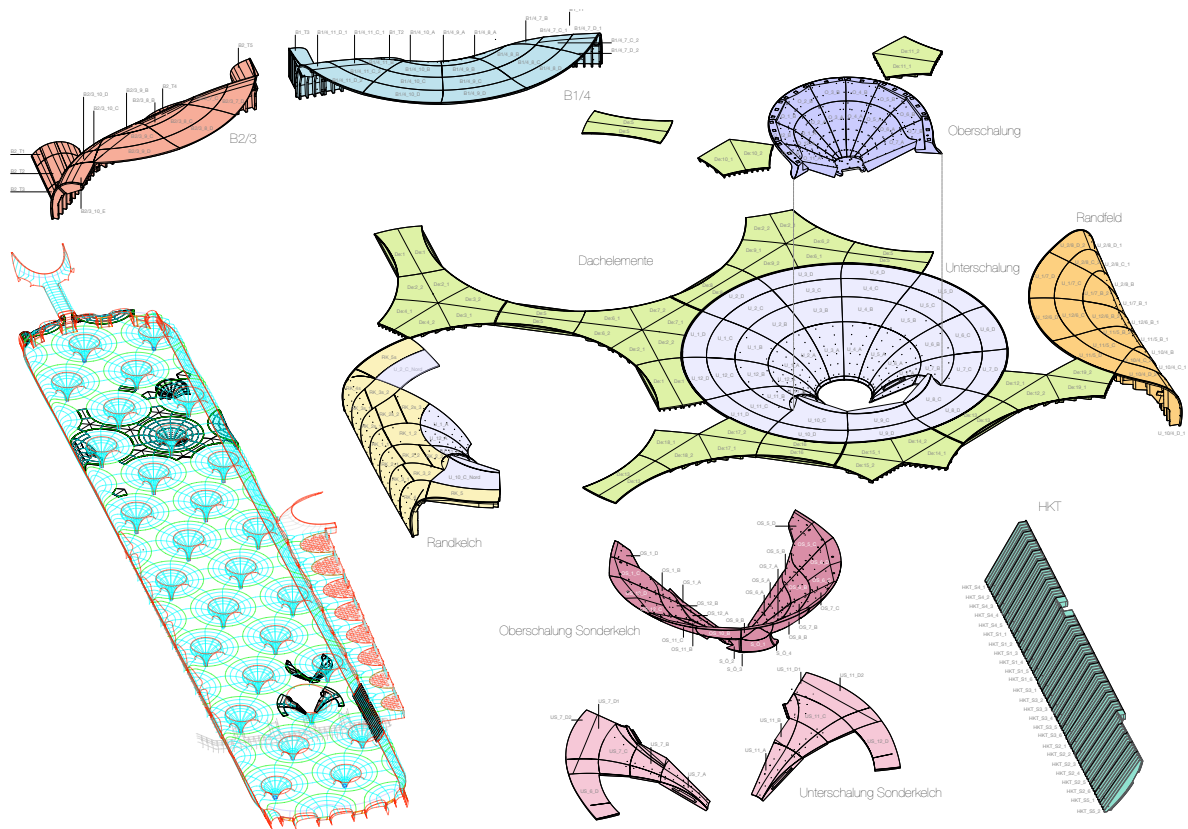


Abb. 6: 3D-Zeichnungen der Schalungselemente von Züblin Timber, (Überarbeitet S210)

2.1 3D-Daten

Die Ausführungsplanung der Schalungselemente des Stuttgarter Hauptbahnhofs erfolgte als 3D-Modell im CAD-Programm Rhino, das von Züblin Timber in enger Absprache mit dem Architekturbüro ingenhofen associates erarbeitet wurde. Mit diesem digitalen Modell wurden sowohl die Grobformen aus Brettsperrholzschichten hergestellt, als auch die Daten für das Fräsen der finalen Oberfläche durch den Roboterarm generiert. Dadurch konnte das 3D-Modell millimetergenau in die Form der Betonschalungen übertragen werden. Dieses 3D-Modell stellte Züblin Timber nach Freigabe durch den Bauherrn, die Deutsche Bahn, dem Forschungsprojekt Stuttgart 210 zur Verfügung [9], so dass zur Untersuchung von Nutzungskonzepten für die Schalungselemente ein präziser digitaler Zwilling vorlag (Abb. 6). Gerade bei geometrisch so komplexen Bauteilen wäre die Entwicklung von Verwendungskonzepten ohne diese Grundlage äußerst aufwendig gewesen, so dass dieser Input der Praxispartner kaum zu überschätzen ist. Züblin Timber stellte ferner dem Forschungsprojekt die statischen Berechnungen der Schalungselemente zur Verfügung, so dass auch hinsichtlich der Tragwerksplanung eine gute Datengrundlage vorlag. Obwohl sich die Elemente durch den Gebrauch als Betonschalung und daraus resultierende Verwitterung, Beschädigungen, Reparaturen und Anpassungen (z. B. an den Auflagerpunkten der Stützgerüste) bisweilen etwas von ihrem digitalen Zwilling unterscheiden, ist eine präzise Informationsgrundlage über den ursprünglichen Verwendungszweck von unschätzbarem Wert für die Planung der Weiterverwendung gebrauchter Bauteile.

Der erste Schritt des Forschungsprojekts war es daher, die 3D-Produktionsdaten digital aufzubereiten und übersichtlich darzustellen. Ergebnis dieser Vorbereitung ist ein kompletter Bauteilkatalog sämtlicher Schalungselemente mit Auflistung ihrer wesentlichen Eigenschaften (siehe Anlage). Allerdings eignete sich weder der Bauteilkatalog noch das auf Grund der gewaltigen Datenmenge unhandliche 3D-Modell als Werkzeug, um Entwurfskonzepte zu erarbeiten oder interessierte, potentielle Bauherren zur Übernahme von Schalungselementen zu motivieren. Auf dieser Basis druckte das Forschungsteam der AG 1 sämtliche Schalelemente im Maßstab 1:100 und 1:50 als 3D-Modelle, um die Geometrie der komplexen Einzelteile für die Entwicklung der Konzepte handlich und begreifbar zu machen. Auf Basis dieser Modelle konnten schnell und intuitiv Modelle für neue Konstruktionen entworfen werden.



Abb. 7: 3D-Drucke ausgewählter Schalungselemente; Foto: Andreas Kretzer

Eine besondere Herausforderung der Grundlagenermittlung bestand jedoch in der Ermittlung der tatsächlich zu einem bestimmten Zeitpunkt verfügbaren Schalungselemente: Welche Schalungselemente wie lange im Einsatz waren, welche bereits nicht mehr gebraucht wurden und zur Entsorgung anstanden bzw. welche Elemente bereits entsorgt waren. Die Angaben, die die Bauleitung auf der Stuttgarter Baustelle dazu machte, erwiesen sich nicht immer als korrekt. So wurden teilweise Planungen für Elemente gemacht, die bereits entsorgt waren (siehe Kapitel 2.3). Teilweise wurde vom Praxispartner, der Fa. Ed Züblin, sehr kurzfristig Bescheid gegeben, wenn Elemente zur Entsorgung anfielen.

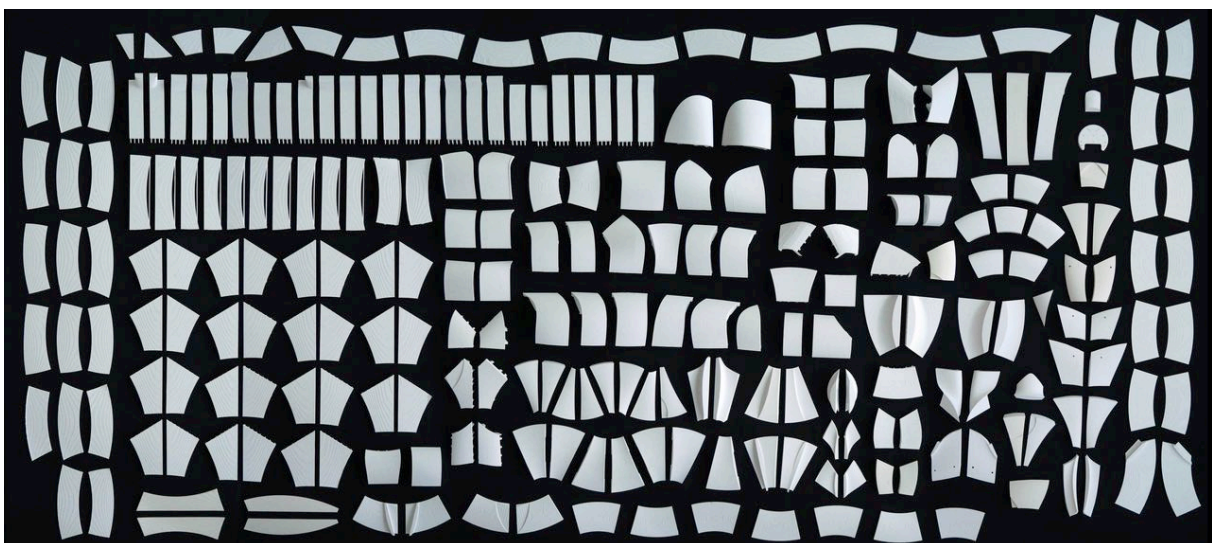


Abb. 8: 3D-Drucke der zum Startzeitpunkt des Forschungsprojekts noch zur Verfügung stehenden Teile. Foto: Andreas Kretzer

2.2 Herstellungsprozess und Konstruktionsaufbau

Die Konstruktion der Schalung für das Betonieren der Bahnhofshalle des neuen Stuttgarter Hauptbahnhofs musste nicht nur standsicher, verformungsarm, sauber, dicht und präzise sein sowie während des Gießvorgangs keine Veränderungen erfahren, sondern vor allem auch die hohe geometrische Komplexität des Architekturentwurfs auf möglichst präzise und rationale Weise herstellbar machen. Die Schalungselemente mussten hohen Lasten standhalten können, denn der Frischbetondruck für die Kelchschalungen erzeugte Drücke von bis zu 80 kN/m² an den Kelchfüßen und 40 bis 60 kN/m² an den Kelchblüten. Um all diesen Anforderungen gerecht zu werden, entschloss sich die ausführende Firma Ed Züblin, die Schalungen durch die Konzerntochter Züblin Timber aus mehrfach blockverleimten Brettsperholz, das durch abfräsen in die benötigte Form gebracht wurde, herstellen zu lassen.

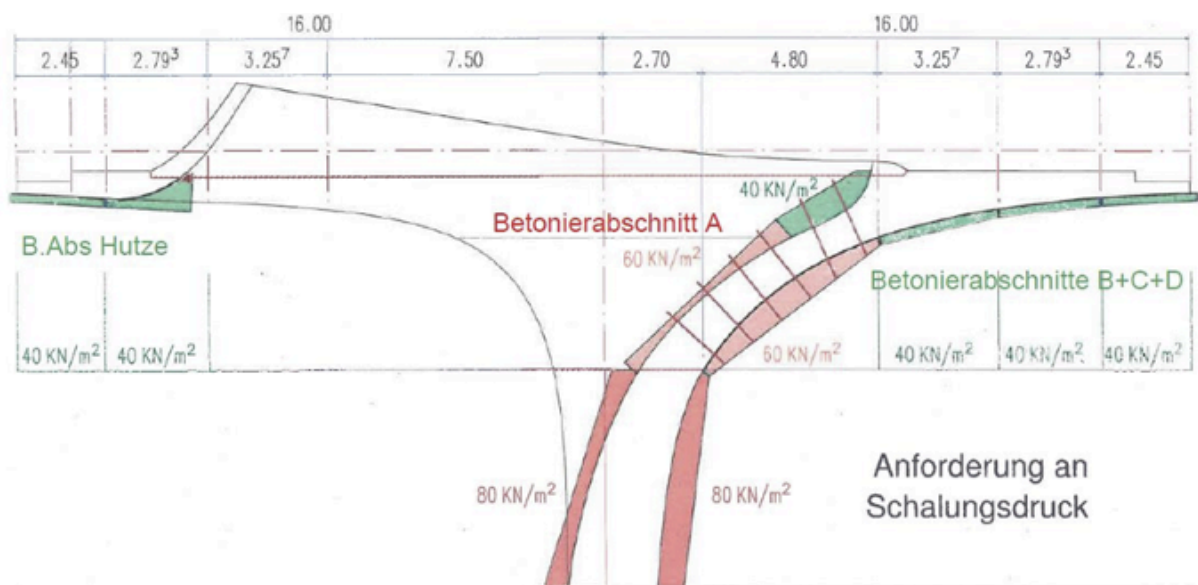


Abb. 9: Frischbetondrücke und Betonierabschnitte der Kelche, aus [1]

Die meisten Schalungen wurden bereits vor dem Beginn des Forschungsprojekts im November 2022 produziert, während der Projektlaufzeit mussten nur noch wenige Elemente gefertigt werden. Am 15.02.2023 hatte das Forschungsteam jedoch die Gelegenheit, die Produktion einiger Elemente im Rahmen einer Werkführung der Fa. Züblin Timber in Aichach besichtigen und die Spezifika der Herstellung und Besonderheiten der Elemente mit den Praxispartnern von Züblin Timber zu besprechen.

Zur Herstellung der Schalungselemente im Werk von Züblin Timber in Aichach wurden wie im vorangehenden Kapitel beschrieben auf Basis eines digitalen Höhenlinienmodells zunächst Rohlinge aus mehreren Schichten mit einander verleimten Brettsperrholzes hergestellt. Das dabei verwendete Brettsperrholz stammt aus der eigenen Produktion des Werks.

war jedoch in der Herstellung nicht fremdüberwacht. Für die Tragwerksplanung wurden die Festigkeitswerte des Produkts „Leno“ angenommen (siehe Kapitel Tragwerksplanung). Dabei handelt es sich um in einer Vakuumpresse verleimtes Brettsperrholz aus Fichtenholz mit ungerader Lagenanzahl unterschiedlicher Stärken (60 bis 300 mm). Um den notwendigen Anpressdruck im Zuge der Blockverleimung mehrerer Schichten zur Herstellung der Rohlinge zu erbringen, wurden Schrauben verwendet. Die Position dieser Schrauben meidet den Bereich der späteren Bearbeitung, um zu verhindern, dass beim Herstellen der Schalungsoberfläche die Fräse des Roboterarms durch die Schrauben beschädigt wird. Im Inneren der Massivholzquerschnitte der Schalungselemente befinden sich nun jedoch Schrauben, deren Position unbekannt ist und die eine nachträgliche Bearbeitung der Elemente erschweren.

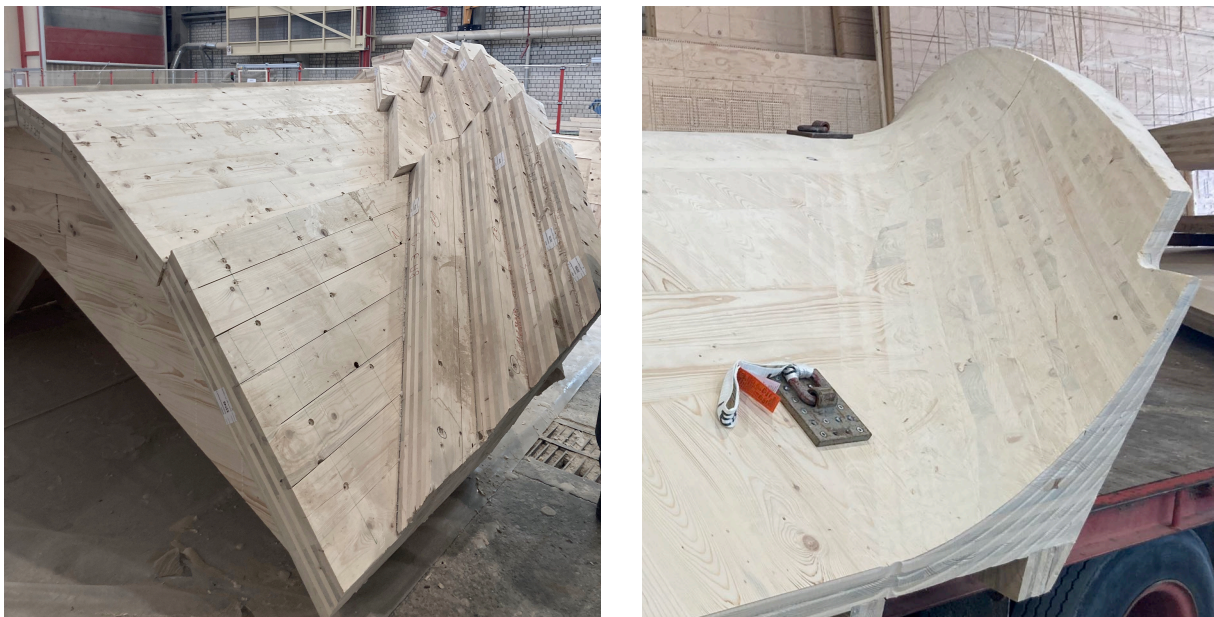


Abb. 10: Rohlinge der Schalungselemente vor und nach dem Fräsen; Fotos: Stefan Krötsch

Während die Geometrie der Schalungsseite sowie die Größe und Stoßfugen der Elemente durch die Geometrie des Architekturentwurfs definiert sind, ist die Geometrie der Rückseite nach den pragmatischen Vorgaben der Materialersparnis, des Arbeitsablaufs auf der Baustelle und den Notwendigkeiten des Betonierens (z. B. Aussteifung gegen Betondruck) entworfen. Dadurch entstehen einerseits massive Elemente (meist Elemente mit geringer Krümmung), andererseits Elemente mit Rippenstruktur auf der Rückseite. Die meisten Elemente beider Arten bilden auf der Rückseite eine Ebene, so dass sie sich einfach auf konventionelle Traggerüste zum Betonieren der Dachuntersicht auf der Baustelle in Stuttgart auflegen lassen. Die Rückseite ist entsprechend der Anforderungen unbehandelt und roh (Leimrückstände, ungleiche Rippenabstände, etc.).



Abb. 11: Rippenstruktur auf der Rückseite stark gekrümmter Elemente; Foto: Stefan Krötsch



Abb. 12: Seitliche Nut zum Einlegen von Kompribändern zu Herstellen wasserdichter Schalungsstöße; Foto: Stefan Krötsch

An den Schmalseiten der Elemente werden im Zuge der Bearbeitung durch den Fräsroboter Nuten eingefräst, in die Kompribänder eingelegt werden können, um eine wasserdichte Schalung, die ein Auslaufen der Zementmilch verhindert, für optimale Betonqualität herstellen zu können. Etwaige Rippen sind eingerückt, um einen dichten Stoß nicht durch aufquellendes Holz der Rippen zu gefährden.

Die Geometrie der Schalungsoberfläche wurde mit einem Roboterarm, der an einem Portal beweglich angebracht ist und sich somit in 8 Achsen bewegen kann, aus den Rohlingen herausgefräst. Züblin Timber hatte sich diese Anlage eigens für die Produktion der Schalungen für den Stuttgarter Hauptbahnhof angeschafft. Damit ist es möglich komplexeste Geometrie herzustellen. Für den Fräsvorgang muss die Anlage die auf dem Bearbeitungstisch platzierten Rohlinge anhand mehrerer Fixpunkte aufmessen können, damit die Geometrie des Fräsvorgangs mit der Geometrie des Rohlings hinreichend kongruent ist. In sich ist die Geometrie des Fräsvorgangs sehr präzise, die Übertragung auf die Werkstücke kann jedoch aufwändig sein. Daher wurden die Rohlinge so überdimensioniert, um Fehlstellen in der Oberfläche durch „Leerlaufen“ der Fräse durch eine entsprechende Toleranz zu vermeiden und die Herstellung der Elemente möglichst unkompliziert zu machen. Als schwieriger stellte

es sich gemäß der Gespräche mit Züblin Timber heraus, fertige Elemente nachträglich zu bearbeiten, beispielsweise um beschädigte Elemente zu reparieren oder um den Bootslack zu entfernen (präzises Abfräsen der vorhandenen Geometrie um wenige Millimeter). Dazu mussten die Elemente so auf der Anlage platziert und eingemessen werden, dass der Roboter annähernd ohne Toleranz fräsen konnte. Das stellte sich offenbar als äußerst zeitaufwändig heraus.



Abb. 13: Portalanlage mit Roboterarm, beweglich in 8 Achsrichtungen im Werk von Züblin Timber; Foto: Stefan Krötsch



Abb. 14: Damaszenerstahlartige Holzoberfläche durch das dreidimensionale Abfräsen kreuzweise verleimter Brettlagen; Foto: Stefan Mederle

Durch das dreidimensionale Abfräsen kreuzweise miteinander verleimter Brettlagen und Brettsperrholz-Schichten entsteht eine faszinierende damaszenerstahlartige Holzoberfläche, die den Herstellungsprozess eindrucklich dokumentiert. Diese Oberflächenbeschaffenheit spielte in der Produktion der Elemente jedoch ebensowenig eine Rolle wie die Position und Richtung der Decklagen, die Maserung oder Farbigkeit, denn nach dem Herstellen der Geometrie erhielt die Oberfläche eine Lackschicht, um als Betonschalung eine gleichmäßige Oberfläche ohne Schalungsabdruck zu erzeugen. Vor dem Aufbringen der Beschichtung wurden Fehlstellen aus dem Fräsvorgang (Äste, abgebrochene Brettränder, etc.) mit einer Spachtelmasse verfüllt. Für die Lackierarbeiten richtete Züblin Timber im Aichacher Werk eigene Hallenbereiche ein, um autonome Arbeitsabläufe für die Subunternehmer zu ermöglichen. Die Beschichtung ist der Lackierung von Bootsrümpfen entlehnt und besteht aus einer farblosen Grundierung, einer zweilagigen Glasfaserarmierung gegen Rissbildung und einer farblosen Deckschicht auf Polyurethan-Basis. Nach dem Aushärten ist dieser Lack relativ robust und stoßfest und schützte die Schalungselemente außerdem vor Witterung bei Lagerung im Freien. Zusätzlich zur Lackierung wurden die Elemente zuletzt mit einer grauen Deckfarbe (PUR-Lack) beschichtet, um eine optisch homogene Oberfläche herzustellen, auf der Beschädigungen nach Reinigung nach einem Betoniervorgang augenscheinlich sichtbar sein sollten. Denn einige der mehrfach verwendeten Schalungselemente (Kelchstützen-/Schwindgassenschalungen) mussten während des Baufortschritts nach Beschädigungen ausgebessert werden, um die gewünschte Schalungsqualität zu beizubehalten.



Abb. 15: links: Grundierung der Schaloberfläche, rechts: Zweilagige Glasfaserarmierung und Beschichtung unter temporärer Abdeckung (weisses Tuch mit roten Streifen); Foto: Stefan Krötsch



Abb. 16: Vordergrund: Verspachtelung von Unregelmäßigkeiten in der Oberfläche

Hintergrund: beheizte Abdeckung zum gleichmäßigen Aushärten der Lackschicht; Foto: Stefan Krötsch

2.3 Sicherung der Schalungselemente

Eine der besonderen Herausforderungen des Forschungsprojekts bestand in dem Umstand, dass während der Projektlaufzeit von November 2022 bis Juni 2024 der Rohbau des Stuttgarter Hauptbahnhofs schon fortgeschritten war und schnell voranschritt – und damit laufend Schalungselemente - Gegenstände des Forschungsprojekts - zur Entsorgung anstanden. Denn die Lagerfläche für nicht mehr benötigte Schalungen auf der Baustelle war äußerst begrenzt. Mit der Entsorgung jedoch wäre die Untersuchung einer möglichen Nachnutzung obsolet geworden.

Zwar gab es detaillierte Zeitpläne von Züblin Timber, die dem Forschungsteam bereits vor Projektbeginn im Juli 2022 zur Verfügung gestellt wurden und die Lieferung und Einsatz der Schalungselemente angaben. In der Praxis wich der Baufortschritt davon aber teils erheblich ab. Außerdem hatte die Bauleitung in Stuttgart keine detaillierten Informationen, ob nicht mehr benötigte Schalungselemente noch auf der Baustelle gelagert waren oder bereits entsorgt.



Abb. 17: Für das Forschungsprojekt deutlich mit dem Schriftzug „KONSTANZ“ markierte Elemente auf der Baustelle Stuttgart 21; Fotos: Roman Kreuzer

2.3.1 Bestandsaufnahme

Im Januar 2023 führte das Forschungsteam eine Bestandsaufnahme auf der Baustelle durch, um zuverlässig zu ermitteln, auf Basis welcher Elemente Entwürfe erarbeitet werden könnten. Sobald verwendbare Elemente identifiziert waren, wurde Züblin darüber informiert, um die Schalungsteile zu lagern und nicht zu entsorgen. Nachdem die Arbeiter auf der Baustelle jedoch oft routinemäßig daran gewöhnt waren, nicht mehr benötigte Elemente in kleinere Teile zu zersägen, gingen auch dann noch einige bereits einplante Elemente verloren. Selbst nachdem ab August 2023 Roman Kreuzer die jeweils zu Verwendung ermittelten Teile deutlich markieren ließ, gingen Elemente verloren, die bereits in Entwürfen verplant waren.

2.3.2 Vorgehensweise bei der Sicherung

Nachdem die logistischen Probleme Anfang 2023 erkannt wurden, erörterten Forschungsteam und Fördergeber die Möglichkeit, ein Grundstück in Baustellennähe anzumieten, um dort eine Bauteilbörse für die Schalungselemente einzurichten. Dadurch hätten ggf. sämtliche Elemente erhalten werden können. Nachdem aber bei weitem nicht abzusehen war, ob auch ein Großteil der geometrisch sehr speziellen Teile sich zur Weiterverwendung als Bauteil eignen würde, wurde das Risiko, die Elemente auf absehbare nicht verwenden zu können als zu kostspielig eingeschätzt. Denn auf diese Weise hätte sowohl der Transport als auch die Lagerung (Grundstücksmiete) und Sicherung (Überdachung/Abdeckung) zu sehr hohen Kosten führen können.

Letztendlich wurde folgendes Vorgehen vereinbart:

- Erarbeiten von Entwürfen, so dass projektspezifisch eine Auswahl von Schalungselementen ermittelt werden kann.
- Markierung der Elemente und Lagerung abseits der zu entsorgenden Elemente auf der Baustelle bis der Abtransport organisiert werden kann.
- Vermittlung der ausgewählten Elemente an potentielle Bauherren, die die Schalungsteile auf einem eigene Grundstück lagern (optimaler Weise das Baugrundstück des neuen Projekts).

Bereits vor dem offiziellen Projektbeginn wurde das Forschungsteam im Juni 2022 von Züblin Timber informiert, dass 52 HKT-Elemente (Schalungen der seitlichen Bahnhofswände) bis Ende August entsorgt werden müssen. In Probeentwürfen stellten sich diese Elemente als besonders gut geeignet heraus. Daher liess sich die Stadt Mannheim davon überzeugen, 18 dieser HKT-Elemente nach Mannheim zu transportieren und dort einzulagern für eine zukünftige Umsetzung eines Multifunktionsgebäudes von ca. 120 m² BGF, dessen Raumgeo-

metrie bewusst nutzungsneutral gestaltet war, nachdem in der Kürze der Zeit noch keine konkrete Nutzung festgestellt werden konnte. Der Abtransport erfolgte im Oktober 2022.

Zu Beginn des Forschungsprojekts existierten noch alle drei Schalsätze der Wanderschaltungen der Kelchstützen des Stuttgarter Hauptbahnhofs, die auch gleichzeitig die ikonographischsten Elemente darstellen. Daher wurden für Unterschaltungen der Kelche im Forschungsprojekt bereits ab Februar 2023 neue Nutzungsmöglichkeiten entwickelt. Nachdem dann bereits im Mai 2023 ein potentieller Bauherr gefunden werden konnte und im Juli 2023 die Finanzierung des Projekts durch die Stadt Stuttgart feststand, konnten der Abtransport der Elemente relativ einfach organisiert werden. Zu diesem Zeitpunkt waren noch zwei vollständige Schalsätze mit insgesamt 14 Elementen pro Ring (innerster/zweitinnerster Ring der Unterschaltungen) vorhanden. Jeweils 12 waren für die Verwendung im Reallabor und jeweils zwei für die Durchführung zerstörender Untersuchungen vorgesehen. Doch obwohl diese Elemente mit der Markierungsaufschrift „KONSTANZ“ versehen waren, gingen vier Elemente des inneren Rings verloren, die versehentlich zersägt und entsorgt wurden.

Eine Anfrage der Stadt Marbach für die Umsetzung einer Fahrradüberdachung aus Schalungselementen scheiterten Anfang 2023 daran, dass mehrfach die eingeplanten Elemente verloren gingen, beispielsweise durch die Entsorgung eines der Schalsätze der Kelchschalungen, von dem das Forschungsprojekt nicht in Kenntnis gesetzt wurde (siehe Kapitel 7.3). Letztendlich wurden die Elemente der letzten betonierten Schwindgasse (Deckenbereich zwischen den Kelchstützen) für das Reallabor Marbach verwendet, die ab Mai 2024 in Ingersheim zwischengelagert und im August 2024 nach Marbach transportiert wurden.



Abb. 18: links: Element U_8_C - „Hutzenschalung“; Foto: Stefan Krötsch; rechts: Entwurf zur Verwendung der „Hutzenschalung“, Stuttgart 210

Das geometrisch komplexeste Schalungselement ist die sogenannte „Hutzenschalung“ (U_8_C). Dieses besondere Element sollte unbedingt gesichert werden. Daher entwickelte das Forschungsteam einen Entwurf speziell zur Verwendung dieses Elements, indem es mit einem weiteren Element kombiniert verwendete. Als potentieller Bauherr fand sich die Gemeinde Ingersheim. Als die beiden Elemente Ende 2023 abtransportiert werden sollten, stellte sich heraus, dass sämtliche „Hutzenschalungen“ bereits entsorgt waren.

Inzwischen waren fast alle im Forschungsprojekt untersuchten Elemente entweder gesichert, entsorgt oder als ungeeignet identifiziert. Nachdem die Gemeinde Ingersheim sich jedoch sehr engagiert um die Umsetzung eines Reallabors beworben hatte, untersuchte das Projektteam weitere Entwürfe mit den noch vorhandenen Elementen. Für die Schalung des Zugangs zum südlichen Fußgängerausgang des Bahnhofs, die aufgrund ihrer Geometrie, Größe und der Tatsache, dass sie nur mit erheblichem Aufwand zu transportieren wären, eigentlich als für ein Reallabor ungeeignet eingestuft waren, fand sich schließlich eine passende Nutzung. Zusammen mit den Elementen des Marbacher Reallabors und einigen weiteren Teilen wurden sie im Mai 2024 nach Ingersheim transportiert. Wie sich jedoch während der Bauvorbereitung in Ingersheim herausstellen sollte, fehlte eines der eingeplanten Elemente. Nachdem jedoch vorsichtshalber mehr Teile als benötigt, nach Ingersheim gebracht wurden, konnte als Ersatz des fehlenden ein Element ähnlicher Geometrie angepasst und verwendet werden.

2.3.3 Gesicherte Elemente

Insgesamt wurden die folgenden Schalungselemente für eine weitere Verwendung in Reallaboren gesichert:

Reallabor Mannheim:

HKT-N1-3, HKT-N1-2, HKT-N1-1, HKT-N3-6, HKT-N3-5, HKT-N3-4, HKT-N2-4, HKT-N2-5, HKT-N2-6, HKT-N3-1, HKT-N3-2, HKT-N3-3, HKT-N4-2, HKT-N4-1, HKT-N1-4, HKT-N2-3, HKT-N2-2 und HKT-N2-1. Insgesamt 18 Elemente; es wurden sämtliche für den Entwurf eingeplanten Elemente gesichert.

Bauherr: Stadt Mannheim

Transport: September 2022; Finanzierung Transport durch Bauherren

Geplante Umsetzung Reallabor: 2025/26

Lagerung: Gelände in Mannheim; Witterungsschutz durch Planen

Reallabor Stuttgart-Vaihingen:

10 Elemente aus dem zweifachen Satz der Unterschaltung Kelchstützen U-1-A bis U-6-A und U-12-A (innerster Ring); 12 Elemente aus dem aus dem zweifachen Satz der Unterschaltung Kelchstützen U-1-B bis U-6-B und U-12-B (zweitinnerster Ring)

Zusätzlich 3 Elemente U-11-A bzw. U-7-A

Insgesamt ca. 30 Elemente; es wurden bis auf zwei Elemente (U-1-A bis U-6-A) alle für den Entwurf eingeplanten Elemente gesichert. Die fehlenden Elemente können eventuell durch Anpassen von zusätzlichen Elementen (U-11-A bzw. U-07-A) ersetzt werden.

Bauherr: Stadt Stuttgart

Transport: Oktober 2023; Finanzierung Transport durch Projekts Stuttgart 210 - Vorbereitung Reallabore (Fördergeber: MLR BW)

Geplante Umsetzung Reallabor: 2025/2026

Lagerung: Baugrundstück in Stuttgart; Witterungsschutz durch Planen

Reallabor Marbach:

De:7, De:10 (2x), De:12, De:13, De:18, De:20 (je 2x)

Insgesamt 14 Elemente; es wurden alle für den Entwurf eingeplanten Elemente gesichert.

Bauherr: Gemeinde Marbach

Transport: Mai 2024; Finanzierung Transport durch Projekts Stuttgart 210 - Vorbereitung Reallabore (Fördergeber: MLR BW)

Umsetzung Reallabor: 2025

Lagerung: Zwischenlagerung in Ingersheim; Weitertransport nach Marbach 2024

Reallabor Ingersheim:

BA 3-1.1, BA 3-1.2 (2x), BA 3-1.3, BA 3-1.4, BA 3-1.5

BA 4-1.3, BA 4-1.4, BA 4-1.6, BA 5-1.3, BA 5-1.4, BA 5-1.6

Insgesamt 12 Elemente; es wurden bis auf ein Element alle für den Entwurf eingeplanten Elemente gesichert. Das fehlende Element konnte durch Anpassen eines zusätzlichen ersetzt werden.

Bauherr: Gemeinde Ingersheim

Transport: Mai 2024; Finanzierung Transport durch Projekts Stuttgart 210 - Vorbereitung Reallabore (Fördergeber: MLR BW)

Umsetzung Reallabor: Mai bis Oktober 2024

Lagerung: Gelände nahe Baugrundstück in Ingersheim; ohne Witterungsschutz, weil die Anlieferung unmittelbar vor Baubeginn erfolgte.

Hohlkastenträger Nord (HKT-N) - Mannheim -

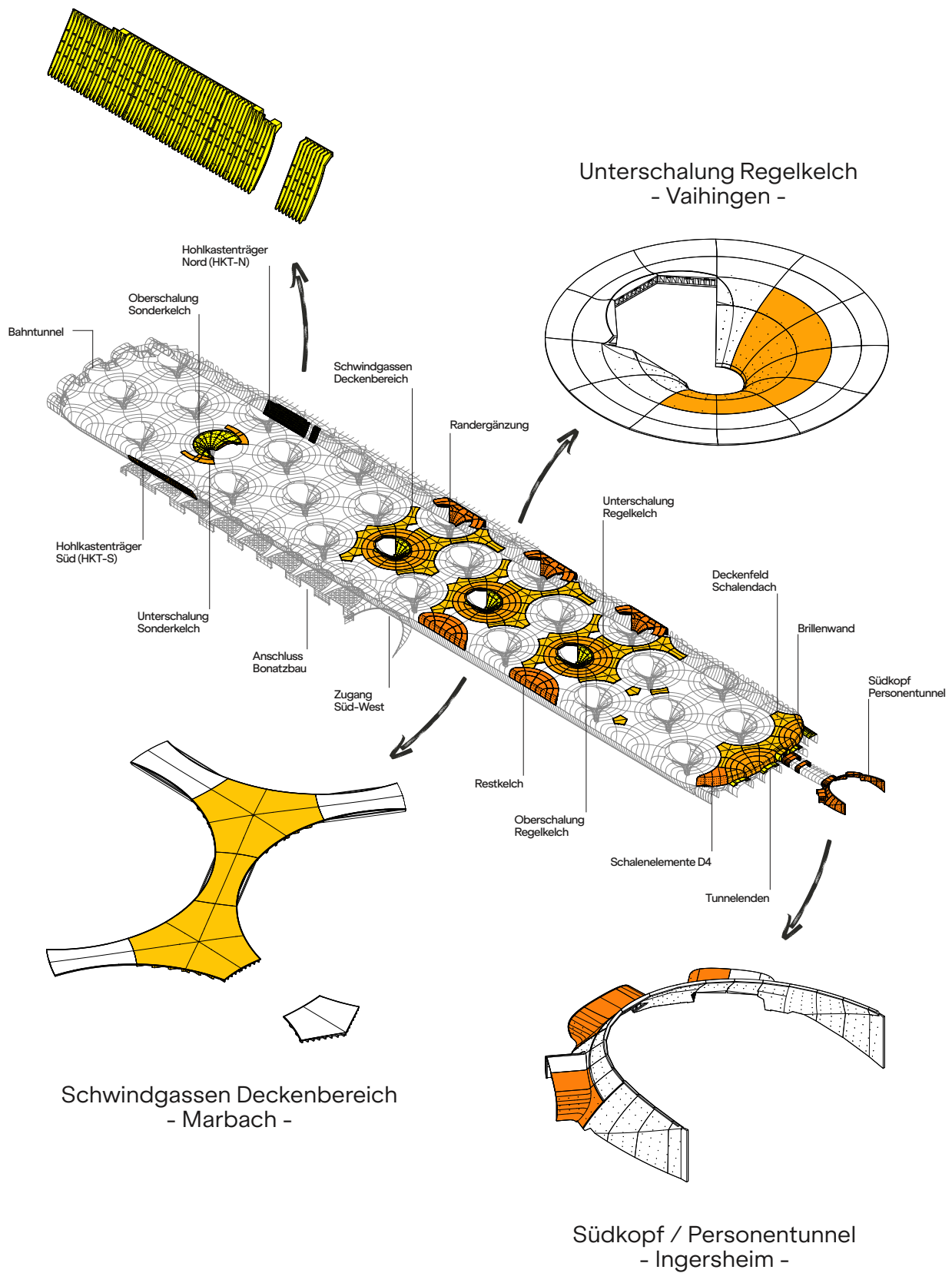


Abb. 19: Herkunft der Schalungselemente der vier Reallabore in Mannheim, Stuttgart-Vaihingen, Marbach und Ingersheim

2.3.4 Erkenntnisse aus der Sicherung der Elemente

Erkenntnisse und Schlussfolgerungen für die Wiederverwendung von Bauteilen hinsichtlich der Baustellenlogistik aus den Erfahrungen des Forschungsprojekts:

- Die Baustellenlogistik (seien es Bauhilfsmittel einer Neubau-Baustelle oder Material aus einer Abbruchbaustelle) spielt eine wesentliche Rolle, um Re-Use-Komponenten verfügbar zu machen. Erhalt, Umgang und Abtransport großer Teile sind von vornherein in den Bauablauf einzuplanen. Das erfordert eine engere Koordination zwischen den verschiedenen Projektbeteiligten. Es muss klar sein, welche Teile wann zur Verfügung stehen und wie sie effizient gelagert und transportiert werden können. Dies bedeutet, dass bereits während der Planungsphase klare Verantwortlichkeiten definiert werden müssen, um Verzögerungen und Missverständnisse zu vermeiden. Eine detaillierte Dokumentation und Nachverfolgung der Bauteile, beispielsweise durch digitale Inventarsysteme (Tracking der Elemente), könnte helfen, den Überblick über verfügbare Materialien zu bewahren. Ansonsten wird die Gewinnung von Re-Use-Komponenten im Bauablauf einen Störfaktor bilden. Dadurch besteht die Gefahr, dass Elemente verloren gehen.
- Ggf. sind gesonderte Lagerflächen oder sogar Zwischenlager vorzusehen. Damit kann die neue Verwendung und die Beschaffung der Re-Use-Komponenten zeitlich entzerrt werden. Eine Zwischenlagerung ist jedoch kostenintensiv (mehrfacher Transport, Lagerkosten) und kann den (beigemessenen) Wert der Elemente mindern.
- Die Handwerker auf der Baustelle müssen sehr genau darüber informiert sein, welche Teile auf welche Art weiterverwendet werden sollen. Das erfordert ein prinzipielles Umdenken für die Wertschätzung gebrauchter Bauteile, damit wesentliche Elemente nicht beschädigt werden oder verloren gehen. Für Großbaustellen wie dem Stuttgarter Hauptbahnhof mit einer sehr heterogenen und internationalen Arbeiterschaft ist das eine Herausforderung.
- Der beste Zeitpunkt, um Bauteile wie Schalungselemente für die Wiederverwendung in Betracht zu ziehen, ist bereits während der Entwurfsphase ihres ersten Lebenszyklus. Im Fall von Schalungselementen sollten Aspekte der späteren Wiederverwendung in den Entwurfs- und Produktionsprozess des ursprünglichen Bauprojekts integriert oder bereits Nachnutzungen entworfen werden. So können Entwurfsentscheidungen getroffen werden, die ihre spätere Wiederverwendung erleichtern – beispielsweise durch standardisierte Maße, modulare Bauweisen oder leicht zu entfernende Beschichtungen. Dadurch wird nicht nur die Nachnutzung erleichtert, sondern auch der Wert der Elemente erhöht.

Aus rechtlicher Sicht ist dabei Folgendes zu beachten (siehe Kapitel 5.1 und Anlage 4):

- Die neue Zweckbestimmung von Re-Use-Bauteilen sollte vor der Eigentumsübertragung feststehen, um zu vermeiden, dass die Bauteile juristisch zu Abfall werden.
- Bei Zwischenlagerung von Bauteilen kann das Eigentum beim Vorbesitzer verbleiben (vgl. Reallabor Stuttgart-Vaihingen), wenn Abtransport und Zwischenlagerung notwendig ist bis eine neue Zweckbestimmung definiert ist.
- Ist die Abfalleigenschaft bereits eingetreten (wurden Bauteile entsorgt, bevor eine neue Nutzung für das Bauteil bestimmt wurde), kann eine Zwischenlagerung mit hohem Aufwand verbunden sein, nachdem das Lager dann rechtlich eine Deponie ist.

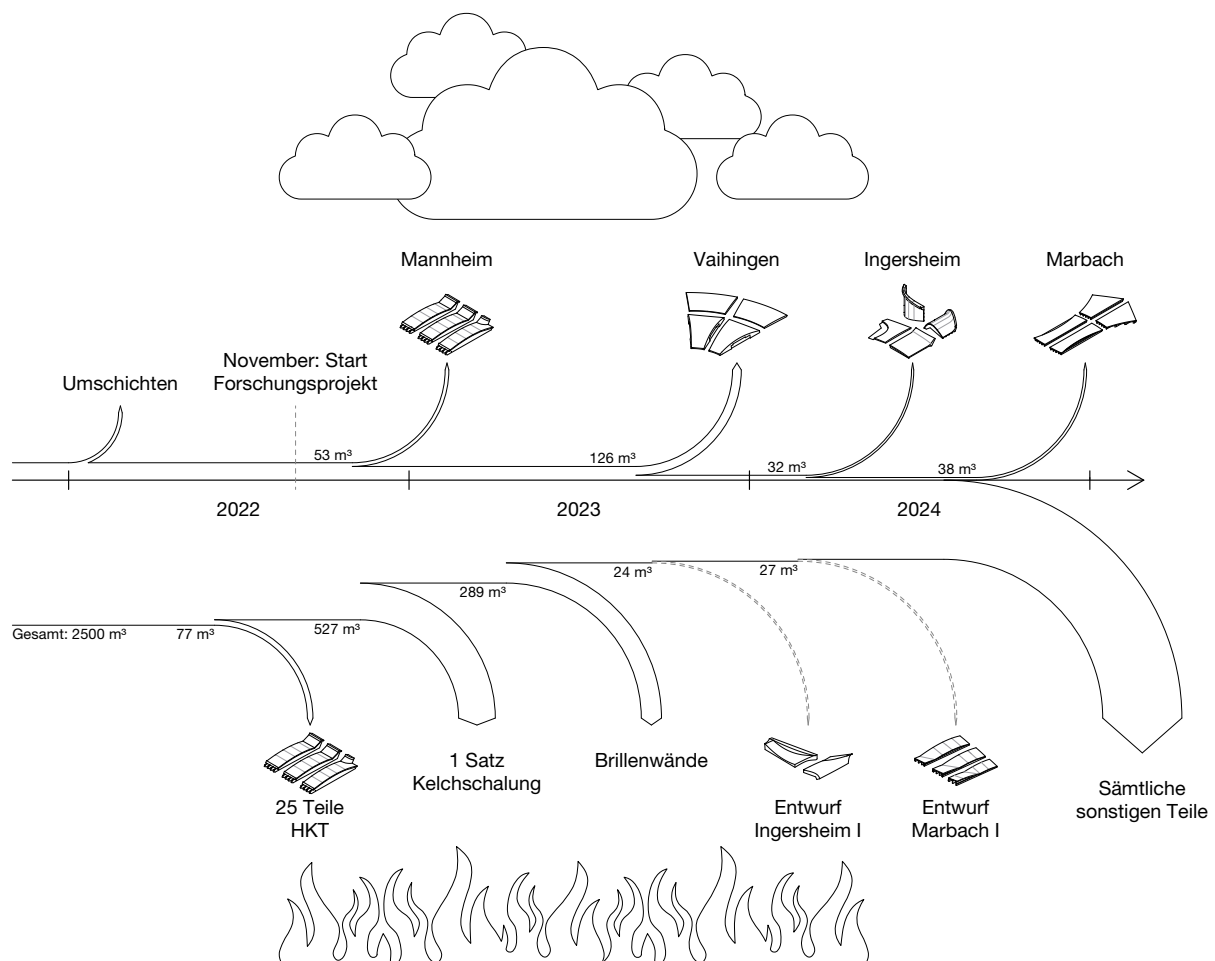


Abb. 20: Stoffströme Forschungsprojekt Stuttgart 210: Mengen der zur Verwendung innen vier Reallaboren gesicherter Schalungselemente (Pfeile nach oben) sowie entsorgter (thermisch verwerteter) Schalungselemente (Pfeile nach unten).

Insgesamt konnten 249 m³ Brettsperrholz für die Reallabore gesichert werden. Das entspricht etwa 10% der Gesamtmenge.

2.4 Tragwerksplanung – relevante Grundlagen

2.4.1 Systematik und Bemessungsgrundlagen

Das Hallentragwerk aus Stahlbeton besteht aus 28 kelchartigen Stützen. Die Betonage eines Regelkelchs wurde in mehrere Abschnitte unterteilt, wofür unterschiedliche Typen von Schalungselementen entwickelt wurden:

- Die synklastisch und antiklastisch gekrümmten Schalungen für den Kelch selbst (Regelkelch, siehe Abb. 22 bis 25).
- Die Schwindgassenelemente verbinden die Kelchstützen in der Höhe ihrer Kränze miteinander (Schwindgassen – Deckenbereich, Abb. 28).
- In Randbereichen wurden Hohlkastenträger aus Stahlbeton ausgeführt, wofür ein weiterer Schalungselementtyp verwendet wurde (HKT, Abb. 29 und 30).
- An den schmalen Rändern gehen sie in eine Trogwand über.

Um die komplexe, doppelt gekrümmte Dachform tragfähig und verformungsarm zu betonieren, wurden die Schalungselemente auf einer Stützkonstruktion aus Stahl mit geringen Stützweiten gelagert. Die Schalungselemente wurden im Wesentlichen aus 200 mm dicken Brettsperrholzplatten aufgebaut. Aufgrund der erforderlichen doppelt gekrümmten Geometrie wurden sie hinsichtlich der Materialeffizienz in Teilbereichen mit Rippen aus Brettsperrholz ergänzt. Dabei wurden folgende Materialeigenschaften zugrunde gelegt:

Festigkeiten [N/mm²]

Biegung	$f_{m,k} = 24$
Zug in Faserrichtung	$f_{t,0,k} = 14$
Zug rechtwinklig zu Faser	$f_{t,90,k} = 0,4$
Druck in Faserrichtung	$f_{c,0,k} = 21$
Druck rechtwinklig zur Faser	$f_{c,90,k} = 2,5$
Schub	$f_{v,k} = 2,0$
	(unter Berücksichtigung k_{cr})
Rollschub	$f_{R,k} = 1,0^{1)}$

Steifigkeiten [N/mm²]

E-Modul in Faserrichtung	$E_{0,mean} = 11.000$
Schubmodul	$G_{mean} = 690$
Rollschubmodul	$G_{R,mean} = 50^{2)}$

Rohdichte [kg/m³]

$$\rho_k = 350 \frac{kg}{m^3}$$

Die Materialeigenschaften entsprechen der DIN EN 338:2010-02 und wurden in Verbindung mit

- DIN EN 1995-1-1/NA:2013-08: NCI NA.9.3.1 (NA.3)
- DIN EN 1995-1-1/NA:2013-08: NCI NA.5.6.1 (NA.4) und hiervon abweichend wird Bezug auf abZ Z-9.1-501 (LENO Brettsperrholz), Absatz 3.2 für die Querlagen angenommen.
- Die zugrundeliegenden Berechnungsvorschriften und Zulassungen umfassten:
 - DIN EN 1990:2010-12; 1990/NA 2010-12 [9]

Grundlagen der Tragwerksplanung

- DIN EN 1991-1-1; 1991-1/NA A1 2015-05 [10]

Einwirkungen auf Tragwerke

- DIN EN 1995-1-1:2010-12; 1995-1-1/NA 2013-08 [11]

Bemessung und Konstruktion von Holzbauten

- DIN EN 338:2016-07 [12]

Bauholz für tragende Zwecke – Festigkeitsklassen

- DIN EN 12812: 2008-12 [13]

Traggerüste – Anforderungen, Bemessung und Entwurf

- LENO Brettsperrholz abZ Z-9.1-501 [14]
- Selbstbohrende Schrauben als Holzverbindungsmitel ETA-11/0190 [15]

Während der Betonage der Regelkelch wurden auf Basis der Frischbetoneigenschaften und des hydrostatischen Drucks die Steiggeschwindigkeiten des Betons gemessen und die maßgebenden Schalungsdrücke sowie die Ankerkräfte ermittelt.

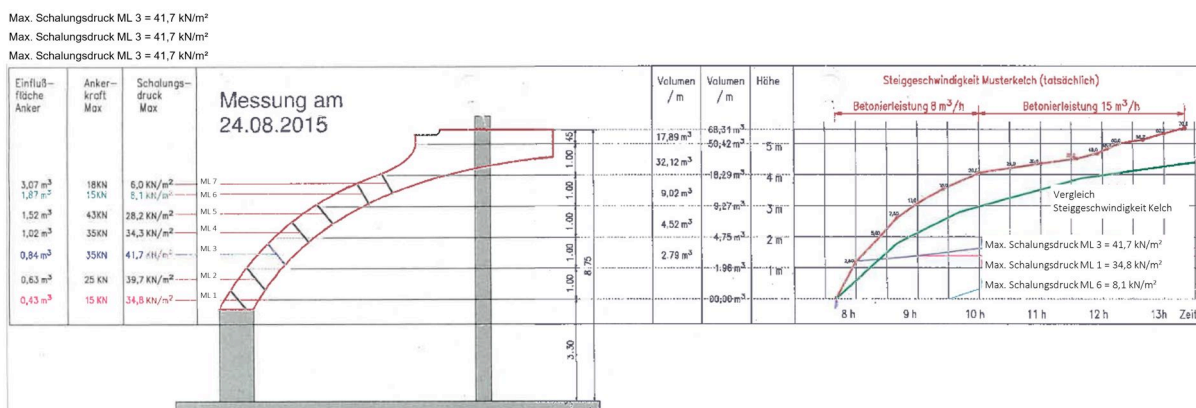


Abb. 21: Regelkelch – Messungen während der Betonage (Betoniergeschwindigkeit und Schalungsdruck), aus [16]

Diese hilfreichen Informationen dienen als Grundlage für die Ansätze der Materialeigenschaften, für die Potentialanalyse (siehe Kapitel 2.4.5) und für die Tragwerksplanung der Reallabore.

Im Folgenden werden die drei Typen der Schalungen (Regelkelch- und Schwindgassen- und Hohlkastenträgerelemente) detaillierter beschrieben, die für die Umsetzung der Reallabore verfügbar und besonders geeignet sind.

2.4.2 Regelkelchelemente

Der Schalsatz eines Regelkelchs besteht aus drei Teilen: den Schalen des Kelchfußes, der Ober- und der Unterschaltung. Jeder dieser Teile besteht aus mehreren Elementen, die zusammengefügt das Negativ einer Regelkelchstütze bilden. Beim Einbringen des Frischbetons werden Lasten auf die Elemente ausgeübt. Im Folgenden werden die Lasten auf die Unterschaltung sowie die Elementquerschnitte beschrieben.

Regelkelch - Bereich A

Die Elemente des aufgehenden Bereichs A bestehen aus mehreren statisch wirksamen Teilquerschnitten. Der Teilquerschnitt 1 setzt sich zusammen aus abwechselnd angeordneten 8x20 mm BSP-Lagen, von denen sich auf der Unterseite zwei Längslagen befinden. Somit handelt es sich um einen nicht geregelten Aufbau. Bemessen wurde dieser Aufbau jedoch mit dem geregelten Leno-160-Querschnitt. Darauf folgen vier Mal der Teilquerschnitt 2 mit 5 x 20 mm BSP-Lagen in wechselnder Faserrichtung (außen Längslagen). Darüber hinaus verfügen die Elemente im Feldbereich über hochkant stehende Rippen (Teilquerschnitt 3), die aus geregelten Leno-160-Querschnitten gefertigt und bemessen wurden. Diese sind 220 mm hoch.

Alle drei Teilquerschnitte wurden in der Bemessung einzeln betrachtet. Dabei blieb ihre Lagerung im wesentlichen unverändert: Entlang der Rippen wurden über die Längsachse der Elemente in Abständen von ca. einem Meter Punktlager gesetzt. Die angesetzten Lastfälle waren das Eigengewicht der tragenden Konstruktion sowie der Frischbetondruck als veränderliche Last. In den Teilquerschnitten 1 und 2 wurden Flächenlasten von 80 kN/m² angesetzt, die sich aus der beschriebenen Ermittlung ergaben. Auf die Rippen wurde entsprechend eine Linienlast von bis zu 52 kN/m angesetzt. Bemessungsrelevant waren die Rippen,

die im Grenzzustand der Tragfähigkeit (GZT) eine maximale Ausnutzung von 70 % der Schubbeanspruchung erfuhren. Im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit wurden die Verformungen dieser Elemente auf 1,5 mm begrenzt.

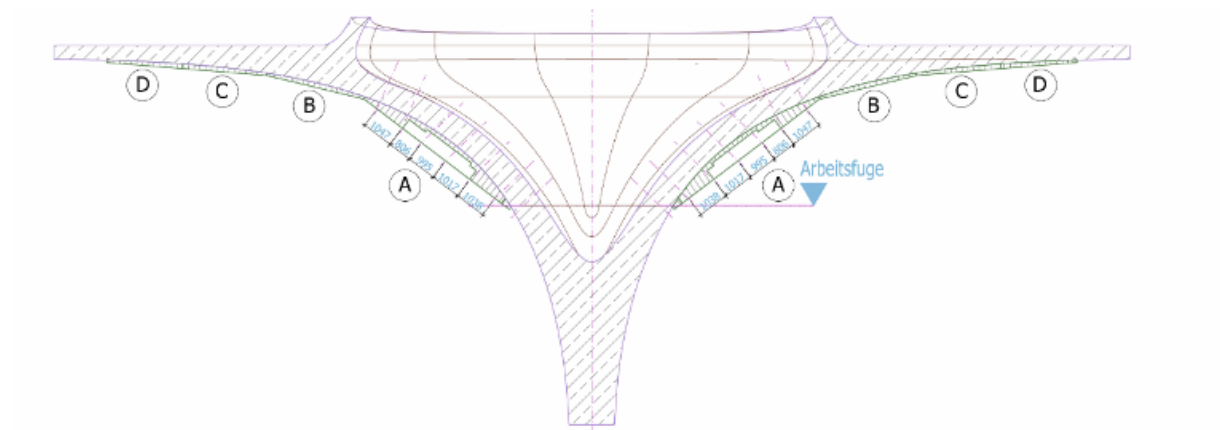


Abb. 22: Regelkelchgeometrie – Schnitt A-A /Querschnitt [16]

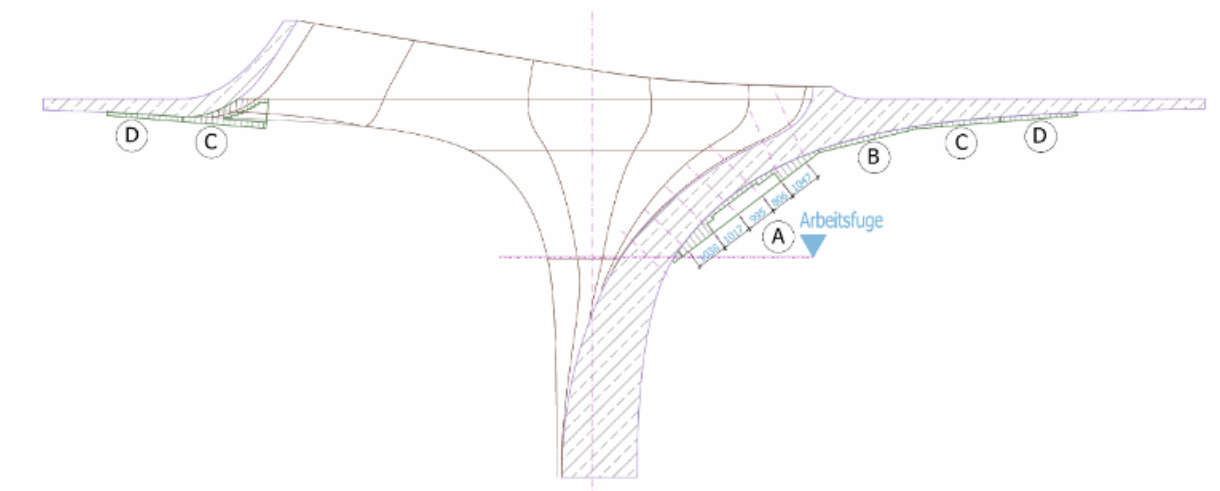


Abb. 23: Regelkelchgeometrie – Schnitt B-B/Längsschnitt [16]

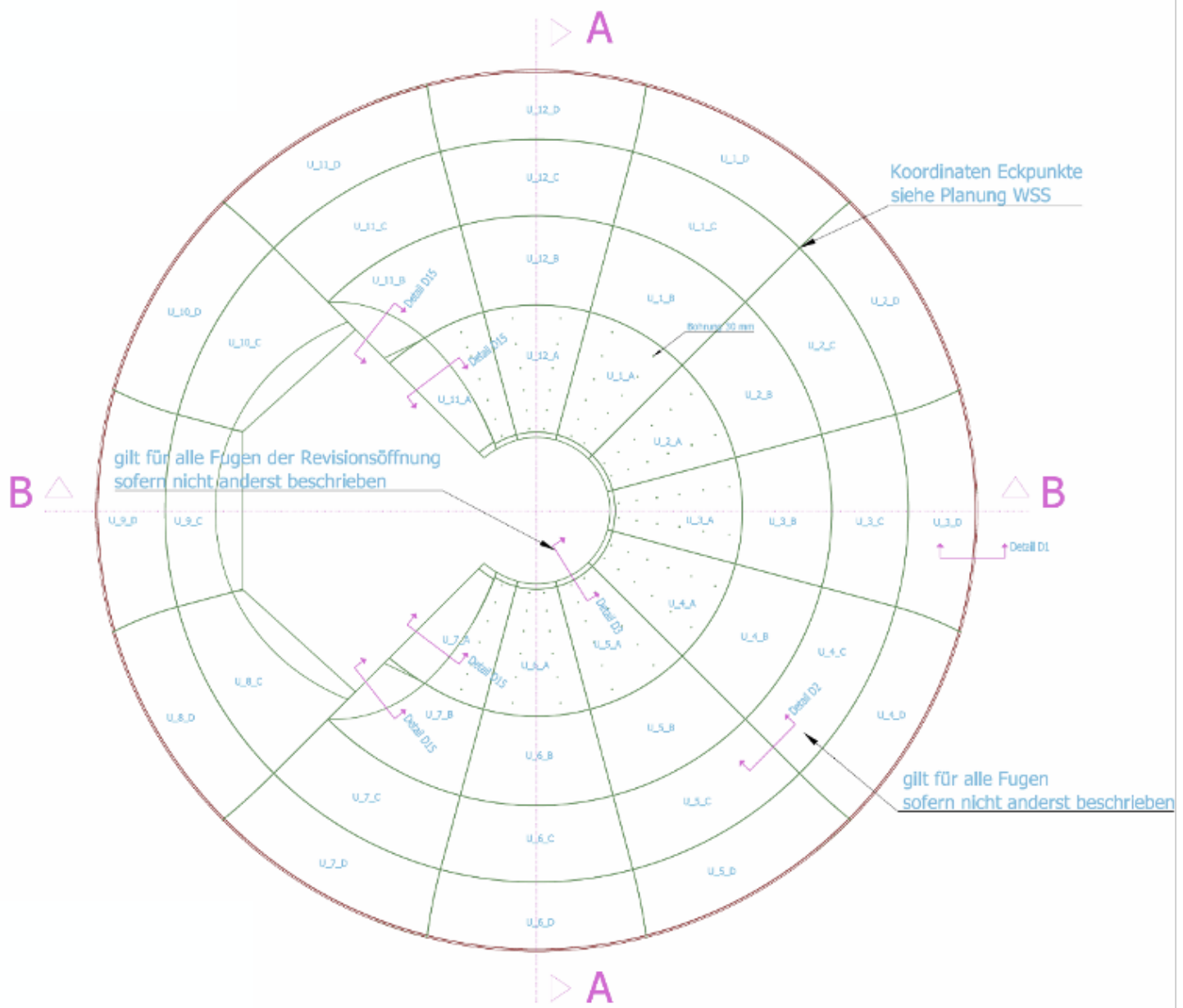


Abb. 24: Regelkelchgeometrie – Draufsicht [16]

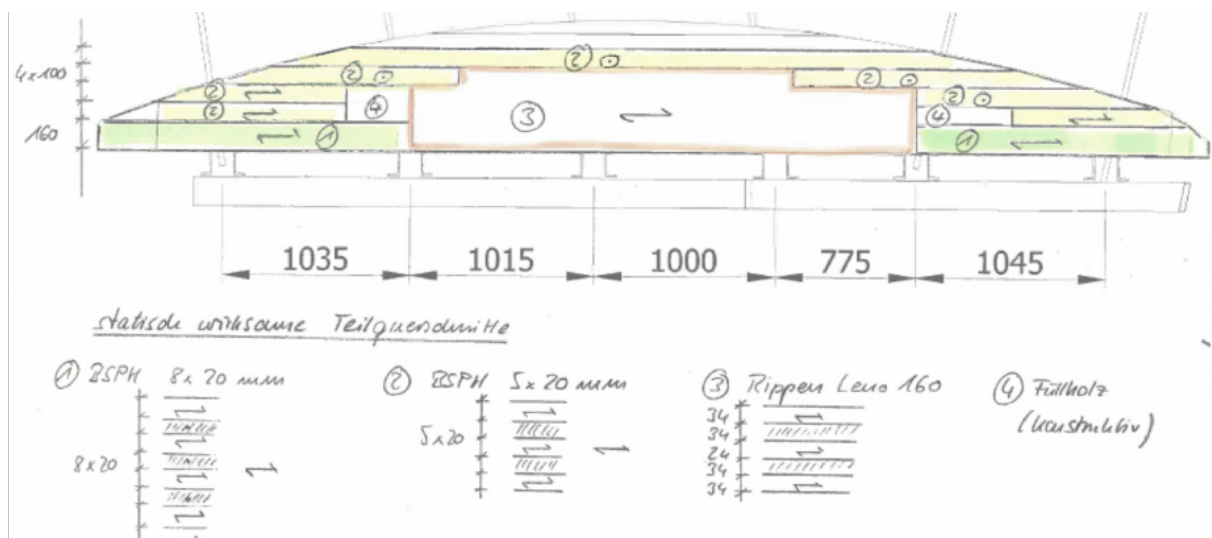


Abb. 25: Regelkelch – Teilbereich A, statisch wirksame Teilquerschnitte der Unterschalung [16]



Abb. 26: Regelkelch-Bereich A, Schalungselement gelagert auf der Baustelle in Stuttgart, Foto: Tim Siemens

Regelkelch - Bereiche B, C und D



Abb. 27: Schalungselement Regelkelch-Bereich B, gelagert auf der Baustelle in Stuttgart; Foto: Roman Kreuzer

Nach der Betonage des Bereichs A folgten die Bereiche B bis D. Diese Elemente weisen eine Dicke von mindestens 80 mm auf und wurden daher mit einem Querschnitt von 4 x 20 mm (Leno 80) bemessen. Jedes Element wurde entlang fünf längs verlaufender Achsen auf je zwei U140-Stahlprofilen gelagert, die als Stützkonstruktion der Schalung dienten. Unterhalb dieser Profile wurden Punktlager anhand der Position der Schalstützen definiert. Diese befanden sich in der mittleren Querachse des Elements sowie jeweils links und rechts davon

im Abstand von ca. 0,5 m vom Rand entfernt. Neben der Eigenlast wurde das Element mit einer Last von 45 kN/m^2 aus dem Betondruck beansprucht. Da sich unter der Platte die Stützträger befanden, konnten diese die Lasten abfangen. Sie wurden zusätzlich bemessen, sind für die Betrachtung der Schalungselemente an dieser Stelle aber irrelevant. Die Schalungselemente erfuhren bei der beschriebenen Belastung im Grenzzustand der Tragfähigkeit Ausnutzungen von bis zu 90 % im Nachweis der Schubspannungen und im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit maximale Durchbiegung von 2 mm.

2.4.3 Schwindgassenelemente

Diese Elemente wurden mit einer oberseitigen, vierlagigen LENO-80-Platte berechnet, die in ihrem tatsächlichen Aufbau jedoch bis zu 170 mm stark ist. Darunter befinden sich jeweils sechs hochkant aufgestellte LENO-80-Rippen mit einem Abstand von ca. 400 mm und einer Höhe von 220 mm.

Im Gegensatz zu den festgelegten Stützpunkten der vorherigen Elemente wurden diese unter Berücksichtigung des Bauverlaufs für mehrere Bauzustände betrachtet. Da den Tragwerksplanern die genaue Anordnung der Rippen zunächst nicht bekannt war, wurden sie in einer Grenzwertbetrachtung quer, schräg und schließlich längs zur Bauteilachse modelliert. Im Falle der längs angeordneten Rippen wurden punktuelle Lager im Abstand von 1,5 m angeordnet. Dabei wurden die Felder zusätzlich zum Eigengewicht mit einer konstanten Flächenlast von $12,5 \text{ kN/m}^2$ belastet. Daraus ergab sich im Grenzzustand der Tragfähigkeit lediglich eine nennenswerte Ausnutzung von 50 % im Nachweis der Normalspannungen in Faserrichtung der Platte. Maßgebend waren auch hier wieder die Rippen, die zu 85 % im Nachweis der Schubspannung ausgenutzt wurden.

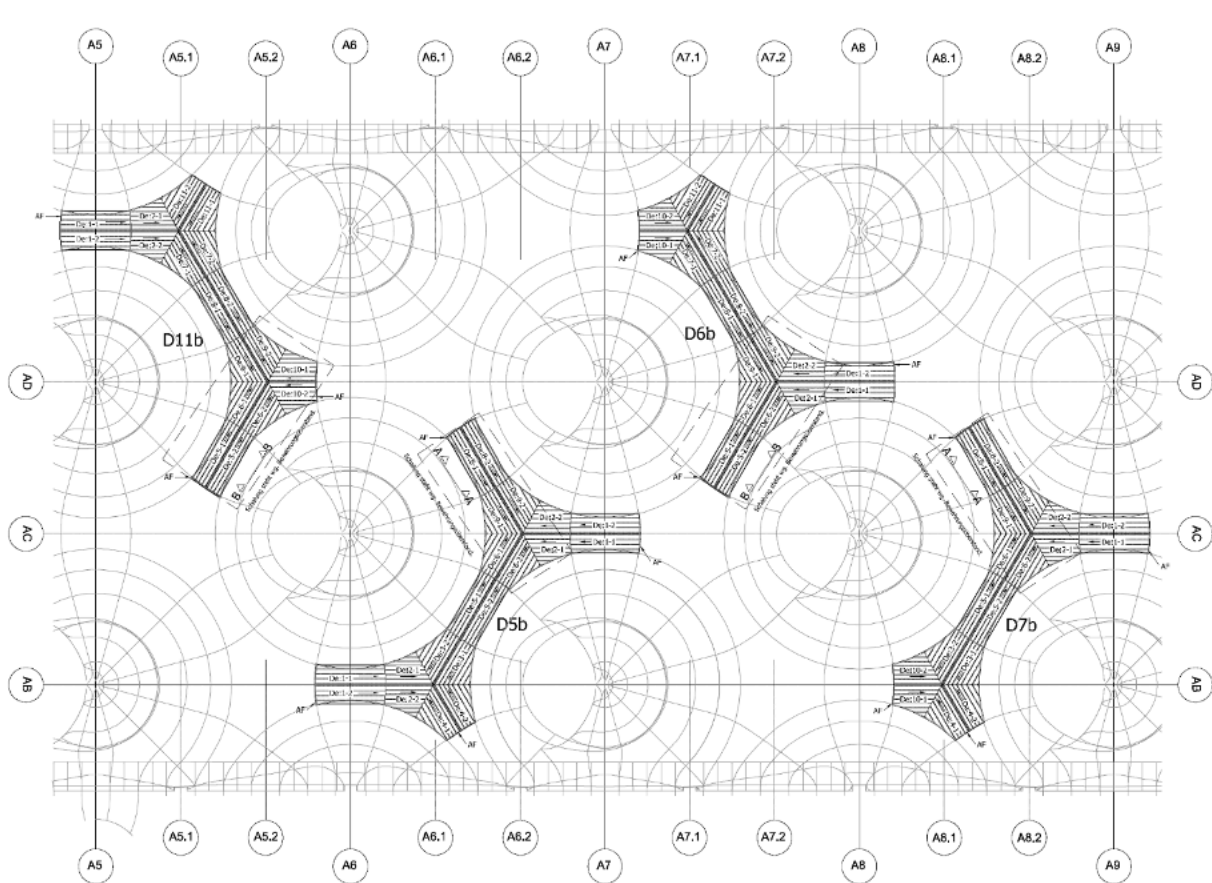


Abb. 28: Schwindgassenelemente, aus [16]

2.4.4 Hohlkastenträgerelemente

Da auch hier die Querschnitte der Bauteile keine konstanten Größen aufwiesen, wurde die Bemessung mit den kleinsten Abmessungen vorgenommen. Dabei wurde ebenso mit einer Schalhaut des Typs LENO 80 gerechnet. Die unterseitigen Rippen wurden hochkant mit einem 5x20-lagigen LENO 100 verbaut. Jedes HKT-Element weist vier Rippen mit einer durchschnittlichen Höhe von 600 mm und einem Abstand zueinander von 750 mm auf. Die Rippen sind zudem mit zusätzlichen Querschotten ausgestattet.

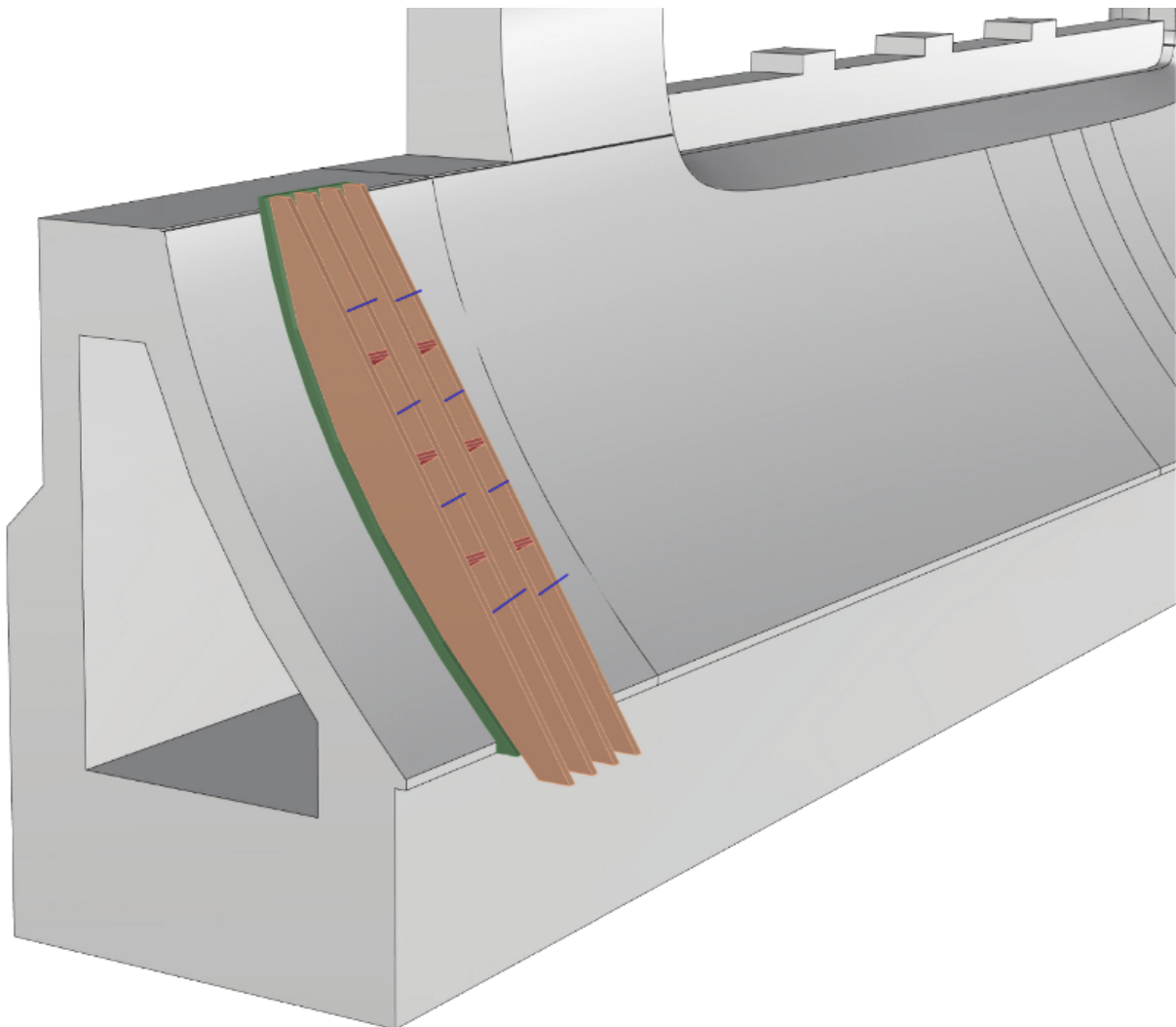


Abb. 29: HKT-Element als Schalung der Bahnhofs-Seitenwand; Zeichnung: Züblin Timber

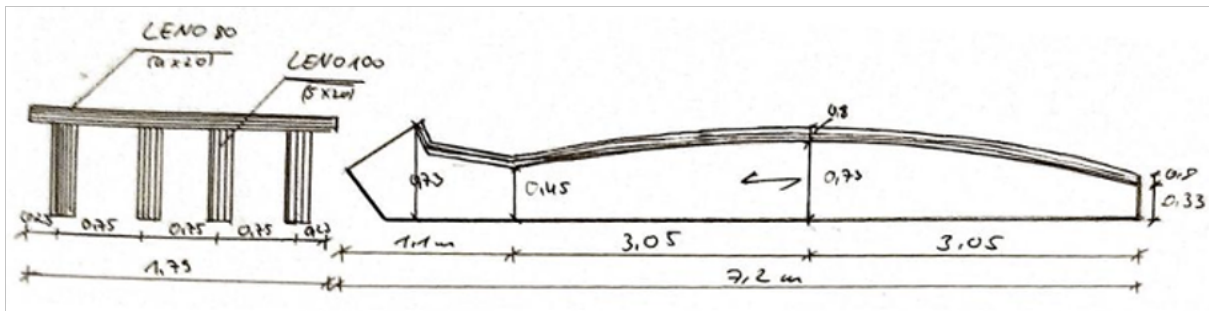


Abb. 30: HKT-Element Querschnitt und Geometrie, aus [16]

Die HKT-Elemente wurden in ihren Viertelpunkten mit je zwei querverlaufenden U140 Profilen versehen. An den Knotenpunkten wurden somit an jeder Rippe Punktlager im Abstand von ca. 1 m gesetzt. Entsprechend der Lastannahmen für den Frischbetondruck wurde auf die Elemente eine konstante Flächenlast von 80 kN/m^2 ausgeübt. In Kombination mit der Eigenlast erfuhr die oberseitige Platte eine maximale Ausnutzung der Schubspannungen von 60% und maximale Durchbiegungen von 1,5 mm. Die Rippen erfuhren zudem ebenso eine Ausnutzung von 60% im Nachweis der Schubspannungen.

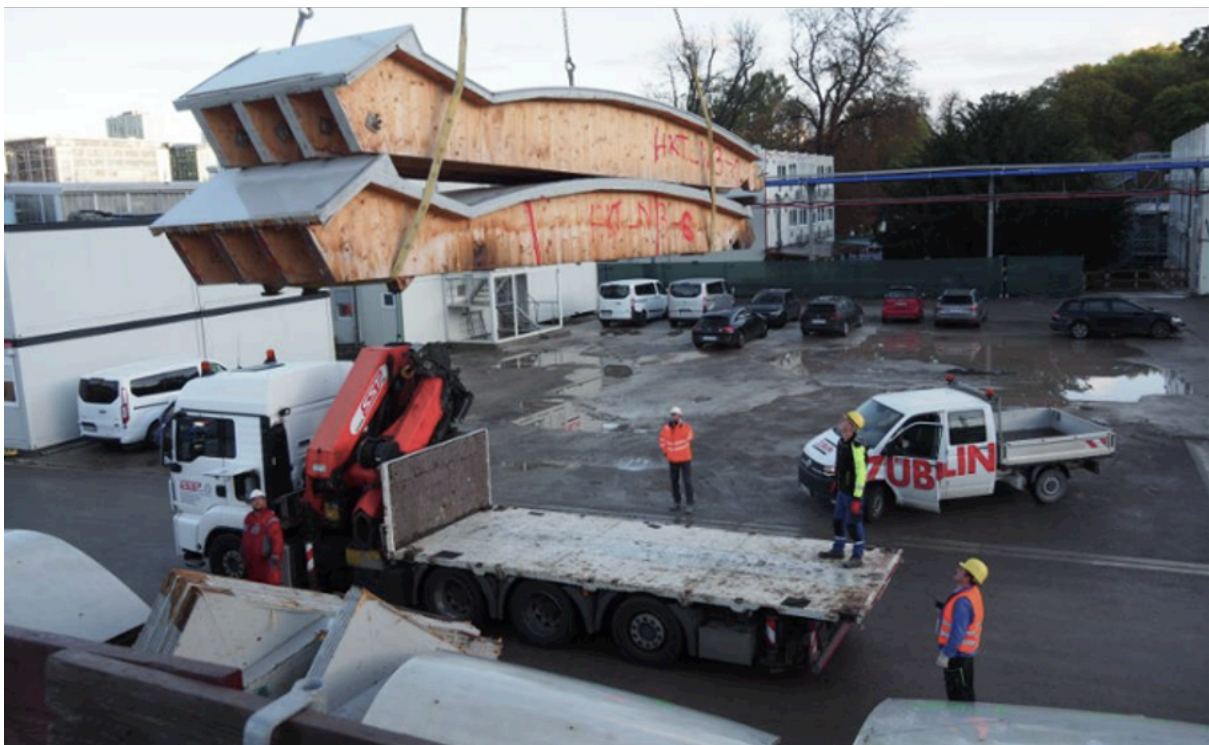


Abb. 31: Schalungselement Hohlkastenträger (HKT) bei der Verladung zum Abtransport, Foto: Tatjana Dürr

2.4.5 Potenziale im Hochbau - Parameterstudie

Die von Züblin Timber erarbeiteten Unterlagen zeigen eindeutig, dass die Elemente passgenau als Schalung geplant und eingesetzt wurden, um die hohen Anforderungen der Schal- und Betonierarbeiten zu erfüllen. Die Einwirkungen des Betondrucks konnten von den Elementen gut aufgenommen und sicher an die Sekundärkonstruktion weitergeleitet werden. Dabei wurden die Tragfähigkeiten der Elemente nicht vollständig ausgenutzt. Hinsichtlich der Gebrauchstauglichkeit wurden besonders strenge Grenzwerte für Verformungen festgelegt und eingehalten.

Auf dieser Grundlage sind Potenziale für die Wiederverwendung dieser Elemente als tragende Bauteile im Hochbau zu erwarten. Zwar werden die Elemente dort für weitere Stützweiten eingesetzt, sie sind jedoch weitaus geringeren Belastungen ausgesetzt.

Um die prinzipielle Eignung der Schalungselemente als Tragwerkselemente vorab einschätzen zu können, wurden einfache Parameterstudien mit den für den Hochbau typischen Einwirkungen und Stützweiten für die zuvor beschriebenen Schalungstypen durchgeführt (siehe Anlage 3).

Die Ergebnisse zeigen, dass die Schalungselemente auch nach ihrer ursprünglichen Nutzung noch Potenzial für eine Wiederverwendung im Hochbau aufweisen. Dabei können sie bei passender Stützweite und geeignetem Tragwerk die im Hochbau üblichen Nutz- und Ausbaulasten zusätzlich zu ihrem Eigengewicht aufnehmen. Unter Berücksichtigung der Ausnutzungen der maßgebenden Bauteile von 50, 75 und 100 % kann zudem abgeschätzt werden, mit welchen Tragfähigkeitsreserven die Elemente verwendet werden könnten. Da Schädigungen aus dem Bauablauf oder der Lagerung jedoch nicht auszuschließen sind, müssen die Elemente vorab einer Sichtprüfung unterzogen werden. Ausgehend davon sind Tragfähigkeitsverluste zu berücksichtigen, beispielsweise durch die Wahl eines abgemindernden Modifikationsbeiwerts k_{mod} oder durch die Reduzierung der Festigkeiten und Steifigkeiten.

Bei der Bemessung der kombinierten Elemente aus oberseitiger Schalhaut (Platte) und unterseitigen Rippen waren die Nachweise der Rippen ausschlaggebend. Da diese hochkant angeordnet wurden, weisen sie nicht die hohen Tragfähigkeiten einer hauptsächlich auf Biegung beanspruchten Platte auf, sondern erfahren neben Biegemomenten auch hohe Schubspannungen. Zudem ist anzumerken, dass gemäß abZ Z-9.1-501 für hochkant ange-

ordnete Träger mindere Festigkeiten anzusetzen sind, um die effektiven Querschnittsanteile zu berücksichtigen.

Zur weiteren Erläuterung werden nun die Parameter der Vorbemessungstabellen für LENO-Brettsper Holz mit denen der US-A-Elemente verglichen. Die Bereich-A-Elemente können bei einer zweifeldrigen Ausführung bis zu 5 kN/m^2 aufnehmen. Ein LENO-100-Querschnitt kann im Vergleich dazu bei Stützweiten von je 3 m ebenso bis zu 5 kN/m^2 aufnehmen. Ein Einfeldträger mit einer Stützweite von 6 m und derselben Last erfordert hingegen einen LENO-100-Querschnitt. Hier wird ein LENO-230-Querschnitt benötigt. Aufgrund der zusätzlich statisch wirksamen Teilquerschnitte der US-Elemente ist jedoch davon auszugehen, dass diese in ihrer Wirkung ähnlich zu diesem Querschnitt sind.

3. Entwurfsprozess

Das Verwenden komplexer, vorgegebener Bauteile erfordert es, den Entwurfsprozess in der Architektur neu zu denken und zu strukturieren. Üblicher Weise steht die Funktion des Gebäudes am Ausgangspunkt der Entwurfsüberlegungen, zu einem späteren Zeitpunkt folgt eine möglichst entwurfsgerechte Materialisierung. Bei der Verwendung der Schalungselemente dreht sich dieser Prozess um: Die Re-Use-Komponenten als Primärtragwerk prägen von Anfang die Möglichkeiten des Raumentwurfs. Um auch das gestalterische Potential der Elemente ausnutzen zu können, wurde die einzigartige Geometrie der Schalungselemente zum bestimmenden Parameter.

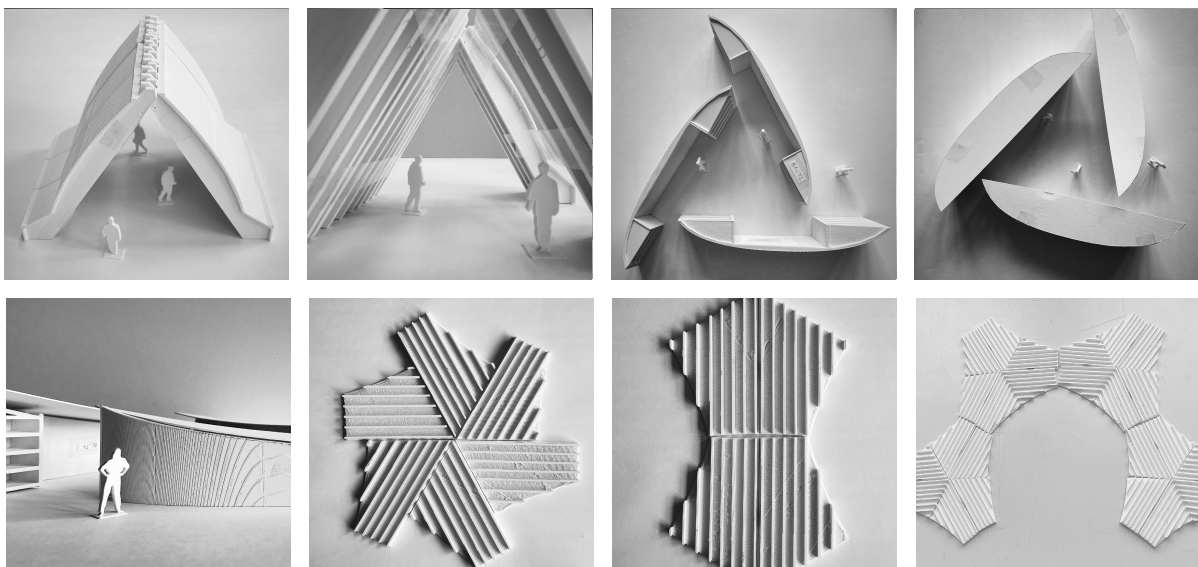


Abb. 32: Modellstudien zur Verwendung der Schalungselemente

Erster Entwurf vorab

Bereits im Oktober 2022 - vor dem eigentlichen Projektbeginn - waren Elemente (HKT-Elemente) nach Mannheim transportiert worden, die sonst entsorgt worden wären. Auf Anfrage der Referentin für Baukultur der Stadt Mannheim, Tatjana Dürr, hatte das Forschungsteam vorab Probeentwürfe erarbeitet und mit Innenraum-Visualisierungen dargestellt (Abb. 32/33), um die Entscheidung herbeizuführen, ob und wie viele der damals zur Entsorgung vorgesehenen HKT-Elemente nach Mannheim transportiert werden sollten. Dieser Entwurf musste unter sehr großem Zeitdruck erfolgen, denn wie in Kapitel 2.3 beschrieben, lagen nur wenige Wochen zwischen der Bekanntgabe, dass die HKT-Elemente verfügbar waren und deren geplanter Entsorgung. Vor allem die Visualisierung des Innenraums hatte die Verantwortlichen der Stadt Mannheim davon überzeugt, das Projekt konkret in Angriff zu nehmen. Vorgespräche mit dem Baubürgermeister Ralf Eisenhauer und Tatjana Dürr hatte es bereits seit der

ersten Projektidee im November 2021 gegeben. Und obwohl sich die Stadt Mannheim von Anfang an prinzipiell für die Potentiale kreislaufgerechtes Bauens des Projekts interessierte, führte erst die Präsentation eines konkreten Architekturentwurfs zur Entscheidung, die dazu benötigten Elemente nach Mannheim zu transportieren und einzulagern. Nachdem jedoch weder eine Bauaufgabe noch Ort für das Projekt feststand, wurde ein nutzungsneutrales Gebäude von etwa 120 m² BGF entworfen, für das unterschiedliche Nutzungen diskutiert wurden, von einem Waldkindergarten über einen Theaterübungsraum, eine Schulmensa, einen Aufwärmraum für Obdachlose, einen Bewegungsraum für einen Kindergarten bis hin zu Büronutzungen (siehe auch Kapitel 7.2).



Abb. 33: Modellstudie und Rendering für ein nutzungsneutrales Gebäude in Mannheim aus HKT-Elementen, Entwurfsworkshop im Juli/August 2022 an der HTWG Konstanz

3.1 Ermittlung von Bauaufgabe und Bauherr

Ursprünglich war geplant, zwar die potentielle Verwendbarkeit unterschiedlicher Schalungselemente im Rahmen des Forschungsprojekts zu untersuchen, die konkreten Entwürfe zukünftiger Nutzungen jedoch potentiellen Bauherren und deren Planern zu überlassen. Daher wurde ein detaillierter Katalog (vgl. Anlage 1) der vorhandenen Elemente erarbeitet, der über verschiedene Netzwerke (ProHolz BW, IBA Stuttgart, Netzwerk Region Stuttgart, etc.) an potentielle Bauherren und Architekturbüros verteilt wurde. Ziel war es, in erster Linie Bauherren der öffentlichen Hand zu finden. Denn einerseits sollte ein fachkundiger Bauherr das Risiko bei der neuartigen Verwendung von Re-Use-Komponenten einschätzen können, andererseits sollten die drittmittelfinanzierten Planungsleistungen, die in die Reallabore fließen, möglichst dem Gemeinwohl dienen.

Ab Februar 2023 gäbe es Gespräche mit mehreren Architekturbüros und potentiellen Bauherren, die sich für die prinzipielle Idee der Wiederverwendung der Schalungselemente interessierten. Allerdings zeigten sie sich überfordert damit, aus dem Katalog geometrisch sehr komplexer Elemente eine Auswahl zu treffen, die sich sinnvoll zu Gebäuden oder Gebäudeteilen kombinieren ließen. Denn sie konnten nachvollziehbarer Weise allein anhand der Darstellung einzelner Bauteile keine Vorstellung davon entwickeln, welche Art von Gebäuden damit hergestellt werden könnten.

Teilweise hatten sich auch Bauherren mit ihren Architekt*innen gemeldet, die bereits in der Planung konkreter Bauaufgaben waren. Daher gab es Anfragen, einzelne Elemente beispielsweise als Dachgauben in bestehende Planungen zu integrieren. Den Zielen des Forschungsprojekts, Gebäude hauptsächlich aus den Schalungselementen selbst zu erstellen, konnte auf diese Weise jedoch nicht entsprochen werden. Die notwendige Anpassung der Schalungselemente an die geplante Gebäudegeometrie hätte außerdem dazu geführt, dass jeweils nur Teile der Schalungen hätten genutzt werden können und ein relativ großer Abfallanteil entstanden wäre. Die bestehende Planung an die Elemente anzupassen, war nicht möglich.

Nachdem auf diese Weise keine Projekte zustande kamen, wurde erwogen, den Bauteilkatalog der zur Verfügung stehenden Elemente auch für die Findung von Bauaufgaben im Rahmen von Wettbewerbsverfahren (Architekturwettbewerbe) einzusetzen. Die Langwierigkeit dieser Verfahren bei der Notwendigkeit des schnellen Abtransports von der Baustelle machten dieses Vorgehen jedoch unmöglich.

Daher entwickelte das Projektteam letztendlich - analog zum Vorgehen des Mannheimer Reallabors - eigeninitiativ über einen längeren Zeitraum immer wieder unterschiedliche Entwürfe, die sich aus den jeweils zur Verfügung stehenden Elementen gestalten ließen, während

die potentielle Nutzung zunächst weitgehend offen gelassen wurde. Einerseits wurden gezielt nutzungsneutrale Räume entwickelt, die durch zukünftige Bauherren einfach und auf sehr unterschiedliche Weise genutzt werden könnten (Reallabor Mannheim, Entwurf Markthalle, Entwürfe Reallabor Marbach). Andererseits ergaben sich aus der Form einiger spezieller Schalungselemente sehr plausible Gebäudegeometrien, beispielsweise der Rundbaus („Circuleum“) aus den umgekehrt angeordneten Kelchstützen-Unterschaltungen. So konnten auch Elemente, die auf den ersten Blick ungeeignet erschienen, verwendet werden - wie die Schalungen des südlichen Fußgängertunnels, die für den sehr skulpturalen Entwurf des Jugendtreffs Ingersheim verwendet wurden. Für diese Entwürfe mussten sehr spezifisch Nutzer gefunden werden (Reallabore Stuttgart Vaihingen und Ingersheim).

Die Entwürfe wurden über Zeichnungen, 3D-Modelle, physische Modelle sowie Renderings detailliert dargestellt, um potentiellen Bauherren eine sehr konkrete Vorstellung der Möglichkeiten zur der Verwendung der Elemente zu ermöglichen. Wesentlicher Entwurfsparameter war dabei die aktuelle Verfügbarkeit der Elemente. Denn nachdem es kein Zwischenlager gab und ständig der Verlust der nicht mehr benötigten Schalungen drohte (vgl. Kapitel 2.3), mussten Bauherren dann innerhalb von wenigen Monaten gefunden werden, um die Schalungen schnellst möglich zum neuen Einsatzort transportieren zu können. Nachdem die Entwürfe über die oben genannten Netzwerke in Umlauf gebracht wurden, meldeten sich in kürzester Zeit eine Vielzahl potentieller Bauherren.

In persönlichen online-Besprechungen mit diesen möglichen Bauherren wurden die Potentiale der verschiedenen Projekte diskutiert. Vorrang erhielten die Projekte, die den Zielen des Forschungsprojekts am besten dienten. Beispielsweise erhielt der Entwurf des Rundbaus Vorrang vor der Verwendung derselben Schalungselemente für den Entwurf der Markthalle. Im Entwurf des Rundbaus sind die Elemente als Primärkonstruktion und Gebäudehülle (Dach) des neuen Gebäudes eingesetzt, während sie im Entwurf der Markthalle lediglich als Sekundärkonstruktion zwischen einer Primärkonstruktion aus Stahl eingesetzt werden könnten.

3.2 Entwurf und Material

Die Visualisierungen der Entwürfe zeigen die Schalungselemente ohne den Bootslack. Denn so kommt die besondere damaszenerstahlartige Holzoberfläche der Elemente zum Vorschein, die durch das dreidimensionale Abfräsen kreuzweise miteinander verleimter Brettlagen und Brettsper Holz-Schichten entstanden ist (vgl. Kapitel 2.2) und den Herstellungsprozess eindrücklich dokumentiert. Diese Oberflächenbeschaffenheit spielte in der Produktion der Elemente keine Rolle und wurde unter der Beschichtung mit Bootslack versteckt. Die Weiterverwendung bietet dagegen die Möglichkeit, diese faszinierende Oberfläche wieder freizulegen. Dabei erweist sich als Vorteil, dass die Oberfläche durch den Bootslack vor Witterung geschützt war.

An einigen kleineren Abschnitten testete das Forschungsteam das Entfernen des Bootslacks, einerseits mit einem Heißluftfön, andererseits durch mechanisches Abschaben. Dabei ließ sich die glasfaserarmierte Beschichtung mechanisch an einer Stelle ablösen und relativ problemlos an einem Stück abziehen. Bei den Musterstücken handelte es sich jedoch um Schalungselement, das sehr lange der Witterung ausgesetzt gewesen war. Beim Bau des ersten Reallabors in Ingersheim kamen dagegen Schalungen zum Einsatz, die nur einmal verwendet worden waren und wenig bewittert waren. Hier ließ sich die Beschichtung nur durch Abfräsen bzw. Abschleifen entfernen.



Abb. 34: links und rechts: Entfernen der Beschichtung an einem länger bewitterten Musterstück, Foto: Roman Kreuzer



Abb. 35: Abfräsen der Beschichtung bei der Vorbereitung des Reallabors Ingersheim, Foto: Roman Kreuzer

3.3 Verwendung von künstlicher Intelligenz als Entwurfswerkzeug

Für sämtliche Schalungselemente waren präzise 3D-Produktionszeichnungen des automatisierten Abbaus vorhanden. Das ist einerseits eine hervorragende und absolut zuverlässige Planungsgrundlage. Andererseits handelt es sich um hochkomplexe Zeichnungen und riesige Datenmengen, die ein intuitives Arbeiten, das für den Entwurfsprozess notwendig ist, erschweren. Eigentlich sind das optimale Voraussetzungen für den Einsatz von künstlicher Intelligenz (KI). So könnten zufällige geometrische Kombinationen der amorphen Schalungselemente generiert werden, aus denen dann sinnvolle Gebäudeentwürfe ausgewählt würden. Dazu wurden Sondierungsgespräche mit dem Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau IRB in Stuttgart geführt, das sich sehr dafür interessierte, auf Basis der Anforderungen des Forschungsprojekts Stuttgart 210 eine entsprechende Software zu entwickeln. Allerdings wurde dabei schnell klar, dass das Programmieren und Trainieren dieser KI viel zu lange gebraucht hätte (1 bis 2 Jahre) und während dieser Zeit wären die meisten Schalungselemente bereits vernichtet worden wären.

Um schnell, effektiv und intuitiv entwerfen zu können schaffte sich das Entwurfsteam daher eines der ältesten Werkzeuge des Architekturentwurfs, indem sämtliche Schalungselemente im Maßstab 1:50 als 3D-Modelle ausgedruckt wurden. Damit konnte nicht nur schnell und zielgerichtet entworfen werden, sondern Projekte auch mit den Bauherren diskutiert werden.

3.4 Erkenntnisse aus dem Entwurfsprozess

Erkenntnisse und Schlussfolgerungen für die Wiederverwendung von Bauteilen hinsichtlich des Entwurfs aus den Erfahrungen des Forschungsprojekts:

- Die Verwendung von Re-Use-Elementen erfordert es, den Entwurfsprozess in der Architektur neu zu denken und zu strukturieren. Die zur Verfügung stehenden Materialien und deren Qualität nehmen einen wichtigeren Stellenwert beim Entwerfen ein - vor allem, wenn sie einen wesentlichen Teil des Tragwerks bzw. des Raumeindrucks bilden. Wenn das Potential der Re-Use-Elemente optimal ausgeschöpft werden soll, müssen sich andere Bereiche, die die Entwurfsentscheidungen üblicher Weise bestimmen, zurücknehmen, beispielsweise die räumliche Funktion, die Gestaltungsabsicht oder die Nutzungsanforderungen.
- Eine langfristige und zuverlässig planbare Verfügbarkeit der Re-Use-Elemente entlastet die ohnehin komplexe Planung und vermeidet Fehlplanungen.
- Die Planung der Weiterverwendung sollte zukünftig bereits zusammen mit der Ausführungsplanung vergleichbarer Schalungselemente erfolgen. Damit kann die Nachnutzung erleichtert und der Wert der Elemente erhöht werden. Beispielsweise wäre es für den Entwurf des Multifunktionsraums (Reallabor Mannheim) von großem Vorteil gewesen, wenn die rückseitigen Rippen der als Dach- und Wandkonstruktion genutzten Elemente einem regelmäßigem Raster unterliegen würden und überall miteinander verbunden werden könnten. Für die Herstellung hätte das kaum zusätzlichen Aufwand bedeutet, die Nachnutzung wäre jedoch deutlich einfacher.

Aus rechtlicher Sicht ist dabei Folgendes zu beachten (vgl. Kapitel 5.1 und Anlage 4):

- Die Beschaffenheit des Werks ist mit dem Bauherren (der ein fachkundiger Bauherr sein sollte) präzise zu definieren, damit es frei von Sachmängeln gem. §633 BGB ist. Denn ohne Vereinbarung wird eine Beschaffenheit erwartet, die "bei Werken gleicher Art üblich ist". Das bedeutet aktuell, dass Gebäude aus neuen und nicht aus gebrauchten Bauteilen erstellt sind.
- Es ist abzuklären, ob Re-Use-Elemente im Rahmen der anerkannten Regeln der Technik eingesetzt werden können oder ob eine Zustimmung im Einzelfall (ZiE) notwendig ist. Eine ZiE ist meist sehr zeitaufwändig. Über eine ZiE können aber auch etwaige Beschädigungen, Verschleiß oder Verwitterungen während der ersten Nutzungsphase in die Beurteilung der Bauteilqualität einfließen.

4. Tragwerksplanung

4.1 Rahmenbedingungen

Für die Bemessung und Konstruktion von Holztragwerken ist die DIN EN 1995-1-1:2010-12 (Eurocode 5) maßgeblich, in Deutschland mit dem zugehörigen Nationalen Anhang. In dieser werden die spezifischen Eigenschaften der Bauteile und Baustoffe berücksichtigt. Die Sortierung und Zuordnung von Bauholz zu Festigkeitsklassen erfolgt gemäß DIN EN 14081-1:2011-12, wobei visuelle oder maschinelle Sortierungsmethoden angewendet werden können.

Die Schalungselemente für den Stuttgarter Hauptbahnhof bestehen aus Brettsper Holz und benötigen entweder eine nationale allgemeine bauaufsichtliche Zulassung (abZ) oder eine europäische technische Zulassung (ETA). Die Festigkeits-, Steifigkeits- und Rohdichtekennwerte von Brettsper Holz sind in der Regel in den technischen Zulassungen der Hersteller angegeben. Die verwendeten Schalungselemente stammen von Züblin Timber, deren Brettsper Holz über die ETA-10/0241 geregelt ist.

Für die Wiederverwendung von Holzbauteilen müssen deren Festigkeitseigenschaften ermittelt und entsprechend den baurechtlichen Anforderungen nachgewiesen werden.

In diesem Abschnitt werden die erforderlichen Eigenschaften und Kriterien für die Verwendung von Holzbauteilen im Bauwesen dargelegt. Diese umfassen insbesondere Anforderungen an die Tragfähigkeit, die Bauphysik und den Brandschutz.

Gemäß dem aktuellen Stand der anerkannten Regeln müssen gebrauchte, wiederverwendete Holzbauteile ebenfalls diesen Anforderungen genügen. Anders formuliert: Für die Nutzung eines Bauteils sind dessen Herkunft und Lebenszyklus unerheblich, sofern die von den Normen gestellten Anforderungen und Nachweise eingehalten werden.

Bei der Bemessung von Konstruktionen nach diesem Eurocode sind Kenntnisse über die spezifischen Eigenschaften der verwendeten Bauteile und Baustoffe, insbesondere deren Festigkeit, unerlässlich. In Abschnitt 3.1.1 heißt es dazu: „Festigkeits- und Steifigkeitskennwerte sind für diejenigen Beanspruchungsarten zu bestimmen, denen der Baustoff in der Konstruktion ausgesetzt ist, entweder durch Versuche, Vergleiche mit ähnlichen Holzarten und -klassen oder Holzwerkstoffen oder aufgrund bekannter Zusammenhänge zwischen den verschiedenen Eigenschaften“. Normalerweise werden diese Festigkeits- und Steifigkeitskennwerte bei der Zulassung oder Zertifizierung eines Produkts angegeben. In der Europäischen Union erfolgt dies durch Produktregelungen, die durch die CE-Kennzeichnung auf dem Produkt veranschaulicht werden. In Deutschland sind die Anforderungen der Bauregel-

listen relevant. Es kann jedoch sein, dass Produkte mit CE-Kennzeichnung nur eingeschränkt verwendet werden dürfen, sofern sie nicht den nationalen Anforderungen entsprechen. Zusätzlich zu den europäischen Vorschriften gibt es in jedem deutschen Bundesland technische Baubestimmungen, die in der entsprechenden Landesbauordnung festgehalten sind.

Da das Ziel dieses Forschungsprojekts darin besteht, Möglichkeiten aufzuzeigen, wie bereits genutzte Holzbauteile wiederverwendet werden können, während sie zugleich eine statische Funktion erfüllen, müssen deren Festigkeitseigenschaften festgelegt werden. Bei Bauteilen, die langen Nutzungsphasen unterlagen oder sich noch im verbauten Zustand eines Bestandsbaus befinden, sind diese Werte vor Ort zu ermitteln. Sobald diese Eigenschaften bekannt sind, kann die entsprechende Bemessungsnorm herangezogen werden, um Nachweise hinsichtlich der Standsicherheit, des Brandschutzes und der Bauphysik zu erbringen. Es existieren verschiedene Normen, die eine Sortierung und Zuordnung zu Festigkeitsklassen ermöglichen. Die hier beschriebenen Normen sind derzeit ausschließlich für neue Holzbauteile zugelassen. Im weiteren Verlauf dieses Berichts wird jedoch erörtert, wie diese Normen angepasst und auf Re-Use-Bauteile angewandt werden können.

Für tragendes Bauholz mit rechteckigem Querschnitt gelten beispielsweise die Anforderungen der DIN EN 14081-1:2019-10, die die Kriterien für die Sortierung, die Sortierverfahren und die Kennzeichnung von festigkeitssortiertem Bauholz definiert. In Zusammenhang mit der DIN 20000-5:2016-06 wird in Abschnitt 4.3 zudem festgehalten, dass die visuelle Festigkeitssortierung nach DIN 4074-1 und -5:2012-06 den Anforderungen der DIN EN 14081-1 entsprechen muss. Die Zuordnung von Bauholz zu Sortierklassen gemäß DIN 4074 kann visuell oder maschinell erfolgen. Bei der visuellen Sortierung nach DIN 4074-1 bzw. DIN 4074-5 werden die sichtbaren Eigenschaften an der Oberfläche des Bauteils beurteilt. Anschließend kann das Holz einer Festigkeitsklasse gemäß DIN EN 338:2016-07 zugeordnet werden. Die dafür erforderlichen charakteristischen Materialkennwerte sind in DIN EN 1912:2013-10 festgelegt. Im Gegensatz dazu können Bauteile, die maschinell sortiert wurden, direkt einer Festigkeitsklasse gemäß DIN EN 338:2016-07 zugeordnet werden.

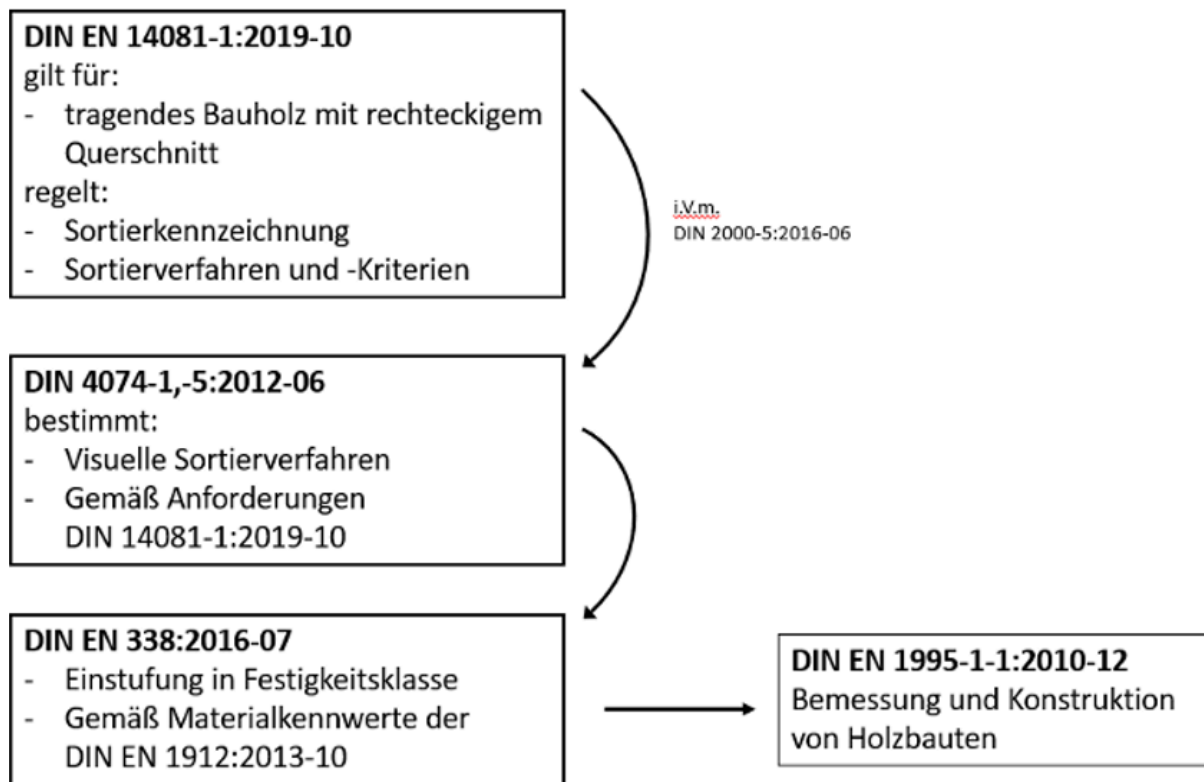


Abb. 36: Flussdiagramm Festigkeitssortierung von Bauholz

Die Schalungselemente, die in diesem Projekt verwendet wurden, um die Kelchstützen und das Dach des neuen Stuttgarter Hauptbahnhofs zu errichten, bestehen aus Brettsperrholz. Für die Verwendung dieses Materials in Deutschland ist derzeit entweder eine nationale allgemeine bauaufsichtliche Zulassung (abZ) des Deutschen Instituts für Bautechnik (DIBt) oder eine europäische technische Zulassung (ETA) erforderlich. Aufgrund herstellereinspezifischer Unterschiede in Produktion und technischen Eigenschaften sind die Produkte ohne Überarbeitung der Tragwerksplanung und der bauphysikalischen Nachweise nicht austauschbar. Die Festigkeits-, Steifigkeits- und Rohdichtekennwerte von Brettsperrholz werden üblicherweise in den technischen Zulassungen der Hersteller als Kennwerte für die einzelnen Lagen angegeben. Diese Kennwerte gelten entlang der Faserrichtung der einzelnen Lagen. Mithilfe verschiedener mechanischer Berechnungsverfahren können Schnittkräfte und Spannungsverläufe in den Lagen sowie Verformungen des gesamten Systems ermittelt werden. Für die Nachweise der einzelnen Lagen in faserparalleler Richtung werden herstellerebezogene Systembeiwerte verwendet.

Brettsperrholz wird in der Regel ausschließlich aus Vollholzlagen der Festigkeitsklassen C24 oder T14 gemäß DIN EN 338:2016-07 hergestellt. Die Festigkeits- und Steifigkeitskennwerte beziehen sich auf die Vollholzlagen mit Fasern parallel zur jeweiligen Spannungsrichtung. Derzeit ermöglichen die herstellereinspezifischen Zulassungen ETA und abZ noch nicht die De-

klaration der Festigkeitsklasse CL 24 (Cross Laminated) anstelle der Auflistung der einzelnen Kennwerte. Es besteht die Möglichkeit, dass sich die Einzelwerte für Brettsperrholz aus Vollholzlamellen der Festigkeitsklassen C 24 und niedriger zusammensetzen.

Alle verwendeten Schalungselemente wurden von der Firma Züblin Timber hergestellt und sind deren Produkt „Leno Brettsperrholz“ zuzuordnen. Der Hersteller verfügt für dieses Produkt über die ETA-10/0241 sowie die Allgemeine Bauartgenehmigung Z-9.1-50, die noch bis November 2027 gültig ist. Somit kann die Vorbemessung, die in den Tragwerkskonzepten durchgeführt wurde, unter Berücksichtigung des Eurocodes 5 erfolgen. Für den Nachweis von Wärme-, Feuchte-, Schall- und Brandschutz gelten die für Vollholz geltenden Vorschriften, Normen und Richtlinien.

4.2 Allgemeine Anforderungen

Bei den Schalungselementen handelt es sich um Bauteile, die nicht vollständig den üblichen Normen und Zulassungen entsprechen, jedoch bereits zuvor erfolgreich als Schalung komplexer Betonkonstruktionen verwendet wurden. Einige Teile dieser Elemente entsprechen den Anforderungen für „Leno Brettsperrholz“ gemäß ETA-10/0241, während andere Abweichungen aufweisen, jedoch die allgemeinen Anforderungen von „Leno Brettsperrholz“ erfüllen.

Die Brettsperrholzelemente wurden durch Blockverklebung verbunden und erfüllten die Anforderungen gemäß DIN 1052-10:2012-05 und EN 14080:2013-09. Dabei wurde zudem eine werkseigene Produktionskontrolle durchgeführt. Nach ihrem Gebrauch wurden die Elemente teilweise ungeschützt gelagert und waren den Bedingungen der Nutzungsklasse 3 in freier Bewitterung ausgesetzt. Diese Lagerungsbedingungen könnten potenziell zu Schäden führen, da die Holzart Fichte, aus der die Elemente bestehen, nicht grundsätzlich für eine solche Exposition geeignet ist. Zukünftige Forschungsvorhaben sollen durch Langzeituntersuchungen von Witterungseinflüssen auf Brettsperrholz genaueren Aufschluss über potenzielle Schäden geben.

Anders als bei herkömmlichem Brettsperrholz wurden im Rahmen dieses Forschungsprojekts für die Schalung wiederverwendete Bauprodukte eingesetzt, die weder nach deutschen oder europäischen Normen geregelt sind noch auf einer allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung (abZ) oder einer vollständigen Europäischen Technischen Bewertung (ETA) beruhen. Es handelt sich um Holzelemente, die als Elemente der Schalung bzw. der Unterkonstruktion der Schalung, unter anderem für die Kelchstützen, auf der Baustelle des neuen Stuttgarter Hauptbahnhofs („Stuttgart 21“) bereits vorab verwendet wurden. Nach Auskunft

des Herstellers bestehen die Holzelemente aus Brettsperrholz bzw. aus blockverklebten Verbundbauteilen aus Brettsperrholz der Holzart Fichte.

Einige Teile des für die Schalelemente verwendeten Brettsperrholzes entsprachen gemäß den vorliegenden Dokumenten den Vorgaben für „Leno Brettsperrholz“ gemäß ETA-10/0241 von Züblin Timber vollständig. Bei anderen Teilen wichen die Eigenschaften des Brettsperrholzes bezüglich des vorgesehenen Lagenaufbaus von den Spezifikationen der ETA-10/0241 ab, sie erfüllten jedoch ansonsten alle Anforderungen von „Leno Brettsperrholz“. Die allgemeinen Anforderungen gemäß ETA-10/0241, die für alle Brettsperrholzelemente gelten, umfassen laut Angaben von Züblin Timber insbesondere:

- die Festigkeitssortierung der Bretter in die Festigkeitsklassen C24 und C16 (Anteil C16 nach Tabelle A.2.1. der ETA)
- die Herstellung der tragend verklebten Keilzinkenverbindungen mit einem nach EN 301:2023-05 als Typ I klassifizierten Klebstoffsystem
- die Herstellung der tragenden Flächenverklebung mit einem nach EN 15425:2023-05 als Typ I klassifizierten Klebstoff
- die Durchführung der werkseigenen Produktionskontrolle nach dem Prüfplan für die ETA-10/0241

Laut Züblin Timber wurden die Brettsperrholzelemente durch Blockverklebung zu Verbundbauteilen verbunden. Dabei wurden die Anforderungen der DIN 1052-10:2012-05 bzw. der EN 14080:2013-09 (für blockverklebte BSH-Träger) erfüllt und eine werkseigene Produktionskontrolle durchgeführt.

Die Schalungselemente wurden gemäß ihrem beabsichtigten Zweck in der temporären Konstruktion bemessen, montiert und für die Errichtung der Stahlbeton-Kelchstützen verwendet. Anschließend wurden sie demontiert und zunächst auf dem Gelände der S21-Baustelle und schließlich auf den Lagerplätzen der Reallabore gelagert, wo sie seit mehreren Monaten stehen. Während dieser Zeit waren die Elemente teils unzureichend abgedeckt und vor Witterungseinflüssen weitgehend ungeschützt. Dadurch waren sie teilweise oder vollständig der Witterung ausgesetzt. Dennoch waren die Elemente auf der Betonseite mit einer speziellen Fasermatte und einem Bootslack versehen, was den direkten Feuchteintritt auf dieser Seite verringert. Seit Februar 2024 werden die Elemente zusätzlich mit Planen abgedeckt, um sie vor Witterungseinflüssen zu schützen. Kanthölzer, die aufgeschraubt sind, dienen als Abstandshalter und ermöglichen eine effektive Hinterlüftung.

Die verwendeten blockverklebten Brettsperrholzelemente weichen in folgenden Punkten teilweise von geregelten, zugelassenen oder gemäß ETA hergestellten Holzprodukten ab:

- Einige Elemente entsprechen nicht vollständig der ETA-10/0241, da sie Querschnittsaufbauten mit einer doppelten äußeren Längslage aufweisen, die unsymmetrisch aufgebaut sind und nicht geregelt sind (siehe Abb. 25,26, 27 in Kapitel 2.4.2).
- Die ETA-10/0241 umfasst keine Blockverklebung. Die durchgeführte Blockverklebung entspricht zudem nicht vollständig der DIN 1052-10, da diese keine Blockverklebung von Brettsperrholzelementen untereinander vorsieht, sondern lediglich die Verklebung von Brettsperrholz und Brettschichtholz, beispielsweise zu Rippenplatten.
- Die Elemente wurden bereits in einer Baukonstruktion (hier: als Elemente der Schalung) verwendet und dabei sowohl mechanischen als auch klimatischen Beanspruchungen ausgesetzt. In allen nationalen oder europäischen Normen für verklebte Vollholzprodukte sind bislang gebrauchte, bereits beanspruchte und wiederverwertete Hölzer oder Holzbauprodukte nicht vorgesehen.
- Die Elemente wurden nach Gebrauch nicht grundsätzlich geschützt gelagert, sondern waren den Bedingungen der Nutzungsklasse 3 in freier Bewitterung ausgesetzt. Für die Verwendung von Brettsperrholz in der ETA-10/0241 ist jedoch nur die Nutzungsklasse 2 vorgesehen. Die ungeschützte Lagerung könnte hinsichtlich der Bewertung des Holzschutzes zudem zu einer Einstufung in die Gebrauchsklasse 3 oder sogar 4 nach DIN 68800-1:2019-06 geführt haben. Dafür ist die verwendete Holzart Fichte mit der Einstufung in die Dauerhaftigkeitsklasse 5 nach EN 350:2016-12 grundsätzlich nicht geeignet. Andererseits war die Expositionszeit von mehreren Monaten für die potenzielle Entwicklung von Holzfäule vergleichsweise kurz, sodass unklar ist, ob die Lagerung tatsächlich zu einer unerwünscht hohen Holzfeuchte oder gar zu einer theoretisch möglichen biotischen Schädigung geführt hat. Zukünftige Forschungsvorhaben könnten diese Schäden durch genauere Langzeituntersuchungen erfassen.

4.3 Umgang mit Schädigungen der Schalungselemente

Da die Schalungselemente nicht primär zur Verwendung als Haupttragelemente für neue Baustrukturen konzipiert wurden, sondern ausschließlich als Hilfsprodukte während des Bauvorgangs dienten, fehlt es ihnen an Neuwertigkeit. Konkret bedeutet dies, dass sie während des Bauprozesses den örtlichen Umweltbedingungen ausgesetzt waren. Dabei waren die klimatischen Bedingungen nicht konstant und die Bauteile wurden nicht immer schonend behandelt, nachdem sie ihre ursprüngliche Funktion erfüllt hatten. Bei genauerer Betrachtung weisen einige Elemente Abplatzungen und Verformungen an den Plattenrändern und

den Rippen auf. Diese sind auf die Lagerung auf den Schalunterkonstruktionen und die Zwänge der Betonhärtung zurückzuführen. Durch den passenden Entwurf und die Geometrisierung der Elemente können solche Schadstellen umgangen werden. Ist dies nicht möglich, müssen an diesen Stellen Bemessungen im Detail mit Querschnittsschwächungen und einer Anpassung/Reduzierung der Festigkeiten erfolgen.



Abb. 37: Schadensbild aufgequollener und verwitterter Brettlagen, Foto: Tim Siemens

Bei handnaher Prüfung sind weitere Schäden erkennbar, darunter unregelmäßige Quell- und Schwindrisse sowie teilweise offene Klebefugen. Diese wurden durch unterschiedliche klimatische Bedingungen verursacht. Ebenso lassen sich an den Rändern der Elemente aufgequollene Plattenlagen feststellen, was auf eine fortwährende Exposition gegenüber Feuchtigkeit hinweist.

Daher ist festzuhalten, dass wiederverwendete Bauteile, solange sie nicht als neuwertig und unbeschädigt gelten, nicht mit ihren vollen Festigkeiten und Eigenschaften bemessen werden sollten, es sei denn, Untersuchungen belegen das Gegenteil. Eine sichere Bemessung mit Traglastreserven von bis zu 20 % wird empfohlen.

4.4 Holzbaubemessung von wiederverwendeten Bauteilen

Wie den allgemeinen Regeln der Technik zu entnehmen ist, sind die Bemessungsgrundlagen in den Normen nur für Neubauten definiert. Da es sich bei den Schalungselementen allerdings um gebrauchte Bauteile handelt, können diese nicht zu 100 % auf sie angewandt werden.

Loebjinsk [17] hat ein Verfahren zur Bewertung der Tragfähigkeit von gebrauchten Holzkonstruktionen im Bestand entwickelt. Dieses Verfahren basiert auf angepassten Teilsicherheitsbeiwerten und einer probabilistischen Bewertung und liefert somit genauere Ergebnisse. Dabei werden unterschiedliche Kenntnisstände über die Eigenschaften der Bauteile berücksichtigt und in einem Stufenkonzept eingeteilt. Die gewonnenen Erkenntnisse ermöglichen eine präzisere Bewertung und Bemessung von Holzbauteilen im Bestand und somit auch deren Wiederverwendung.



Abb. 38: Schadensbild nichtintakter Klebefugen und Fehlstelle, Foto: Tim Siemens

Lißner und Rug [18] haben gezeigt, dass die visuelle Sortierung nach DIN 4074:2012-06 theoretisch auch für Holz im Bestand geeignet sein könnte. Es gibt jedoch Hindernisse für ihre Anwendung. Schwierigkeiten ergeben sich durch die erschwerte Zugänglichkeit der Bauteile im Bestand, die Unterschiede zwischen aktuell verbautem und sortiertem Holz sowie die Sortierkriterien, die hauptsächlich auf Schnitthölzer ausgerichtet sind. Weitere Herausforderungen sind das Fehlen von Fachkräften für die visuelle Sortierung, begrenzte maschinelle Sortierungsmöglichkeiten und das Fehlen einer CE-Kennzeichnung für alte Bauteile. Es wurden Modifikationen vorgeschlagen, um Bestandsbauteile einzustufen, diese liegen jedoch außerhalb der bauaufsichtlichen Zulassung. Um die Zuverlässigkeit der Sortierung zu erhö-

hen, sollten verschiedene Materialeigenschaften mit zerstörungsfreien Prüfmethoden ermittelt werden.

Bei genauer Betrachtung zeigen die Schalungselemente, die primär als Hilfsprodukte während des Bauvorgangs genutzt wurden, Schäden wie Abplatzungen, Verformungen, Quell- und Schwindrisse sowie offene Klebefugen. Einige Elemente weisen zudem aufgequollene Plattenlagen an den Rändern auf, was auf Feuchtigkeitseinwirkung hindeutet. Aufgrund dieser Schäden ist eine angepasste Bemessung erforderlich, da die Elemente nicht mehr neuwertig sind. Empfohlen wird eine sichere Bemessung mit Traglastreserven von bis zu 20 %.

4.4.1 Kalibrierung der Teilsicherheitsbeiwerte

Eine präzisere und verbesserte Bemessungsgrundlage für gebrauchte Holzbauteile eröffnet vielfältigere Einsatzmöglichkeiten. In ihrer Dissertation hat Loebjinsk [17] ein Verfahren zur Bewertung der Tragfähigkeit von Holzkonstruktionen im Bestand entwickelt. Dieses Verfahren basiert auf der Anpassung von Teilsicherheitsbeiwerten und einer probabilistischen Bewertung der Bemessung von Bauteilen im Bestand. Somit ist es auch für aufbereitete Bauteile einsetzbar, die wiederverwendet werden sollen. Dabei wurden unterschiedliche Kenntnisstände bei der Betrachtung der Bauteile berücksichtigt. Die Teilsicherheitsbeiwerte werden entweder gemäß der Norm übernommen oder anhand von semi-probabilistischen Methoden für den spezifischen Fall kalibriert. Durch die Verwendung angepasster Teilsicherheitsbeiwerte im Bestand erhöht sich die Zuverlässigkeit der Bemessung mit zunehmendem Kenntnisstand, was zu genaueren Ergebnissen führt. Loebjinsk hat ein Stufenkonzept bestehend aus drei Stufen entwickelt. Diese umfassen einzelne Bewertungsschritte und sind in Wissensniveaus (Knowledge Level, KL) unterteilt. Die erste Stufe beinhaltet eine Überprüfung des Bestands ohne Modifizierung. Die zweite Stufe umfasst eine modifizierte semi-probabilistische Überprüfung, die in drei Abstufungen (a, b und c) unterteilt ist, abhängig von der Sortierung und Bestimmung der Teilsicherheitsbeiwerte. In der dritten Stufe erfolgt die Bewertung der Tragfähigkeit mittels Näherungsverfahren. Die in dieser Arbeit gewonnenen Erkenntnisse können als Grundlage für die Bewertung und Bemessung ehemaliger Holzbauteile aus dem Bestand dienen, die neu bewertet werden müssen, um wiederverwendet zu werden. Insbesondere bietet sie die Möglichkeit, vollständige Konstruktionen aus dem Bestand zu bemessen und somit die Voraussetzung für ihre Wiederverwendung zu schaffen.

4.4.2 Anpassung der Festigkeitssortierung

Um die geregelten Materialkennwerte wie Rohdichte, Festigkeiten und E-Moduli für den Bestand und somit auch für wiederverwendete Bauteile anwenden zu können, gibt es Bestrebungen, die visuelle Sortierung für den Bestand anzupassen. Untersuchungen von Lißner und Rug [18] zeigen, dass die Sortierung nach DIN 4074:2012-06 theoretisch auch für Holz im Bestand verwendet werden kann. Allerdings gibt es Hindernisse für die Anwendung dieser Norm im Bestand. Oftmals sind die Bauteile schwer zugänglich oder nicht von allen Seiten erreichbar. Dadurch sind einzelne Eigenschaften des Holzes nicht überprüfbar und die Kriterien der DIN 4074:2012-06 können nicht einfach visuell überprüft werden. Zudem sind die Unterschiede zwischen dem aktuell verbauten und sortierten Holz einerseits und dem Holz in Bestandsbauten andererseits der Grund dafür, dass nicht alle Sortierkriterien der DIN 4074 übertragbar sind. Die Norm bezieht sich hauptsächlich auf Schnitthölzer, während in alten Holzkonstruktionen oft handbehauene Balken und Kanthölzer verwendet wurden. Die Sortierkriterien basieren außerdem auf einer Holzfeuchte von 20 %, die im Bestand in den Nutzungsklassen 1 und 2 in der Regel unterschritten wird und bei frei verwitterter Konstruktion der Nutzungsklasse 3 darüber liegt. Weitere Herausforderungen für die Anwendung der DIN 4074 auf Bestand- und Re-Use-Bauteile sind das Fehlen ausgebildeter Fachkräfte für die visuelle Sortierung, begrenzte maschinelle Sortierungsmöglichkeiten und das Fehlen einer CE-Kennzeichnung für alte Bauteile. Angesichts dieser Schwierigkeiten wurden in der Literatur (Wenzel, 1994) Modifikationen vorgeschlagen, um eine Einstufung in Sortierklassen für Bestandsbauteile vorzunehmen. Es sollte jedoch darauf hingewiesen werden, dass diese Modifikationen außerhalb der bauaufsichtlichen Zulassung liegen. Um die Aussagekraft der Sortierung zu erhöhen, sollten verschiedene Materialeigenschaften mit zerstörungsfreien Prüfmethoden ermittelt werden.

Um die geregelten Materialkennwerte wie Rohdichte, Festigkeiten und E-Moduli im Bestand und somit auch für wiederverwendete Bauteile anwenden zu können, gibt es auch Bestrebungen die visuelle Sortierung für den Bestand anzupassen. Verschiedene Untersuchungen von Lißner und Rug [18] zeigen, dass die Sortierung nach DIN 4074:2012-06 theoretisch auch für die Sortierung von Holz im Bestand verwendet werden kann. Allerdings gibt es Hindernisse für den Einsatz der dieser Norm im Bestand. Oftmals sind die Bauteile im Bestand schwer zugänglich oder nicht von allen Seiten erreichbar, was dazu führt, dass einzelne Eigenschaften des Holzes nicht überprüfbar sind und die Kriterien der DIN 4074:2012-06 nicht einfach visuell überprüft werden können. Zudem sind die Unterschiede zwischen dem aktuell verbauten und sortierten Holz und dem Holz in Bestandsbauten der Grund dafür, dass nicht

alle Sortierkriterien der DIN 4074 übertragbar sind. Die Norm bezieht sich hauptsächlich auf Schnitthölzer, während in alten Holzkonstruktionen oft handbehauene Balken und Kanthölzer verwendet wurden. Die Sortierkriterien basieren auch auf einer Holzfeuchte von 20%, die im Bestand in der Regel in den Nutzungsklassen 1 und 2 unterschritten wird und bei frei verwitterter Konstruktion der Nutzungsklasse 3 darüber liegt. Weitere Herausforderungen für die Anwendung der DIN 4074 für Bestand- und Re-Use-Bauteile sind das Fehlen von ausgebildeten Fachkräften für die visuelle Sortierung, begrenzte maschinelle Sortierungsmöglichkeiten und das Fehlen einer CE-Kennzeichnung für alte Bauteile. Angesichts dieser Schwierigkeiten wurden in der Literatur Modifikationen vorgeschlagen, um eine Einstufung in Sortierklassen für Bestandsbauteile vorzunehmen. Es sollte jedoch darauf hingewiesen werden, dass diese Modifikationen außerhalb der bauaufsichtlichen Zulassung liegen. Um die Aussagekraft der Sortierung zu erhöhen, sollten verschiedene Materialeigenschaften mit zerstörungsfreien Prüfmethoden ermittelt werden. Im Kontext dieser Arbeit und dem Ziel der Wiederverwendung von Bauteilen im Holzbau spielt die Sortierung und Bewertung von Bestandsbauteilen hinsichtlich ihrer Festigkeit somit eine wichtige Rolle.

4.5 Reversible Bauteilverbindungen

Die Projektaufgabe umfasst neben der standsicheren Bemessung der Bauteile und ihrer Verbindungen auch die kreislauffähige Konstruktion dieser Fügungen. Im Sinne der Wiederverwendung sollen diese reversibel sein und im Optimalfall die Möglichkeit bieten, die Verbindungsmittel selbst wiederzuverwenden.

4.5.1 Bewertung der Lösbarkeit von Verbindungen

Es wurden verschiedene Ansätze zur Bewertung der Lösbarkeit von Verbindungen entwickelt, bei denen ökonomische Aspekte und der Erhalt der Bauteilgestalt berücksichtigt werden. Die DIN 8593-0-5:2003-09 definiert fünf Stufen der Lösbarkeit: von „ohne Schädigung lösbar“ bis „nur durch Schädigung lösbar“. Holzbauteile können aufgrund von Formveränderungen, etwa durch Schwinden oder Quellen, schwer zu lösen sein. Auch plastische Verformungen der Verbindungen und deren Einbringungsmethode beeinflussen die Lösbarkeit. Schäden, die beim Entfernen von Verbindungsmitteln auftreten können, müssen berücksichtigt werden, um die Wiederverwendung der Bauteile sicherzustellen. Dabei spielt die Intaktheit der Bauteilgestalt eine entscheidende Rolle, insbesondere bei Holzwerkstoffplatten, die fragiler sind als massive Holzbauteile.

Die Lösbarkeit einer Verbindung und damit eines Bauteils kann jedoch nicht immer eindeutig als reversibel oder irreversibel klassifiziert werden. Aus diesem Grund gibt es verschiedene Bestrebungen, bei denen Systeme entwickelt wurden, die die Lösbarkeit von Verbindungen bewerten. Das System von Küpfer und Fivet [20] bewertet die Lösbarkeit einer Verbindung beispielsweise anhand des erforderlichen Arbeitsaufwands und des Werts des gewonnenen Materials, um die ökonomischen Aspekte der Lösbarkeit zu berücksichtigen. Entsprechend der Definition von Rosen [21] erfordert die Wieder- und Weiterverwendung von Bauteilen den Erhalt der Produkt- bzw. Bauteilgestalt. Aus diesem Grund wird hier nur zwischen Bauteilen, die ohne Schaden lösbar sind, und solchen, die nur mit Schaden lösbar sind, unterschieden. Die Beurteilung, inwiefern eine Fügung lösbar ist oder nicht, ist in der DIN 8593-0-5 dargestellt. Entsprechend der geltenden Regeln erfolgt die Bewertung der Lösbarkeit in fünf Stufen:

1. ohne Schädigung der Fügeteile lösbar

2. im Allgemeinen ohne Schädigung oder Zerstörung der Füge-teile- lösbar
3. im Allgemeinen mit, teils jedoch auch ohne Schädigung oder Zerstörung der Füge-teile lös-
bar
4. im Allgemeinen nur mit Schädigung oder Zerstörung der Füge-teile lösbar
5. nur durch Schädigung oder Zerstörung der Füge-teile lösbar

In der folgenden Tabelle sind die gängigen Verbindungstypen im Holzbau aufgeführt und gemäß der Lösbarkeit nach DIN 8593:2003-09 bewertet. Die Beispiele wurden basierend auf typischen Bauweisen im Holzbau ausgewählt.

Verbindungsart	Lösbarkeit	Beispiel
Schraubverbindung	2	Holzrahmenbau, Verbindung von Plattenwerkstoff mit Unterkonstruktion
Nagelverbindung	4	
Klammern	4	
Stabdübel (Holz)	4	Brettstapelbauweise, Verbindung der Lamellen
Stabdübel (Stahl)	4	Fachwerkknoten, Verbindung der Streben mit den Gurten
Bolzenverbindung	1	Anschluss Träger an Stahlblechformteil
Steckverbindung	1	Stahlblech-Stecksystem
Zimmerman. Verb.	1	Versätze, Zapfen
Klebung	4	Keilzinkung

Ergänzend zur obigen Tabelle muss angemerkt werden, dass Holz im Laufe seiner Lebensdauer seine Form verändern kann, beispielsweise durch Schwinden oder Quellen. Dadurch können gequollene Bauteile, die durch zimmermannsmäßige Verbindungen miteinander verbunden sind, nur schwer gelöst werden. Ähnlich verhält es sich bei plastischen Verformungen der Verbindungen und Verbindungsmittel. Wenn diese aufgrund erhöhter Lasten im Bestand verformt wurden, gestaltet sich ihre Lösung entweder als äußerst schwierig oder ist gar nicht möglich. Darüber hinaus spielt auch die Art und Weise, wie die Verbindungsmittel eingebracht werden, eine entscheidende Rolle. Einige Verbindungsmittel im Ingenieurholzbau werden beispielsweise durch Schießen angebracht, was sie nur schwer oder mit großem Aufwand lösbar macht.

An dieser Stelle ist auch die Frage zu erörtern, ob Schäden, die beim Entfernen von Verbindungsmitteln entstehen können, eine weitere Verwendung der Bauteile ausschließen. Wie bereits festgehalten, sind die Funktionsfähigkeit und die Gestalt der Bauteile wesentliche

Faktoren für eine Wiederverwendung. Daher ist es bei der Untersuchung der Re-Use-Bauteile wichtig, die Zertifizierung und Gewährleistung der Eigenschaften jedes Bauteils nach dem Rückbau sicherzustellen. Wenn beispielsweise sichergestellt werden kann, dass die Bretter einer Dachschalung ihre Funktion auch nach dem Lösen der Nagelverbindung erfüllen können, können sie erneut als solche verwendet werden, sofern ihre Gestalt intakt geblieben ist. Dabei ist zu beachten, dass nicht nur die Verbindungsmittel, sondern auch die Bauteile selbst die zerstörungsfreie Lösbarkeit beeinflussen. Im Vergleich zu massiven Holzbauteilen wie Massivholzscheiben, Balken oder Stützen aus Vollholz oder BSH sind Holzwerkstoffplatten wie OSB- oder Spanplatten deutlich fragiler. Dies kann dazu führen, dass die Schäden beim Lösen der Verbindung so groß sind, dass eine Wiederverwendung ausgeschlossen wird.

4.5.2 Wiederverwendung von Verbindungen

Es ist wichtig zu prüfen, ob Verbindungsmittel in wiederverwendeten Bauteilen erneut genutzt werden können, da sie durch wiederholten Einsatz geschwächt werden können. Während Schraub- und Nagelverbindungen ihre Tragfähigkeit verlieren können, können Bolzenverbindungen oft wiederverwendet werden. Zimmermannsmäßige Verbindungen sind häufig an die geplante Nutzung angepasst. Es wird empfohlen, zusammengehörige Bauteile gemeinsam wiederzuverwenden, da die Verbindungen aufeinander abgestimmt sind. Wenn eine Wiederverwendung von Verbindungen nicht möglich ist, müssen mögliche Querschnittsminderungen bei der Tragfähigkeitsbewertung berücksichtigt werden.

Neben der erneuten Verwendung von Bauteilen ist es außerdem wichtig zu untersuchen, ob eine Verbindung in einem wiederverwendeten Bauteil erneut genutzt werden kann. Gleichzeitig sollte bewertet werden, inwieweit sich der Querschnitt eines Bauteils durch eine Verbindung verändert und ob an derselben Stelle eine weitere Verbindung angebracht werden kann. Beispielsweise kann das erneute Eindrehen einer Schraube mit dem gleichen Durchmesser das Schraubenloch so vergrößern, dass die angesetzte Tragfähigkeit der Verbindung verringert werden muss. Infolgedessen könnte ein weiteres Schraubenloch an einer neuen Stelle im Bauteil gewählt werden, was wiederum zu einer Reduzierung des Querschnitts des Bauteils führt. Ebenso kann es bei der erneuten Verwendung eines Schraubenlochs passieren, dass das zuvor gedrehte Gewinde im Holz nicht genau getroffen wird und die Schraube das Holz an anderer Stelle durchscheidet. Außerdem ist es möglich, dass Schrauben durch mehrmaliges Verwenden plastische Verformungen erfahren und dadurch die Steifigkeit nicht mehr abbilden können, für die sie ursprünglich ausgelegt wurden. All diese Fälle führen

dazu, dass die Annahmen zur Tragfähigkeit der Verbindung nicht mehr gültig sind. In diesen Fällen sollte auf eine Wiederverwendung dieser Schraubverbindungen verzichtet werden. Dies gilt ebenso für Nagelverbindungen. Volllösbare Verbindungen, wie etwa Bolzenverbindungen, können potenziell wiederverwendet werden. Die Löcher für die Bolzen werden vorab gebohrt und der Bolzen kann ohne weitere Beschädigung des Holzes gelöst und erneut eingesetzt werden. Gerade bei demontierbaren oder temporären Konstruktionen kommen sie daher häufig zum Einsatz. Auch die zimmermannsmäßigen Verbindungen sind an die beabsichtigte Nutzung der Konstruktion angepasst. So werden beispielsweise Sparrenversätze in einem Dachstuhl so angeordnet, dass sie genau auf der Firstpfette und dem Hängewerk aufliegen, oder gezapfte Verbindungen werden so gefräst und behauen, dass die Bauteile passgenau ineinandergreifen.

Vor diesem Hintergrund ist es empfehlenswert, möglichst viele zusammengehörige Bauteile gemeinsam wiederzuverwenden, da ihre Verbindungen aufeinander abgestimmt sind. Ist eine Wiederverwendung der Verbindungen nicht möglich, müssen die durch neue Verbindungsmittelanordnungen entstehenden Querschnittsminderungen bei der Tragfähigkeitsbewertung berücksichtigt werden.

5. Rechtliche Rahmenbedingungen

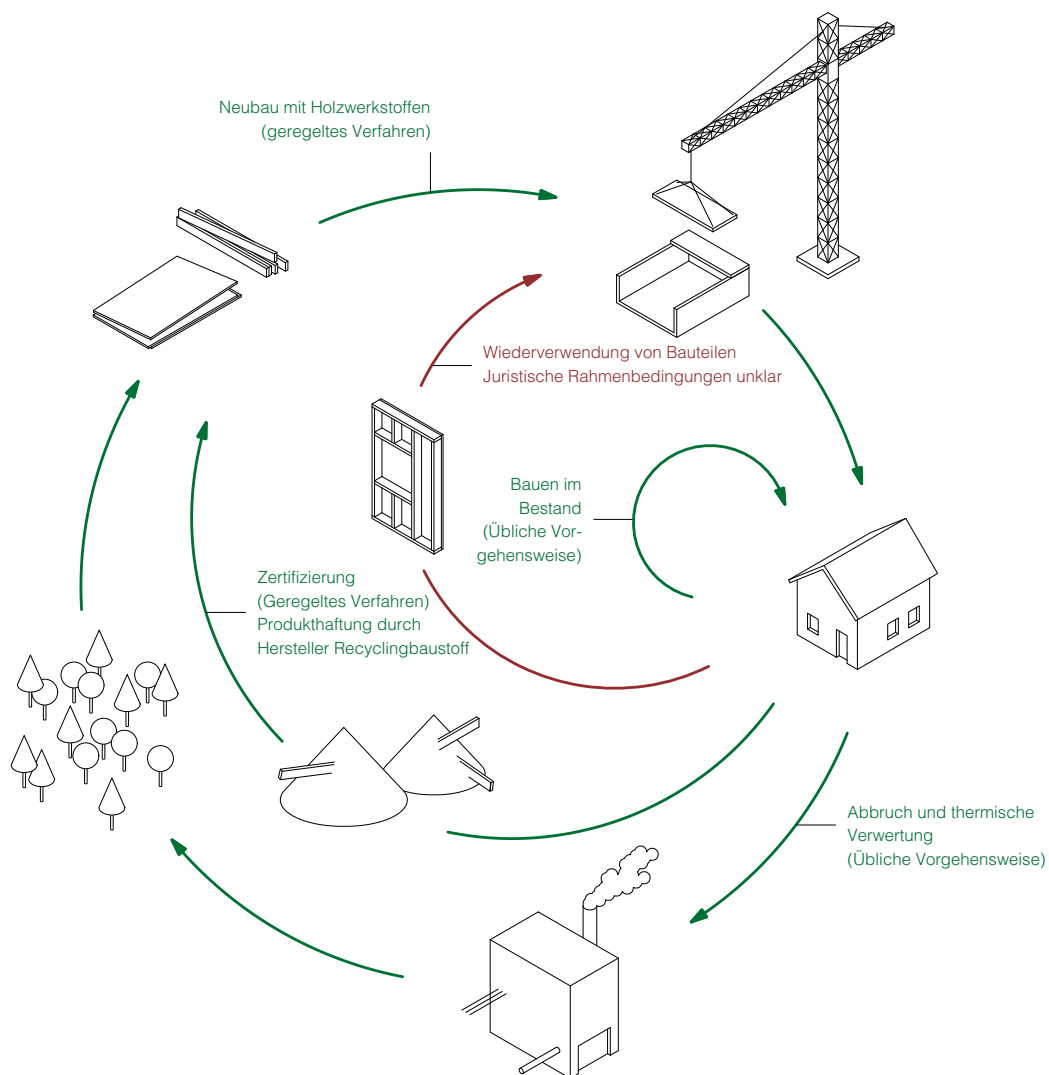


Abb. 39: Materialkreislauf im Bauwesen aus rechtlicher Sicht: Geregelte Verfahren bestehen sowohl für die Entsorgung von Baumaterial (4. Kreis/äußerster Kreis), das Recycling (3. Kreis) und für das Bauen im Bestand (1. Kreis/innerster Kreis). Aus rechtlicher Sicht weitgehend unklar ist die Wiederverwendung von Bauteilen (2. Kreis)

5.1.2 Vermeidung der Abfalleigenschaft

Die Abfalleigenschaft lässt sich grundsätzlich verhindern. Hierzu muss in dem Zeitpunkt, in dem die betreffenden Stoffe oder Gegenstände erstmals im Zuge der Baumaßnahme anfallen, ein neuer Verwendungszweck bestimmt worden sein. Dabei können die Produkte wieder als Erzeugnis mit dem gleichen Zweck, zu dem sie ursprünglich hergestellt und im Bauwerk verwendet wurden, erneut verwendet werden. Alternativ können sie als stoffliche Ressourcenquelle für die Herstellung neuer materialgleicher Bauprodukte verwendet werden, wobei es sich um die gleichen Bauprodukte oder um andere materialgleiche Bauprodukte handeln kann. Die bloße unternehmerische Absicht, einen Stoff oder Gegenstand zu veräußern, stellt hingegen keine ausreichende Zweckbestimmung dar, da auch Stoffe oder Gegenstände, die einen Handelswert haben, Abfall sein können.

Der neue Verwendungszweck der Stoffe oder Gegenstände muss von vornherein feststehen. Es darf auch nicht vorübergehend oder zu einem späteren Zeitpunkt zu einem Wegfall jeglicher Zweckbestimmung kommen. Auch muss die weitere Verwendung des Stoffes oder Gegenstandes rechtlich möglich und zudem konkret sichergestellt sein. Es muss daher entweder feste Vertragsbeziehungen zwischen den für die Baustelle Verantwortlichen und den für die Weiterverwendung Verantwortlichen geben oder ein entsprechender Markt bzw. eine entsprechende Nachfrage für die Stoffe oder Gegenstände bestehen.

Die Produkte dürfen auch nicht zu schädlichen Auswirkungen auf Menschen und Umwelt führen, Daher sollten die betreffenden Stoffe oder Gegenstände kein Gefährlichkeitsmerkmal i. S. d. Abfallrechts aufweisen und dürfen nicht geeignet sein, das Wohl der Allgemeinheit, insbesondere die Umwelt, zu gefährden.

In der Regel wird es daher notwendig sein, die Stoffe oder Gegenstände als gesonderte selbstständige Fraktion von gebrauchten Produkten bzw. Materialien vor dem selektiven Rückbau zu erfassen.

Im Ergebnis ist der Grat zwischen einer legalen unmittelbaren Weiterverwendung und einer Zuordnung der Materialien in den Abfallbereich schmal und bedarf grundlegender Kenntnisse des Abfallrechts.

Im vorliegenden Fall konnte die Abfalleigenschaft der Schalungselemente durch eine neue unmittelbare Zweckbestimmung vermeiden werden, was allerdings einer gewissen Vorbereitung bedurfte, da für solche Schalungsteile kein Markt existiert. Daher musste der neue Verwendungszweck rechtzeitig, d. h. noch während ihrer ursprünglichen Verwendung, geplant werden.

5.1.3 Folgen der Geltung des Abfallrechts

Wäre eine unmittelbare Zweckbestimmung nicht erfolgt, hätten die Elemente als Abfall betrachtet werden müssen. Dann hätte es eines Recyclings bedurft, damit die Elemente wieder in den Stoffkreislauf gelangen können. Erst mit dem Recycling wäre die Abfalleigenschaft beendet worden.

Dabei stellt nicht allein der Recycling Vorgang eine Herausforderung dar. Vielmehr existiert eine Vielzahl von abfallrechtlichen Vorschriften, die ab dem Zeitpunkt der Aufgabe des ersten Verwendungszwecks zu beachten wären. Grundlegend sind insbesondere die Pflichten, die das Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG) regelt. Hinzu kommen Maßgaben, die sich aus speziellen Gesetzen oder Rechtsverordnungen ergeben, die auf der Grundlage des KrWG bzw. zur Ergänzung des KrWG erlassen wurden. Vorliegend wären z. Bsp. die Altholzverordnung, die Gewerbeabfallverordnung und die Abfallverzeichnungs-Verordnung zu beachten gewesen.

Wesentliche Pflichten, die sich aus dem Abfallrecht ergeben sind die Getrenntsammlungspflichten und Vermischungsverbote, die insbesondere bei Transport und Lagerung der Abfälle ab dem Zeitpunkt, in dem der Abfall anfällt – vorliegend also ab dem Aus- bzw. Abbau der Schalungselemente, zu beachten sind. Insoweit bestehen auch Dokumentationspflichten. Zudem können im Einzelfall Kennzeichnungspflichten, Registerpflichten und / oder Erlaubnis- oder Anzeigepflichten bestehen, die sich z. Bsp. aus der Anzeige- und Erlaubnisverordnung ergeben können. Zudem kann bei der Lagerung von Abfällen das Bundesimmissionsschutzgesetz greifen.

Unternehmen, die Bauabfälle einer Weiternutzung zuführen wollen, müssen sich daher mit einer Vielzahl abfallrechtlicher Vorschriften auseinandersetzen. Da die Kriterien zur Vermeidung der Abfalleigenschaft letztlich nicht hinreichend konkret geregelt sind, besteht das Risiko, dass derjenige, der Bauprodukte weiterverwendet, gegen diese Vorschriften verstößt, wobei diese vielfach bußgeldbewehrt sind.

Ein weiteres Problem besteht darin, dass das Ende der Abfalleigenschaft voraussetzt, dass der Abfall ein Recycling oder ein anderes Verwertungsverfahren durchlaufen hat. Das hierfür maßgebliche Tatbestandsmerkmal des „Durchlaufens eines Verwertungsverfahrens“ ist im KrWG und in der Abfallrahmenrichtlinie allerdings nicht näher definiert.

Letztlich wird unter „Recycling“ jedes Verwertungsverfahren verstanden, durch das Abfälle zu Erzeugnissen, Materialien oder Stoffen entweder für den ursprünglichen Zweck oder für andere Zwecke aufbereitet werden. Kennzeichnend für das Recycling mithin ist der Umstand, dass Abfälle zu Erzeugnissen, Materialien oder Stoffen aufbereitet werden, die wiederum für den ursprünglichen Zweck oder andere Zwecke verwendet werden können. Im Gegensatz

zur Vorbereitung zur Wiederverwendung sind daher auch intensivere Behandlungsmaßnahmen denkbar, durch die der aufbereitete Gegenstand auch für eine andere Verwendung aufbereitet werden kann.

5.1.4 Verwendungszweck der Schalungselemente

Vorliegend wäre auch ein Recycling der Schalungselemente möglich gewesen. Auch hierfür ist entscheidend, dass ein konkreter Verwendungszweck vorliegt. Das ist der Fall. Die Schalungselemente sollen nach Aufgabe des ersten Verwendungszwecks als Bauprodukte weiter- bzw. wiederverwendet werden. Die geplante Verwendung als Bauprodukte entspricht grundsätzlich marktüblichen Verhältnissen und der bestehenden Praxis, Materialien aus dem Baubereich weiter zu nutzen, sofern sie noch in gutem Zustand sind. So werden insbesondere Schalungen einer mehrfachen Nutzung zugeführt. Auch ist eine Nachfrage nach hochwertigen Baumaterialien, insbesondere Hölzern oder Holzwerkstoffen gegeben. Brettsperthölzer können insbesondere nur für die Errichtung von Außen- und Innenwänden sowie Dach- und Deckenelementen eingesetzt werden.

5.1.5 Re-Use von Bauprodukten und Bauteilen aus baurechtlicher Sicht

Für das Baurecht ist allgemein festzustellen, dass es zwischen neuen, gebrauchten, wiederverwendeten oder weitergenutzten Bauprodukten sowie Recycling-Baustoffen in Bezug auf die gesetzlichen Anforderungen nicht unterscheidet. Das bedeutet, dass Bauprodukte unabhängig von ihrer bisherigen Nutzung bei ihrer neuen Verwendung für Zwecke der Errichtung, Modernisierung oder Instandsetzung baulicher Anlagen die aktuellen gesetzlichen Anforderungen erfüllen müssen.

Bei der rechtlichen Beurteilung aus baurechtlicher Sicht sind vor allem drei Rechtsbereiche entscheidend. Das europäische Bauproduktenrecht in Form der EU-Bauproduktenverordnung, das nationale Bauordnungsrecht und das Zivilrecht in Form des Werkvertragsrechts.

Bauproduktenrecht

Die EU-Bauproduktenverordnung regelt das Inverkehrbringen von Bauprodukten und formuliert insoweit Anforderungen an die Hersteller von Bauprodukten. Das Bauordnungsrecht der Länder regelt die Verwendung von Bauprodukten. Das Werkvertragsrecht regelt die Rechtsverhältnisse der Parteien eines Planer- oder Bauvertrags, also zwischen Bauherren und Planern sowie Bauunternehmen.

Im Ergebnis ist die EU-Bauproduktenverordnung nur auf europäisch harmonisierte Baupro-

dukte anwendbar ist, die erstmals in Verkehr gebracht werden, so dass gebrauchte Bauprodukte nicht dem europäischen Bauproduktenrecht unterfallen. Daraus ergeben sich allerdings zwei Konsequenzen. Nach der erstmaligen Nutzung des Bauprodukts verliert die Leistungserklärung ihre rechtliche Wirkung. Für Eigentümer und Unternehmen, die mit gebrauchten Bauprodukten oder Bauteilen handeln, hat dies zur Konsequenz, dass ihnen eine Grundlage für die Beurteilung der technischen Leistungen des Bauprodukts fehlt.

Falls die Bauprodukte mit einem neuen Verwendungszweck erstmalig auf dem Markt bereitgestellt werden, stellt sich aber die Frage, ob der (neue) Hersteller, nicht den Pflichten des Bauproduktenrechts unterliegt und daher insbesondere eine neue Leistungserklärung erstellen muss.

Im vorliegenden Fall könnten die Pflichten nach der BauPVO denjenigen treffen, der die Schalungselemente als Bauprodukte in Verkehr bringt. In diesem Fall wäre die BauPVO zu beachten, wenn es für derartige Elemente aus Brettsper Holz eine harmonisierte Norm nach der BauPVO gäbe. Das ist – soweit ersichtlich – aber nicht der Fall. Ansonsten wäre derjenige, der die neuen Bauprodukte in Verkehr bringt, verpflichtet gewesen, die Leistungen der Elemente zu ermitteln, was im Einzelfall einen erheblichen wirtschaftlichen Aufwand verursachen kann.

Bauordnungsrecht

Das Bauordnungsrecht der Länder dient der Gefahrenabwehr im Hochbau. Dabei stehen die Standsicherheit, der Brandschutz aber auch der (Mindest-) Wärmeschutz sowie der Schallschutz im Fokus. Die Bauordnungen der Länder werden durch Technische Baubestimmungen ergänzt, die im Wege von normenkonkretisierenden Verwaltungsvorschriften durch die obersten Bauaufsichtsbehörden der Länder konzipiert und veröffentlicht werden. Diese Verwaltungsvorschriften der Technischen Baubestimmungen der Länder enthalten neben einer Vielzahl von konkreten technischen Festlegungen wiederum Verweise auf Normen, technische Regelwerke oder anerkannte Regeln der Technik, die verbindlich zu beachten sind. Diese beziehen sich auch auf Bauprodukte.

Bauprodukte sind für das Bauordnungsrecht aber nur insoweit relevant, als diese für die Bauwerkssicherheit von Bedeutung sind. Es gibt daher auch eine Vielzahl von Bauprodukten, die keinen Verwendungsvorbehalt unterliegen, weil sie für die bauaufsichtlichen Anforderungen nicht von Relevanz sind. Solche Produkte können dann ohne Weiteres (Wieder-) Verwendung finden.

Im Übrigen müssen die verwendeten Bauprodukte als Teil des Bauwerks mit den bauaufsichtlichen Anforderungen korrespondieren. Daher gelten alle Regelungen uneingeschränkt auch für gebrauchte Bauprodukte. In allen Bauordnungen ist geregelt, dass Bauprodukte ei-

nem Verwendungsverbot mit Erlaubnisvorbehalt unterliegen. Danach dürfen für die Bauwerkssicherheit relevante Bauprodukte, bzw. Bauprodukte, an die bauaufsichtliche Anforderungen gestellt werden, nur verwendet werden, wenn ein Verwendbarkeitsnachweis (allgemeine bauaufsichtliche Zulassung, allgemeines bauaufsichtliches Prüfzeugnis oder Zustimmung im Einzelfall) für das Produkt vorliegt, welcher grundsätzlich dann nicht erforderlich ist, wenn

- das Produkt den anerkannten Regeln der Technik entspricht oder von einer solchen Regel abweicht oder
- einer Technischen Baubestimmung entspricht oder
- das Bauprodukt für die Erfüllung der Anforderungen der bauordnungsrechtlichen Vorschriften nur eine untergeordnete Bedeutung hat.

Bei gebrauchten Bauprodukten ist zu beachten, dass das Bauordnungsrecht davon ausgeht, dass Verwendbarkeitsnachweise nicht (mehr) gelten, wenn das Produkt bereits eine Nutzungsphase durchlaufen hat und mit dem Ausbau seinen Bestandsschutz verliert.

Muss ein Bauherr aber bautechnische Nachweise, z. Bsp. einen Standsicherheitsnachweis oder einen Wärmeschutznachweis erstellen, benötigt er hierfür die aktuellen Leistungsdaten des Produkts.

Um festzustellen, welche Leistungen für das gebrauchte Produkt zugrunde gelegt werden können, bedarf es daher einer Untersuchung und technischen Dokumentation, die als Grundlage für erforderliche Verwendbarkeitsnachweise und bautechnische Nachweise herangezogen werden kann.

Gebrauchte Bauprodukte waren in der Regel aber einer unterschiedlichen Beanspruchung ausgesetzt, so dass auch die Leistungen unterschiedlich sein können. Es bedarf daher einer Einzelfallprüfung, um die verbliebenen Leistungen festzustellen. Etwas kann ausnahmsweise gelten, wenn die Bauprodukte eine ähnliche Historie haben. In diesen Fällen dürfte es zulässig sein, eine exemplarische Charge auszuwählen, diese zu prüfen und so einen Leistungsbereich zu definieren, in dem sich – ggf. unter Einrechnung eines Sicherheitsbeiwerts – aller Voraussicht nach auch die übrigen Bauprodukte befinden.

Da es sich aber auch in diesen Fällen um eine Einzelfallbetrachtung handelt, kommt als Verwendbarkeitsnachweis regelmäßig nur eine Zustimmung im Einzelfall (ZiE) in Betracht. Damit ist grundsätzlich eine Zustimmung der obersten Bauaufsichtsbehörde eines Landes erforderlich. Das kann mit einem erheblichen technischen, zeitlichen und finanziellen Aufwand verbunden sein.

Die Verwendung von Bauprodukten, die die bauaufsichtlichen Anforderungen nicht erfüllen, führen zu einem gesetzlichen Verstoß und damit zwangsläufig zu einem mangelhaften Bau-

werk, für das die Unternehmer haften.

Für die Schalungselemente käme es darauf an, ob das Bauprodukt „Brettsperrholz“ ein Produkt ist, das nach anerkannten Regeln der Technik gefertigt wurde. In diesem Fall wäre kein spezieller Verwendbarkeitsnachweis erforderlich.

Sofern die Fertigung nicht nach allgemein anerkannten Regeln der Technik erfolgt ist, ist ein spezieller Verwendbarkeitsnachweis erforderlich.

Dazu bedürfte es der Erstellung einer technischen Dokumentation in Bezug auf die Leistungen, die nach den bauordnungsrechtlichen Vorschriften der LBO Baden-Württemberg (LBO) und des Gebäudeenergiegesetzes. Dabei könnte aber auf vorliegende Technische Dokumentationen von Züblin Timber zurückgegriffen werden.

Auf dieser Grundlage könnte dann für die betreffenden Bauprojekte eine Zustimmung im Einzelfall bei der obersten Baurechtsbehörde des Landes beantragt werden.

Der spätere Aufsteller des Standsicherheitsnachweises hätte dann unter Einbeziehung der vorliegenden technischen Angaben einen rechnerischen Nachweis der Standsicherheit aufzustellen.

Werkvertragsrecht

Das Bauvertragsrecht ist Bestandteil des Werkvertragsrechts, so dass der Auftragnehmer den „Erfolg“ schuldet. Bestandteil des Erfolgs ist grundsätzlich die Einhaltung von gesetzlichen Anforderungen und vertraglichen Standards, was in der Praxis die Beachtung der allgemein anerkannten Regeln der Technik und damit der technischen Regelwerke bedeutet. Die Parteien können die Inhalte des Werkvertrags aber grundsätzlich frei vereinbaren. Das betrifft auch die Verwendung gebrauchter Bauprodukte.

Es ist daher nicht ausgeschlossen, dass sich die Parteien ausdrücklich darauf einigen, dass gebrauchte Bauprodukte Verwendung finden. Dabei besteht aber immer das Risiko der Unwirksamkeit solcher Vereinbarungen, insbesondere wenn der Bauherr Verbraucher und damit technisch unkundig ist.

Unabhängig davon muss der (Weiter-) Verwender wegen der werkvertraglichen Pflichten in jedem Fall prüfen und ggf. gegenüber dem Bauherrn verantworten, ob das betreffende Produkt/Material auch den aktuellen Vorschriften entspricht. Damit sind Bauunternehmen, die Bauprodukte nicht herstellen, sondern nur verwenden, meist überfordert. Dadurch drohen nicht unerhebliche Haftungsrisiken bei der Verwendung gebrauchter Materialien.

Für den Fall, dass sich die Vertragsparteien nicht ausdrücklich über die Beschaffenheit geeinigt haben, gilt im Zweifel, dass der Unternehmer das Übliche schuldet. Das Übliche dürfte aber die Verwendung neuer Bauprodukte sein. Dabei ist „neu“ nicht unbedingt auf das Alter zu beziehen, sondern vor allem auf den Umstand, dass die Bauprodukte zuvor noch nicht

verwendet worden sind.

Zudem müssen auch recycelte oder wiederverwendete Bauprodukte grundsätzlich den allgemein anerkannten Regeln der Technik entsprechen, die zum Zeitpunkt der Abnahme des Bauwerks gelten. Gleiches gilt in Bezug auf die Vorschriften des Bauordnungsrechts. Haben sich diese Regelungen geändert, kann ein Bauprodukt folglich nur wiederverwendet oder recycelt werden, wenn das bereits gebrauchte und daher ältere Bauprodukt auch den geänderten Vorschriften entspricht.

Vorliegend sollen die Brettsperrholzelemente im Rahmen eines Forschungsvorhaben beispielhaft eingebaut werden. Davon gehen auch die jeweiligen Bauherren aus. Daher wird ausdrücklich vereinbart, dass die fraglichen Bauteile zum Einsatz kommen. Zudem sind die Bauherren keine Verbraucher. Daher ist davon auszugehen, dass der Einbau der Elemente in Bezug auf die in Rede stehenden Materialien vertragsgerecht erfolgen kann. Voraussetzung ist aber, dass für die Elemente die erforderlichen Verwendbarkeitsnachweise vorliegen.

5.2 Zustimmung im Einzelfall

Christian Engel-Götz

5.2.1 Allgemeines

Aufgrund der individuellen Beschaffenheit und komplexen Fertigung der wiederverwendeten Schalungselemente fehlt ihnen eine bauaufsichtliche Zulassung gemäß den geltenden technischen Regeln, wie es bei neuen Bauprodukten der Fall ist. Daher bedarf es eventuell einer gesonderten Beurteilung und Zulassung durch die oberste Bauaufsichtsbehörde (siehe 4.1). Dies kann entweder durch eine Zustimmung im Einzelfall für Bauprodukte oder eine vorhabenbezogene Bauartgenehmigung erfolgen, für die bestimmte Nachweise erbracht werden müssen. Die genauen Anforderungen variieren je nach Projekt und liegen im Ermessen der Bauaufsichtsbehörde bzw. deren Gutachter. Grundsätzlich müssen jedoch die Regelungen für neuartige Bauteile der geltenden Landesbauordnung erfüllt werden.

In Baden-Württemberg ist die Leitstelle für Bautechnik (LfB) des Regierungspräsidiums Tübingen (Referat 27) für die Prüfung von Anträgen auf Zustimmung im Einzelfall und vorhabenbezogene Bauartgenehmigung zuständig. Eine Voranfrage zur Abklärung der Machbarkeit eines Projekts ist zwar nicht offiziell geregelt, jedoch kann der Antrag auf Zustimmung im Einzelfall oder Bauartgenehmigung bereits frühzeitig gestellt werden, sofern der Planungsstand den Einsatz wiederverwendeter Elemente konkret darstellt. Bei einer negativen Beurteilung in dieser frühen Phase kann das Antragsverfahren abgebrochen werden, wobei nur anteilige Aufwandsgebühren anfallen.

Für die frühzeitige Abklärung der Zulassungsfähigkeit sollte der Behörde neben dem Antragsformular eine detaillierte Elementübersicht der wiederzuverwendenden Bauteile übermittelt werden, die Informationen wie vorherige Anwendung, Bemessungsgrundlage, Zustand und geplanter Einsatz enthält. Zudem sollte gemeinsam mit einem Gutachter festgelegt werden, welche Prüfungen an den Elementen durchgeführt werden müssen, um Abweichungen der Bauprodukte/Bauart und mögliche Schäden festzuhalten. Der Prüfplan muss der LfB vorgelegt und bestätigt werden, um die notwendigen Prüfungen oder erforderlichen Änderungen und Maßnahmen einzuleiten.

Für die Antragstellung müssen folgende Unterlagen eingereicht werden:

- Beschreibung des Antraggegenstandes

- Beschreibung des Produkts und seine Abweichungen von den Technischen Baubestimmungen, Zulassungen, Bauartgenehmigungen oder Prüfzeugnissen
- Bautechnische Unterlagen
- Übersichtspläne, Detail- und Werkpläne, Bau- und Nutzungsbeschreibungen und relevante Angaben zur Ausführung, sofern diese nicht aus den Unterlagen ersichtlich sind
- Bautechnische Nachweise
- Standsicherheit, Gebrauchstauglichkeit, Brand- und Schallschutz
- Beurteilung der Verwendbarkeit durch Versuchsberichte, Gutachterliche Stellungnahme
- Falls notwendig sind die Auswahl der Prüfstelle und das Versuchsprogramm mit der Landesstelle abzustimmen

5.2.2 Anforderungen der LfB

Gemäß LBO §3, Absatz 1 Satz 1 sind die Grundanforderungen an Bauwerke gemäß Anhang I der Verordnung (EU) Nr. 305/2011 zu berücksichtigen. Folgende Punkte müssen demnach für das Bauwerk generell sichergestellt sein:

1. Mechanische Festigkeit und Standsicherheit
2. Brandschutz
3. Hygiene, Gesundheit, Umweltschutz
4. Sicherheit und Barrierefreiheit bei der Nutzung
5. Schallschutz
6. Energieeinsparung und Wärmeschutz
7. Nachhaltige Nutzung der natürlichen Ressourcen

Bezüglich der Wiederverwendung der Schalungselemente ergeben sich damit folgende Punkte, die eine Untersuchung und Bewertung erfordern:

Zu 1.

- Die Tragfähigkeit der BSP-Elemente muss zur Sicherstellung der Standsicherheit des Gebäudes für die gesamte Nutzungsdauer sichergestellt sein.
- Dies gilt sowohl für die Elemente an sich, als auch für die Verbindungen, welche zwischen den BSP-Elementen untereinander und auch zu anderen Bauteilen ausgeführt werden sollen.
- Weiterhin muss sichergestellt sein, dass die Verformungen begrenzt sind, so dass daraus folgende Beschädigungen anderer Teile des Bauwerks ausgeschlossen werden können.

- Ob die bereits be- und wieder entlasteten Elemente diese Anforderungen erfüllen, muss mit Hilfe von geeigneten Untersuchungen/Versuchen ermittelt werden.
- (sind die Holzquerschnitte und Leimfugen unbeschädigt / ergeben sich unterwartet hohe Durchbiegungen / werden die berechneten Tragfähigkeiten erreicht, Übereinstimmung der Berechnungen mit den Eigenschaften der vorhandenen Bauteile ...)

Zu 2.

- Abhängig von den baurechtlichen Anforderungen muss für die BSP-Elemente ggf. die Tragfähigkeit im Brandfall nachgewiesen werden. Hierzu muss sichergestellt sein, dass die gängigen Rechenmethoden (bzw. die in der allgemeinen Bauartgenehmigung angegebenen Rechenmethoden) anwendbar sind.
- Gleiches gilt für den ggf. herzustellenden Raumabschluss im Brandfall.

Zu 3.

- Die Freisetzung von giftigen Gasen und sonstigen gefährlichen Stoffen muss ausgeschlossen werden können.
- Hier ist zu prüfen, ob die Elemente bei der bisherigen Verwendung mit Stoffen in Verbindung gekommen sind, welche ggf. in Zukunft eine Gefahr darstellen könnten (z.B. Schälungsöl, Betonzusätze etc.)
- Ggf. müssen Proben genommen und untersucht werden, um eine Belastung mit gefährlichen Stoffen ausschließen zu können.

Zu 4.-7

- Auf den ersten Blick für die Wiederverwendung der Schalungselemente nicht direkt relevant. Selbstverständlich sind die Anforderungen bezogen auf das Gesamtbauwerk zu berücksichtigen.

5.2.3 Theoretischer Weg zur Zustimmung im Einzelfall

Analyse Statistischer Systeme:

- Überprüfung der Statik für die Bahnhofsschalung anhand der Bestandsunterlagen von Züblin Timber.
- Erstellung von Übersichten der statischen Konzepte, Beschreibung der Tragwirkung, der Materialien und Aufbauten in Form eines Elementkatalogs mit Bildern und Plänen der jeweiligen Elemente.
- Klärung des Gebrauchseinsatzes der Elemente für jedes Reallabor und statisches System.
- Durchführung einer Parameterstudie zur Ermittlung der Traglasten für hochbauspezifische Anforderungen und Berücksichtigung der Lagerungsarten, Spannweiten und Belastungen.

Erstellung der Tragwerkskonzepte (spezifisch für Reallabore):

- Identifizierung der Tragwirkung und des Lastabtrags der Reallabore
- Festlegung der statisch-relevanten Positionen in einem Positionsplan und Darstellung des Kraftflusses
- Erkennen von Problemstellen durch fehlende Re-Use-Elemente/ neue Bauteile.
- Entwicklung von Verbindungs- und Detaillösungen, um den Lastabtrag zwischen den Elementen zu ermöglichen.

Bestandsuntersuchung und vorläufige Prüfung:

- Erste visuelle und handnahe Begutachtung zur qualitativen Einschätzung der Wiederverwendungseignung, einschließlich der Beurteilung der Material- und Bauqualität sowie des Schädigungszustands → bis hierhin S210-Weg (05.03.24 Termin mit Hr. Dill-Langer)
- Tiefgehende Untersuchungen durch Bohrkernentnahme zur Bestimmung von Rohdichte, Festigkeiten und Holzfeuchte.
- Einschätzung der Auswirkungen der Schäden auf Standsicherheit, Sicherheitsniveau, Funktions- und Nutzungsfähigkeit.
- Festlegung bautechnischer Maßnahmen wie wirksame Ersatzteile oder Bauteilverstärkungen.

Antrag auf Zustimmung im Einzelfall (ZiE) oder vorhabenbezogene Bauartgenehmigung (vBg):

- Einholung der Beurteilung der Bauweise durch die oberste Landes-Bauaufsichtsbehörde, in diesem Fall die Leitstelle für Bautechnik (LfB) des RP Tübingen.

- Einreichung eines Antragsformulars mit genauer Beschreibung des Antraggegenstands, Angaben zu Stückzahlen und Einbauorten sowie den erforderlichen bautechnischen Nachweisen.
- Erarbeitung der notwendigen Unterlagen für ZIE und vBg gemäß den Anforderungen an konventionelle Bauprodukte.
- Erfüllung der Kriterien wie Tragfähigkeit, Brandschutz, Gesundheitsschutz, Barrierefreiheit, Schallschutz und Energieeinsparung.
- Vorliegen der ZIE oder vBg zum Zeitpunkt der Einreichung des Bauantrags, um die Erfüllung aller Anforderungen gegenüber der Bauaufsichtsbehörde nachzuweisen.
- Bautechnische Prüfung: Die Zustimmung im Einzelfall oder die vorhabenbezogene Bauartgenehmigung ersetzt nicht die bautechnische Prüfung. Sie legt vielmehr die besonderen Bedingungen fest, die bei der im Regelfall erforderlichen Prüfung zu beachten sind.

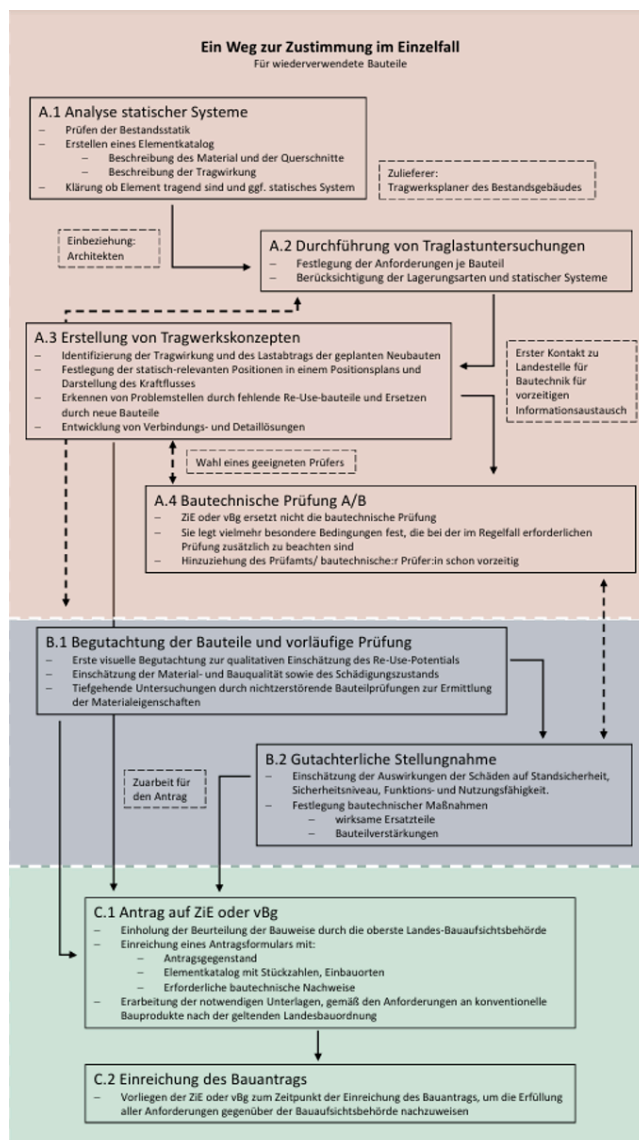


Abb. 41: Flussdiagramm Zustimmung im Einzelfall (ZIE)

6. Ökobilanzierung

Prof. Dr. Thomas Stark

Dr. Viola John

6.1 Einleitung

Im Projekt Stuttgart 210 steht die Wiederverwendung von Schalungselementen aus Holz im Fokus. Zur Einordnung der für die ökologische Bewertung relevanten Aspekte ergeben sich hieraus drei wesentliche Themenbereiche:

- Möglichkeiten und Grenzen der Ökobilanzierung im Bauwesen generell
- Besonderheiten bei biogenen Baustoffen
- Besonderheiten bei der Wiederverwendung von Bauteilen

Im Folgenden werden diese Themen erörtert, im Anschluss erfolgt eine exemplarische Berechnung einer Ökobilanz mit biogenen ReUse-Bauteilen am Beispiel des Reallabors Circuleum.

6.2 Möglichkeiten und Grenzen der Ökobilanzierung im Bauwesen

Die Ökobilanzierung dient im Bauwesen dazu, neben den bislang im Mittelpunkt stehenden Energieverbräuchen während der Gebäudenutzung auch alle Umweltwirkungen zu berechnen, einzuordnen und zu objektivieren, die im Zusammenhang mit den verwendeten Baumaterialien entstehen. Die Systematik der Ökobilanzierung ist in den Normen DIN EN ISO 14 040 bis 14 044 definiert [22], bietet aber in der Praxis einen breiten Spielraum für individuelle Berechnungen. Speziell für den Gebäudebereich gibt es daher die Ökobilanz-Norm DIN EN 15978, die den gesamten Lebenszyklus von Gebäuden in Module unterteilt. Zu den wichtigsten Festlegungen in der Gebäudeökobilanzierung gehört der zeitliche Betrachtungsrahmen, der im Idealfall von der Rohstoffgewinnung über die Realisierung und Instandsetzung während der Nutzung bis zu einem potenziellen Rückbau den gesamten Lebenszyklus eines Gebäudes umfasst. Hierfür werden in der Norm vier Zeitabschnitte in Form der Module A bis D definiert (Abb. 42). Für die Nutzungsphase B wird üblicherweise ein Zeitraum von 50 Jahren angesetzt. Da neben dem Bilanzierungsumfang auch bei den zu betrachtenden Bauteilen – vom Rohbau bis zum Detail des Innenausbau – sowie bei der Auswahl der Baustoffdatensätze individuelle Festlegungen getroffen werden können, sind Ergebnisse verschiedener Ökobilanzen nicht zwangsläufig direkt vergleichbar, sondern müssen immer im Kontext des Bilanzierungsrahmens betrachtet werden.

Lebenszyklus Gebäude

A Herstellung und Errichtung	B Nutzung	C Entsorgung	D Vorteile und Belas- tungen außerhalb der Systemgrenzen
A1 Rohstoffbeschaffung A2 Transport A3 Produktion A4 Transport A5 Errichtung/Einbau	B1 Nutzung B2 Instandhaltung B3 Instandsetzung B4 Austausch B5 Modernisierung B6 Energieverbrauch im Betrieb B7 Wasserverbrauch im Betrieb	C1 Rückbau/Abriss C2 Transport C3 Abfallbehandlung C4 Beseitigung	D Potenzial für Wiederverwendung, Rückgewinnung und Recycling

nach DIN EN 15978

Abb. 42: Module und Teilmodule der Ökobilanzierung nach DIN EN 15978

Ein weiterer wichtiger Aspekt bei der Berechnung von Ökobilanzen ist die Wahl der sogenannten Wirkungskategorien. Diese drücken in quantitativer Form den unmittelbaren Effekt auf das Ökosystem der Erde aus. In der Norm sind über 40 Wirkungskategorien definiert, jedoch hat sich in der Vergangenheit die Kategorie „Erderwärmungspotenzial“ bzw. „Treibhauspotenzial“ (Global Warming Potential – GWP) mit dem Kennwert CO₂-Äq als dominierender Leitindikator herauskristallisiert. Dieser als Masse in Gramm, Kilogramm oder Tonnen angegebene Kennwert bildet am direktesten den unmittelbaren Einfluss auf den globalen Treibhauseffekt und die damit verbundene Klimaerwärmung ab, was aktuell als größte weltweite Herausforderung eingestuft wird. Da die Hauptursache für die Emission von Treibhausgasen in der Nutzung fossiler Energiequellen für die Produktion der Baumaterialien liegt, wird meist ergänzend die Wirkungskategorie „Totaler nicht erneuerbarer Primärenergieaufwand“ (primary energy non renewable total – PENRT) berechnet und ausgewiesen. In der Vergangenheit kamen Ökobilanzen überwiegend im Rahmen von Pilot- und Forschungsprojekten zum Einsatz. Inzwischen stehen jedoch fundierte und frei zugängliche Datenbanken (z. B. ÖkobaDat) für eine Vielzahl an Baustoffen sowie geeignete Softwaretools (z. B. eLCA) zur Verfügung, sodass die Ökobilanzierung bereits regelmäßig bei Auditierungsverfahren Anwendung findet (z.B. DGNB, BNB) sowie inzwischen elementarer Bestandteil der Nachweisverfahren für Förderprogramme der KfW sind (Förderstufen mit QNG).

Zur Einordnung der Aussagekraft einer Ökobilanz ist weiterhin von Relevanz, auf welcher Datengrundlage die Berechnungen basieren und wie stark die potenziellen Abweichungen in der Praxis ausgeprägt sein können. Analog zur Energiebilanzierung für den Gebäudebetrieb benötigt es pauschale Kennwerte, um die Berechnungen mit angemessenem Aufwand durchführen zu können. Bei den Berechnungen nach Gebäudeenergiegesetz (GEG) haben Planerinnen und Planer über die Vorläufer Energieeinsparverordnung (EnEV) und Wärmeschutzverordnungen (WSV) seit vielen Jahrzehnten Erfahrung in der Praxis. Dennoch gibt es teilweise erhebliche Differenzen zwischen theoretischen Bedarfen und realen Verbräuchen. Dies trifft insbesondere auf die Ökobilanzierung zu, da es hier große Unterschiede in der Aussagekraft der Einzelmodule gibt: Die Ergebnisse der Herstellungsphase (insbesondere die Module A1–A3) basieren auf den konkreten Planungsdaten und Massenermittlungen und sind somit in Verbindung mit den Kennwerten aus aktuellen Datenbanken relativ aussagekräftig. Die Betriebsphase (Module B) lässt sich ebenfalls gut abschätzen, ist jedoch mit den vorher erwähnten Unsicherheiten als weniger zuverlässig einzustufen, da es sich bereits um Szenarien handelt. Ganz anders sieht es allerdings bei den Berechnungen zur Rückbauphase aus. Denn hier handelt es sich, was den Zeitpunkt und vor allem den Aufwand eines potenziellen Rückbaus sowie den Umgang mit den Materialien betrifft, um ein rein fiktives Szenario, dessen Eintrittswahrscheinlichkeit als sehr gering eingestuft werden muss. Aus heutiger Perspektive die umweltspezifischen Randbedingungen für eine Zeit in 50 Jahren zu definieren, hat zwangsläufig einen hohen spekulativen Charakter. Dennoch werden nach üblicher Vorgehensweise alle Teilergebnisse der Einzelmodule gleichwertig aufsummiert.

6.3 Besonderheiten bei biogenen Baustoffen

Der Baustoff Holz ist der wichtigste Vertreter der sogenannten biogenen Rohstoffe. Diese haben im Gegensatz zu allen anderen Baustoffen (mineralische Produkte, Metalle, Kunststoffe, Glas etc.) vor allem in Hinblick auf die Treibhausgas-Emissionen ein grundsätzlich anderes Verhalten: Bei den nicht biogenen Baustoffen entstehen nahezu sämtliche Treibhausgas-Emissionen unmittelbar während des Herstellungsprozesses und befinden sich bei Fertigstellung des Gebäudes bereits in der Atmosphäre. Im Gegensatz dazu findet bei biogenen (nachwachsenden) Baustoffen während des Wachstums – und damit der Baustoffproduktion – eine Bindung von CO_2 statt, das in dem entsprechenden Bauteil über den gesamten Nutzungszeitraum gebunden bleibt. Daher ist der zeitliche Bilanzrahmen von zentraler Bedeutung: Wird der Fokus ausschließlich auf die Herstellung des Gebäudes gelegt, ergeben sich bei der Berechnung für biogene Baustoffe negative CO_2 -Emissionen, da durch deren Einsatz als Bauteil eine natürliche Verrottung und die damit verbundene Rückführung von CO_2 in die Atmosphäre verhindert wird. Das Gebäude fungiert als CO_2 -Speicher, der umso größer ist, je mehr biogene Baumasse gebunden wird.

Da man in einer Ökobilanzierung jedoch meist den gesamten Lebenszyklus betrachtet, muss ein sogenanntes End-of-Life-Szenario definiert werden. Für das Lebenszyklusende wird typischerweise angenommen, dass biogene Bauteile nach dem Rückbau thermisch verwertet werden. Hierbei kommt es wieder zur vollständigen Freisetzung des im Material gebundenen CO_2 in die Atmosphäre, womit sich bei nachwachsenden Baustoffen bezüglich des gebundenen CO_2 im Gesamtkennwert bei der heute üblichen Methodik entsprechend nur eine neutrale Bilanz ergibt. Zwar lässt sich bei der thermischen Verwertung über das Recyclingpotenzial in Modul D eine Treibhausgas-Kompensation aus energetischer Gutschrift anrechnen. Dieser Anteil wird jedoch nicht in der Bilanz mitberücksichtigt, sondern separat ausgewiesen, da das Modul D formell nicht mehr dem Lebenszyklus des zu berechnenden Gebäudes zugeordnet wird.

Da für die Ernte und Bearbeitung bei der Herstellung der biogenen Stoffe ebenfalls fossile Energiequellen zum Einsatz kommen, verursachen auch Bauteile aus Holz selbst unter Einbindung des Moduls D in der heute üblichen Lebenszyklusbilanz nennenswerte Treibhausgas-Emissionen (Abb. 43). Diese sind auf das Einzelbauteil bezogen zwar deutlich geringer als z. B. bei mineralischen Baustoffen, es ergibt sich in der Gesamtbetrachtung mit erdberührenden Bauteilen, Fenstern, Gebäudetechnik etc. bei typischen Holzgebäuden jedoch oft eine nur geringfügig bessere Ökobilanz als im klassischen Massivbau mit Mauerwerk-oder

Betonkonstruktionen. Dies ist auch ein wichtiges Argument für die Bestandserhaltung von Gebäuden, denn durch Abriss und Ersatzneubau werden über den Lebenszyklus betrachtet erheblich mehr Ressourcen in Anspruch genommen und Emissionen verursacht, auch wenn der Neubau überwiegend aus Holz besteht.

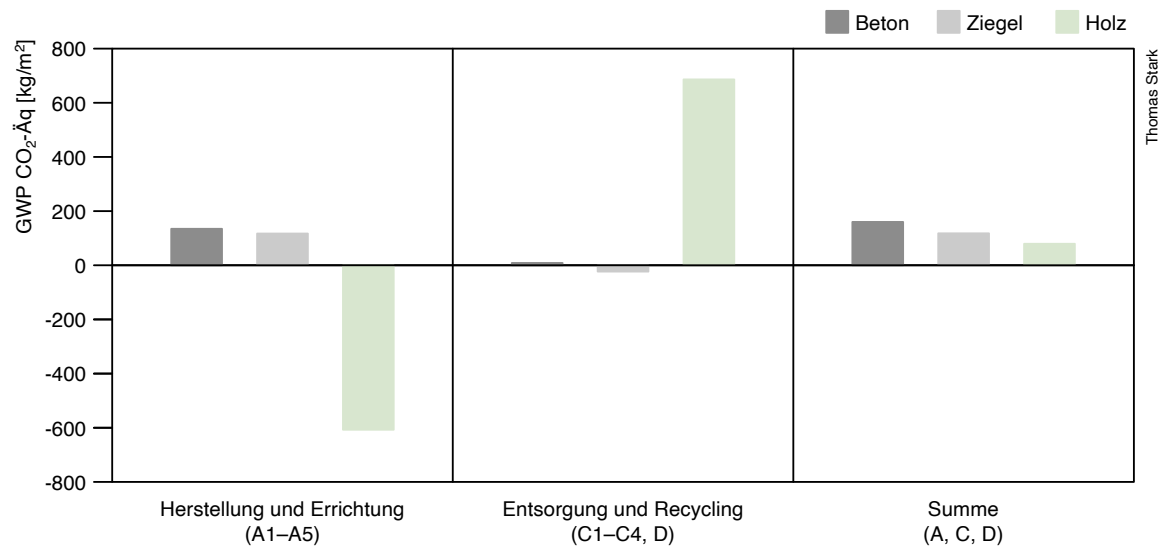


Abb. 43: Vergleich der Treibhausgasemissionen mineralischer und biogener Baustoffe in der Ökobilanzierung am Beispiel von Beton C 20/25, Mauerziegel ungefüllt und Brettschichtholz, bezogen auf 1 m³ (Datenbasis: Ökobaumat gem. EN 15804 A1)

6.4 Besonderheiten bei der Wiederverwendung von Baustoffen

Im Projekt Stuttgart 210 wurde das Thema biogene Baustoffe in Kombination mit der Wieder- und Weiterverwendung von Bauteilen kombiniert (Re-Use). Entsprechend wird im Folgenden auf die Besonderheiten bei der Wiederverwendung von Baustoffen in der ökobilanziellen Betrachtung eingegangen. Hierbei kann zunächst festgestellt werden, dass der Fokus in der Ökobilanzierung bislang auf der Bewertung unterschiedlicher Materialkonzepte im Neubau liegt. Es ist mit der Methode prinzipiell auch möglich, die in Bestandsgebäuden oder in rückgebauten Bauteilen „gebundene“ sogenannte graue Energie bzw. die grauen Emissionen zu berechnen und in die Planung einzubeziehen. Mit der gebundenen grauen Energie wird die Energiemenge bzw. die damit verbundene Treibhausgas-Emission beschrieben, die zur Herstellung des Bauteils ursprünglich aufgewendet wurde. Da für frühere Bauprodukte keine entsprechende Datenbasis vorliegt, kann man behelfsweise eine analoge Herstellung des entsprechenden Bauteils nach heutigem Stand berechnen. Denn mit der Weiternutzung eines Bauteils oder von Gebäudeteilen wird die mit dem Energieeinsatz verbundene Weiternutzung gesichert und zusätzliche Energieaufwendungen durch eine Neuproduktion verhindert. Dieser Effekt lässt sich nur durch eine Ökobilanzierung transparent quantifizieren und ist ansonsten nicht „sichtbar“. Diese Art der Bilanzierungsmethodik kommt bislang in der Praxis jedoch nur sehr selten zur Anwendung, da es bislang hierfür in der Regel keinen Anlass gibt.

6.4.1 Status Quo: QNG-Methodik

Für den Umgang mit Materialien aus Wiederverwendung gibt es – wie im Prinzip generell im Bauwesen - keine allgemeinen konkretisierten Regeln. Die größte Relevanz hat in der Praxis die Methodik, wie sie für Berechnungen nach dem „Qualitätssiegel Nachhaltiges Gebäude QNG“ des Bundes definiert sind. Bei einer teilweisen Weiternutzung von Bestandsbauteilen aus Rückbau im Rahmen von Neubauprojekten erfolgt hier die Berücksichtigung in der Ökobilanz aktuell dadurch, dass für diese Elemente bei der Berechnung des Neubaus keine Emissionen für Modul A anzusetzen sind, was sich üblicherweise entsprechend positiv auf das Gesamtergebnis auswirkt.

Dieser Ansatz hat nun jedoch zur Folge, dass bei biogenen Bauteilen im Falle einer Wiederverwendung die ansonsten in Modul A ausgewiesenen CO₂-Bindungspotenziale in der Ökobilanz des Neubaus nicht berücksichtigt werden. Dennoch müssen für diese Bauteile die Belastungen für biogene Bauteile im Modul C angesetzt werden. In der Gesamtbetrachtung entsteht dadurch ein erheblicher Nachteil, da sich im Ergebnis bei biogenen Bauteilen nach

aktueller Methodik im Falle einer Wiederverwendung ungünstigere Werte ergeben als bei der vergleichbaren Verwendung von neuen biogenen Baustoffen (!). Diese Situation bedarf einer schnellen Korrektur.

Exkurs: Dies gilt insgesamt auch bei allen Bauteilen, die im Rahmen einer Bestandserhaltung weitergenutzt werden. Bei Neubauprojekten ohne Bestandsnutzung wird allerdings bislang nicht berücksichtigt, ob für den Neubau ein Bestandsgebäude abgerissen werden musste oder nicht, hier besteht ebenfalls Korrekturbedarf. Ebenso wird in der Ökobilanz nicht erfasst, welche Voraussetzungen für eine spätere Wieder- und Weiterverwendung bei der Erstellung eines Gebäudes geschaffen werden (z. B. Möglichkeit und Aufwand eines sortenreinen Rückbaus). Daher sind generell pauschale Annahmen für End-of-Life-Szenarien in Modul C in Ihrer Aussagekraft sehr begrenzt.

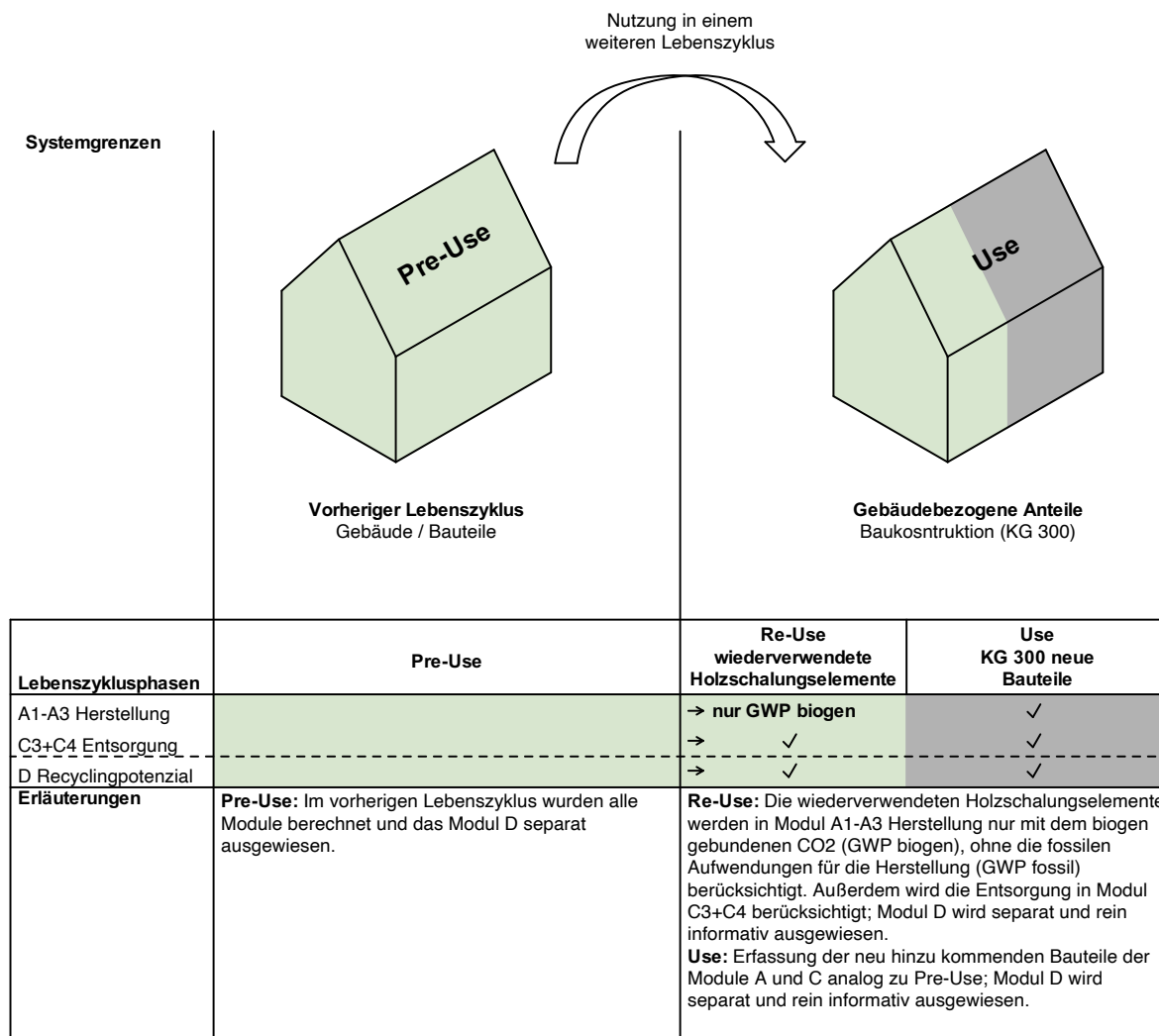


Abb. 44: Beispiel für die Verbesserung der Methodik zur Berechnung wiederverwendeter biogener Baustoffe in der Ökobilanz

6.4.2 Zukünftige Methodik

In der aktuellen Fassung der ÖkobaDat ist bereits eine alternative Datensammlung dokumentiert, in der im Modul A differenziert wird nach fossilen und biogenen Treibhausgas-Kennwerten (DIN EN 15804+A2). Dies ermöglicht die separate Ausweisung des biogen gebundenen Kohlenstoffs. Dadurch kann zukünftig für ReUse-Bauteile aus nachwachsenden Rohstoffen auch die im Produkt gebundene Menge an CO₂ in der neuen Bilanz angesetzt werden. Ein Übergang zur neuen Datenbank für die Nachweise nach QNG ist für das Jahr 2025 vorgesehen.

Exkurs: Auf lange Sicht hat die Bewertung von Bestandsbauteilen über nicht erneuerbare Primärenergie oder Treibhausgas-Emissionen generell den Nachteil, dass mit fortschreitender Umsetzung der Energiewende der „ökologische Wert“ des Bestands bzw. wiederverwendbarer Bauteile bei sich verbessernder Datenbasis gegenüber Neuprodukten stetig abnimmt. Für eine adäquate Bewertung der positiven Umweltwirkung wäre daher beispielsweise die bislang eher selten betrachtete Wirkungskategorie des „abiotischen Ressourcenaufwands“ hilfreich, da hierdurch die Wertschätzung einer dauerhaften Nutzung des (überwiegend mineralischen) Bestands besser abgebildet werden kann. Mit diesem Kennwert lassen sich die nicht erneuerbaren Stoffströme im Bauwesen erfassen, was leider in der ökobilanziellen Bewertung noch keine adäquate Gewichtung hat. Hier besteht ebenfalls Korrekturbedarf, um die Auswirkungen im Hinblick auf die Rohstoffentnahme aus der Erde und auf das Abfallaufkommen besser abbilden zu können. Bestandserhalt stellt hierbei zusammen mit der Verwendung biogener Baustoffe die Schlüsselstrategie dar.

6.4.3 Alternative Methoden

Das Ergebnis einer Ökobilanz mit hohem Anteil an Holzbaustoffen ist – wie oben aufgeführt – wesentlich davon beeinflusst, welches End-of-Life-Szenario angesetzt wird. Das Standardszenario der thermischen Verwertung ist die aktuelle Grundlage für alle Ökobilanzrechnungen nach den Auditierungsverfahren (DGNB, BNB etc.) sowie für die Berechnung nach Qualitätssiegel Nachhaltiges Gebäude im Rahmen der Förderstrategie des Bundes. Dies entspricht im Wesentlichen auch der gängigen Baupraxis, jedoch ist es nicht zwangsläufig sinnvoll, den Status quo auch für Szenarien anzuwenden, die sich auf ein Ereignis in 50 Jahren beziehen, dem typischen Betrachtungsrahmen einer Ökobilanz. Aus heutiger Sicht wäre es beispielsweise durchaus denkbar, dass eine thermische Verwertung biogener Baustoffe

aus dem Gebäuderückbau zukünftig vermieden werden soll. Als Optionen kommen dann die Weiterverwendung als Baustoff oder die dauerhafte Einlagerung des Biogen gebundenen CO₂ infrage, wobei Letzteres wesentlich einfacher umzusetzen wäre, als es aktuell mit Rauchgasemissionen erprobt wird. Eine entsprechende Regelung würde dann sicherstellen, dass in Holzbauteilen gebundenes CO₂ dauerhaft der Atmosphäre entnommen bleibt (Abb. 45). Ein solches Szenario verbessert die Ergebnisse von Holzgebäuden erheblich. Bauen mit biogenen Materialien würde dann über die dauerhafte Einlagerung von CO₂ quasi als „Reparaturmaßnahme“ der bisherigen fossilen Ressourcenverbrennung fungieren. Dies ist auch der gedankliche Hintergrund der bekannten These des Klimaforschers Hans Joachim Schellnhuber: „Wir könnten uns aus der Klimakrise herausbauen“ [23]. Der Ansatz einer Maximierung der CO₂-Speicherung erfordert jedoch ein Abwägen der Vorteile eines effizienten Ressourceneinsatzes auch bei biogenen Baustoffen, denn deren Substitutionspotenzial für mineralische Baustoffe steigt, je weniger Material für eine bestimmte Funktion benötigt wird. Ein weiterer wichtiger Gedanke ist in diesem Kontext der ungünstige Umstand, dass der Zeitpunkt der Treibhausgas-Emissionen keine Relevanz in der Bewertung hat. Die Emissionen über alle Lebenszyklusmodule werden wie oben erläutert zu einem Gesamtwert aufsummiert, ohne zu berücksichtigen, wann diese entstehen. Dabei kann dies einen wesentlichen Unterschied darstellen: Zum einen ist es durchaus von Relevanz, ob in der Bilanz die Emissionen zu Beginn entstehen und dann 50 Jahre in der Atmosphäre wirken können, oder ob diese erst am Ende des Zyklus in die Atmosphäre gelangen. Besonders vor dem Hintergrund des Erreichens verschiedener Kipppunkte des Klimasystems (Schwellenwerte, bei deren Überschreiten es zu starken und teils unaufhaltsamen und unumkehrbaren Veränderungen kommt) sind Treibhausgas-Emissionen, die heute stattfinden, wesentlich schädlicher als Emissionen in einer Zukunft von 50 Jahren oder mehr. Hans Joachim Schellnhuber spricht in diesem Zusammenhang davon, dass wir uns heute in der „entscheidenden Dekade“ befinden.

Vor allem aber bewirkt dieser Unterschied eine Verlagerung der Verantwortung: Bei nicht biogenen Baustoffen entstehen die Emissionen unmittelbar bei der Herstellung und werden von den heutigen Planungsbeteiligten verantwortet. Bei biogenen Baustoffen hingegen organisieren die Planungsbeteiligten die Einlagerung von CO₂ und zukünftige Generation haben im Falle eines Rückbaus mehrere Optionen, ob und zu welchem Anteil diese gebundenen Emissionen wieder an die Atmosphäre abgegeben werden (Abb. 45).

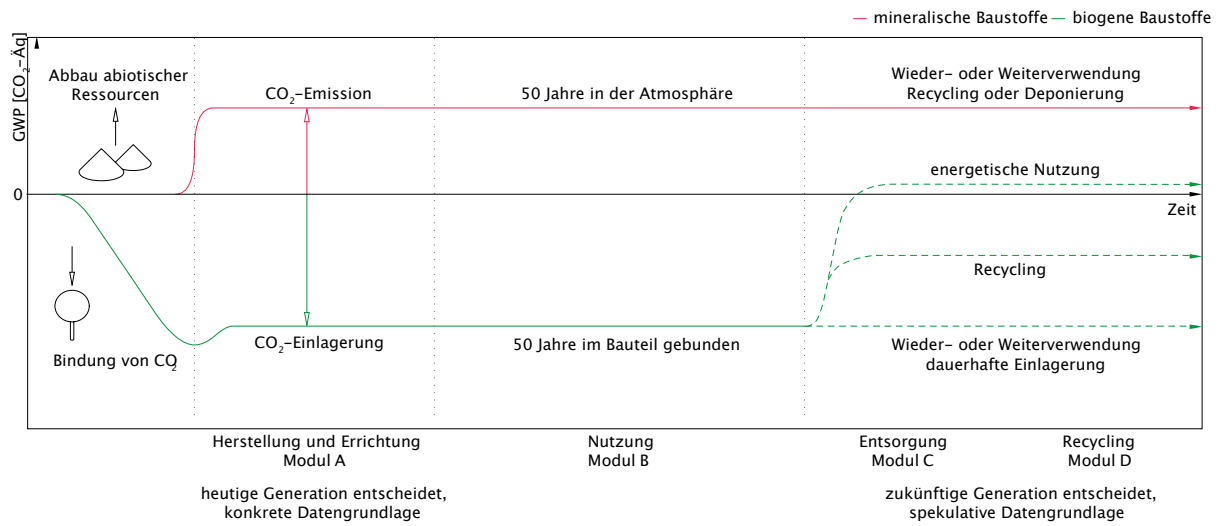


Abb. 45: Vergleich der CO₂-Wirkung mineralischer und biogener Baustoffe

6.5 Ökobilanzberechnung für das Reallabor Circuleum

Im Rahmen des Projektes Stuttgart 210 wurde für den Gebäudeentwurf „Reallabor Circuleum“ eine Berechnung der Ökobilanz erstellt. Als Grundlage diente hierfür die Norm DIN EN 15978 mit ihrer Definition der Lebenszyklusmodule von Gebäuden. Für die Re-Use-Bauteile wurden folgende Randbedingungen angesetzt:

- Use-Systemgrenze (KG 300 neue Bauteile):

In der Ökobilanz werden die Lebenszyklusmodule aller neuen Bauteile mit ihrer Herstellungsphase (Module A1-A3) sowie die der Entsorgungsphase (Module C3-C4) betrachtet. Darüber hinaus werden die Vorteile und Belastungen, die durch thermisches und stoffliches Recycling entstehen (Modul D), separat und rein informativ in die Bilanz aufgenommen. Gegenstand der Betrachtung sind all jene Baustoffe, die der KG 300 zuzuordnen sind.

- Re-Use-Systemgrenze (KG 300 wiederverwendete Baustoffe):

Die wiederverwendeten Holzschalungselemente werden in der Ökobilanz im Modul A1-A3 nur mit ihrem biogen gebundenen CO₂-Anteil (GWP biogen), ohne die fossilen Aufwendungen für die Herstellung (GWP fossil) berücksichtigt. Außerdem wird die Entsorgung in Modul C3-C4 berücksichtigt; Modul D wird auch hier separat und rein informativ ausgewiesen. Gegenstand der Betrachtung sind all jene Baustoffe, die der KG 300 zuzuordnen sind.

- Verwendete Ökobilanzdaten:

Die Ökobilanz wurde mit ÖKOBAUDAT-Datensätzen der Datenbankversion 2023-I (aktuelle Version: 2023-I vom 15.06.2023) gerechnet, die die Darstellung und separate Ausweisung des biogen gebundenen CO₂ und der fossil erzeugten Treibhausgasemissionen ermöglicht. Diese ÖKOBAUDAT-Datensätze sind konform zur DIN EN 15804+A2.

- Betrachtete Indikatoren:

GWP-total (gemäß DIN EN 15804+A2) bezeichnet das gesamte Globale Erwärmungspotenzial und umfasst die drei Unterkategorien des Klimawandels GWP-fossil, GWP-biogen und GWP-luluc. Wie in DIN EN 15804+A2, Abschnitt 7.2.3.1 beschrieben, müssen die drei Unterkategorien separat deklariert werden, wobei auf die separate Deklaration von GWP-luluc verzichtet werden kann, wenn dessen Beitrag < 5 % von GWP-gesamt über die deklarierten Module mit Ausnahme von Modul D ausmacht (EN 15804+A2, 7.2.3.). Die Einheit sind kg-CO₂-Äquivalente (kg CO₂-Äq.).

- GWP-fossil berücksichtigt das GWP durch Treibhausgasemissionen und -bindung in allen Medien, die durch die Oxidation oder Reduktion von fossilen Brennstoffen oder fossilen Kohlenstoff enthaltenden Stoffen entstehen (z. B. Verbrennung, Lagerung auf Deponien usw.). Dieser Indikator beinhaltet außerdem die Bindung oder Emission von Treibhausgasen in anorganischen Materialien (z. B. Calzinierung, Carbonatisierung von Baustoffen auf Zement- oder Kalkbasis). Die Einheit sind kg-CO₂-Äquivalente (kg CO₂-Äq.).
- GWP-biogen berücksichtigt die während des Wachstums von Biomasse aus der Atmosphäre aufgenommene und über die Lebensdauer des Materials gebundene Menge an CO₂ sowie biogene Emissionen in die Luft durch Oxidation oder Zerfall von Biomasse (z. B. Verbrennung). Die Einheit sind kg-CO₂-Äquivalente (kg CO₂-Äq.).

6.5.1 Darstellung der Ergebnisse

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Berechnung dargestellt. Abbildung 46 zeigt in grün den Anteil der Re-Use-Elemente an der insgesamt verbauten Masse. Diese haben mit rund zwei Drittel eine relevante Größenordnung. Zusammen mit den neuen Holzbauteilen ergibt sich ein Anteil biogener Baustoffe am Gesamtgewicht von rund 97%. Die nicht biogenen Bauteile haben keinen relevanten Anteil. In Abbildung 47 sind zusammengefasst die wichtigsten Bauteilgruppen mit den jeweiligen Mengen sowie der Zuordnung zum entsprechenden Datensatz der Ökobaudat aufgeführt.

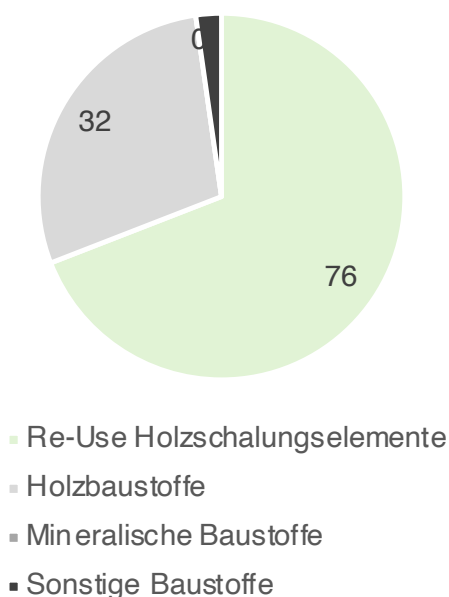


Abb. 46: Verbaute Massen [t] der unterschiedlichen Materialgruppen im Reallabor Circuleum

Verbaute Materialien	Menge	Datensatz Ökobaumat*
SCHRAUBFUNDAMENTE	1337,04 kg	Befestigungsmittel/Schrauben verzinkt
GUMMIBELAG	7,52 m ²	Gummi-Bodenbelag profiliert EN 12199 (de) en de
PE-FOLIE	867,20 m ²	Dampfbremse PE (de) en de
EINFACHVERGLASUNG	90,00 m ²	Fensterglas einfach (de) en de
FASERZEMENT 1 cm	3,40 m ²	Faserzementplatte (Fassade) (de) en de
DREISCHICHTPLATTE	1,44 m ³	3- und 5-Schicht Massivholzplatte (Durchschnitt DE)
KVH	36,78 m ³	Konstruktionsvollholz (Durchschnitt DE) (de) en de
NADELHOLZ	26,30 m ³	Nadelschnittholz - getrocknet (Durchschnitt DE) (de) en de
WIEDERVERWENDETE SCHALUNGSELEMENTE BRETTSPERRHOLZ	155,80 m ³	Brettsperrholz (Durchschnitt DE) (de) en de

Abb. 47: Zusammenfassung der wichtigsten Materialien mit der Zuordnung zu den Ökobaumat-Datensätzen für die Ökobilanz des Reallabors Circuleum. * Die Ökobilanz wurde berechnet mit ÖKOBAUMAT-Datensätzen der Version: 2023-I vom 15.06.2023. Diese sind konform zur DIN EN 15804+A2.

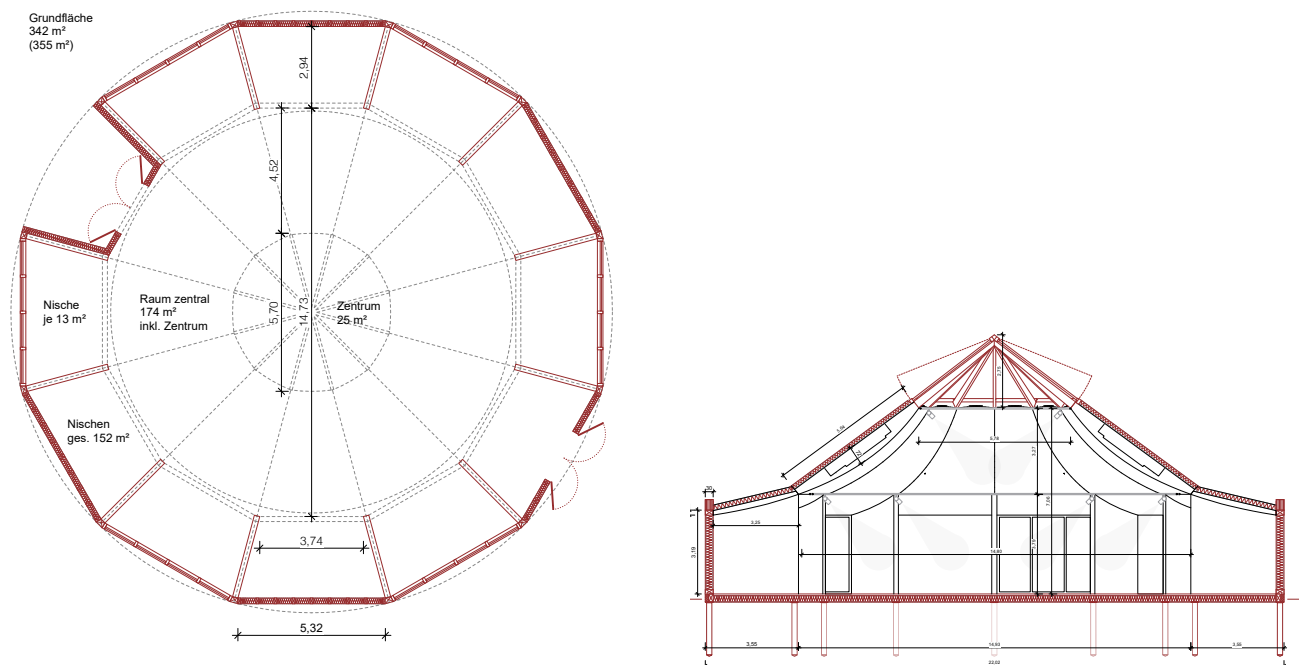


Abb. 48: Grundriss und Schnitt für das Reallabor Circuleum

Das Gesamtergebnis in Abbildung 49 zeigt die absoluten Treibhausgasaufwendungen für GWP-total, untergliedert in die Teilergebnisse für die wiederverwendeten Holzschalungselemente, die neu eingebrachten Holzbaustoffe, für mineralische Baustoffe sowie für sonstige Baustoffe. Da keine mineralischen Bauteile vorhanden sind, ist der Anteil an den Treibhausgasemissionen hier 0 kg CO₂ Äq. Zu erkennen ist auch gut, dass die Re-Use-Elemente trotz deutlich größerem Anteil als die neuen Holzbauteile im Ergebnis erheblich geringere Werte aufweisen. Dies liegt begründet in der hier verwendeten Methodik, dass bei biogenen Re-Use-Bauteilen nur der fossile Anteil aus Modul A nicht berücksichtigt wurde. Dies bildet sich auch in der nach Modulgruppen differenzierten Darstellung in Abbildung 50 ab: Die positive Wirkung als CO₂-Speicher ist bei den Re-Use-Bauteilen überproportional zur Masse größer. Dies wirkt sich in der Gesamtbilanz (vgl. Abb. 50) allerdings nicht entsprechend aus, da wie oben aufgeführt nach der gültigen Bilanzierungsmethodik eine thermische Verwertung bzw. Verrottung am Ende des Lebenszyklus und damit die Freisetzung des Kohlenstoffs angesetzt werden muss.

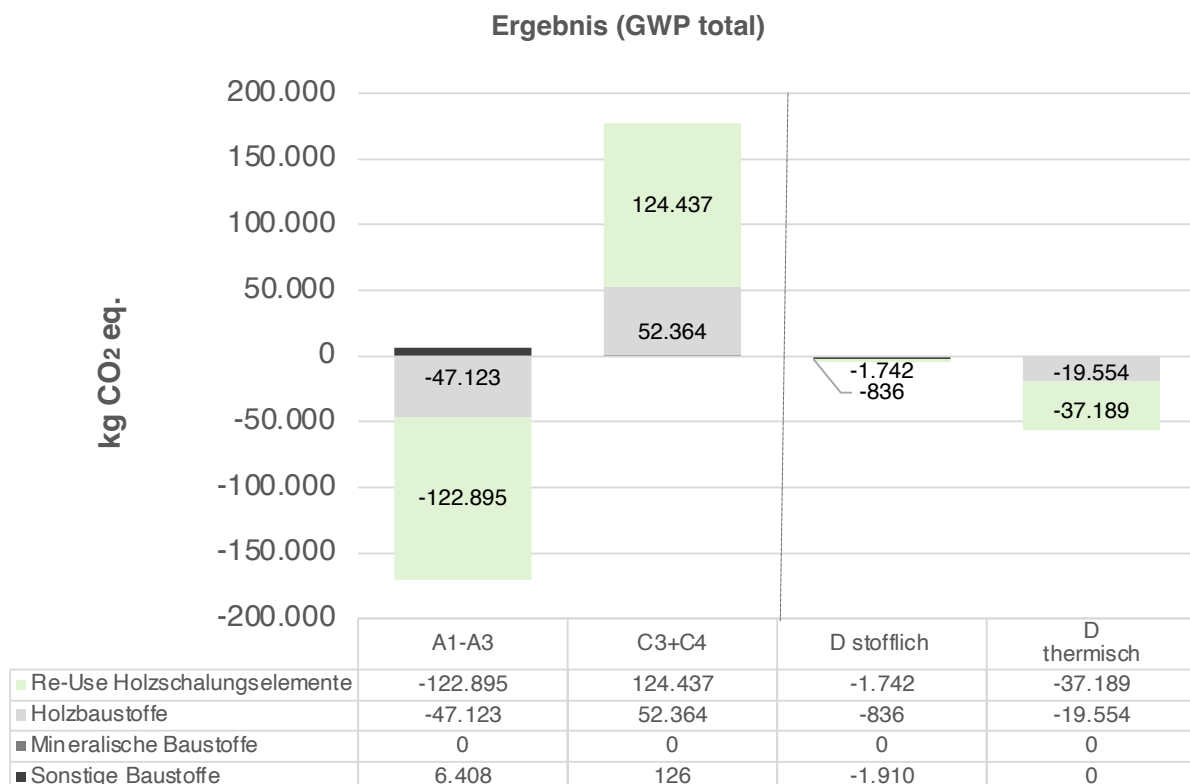


Abb. 49: Ergebnis der Ökobilanzrechnung für das Reallabor Circuleum

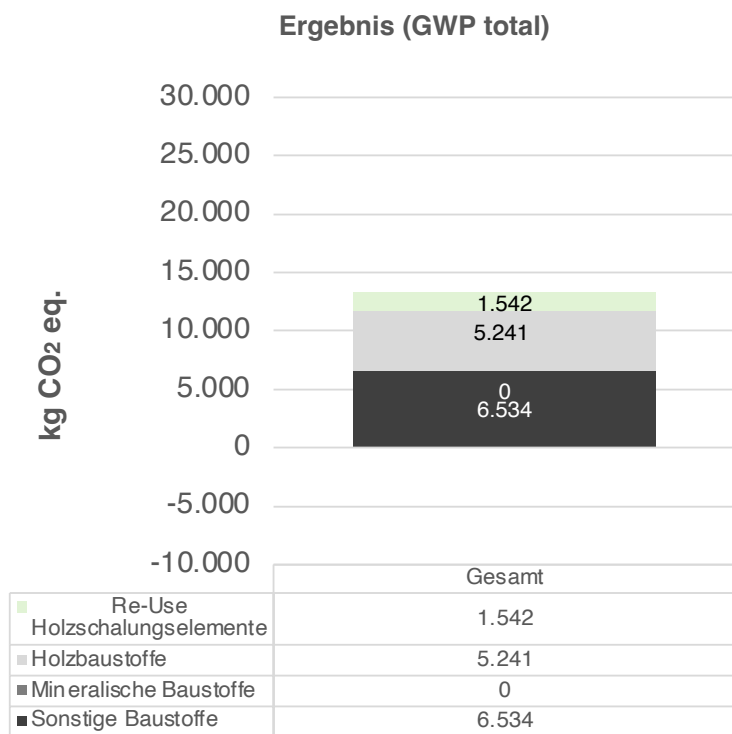


Abb. 50: Differenzierte Darstellung der Ergebnisse nach LC-Modulen. Auf eine separate Darstellung für GWP-luluc wurde verzichtet, da dessen Beitrag < 5 % von GWP-gesamt über die deklarierten Module mit Ausnahme von Modul D ausmacht.

6.6 Zusammenfassung

Das Teilprojekt Ökobilanzierung hat im Projekt Stuttgart 210 wichtige Erkenntnisse für die aktuelle und zukünftige ökologische Bewertung von biogenen Re-Use-Elementen erbracht:

- Es konnte aufgezeigt werden, dass die aktuellen Methoden der Ökobilanzierung generell deutliche Schwächen aufzeigen, insbesondere im Hinblick darauf, dass sowohl der Zeitpunkt der Entstehung von Emissionen als auch die unterschiedliche Qualität der Datengrundlage der Module A (konkrete Planung), B (Szenario auf Grundlage konkreter Planung) und C (rein spekulative Annahmen) keine Berücksichtigung finden.
- In Bezug auf biogene Baustoffe ist es nach den aktuellen Bilanzierungsmethoden nicht möglich, das dauerhafte CO₂-Speicherpotenzial abzubilden. Die gebundenen Kohlenstoffmengen werden nur als „Durchlaufposten“ eingebunden und haben keinen Einfluss auf das Gesamtergebnis.
- In Bezug auf Re-Use-Bauteile gibt es aktuell eine Regelung, die biogene Re-Use-Baustoffe gegenüber mineralischen deutlich benachteiligt. Wenn Bauteile aus dem Rückbau in neuen Bauprojekten erneut verwendet werden, werden für diese Bauteile im Neubau keine Emissionen im Modul A der Ökobilanz angesetzt. Dies wirkt sich in der Regel positiv auf das Gesamtergebnis bei nicht-biogenen Bauteilen aus. Bei biogenen Bauteilen entfällt dadurch jedoch das CO₂-Bindungspotenzial, das normalerweise in Modul A berücksichtigt würde, in der Ökobilanz des Neubaus. Die Emissionen für biogene Bauteile müssen jedoch weiterhin im Modul C erfasst werden.
- Im Reallabor Stuttgart Vaihingen wurde deshalb das CO₂-Bindungspotenzial der wiederverwendeten Schalungselemente im Modul A mit einbezogen. Die Ergebnisse zeigen einen entsprechend positiven Effekt, dennoch wird aus den oben genannten Gründen das volle Potenzial in der Ökobilanz nicht abgebildet. Entsprechende Anpassungen bzw. Möglichkeiten zur Flexibilität sind daher als Empfehlung dringend erforderlich.

7. Reallabore

„Reallabore als Testräume für Innovation und Regulierung machen es möglich, unter realen Bedingungen innovative Technologien, Produkte, Dienstleistungen oder Ansätze zu erproben, die mit dem bestehenden Rechts- und Regulierungsrahmen nur bedingt vereinbar sind. Die Ergebnisse solcher zeitlich und oft räumlich begrenzten Experimentierräumen bieten die Grundlage dafür, den Rechtsrahmen evidenzbasiert weiterzuentwickeln.“ [24]

Die Initiierung und Vorbereitung von Reallaboren war Gegenstand des zweiten Förderantrags „Stuttgart 210 II - Vorbereitung Reallabore“, der im November 2023 bewilligt wurde. Diese Reallabore dienen als physische Testfelder, in denen innovative Ansätze zur Wiederverwendung und Weiterverwendung von Materialien in realen Bauprojekten angewendet und untersucht werden können. Das Konzept hinter den Reallaboren basiert auf der Prämisse, dass nachhaltiges Bauen nicht nur in der Theorie, sondern vor allem in der Praxis erforscht und vorangetrieben werden muss. Denn nur durch den Bau echter Gebäude aus den weiterverwendeten Schalungselementen kann der gesamte Prozess von der Planung über die Umsetzung bis zur Fertigstellung des Gebäudes betrachtet werden. Dies ermöglicht nicht nur die technischen und ökologischen Aspekte zu bewerten, sondern auch die sozialen, ökonomischen und rechtlichen Rahmenbedingungen auszuloten. So können die Machbarkeit und Wirksamkeit von Upcycling-Strategien zu demonstriert und gleichzeitig wertvolle Daten und Erkenntnisse für die Forschung gesammelt werden.

Ein wesentlicher Teil der Fördermittel des Antrags „Stuttgart 210 II“ wurde dafür aufgewendet, die Schalungselemente für die Reallabore in Stuttgart-Vaihingen (Rundraum), Ingersheim (Jugendtreff) und Marbach (Fahrradüberdachung) zu sichern.

Die Ausarbeitung der Entwürfe für die nachfolgend beschriebenen Reallabore durch Hochschulen Konstanz und Stuttgart (Architektur) sowie Karlsruhe (Tragwerksplanung) stellen etwa die Bearbeitungstiefe eines Vorentwurfs (LPH 2 gem. HOAI) dar. Sie sollen die Umsetzbarkeit der jeweiligen Projekte nachweisen und dienen der Sicherung und Beschaffung der für die Entwürfe benötigten Elemente sowie zur Findung eines Bauherren. Weiterführende Nachweise, Berechnungen und Planungen werden im Anschluss des Forschungsprojekts von externen Planungsbüros erarbeitet, die die jeweiligen Bauherren der Reallabore unabhängig vom Forschungsprojekt beauftragt. Diesen Planungsbüros werden die Nutzungsrechte des Entwurfs durch die Entwurfsverfasser übertragen.

7.1 Reallabor Stuttgart Vaihingen



Abb. 51: Innenraumvisualisierung des Rundbaus für das Projekt Circuleum in Stuttgart-Vaihingen, Entwurf HTWG Konstanz

7.1.1 Entwurf

Das Reallabor Stuttgart-Vaihingen ist mit ca. 380 m² BGF das größte der 4 Reallabore. Es besteht aus den ikonographischen Elementen der Unterschaltung der Kelchstützen des Stuttgarter Hauptbahnhofs und bildet daher im Innenraum die Negativform der Kelche. Die Schalungselemente sind jedoch um 180° gedreht „über Kopf“ eingesetzt, so dass ein Zirkuszelt-artiger Rundraum entsteht, der aus den inneren beiden Kreisen der Kelch-Unterschaltung mit jeweils zwölf Elementen gebildet wird.

Es werden jedoch ausschließlich die Elemente der geschlossenen Kelchseite verwendet und nicht die Schalungen des Oberlichttrands. Dafür sind die Elemente zweier Schalsätze notwendig, denn jeder Schalsatz enthält nur sieben geschlossene Schalungen (U_1_A bis U_6_A und U_12_A sowie U_1_B bis U_6_B und U_12_B).

Teile: (je 2x)
U_1_A; U_2_A; U_3_A; U_4_A; U_5_A; U_6_A
U_1_B; U_2_B; U_3_B; U_4_B; U_5_B; U_6_B

M: 1:100

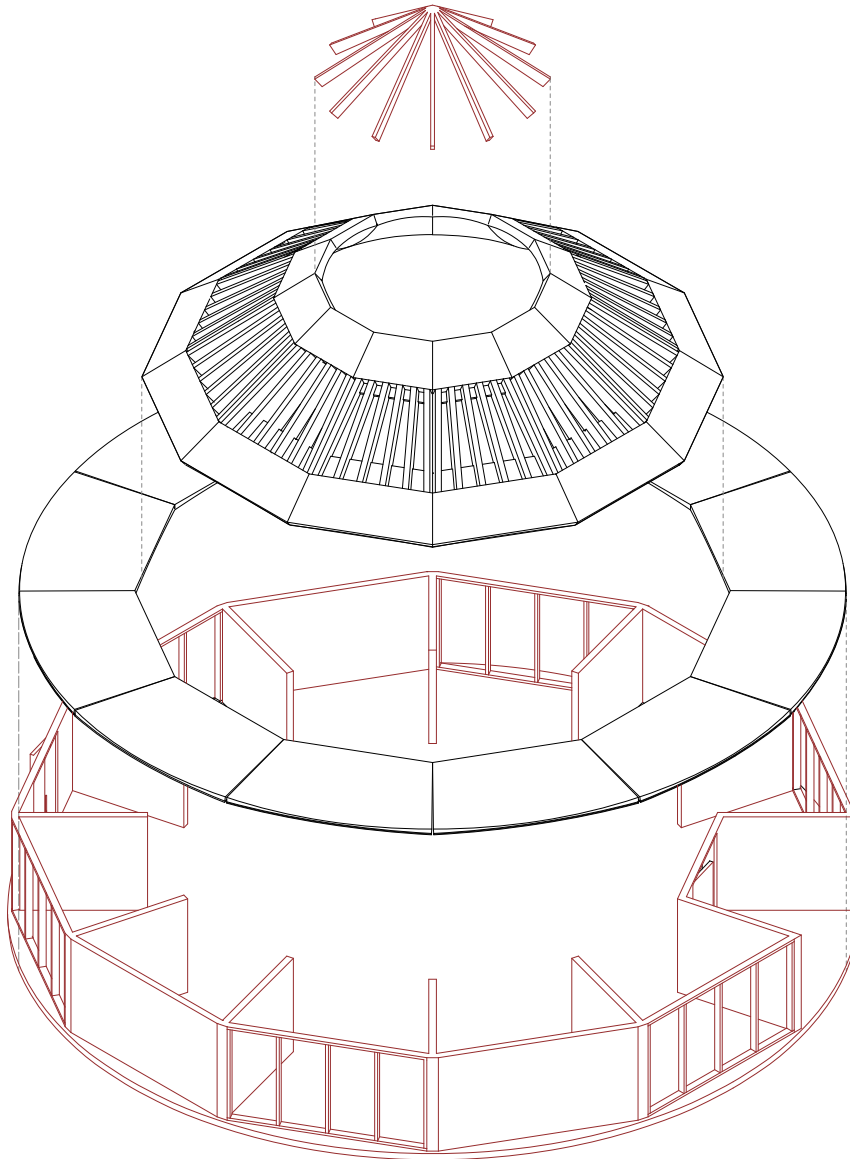


Abb. 52: Sprengaxonometrie des Rundbaus (schwarz: Schalungselemente, rot: ergänzende Bauteile)

Ursprünglich existierten drei gleiche Schalsätze für die die Ober- und Unterschaltungen, die als Wanderschaltungen zum Betonieren aller 28 Kelchstützen verwendet wurden. Das Forschungsprojekt plante für seine Entwürfe alle dieser Schalungen ein und meldet die Weiterverwendung auf der Baustelle an. Als der Abtransport organisiert wurde, stellte sich jedoch heraus, dass ein kompletter Schalsatz bereits entsorgt worden war. Bis zum Zeitpunkt des Abtransports wurden die verbleibenden beiden Schalsätze separat gelagert. Dennoch konnte

nicht verhindert werden, dass vier Elemente des inneren Rings der Unterschaltung verloren gingen. Das Projektteam hatte mit 14 Elementen gerechnet, 12 für den Bau und 2 für etwaige zerstörende Untersuchungen zu verwenden. Tatsächlich konnten jedoch nur 10 Elemente nach Vaihingen transportiert und eingelagert werden.

Allerdings konnten auch einige Elemente der an den Oberlichtrand anschliessende Schalenelemente (U_7_A und U_11_A) gesichert werden. Ggf. werden zerstörende Untersuchungen an diesen Elementen vorgenommen, denn sie verfügen über denselben Querschnitt in Spannrichtung, jedoch nur über die Hälfte der Breite. Eventuell könnten auch zwei dieser Elemente seitlich abgeschnitten und als Konstruktion des Reallabors verwendet werden, um die fehlenden beiden Elemente zu ersetzen. Allerdings sind diese Elemente auf Grund einer horizontalen, unlackierten Brettspertholzfläche deutlich stärker von der Bewitterung angegriffen als die übrigen Elemente. Dadurch würden sie sich als Probestücke für Belastungstests besonders gut eignen.

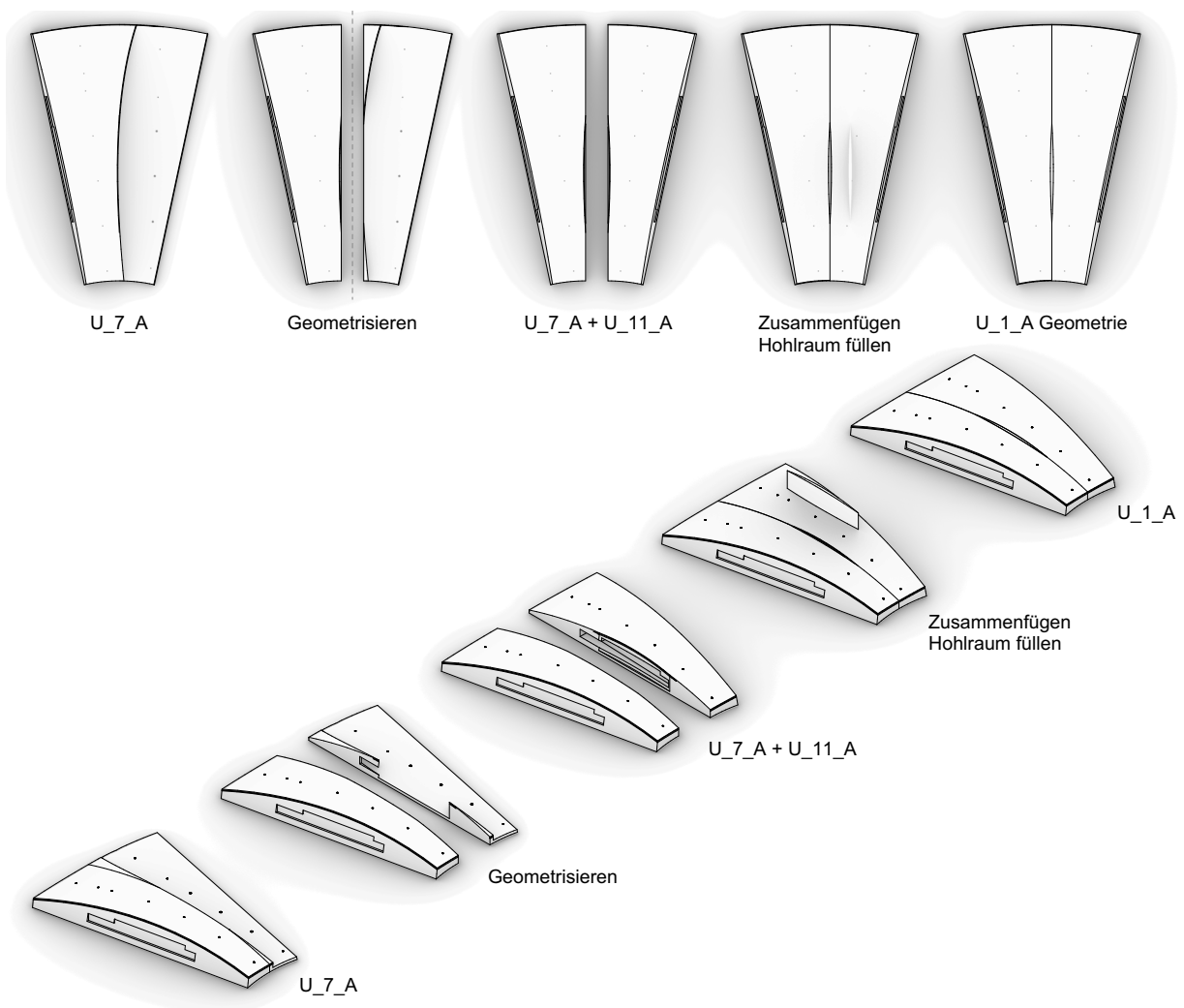


Abb. 53: Strategie zum Ersatz der fehlenden Elementen U_1_A bis U_6_A durch Zusammenfügen geometrisierter U_7_A bzw. U_11_A

Im Zuge der weiteren Planung ist zu ermitteln, wie die fehlenden Teile am besten zu ersetzen sind: Entweder durch die Verwendung der Elemente U_7_A und U_11_A, durch neue Elemente gleicher Machart oder durch andere Konstruktionen, die die Lücke räumlich und hinsichtlich des Tragwerks schließt.

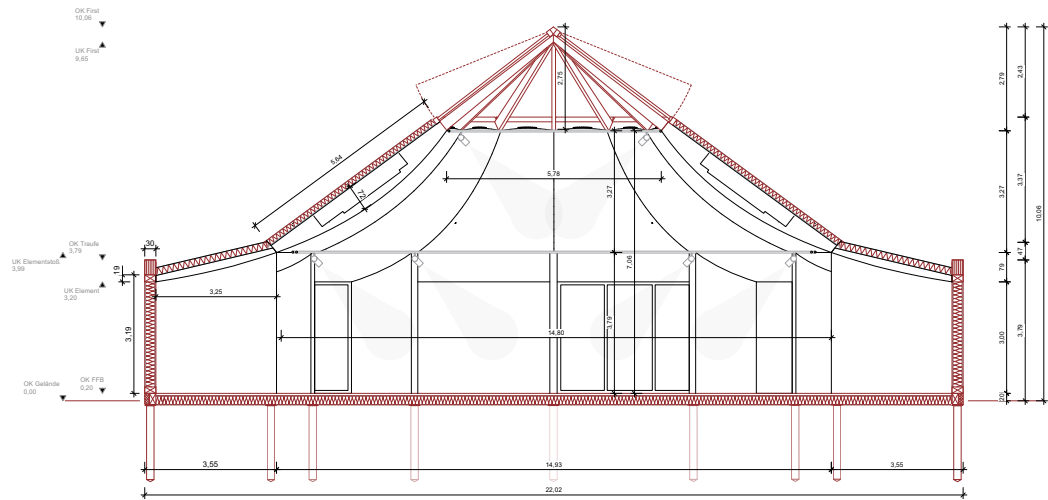


Abb. 54: Schnitt des Rundbaus (schwarz: Schalungselemente, rot: ergänzende Bauteile)

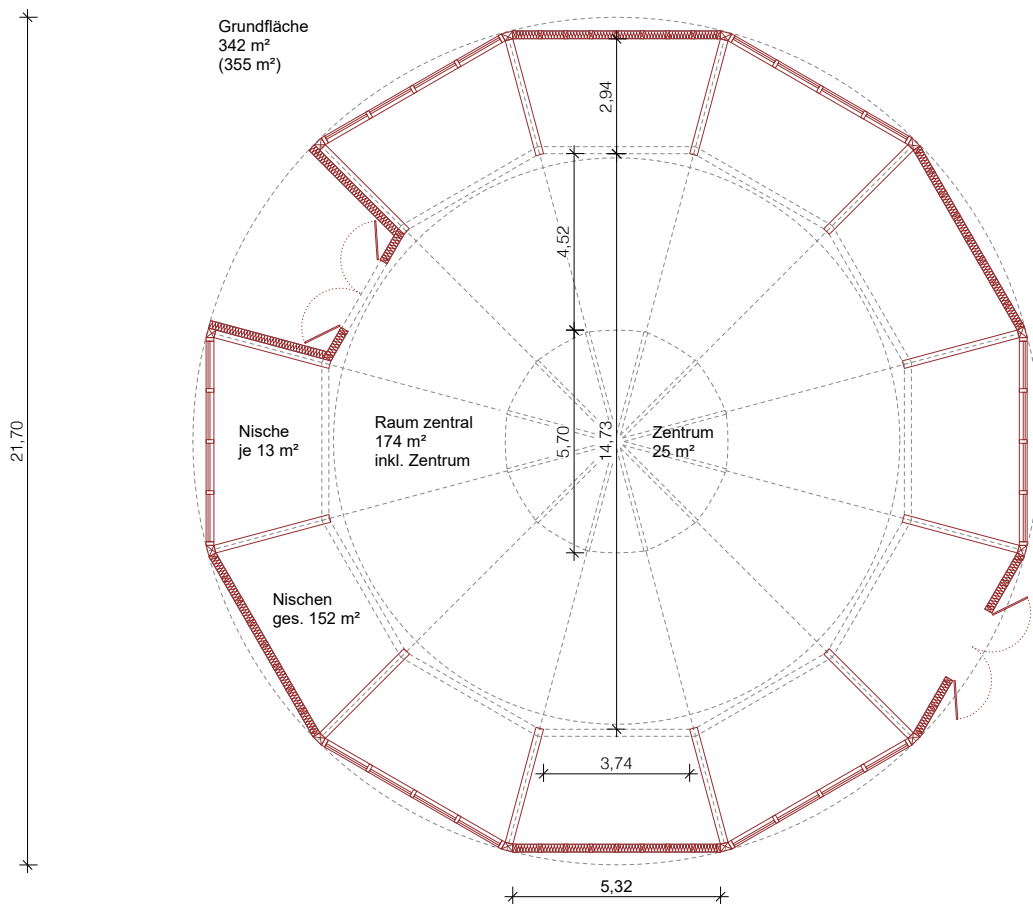


Abb. 55: Grundriss des Rundbaus (schwarz: Schalungselemente, rot: ergänzende Bauteile)

Funktionalität

Ausgangspunkt für den Entwurf des Rundbaus war die Geometrie der Schalungselemente. Zwar hatte es auch andere Entwürfe zur Verwendung dieser Schalelemente gegeben (Markthalle, Würth-Store und andere). Bei diesen Entwürfen wären die Schalungselemente jedoch nur sekundärer Teil des Tragwerks gewesen.

Als das Forschungsteam sich mit dem Entwurf des Rundbaus auf die Suche nach Bauherren für ein Reallabor machte, meldete sehr schnell Timon Schillinger, Projektleiter des „Circuleum“, Interesse an. Das Circuleum ist ein Social Startup des Planungsbüros Kreativhaltig und der Stuttgarter Jugendhaus Gesellschaft. Das Projekt versteht sich als Netzwerk aus Kinder- und Jugendzirkussen, Profi-Artist*innen, Trainer*innen, Künstler*innen und Zirkus- bzw. Kunstbegeisterten [25]. Auf einem Grundstück in Stuttgart-Vaihingen betreibt das Startup-Unternehmen aktuell ein saisonal gemietetes Zirkuszelt, um seine Veranstaltungen durchzuführen. Der Rundbau aus den Schalungselementen ersetzt dieses Zelt durch ein besseres Raumangebot. Nicht nur bietet er bei ähnlicher Größe und Geometrie einen stützenfreien Raum, sondern auch das Potential einer ganzjährigen Nutzung, die bei einer Zeltkonstruktion auf Grund zu hoher Heizkosten nicht möglich ist. Auch für das Forschungsprojekt ist diese Konstellation ein glücklicher Zufall, da so das räumliche und konstruktive Potential der Schalungen optimal ausgeschöpft werden kann.

Zukünftig wird der Rundbau als Veranstaltungsraum sowie als Bewegungsraum für Kinder und Jugendliche genutzt.



Abb. 56: Visualisierung des Rundbaus auf dem Gelände des Projekts Circuleum in Stuttgart-Vaihingen, HTWG Konstanz

Sukzessiver Ausbau

Die geplante Nutzung unterliegt keinen normierten Anforderungen. Darin verbirgt sich ein besonderes Potenzial: Unwägbarkeiten hinsichtlich der Kosten könnte durch variable Ausbaustufen begegnet werden: Zunächst sollte das Tragwerk mit Deckung und Dämmung des Dachs sowie ein Witterungsschutz der Außenwände hergestellt werden. Damit ist sofort eine saisonale Nutzung möglich, zu deutlich komfortableren Konditionen als aktuell bei Nutzung eines Zelts, denn sowohl Hitze und Kälte als auch andere Witterungseinflüsse (Sturm, Starkregen, etc.) können durch die massive Holzkonstruktion wesentlich besser ausgeglichen werden. Die vollständige thermische Gebäudehülle könnte durch nachträgliche Dämmung der Außenwände und des Bodenaufbaus sowie durch Einbau von Fensterelementen in einem zweiten Schritt umgesetzt werden. Ab diesem Zeitpunkt stünde das Gebäude für die meisten geplanten Veranstaltungen ganzjährig zur Verfügung. In einem dritten Schritt könnte die technische Gebäudeausstattung einschließlich Heizung und Verfeinerungen des Ausbaus erfolgen, so dass letztendlich eine uneingeschränkte, ganzjährige Nutzung möglich ist.



Abb. 57: Visualisierung des Rundbaus in Ausbaustufe 1 (ohne vollständige thermische Gebäudehülle; die Fensteröffnungen können mittel LKW-Planen gegen Witterung geschützt werden)



Abb. 58: Visualisierung des Rundbaus in Ausbaustufe 2 bzw. 3 (vollständige thermische Gebäudehülle mit Fensterelementen)

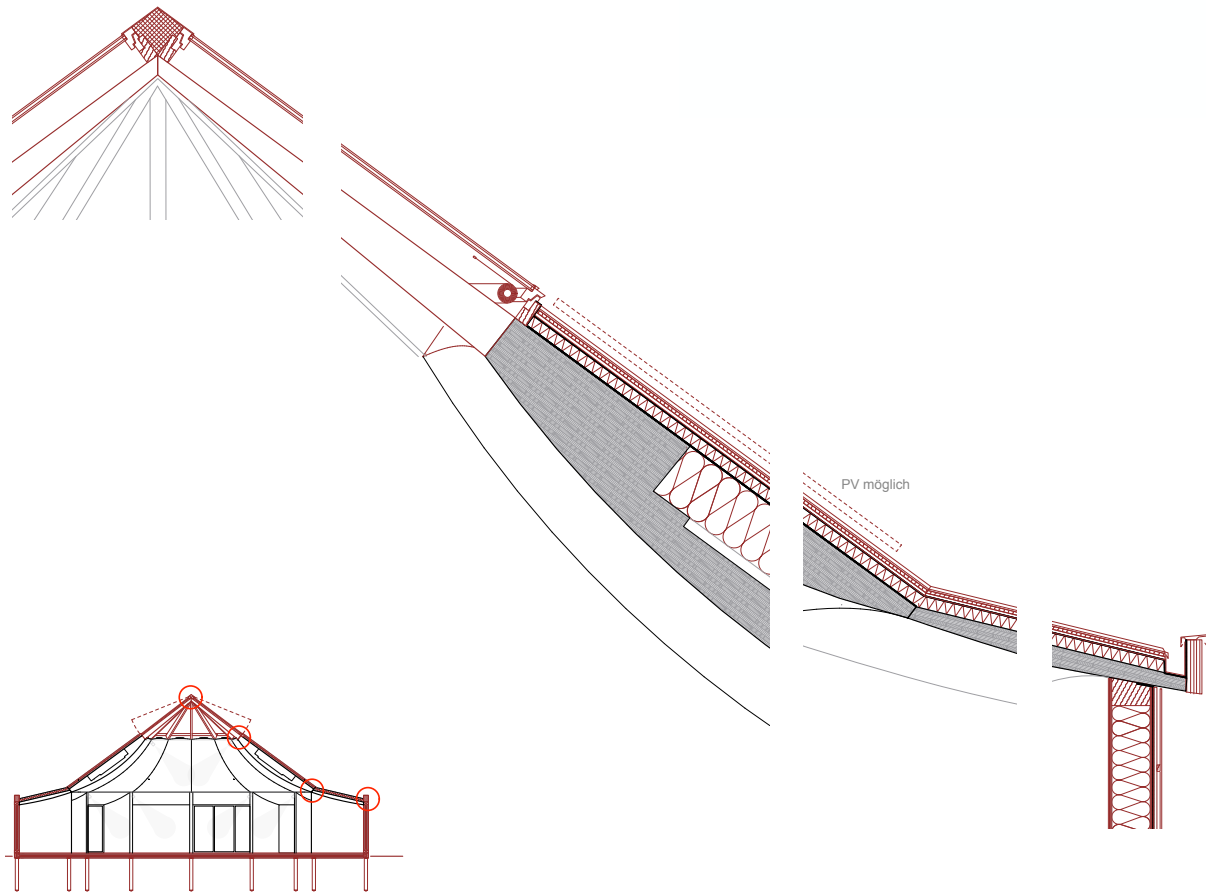


Abb. 59: Detailpunkte Firstanschluss, Oberlicht, Elementstoß Dach und Traufanschluss (schwarz: Schalungselemente; rot: ergänzende Bauteile/Konstruktionen), Entwurf HTWG Konstanz

Bauherrschaft und Beginn Planungsleistungen

Anfang 2023 wurden die Schalungselemente nach sehr kurzer Vorlaufzeit auf das Gelände des Circuleum transportiert - gerade noch rechtzeitig, um deren Entsorgung aus Platzmangel auf der Baustelle des Stuttgarter Bahnhofs zu verhindern. Die Elemente wurden zunächst als Schallschutzbarriere entlang der Bahnlinie aufgebaut, um das Gelände des Circuleums von den Lärmimmissionen der Bahn zu entlasten. Nachdem zunächst das Circuleum die Bauherrenfunktion übernehmen wollte, erklärte die Eigentümerin des Grundstücks, die Stadt Stuttgart, das Interesse, den Bau des Reallabors selbst zu tragen. So könnte der Rundbau auch bestehen bleiben, wenn der Vertrag zur Nutzung des Grundstücks mit dem Circuleum auslaufen würde.

Zunächst wurde in Machbarkeitsstudien die zukünftige Nutzung des Geländes antizipiert. Die Position des Rundbaus wurde so ermittelt, dass zusätzlich auf dem Grundstück eine Dreifachsporthalle Platz finden kann.

Im Juni 2023 stellten Stefan Krötsch und Roman Kreuzer das Projekt im Stuttgarter Stadtrat

vor. Die Umsetzung des Reallabors und die Bereitstellung der Kosten von geschätzten 1.000.000 € durch die Stadt Stuttgart wurde daraufhin im Stadtrat einstimmig beschlossen. Leider konnten seit diesem Beschluss keine nennenswerten Planungsfortschritte erzielt werden. Anfang 2024 wurden die Nutzungsrechte aus dem Urheberrecht des Entwurfs von der HTWG Konstanz an die Stadt Stuttgart übertragen. Die Materialprüfanstalt (MPA) der Uni Stuttgart erstellte ein Angebot über die Prüfung der Elemente für eine Zustimmung im Einzelfall (ZiE).

Inzwischen hat ein Vergabeverfahren zur Beauftragung der Planungsleistungen statt gefunden, so dass von einer Umsetzung bis 2027 ausgegangen werden kann.

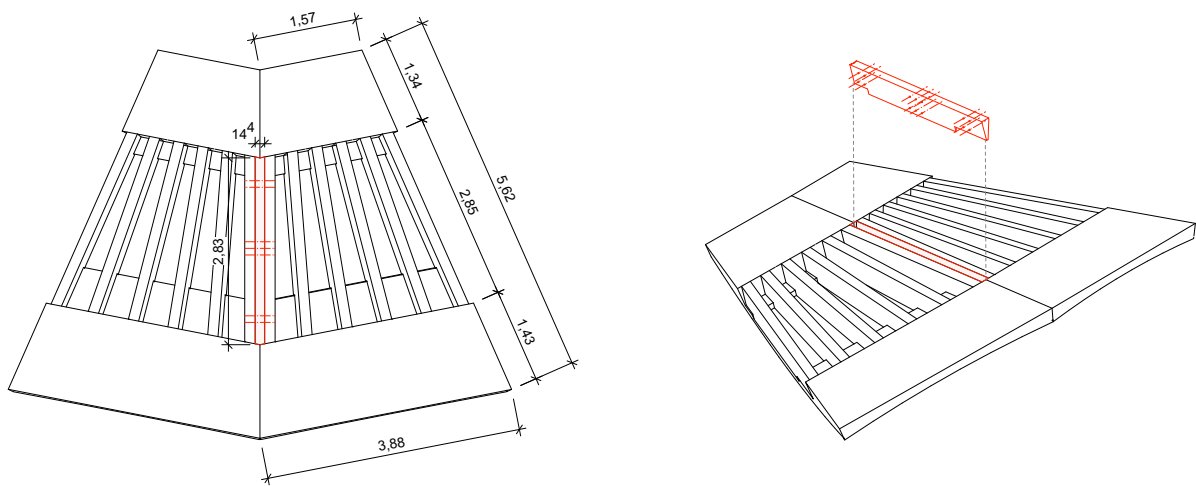


Abb. 60: Fügepunkte am Elementstoß zur kraft- und formschlüssigen Verbindung, Entwurf HTWG Konstanz

kreislaufgerecht

Auch das Reallabor Stuttgart-Vaihingen bietet - analog zum Reallabor Mannheim - die Möglichkeit weitgehender Nutzung von Re-Use-Elementen in Form des Upcyclings. Die Schalungselemente bilden das Tragwerk. Die Dämmung des Gebäudes kann aus einfachen und kostengünstigen Re-Use-Materialien wie Getreidestroh oder Altkleidern bestehen. Die Fenster in den Außenwänden könnten Kastenfenster aus weiterverwendeten Fassadenelementen von Abbruchgebäuden bestehen. Die zusätzlich notwendigen Konstruktionen der Außenwände und des Bodenaufbaus können aus einfachen Holzkonstruktionen (Balkenlage und Tafelbauelemente) bestehen, deren biogene Materialität zusätzlich CO₂ einspeichert.

Lediglich für die Dachdeckung (Stehfalzdeckung), das Oberlicht und die Fundamente (Schraubfundamente) werden neue, nicht biogene Materialien benötigt. Die Fundamente könnten jedoch ggf. aus Betonteilen hergestellt werden, die durch Zersägen von Abbruch-Betonteilen gewonnen werden können.

Die Tragwerkskonstruktion begünstigt außerdem die Verwendung reversibler Verbindungen, so dass die gesamte Konstruktion ohne wesentlichen Bauteilverschleiß wieder demontiert und die einzelnen Elemente einer neuen Nutzung zugeführt werden könnten.

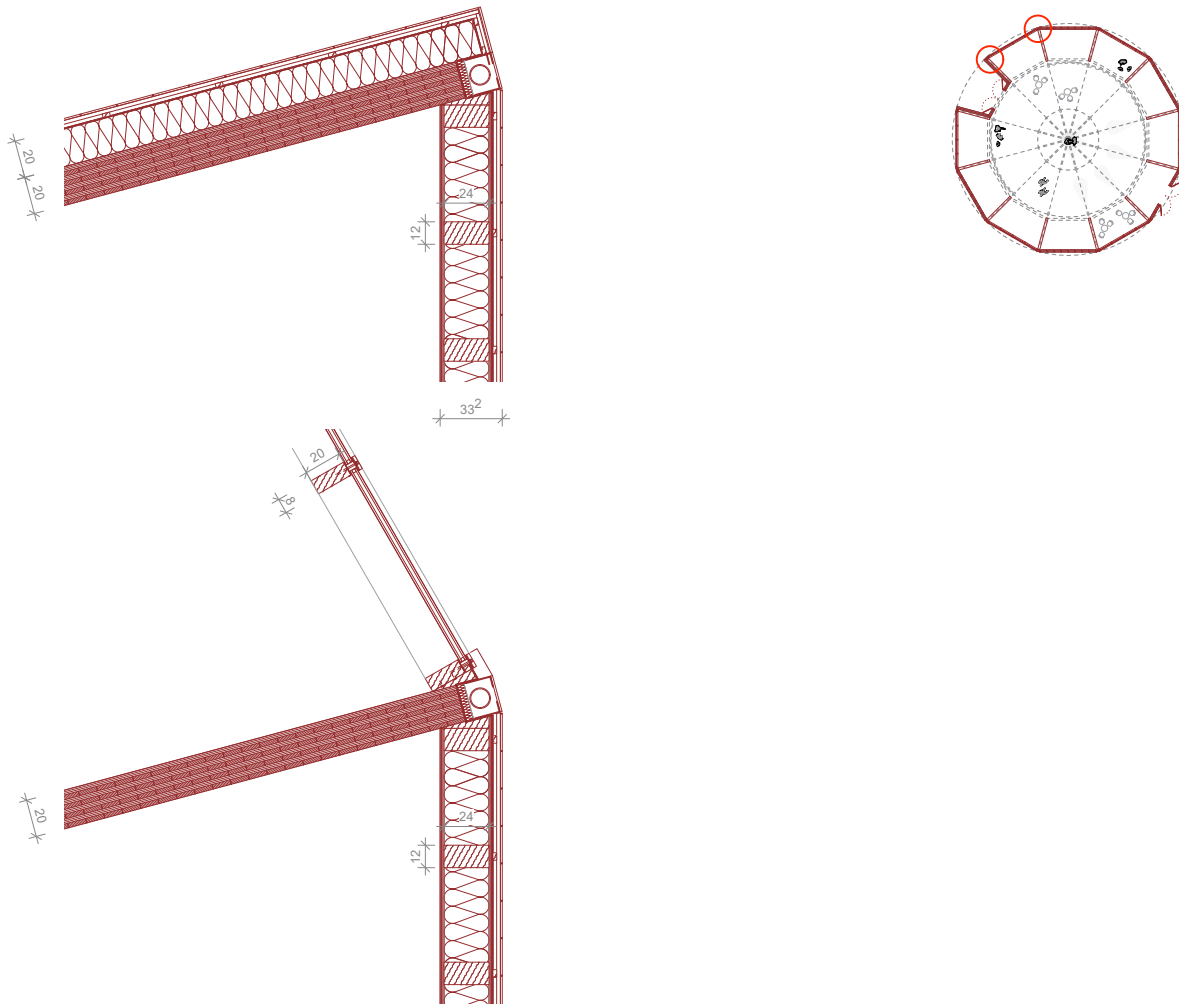


Abb. 61: Detailpunkte Wandanschlüsse und Sockel; links oben: Grundriss Außenecke an der Eingangsnische; links unten: Grundriss Außenecke (Regeldetail) mit Anschluss geschlossener Wand und Fensterelement; rechts unten: Sockelanschluss Außenwand

7.1.2 Tragwerk

Die primäre Nutzung beschränkt sich auf das Erdgeschoss, jedoch sollen Vorrichtungen für Artistik an der Dachkonstruktion angebracht werden können, die zusätzliche Personenlasten auf das Tragwerk ausüben.

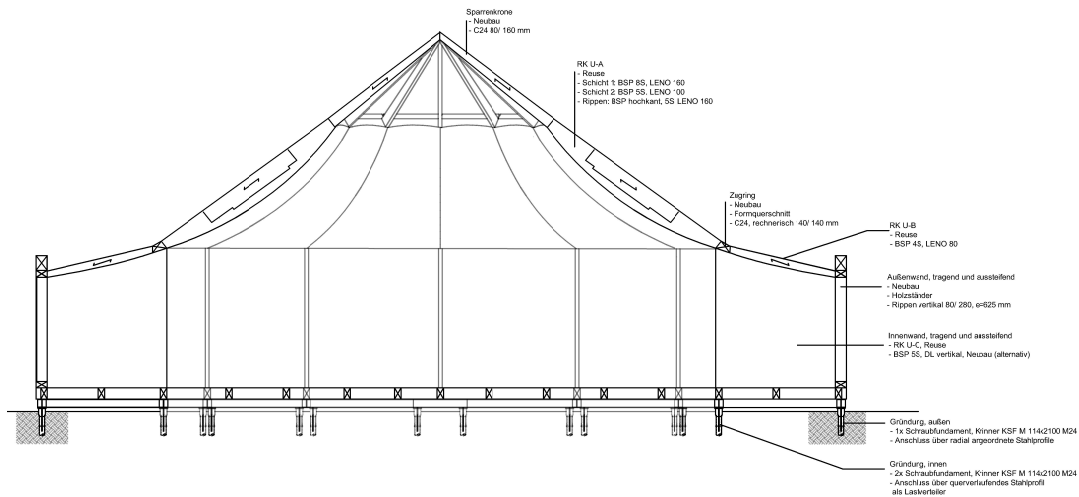


Abb. 62: Positionsplan Circuleum

Material- und Querschnittsbeschreibung

Hauptabmessungen:

$$D \times H = 21,7 \times 9,4 \text{ [m]}$$

$$BGF = 355 \text{ [m}^2\text{]}$$

Unterschaltung – Bereich A:

Schalungselemente aus zusammengesetztem Querschnitt. Bemessung erfolgt mit mehrschichtigem LENO-Materialmodell mit 20 mm Schichten gemäß dem tatsächlichen Querschnitt und BSP-Rippen LENO 100.

$$(L \times B \times H = \text{ca. } 5,5 \times 3,9 \times 0,6 \text{ [m]})$$

Elemente:

2 x U-1-A, 2 x U-2-A, 2 x U-3-A, 2 x U-4-A, 2 x U-5-A und 2 x U-6-A

Unterschaltung – Bereich B:

Schalungselemente aus einfachem Platten-Querschnitt. Bemessung erfolgt mit BSP-Platten LENO 80

$$(L \times B \times H = \text{ca. } 3,0 \times 5,5 \times 0,8 \text{ [m]})$$

Elemente:

2 x U-1-B, 2 x U-2-B, 2 x U-3-B, 2 x U-4-B, 2 x U-5-B und 2 x U-6-B

Primäre Tragwirkung, vertikaler Kraftfluss

Das Gesamtsystem ist dadurch gekennzeichnet, dass die wiederverwendeten Schalungselemente ein rotationssymmetrisches Tragwerk bilden. Die horizontalen Kräfte werden im Wesentlichen kurzgeschlossen, sodass die Gründung (Schraubfundamente) primär durch vertikale Kräfte beansprucht wird. Dabei werden die äußeren Einwirkungen aus Wind und Schnee zusammen mit den Ausbaulasten und dem Eigengewicht der Konstruktion über die zwölf massiven Elemente des Bereichs A zunächst über die Biegung der Rippen und anschließend der Platten aufgenommen.

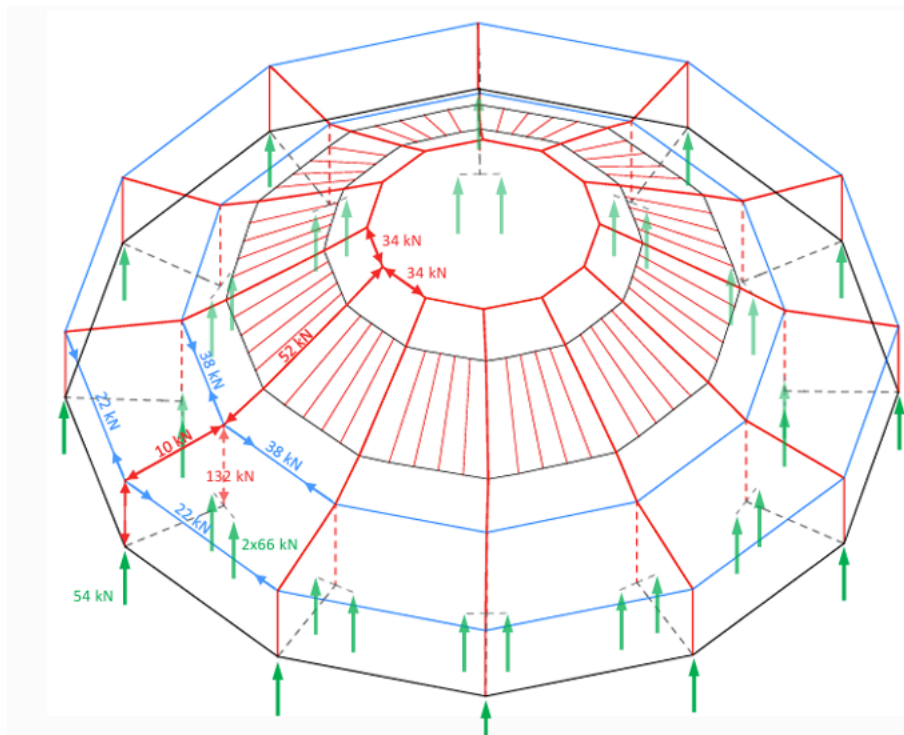


Abb. 63: Primäre Tragwirkung Circuleum

Diese kraftschlüssig miteinander verbundenen Elemente stützen sich gegenseitig ab und lassen am oberen Elementrand einen kleinen Druckring entstehen. Zusammen mit dem Zugring am unteren Elementrand halten sie die inneren Kräfte im Gleichgewicht. An den Zugring, der als Formquerschnitt hergestellt wird, schließen weiterführend die Elemente des Bereichs B an. Diese müssen neben ihren vertikalen Belastungen auch die horizontalen Reaktionskräfte aus den Elementen U-A aufnehmen. Die Elemente U-B werden dabei dreiseitig gelagert. Im Inneren befinden sich radial angeordnete Zwischenwände aus Brettsperrholz (Neubau- oder U-C-Elemente) und die Außenwand bilden neue Holzständerwände, auf denen die flächigen Elemente lagern. Ähnlich wie beim inneren Ring entstehen dabei entlang des äußeren Elementrands Zugbeanspruchungen, die jedoch kleiner ausfallen. Durch die Verbindung der Elemente mit den Wänden werden diese sicher in die Wände eingeleitet. Die Wän-

de erfahren überwiegend globale Druckbeanspruchungen und können diese direkt an die Fundamente weiterleiten. Als Fundamentierung werden Schraubfundamente eingesetzt. Hierbei wird an den zwölf äußeren Eckpunkten je ein Fundament gesetzt und an den inneren je zwei, da sie mehr als die doppelte Auflast erfahren. Diese sind orthogonal zu den Innenwänden über einen Lastverteilungssteg verbunden.

Aussteifungskonzept, horizontaler Kraftfluss

Die rotationssymmetrische Anordnung der Elemente ermöglicht es dem Tragwerk, die angreifenden horizontalen Einwirkungen gleichmäßig auf die äußeren Wandscheiben zu verteilen. Diese werden in Holztafelbauweise mit aussteifender Beplankung realisiert, um die nötige Steifigkeit in Wandlängsrichtung zu erreichen. Zudem wird das Bauwerk in Dachebene durch die schubsteif miteinander verbundenen Dachelemente ausgesteift. Auch hier kommen die horizontalen Ringe dem System zugute, da sie ebenso die horizontalen Reaktionskräfte in den Auflagern aufnehmen.

Montageablauf

Für die Herstellung des Tragwerks wird folgende Bauablauf vorgeschlagen:

- Setzen der Schraubfundamente
- Aufstellen der Stützen/Innenwände und Verbindung mit den Schraubfundamenten
- Aufstellen der Außenwände + Verbindung mit Innenwänden
- Einheben der U-B-Elemente und Verbindung dieser auf den Wänden
- Anbringung des Zugrings an U-B-Elemente
- Aufstellen der U-A-Elemente, gegenüberliegend mit Abstützung im Opäum
- Zuhilfenahme Hilfsgerüst
- Verbindung der U-A-Elemente mit dem Zugring über oberseitige Platte
- Verbindung der U-A-Elemente selbst über Adapterstücke
- Beplankung der U-A-Elemente
- Schließen der übrigen Außenflächen durch verglaste Pfosten-Riegel-Konstruktionen
- Herstellung des Bodenaufbaus

7.2 Reallabor Mannheim

7.2.1 Entwurf



Abb. 64: HKT-Elemente (Schalungen der seitlichen Bahnhofswand) auf der Baustelle in Stuttgart, 2022, Foto: Stefan Krötsch

Bereits 2022 hatte die Fa. Ed.Züblin der Stadt Mannheim 18 Schalungselemente zur Nutzung im Rahmen eines Reallabors überlassen, die seitdem in Mannheim gelagert sind. Dabei handelt es sich um Schalungselemente des Typs „HKT“ (Rippenplatten; $L \times B \times H = \text{ca. } 7,8 \times 1,8 \times 1,5 \text{ m}$; ca. 3 m³ Holz; ca. 1 bis 1,5 t), deren Auswahl und Zusammenstellung auf einem der Entwürfe Forschungsprojekts beruht. Der Entwurf sieht vor, sechs der Elemente zu halbieren, um so zwölf Wandelemente zu erhalten, auf denen jeweils zwei vollständige HKT-Elemente aufliegen, die ein Satteldach bilden. In sechsmaliger Reihung dieses Querschnitts entsteht ein nutzungsneutrales Gebäude mit einer Grundfläche von etwa 12 x 10 m.

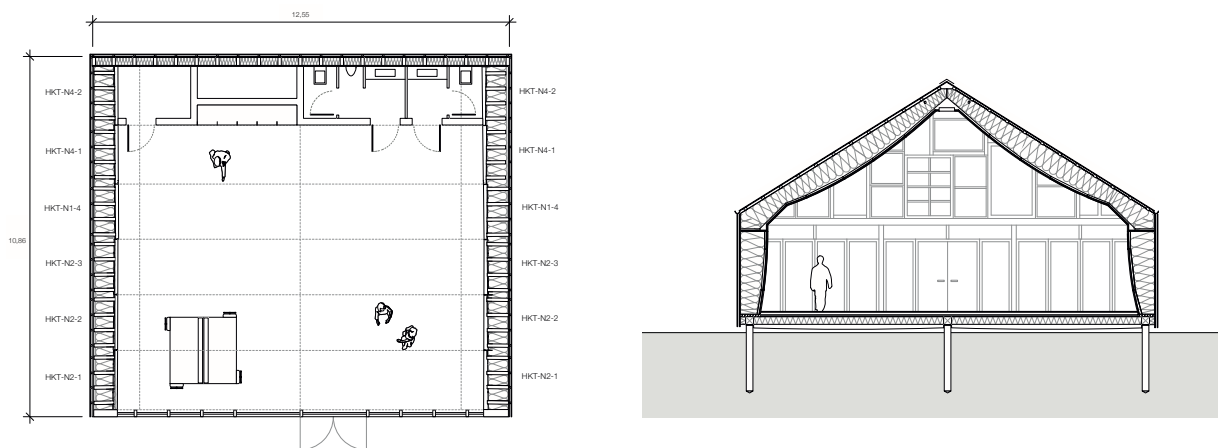


Abb. 65: Grundriss und Schnitt Nutzungsneutrales Gebäude mit Nebenraumzone

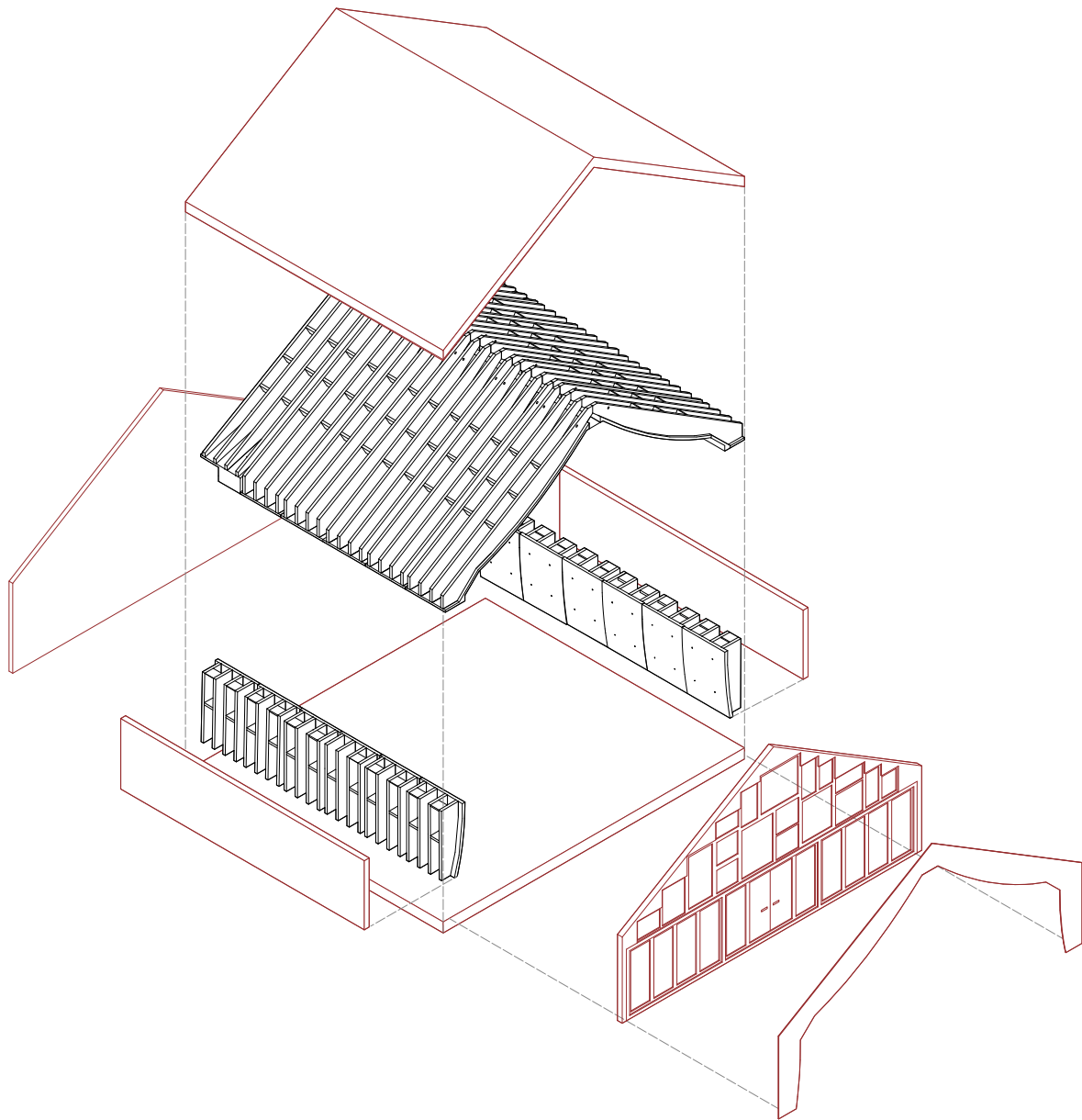


Abb. 66: Entwurf nutzungsneutrales Gebäude aus HKT-Elementen (schwarz: Schalungselemente, rot: ergänzende Bauteile)

Funktionalität

Nachdem zum Zeitpunkt des ersten Entwurfs noch keine Nutzung des Gebäudes festgelegt war, sieht der Entwurf einen möglichst nutzungsneutralen Raum von etwa 100 m² vor. Seit dem wurden verschiedene Nutzungen in Erwägung gezogen, beispielsweise als Speiseraum einer Schulmensa, als Bewegungsraum eines Kindergartens, als Waldkindergarten, als Veranstaltungs- und Mehrzweckraum oder als Bürofläche. Während die Seitenwände und Dachflächen aus den Stuttgarter Schalelementen bestehen und somit geschlossen sind, können beide Giebelwände vollständig oder teilweise mit Fenstern versehen werden. Das ermöglicht eine ein- oder zweiseitige Orientierung des Gebäudes, wie es in Probeentwürfen für verschiedene Positionen am Zugang zum Herzogenriedpark getestet wurde. Aber auch bei einseitiger Öffnung ist die Tageslichtversorgung auf Grund der Giebelhöhe ausreichend. Die

zweite Giebelwand könnte geschlossen werden (z. B. als einfache Holz-Tafelbauwand) oder auch als raumhaltige Schicht ausgebildet werden, in der Nebenräume wie Toiletten, Abstell-/Technikräume untergebracht werden. Über dieser Nebenraumschicht bliebe die Möglichkeit, eine Galerie mit einem Rückzugsbereich (Büroarbeitsplatz ö. ä.) zu organisieren.

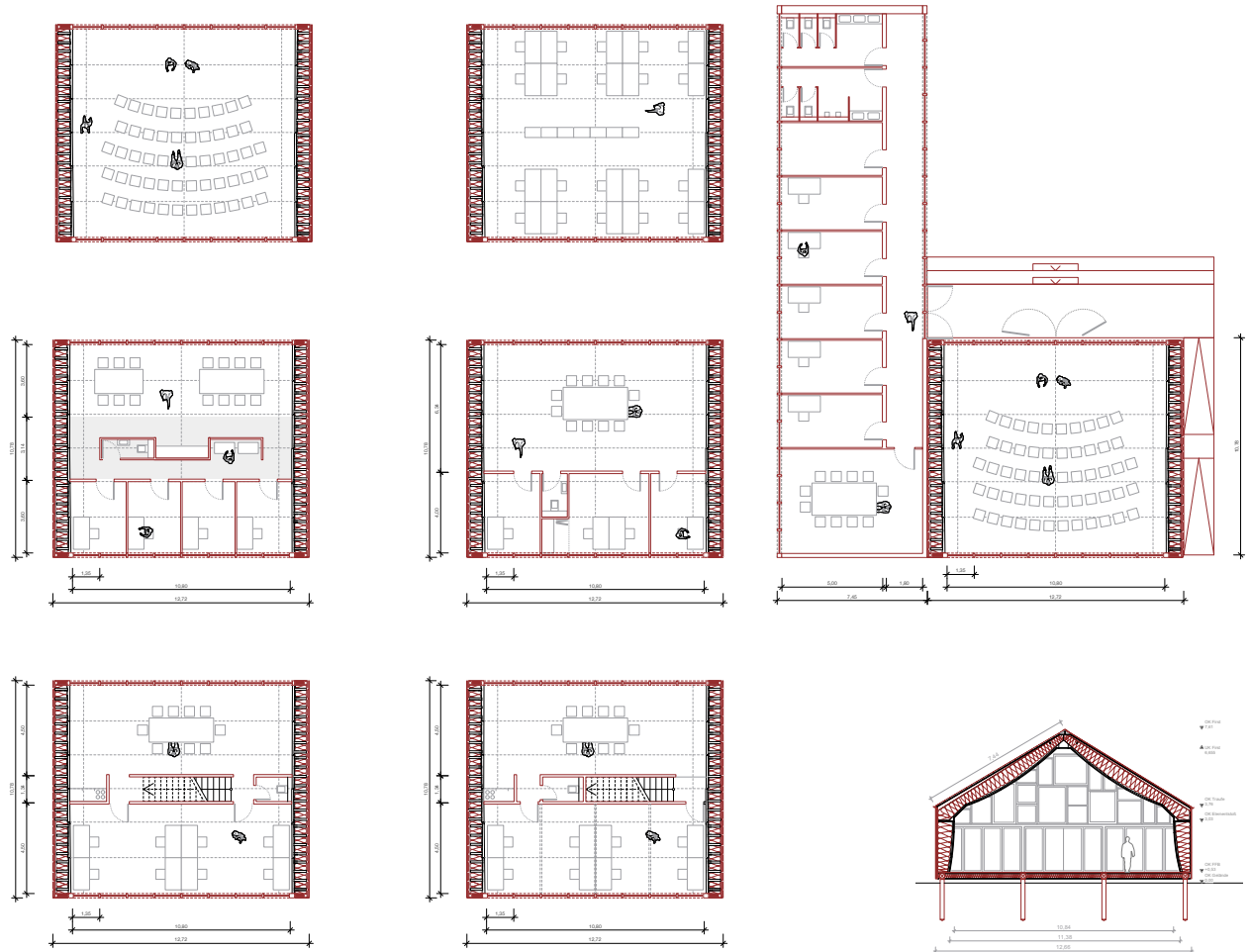


Abb. 67: Nutzungsvarianten als Veranstaltungs- oder Aufenthaltsraum, als Großraum- oder Kombibüro; ggf. mit zweiter Nutzungsebene (abhängig von Tragwerks- und Brandschutzkonzept) oder als Veranstaltungsraum in Kombination mit einem Büroneubau

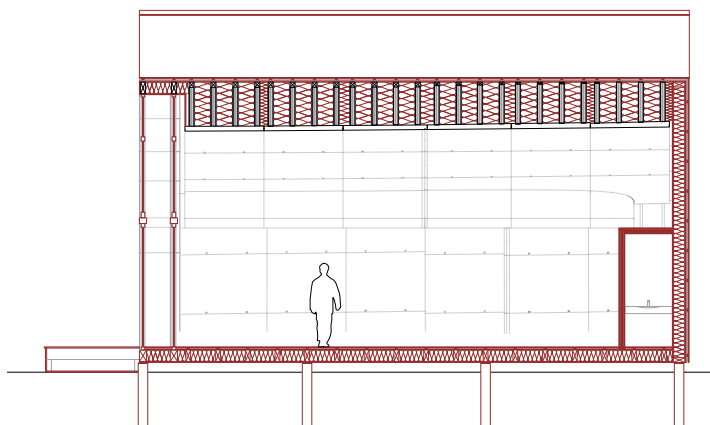


Abb. 68: Längsschnitt mit Anschluss Kastenfensterkonstruktion aus Re-Use-Fenstern an Tragwerk aus Schalungselementen

kreislaufgerecht

Das Mannheimer Projekt ist im Rahmen der vier Reallabore des Forschungsvorhabens besonders interessant, weil es als einziges fast vollständig aus wiederverwendetem Material gebaut werden könnte. Inzwischen gibt es in Europa einige Beispiele des Bauens mit wiederverwendetem Abbruchmaterial, hauptsächlich in den Niederlanden, der Schweiz und Skandinavien. Meist werden dabei Ausbaumaterialien wie Fenster, Wandbekleidungen oder Bodenbeläge wiederverwendet, selten auch Einzelteile des Tragwerks. Dass jedoch das vollständige Tragwerk eines Gebäudes aus Re-Use-Komponenten besteht, ist bisher nicht dokumentiert. Hier wäre das Mannheimer Reallabor das Erste seiner Art. Dieses Alleinstellungsmerkmal wird noch dadurch gesteigert, dass es sich bei den Stuttgarter Schalelementen um Bauhilfsmittel handelt. Die Verwendung als vollwertige und dauerhafte Konstruktion ist nicht nur eine Weiterverwendung (Recycling), sondern sogar eine höherwertige Verwendung (Upcycling).

Die Schalungselemente bilden Tragwerk und einen wesentlichen Teil der thermischen Gebäudehülle. Um das Denken in Materialkreisläufen zu vervollständigen, könnte auch die Dämmung des Gebäudes auf einfache und kostengünstige Art aus Abfall im juristischen Sinn bestehen, indem der Rippenzwischenraum der Elemente mit Getreidestroh oder Altkleidern gefüllt würde. Die Fenster in den Giebelwänden könnten Kastenfenster aus weiterverwendeten Fenstern aus Abbruchgebäuden bestehen. Auf diese Weise könnte ein prototypischer Experimentalbau entstehen, der in einzigartigem Umfang alle Bereiche kreislauffähigen Bauens beinhaltet.

Idealer Weise werden sämtliche Verbindungen reversibel hergestellt, so dass das Gebäude auch zukünftig vollständig und ohne Qualitätsverlust in seine Einzelteile zerlegbar und damit kreislauffähig bleibt.

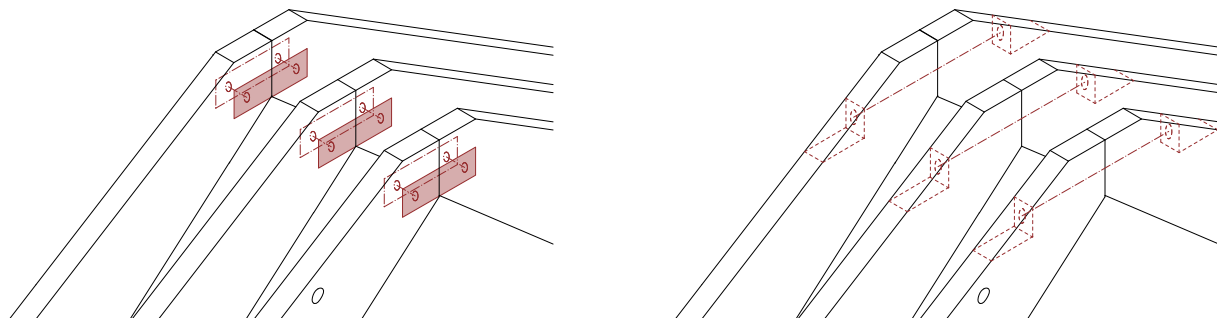


Abb. 69: Skizzen für Verbindungsprinzipien des Firstanschlusses als reversible Verbindung im Holzbau

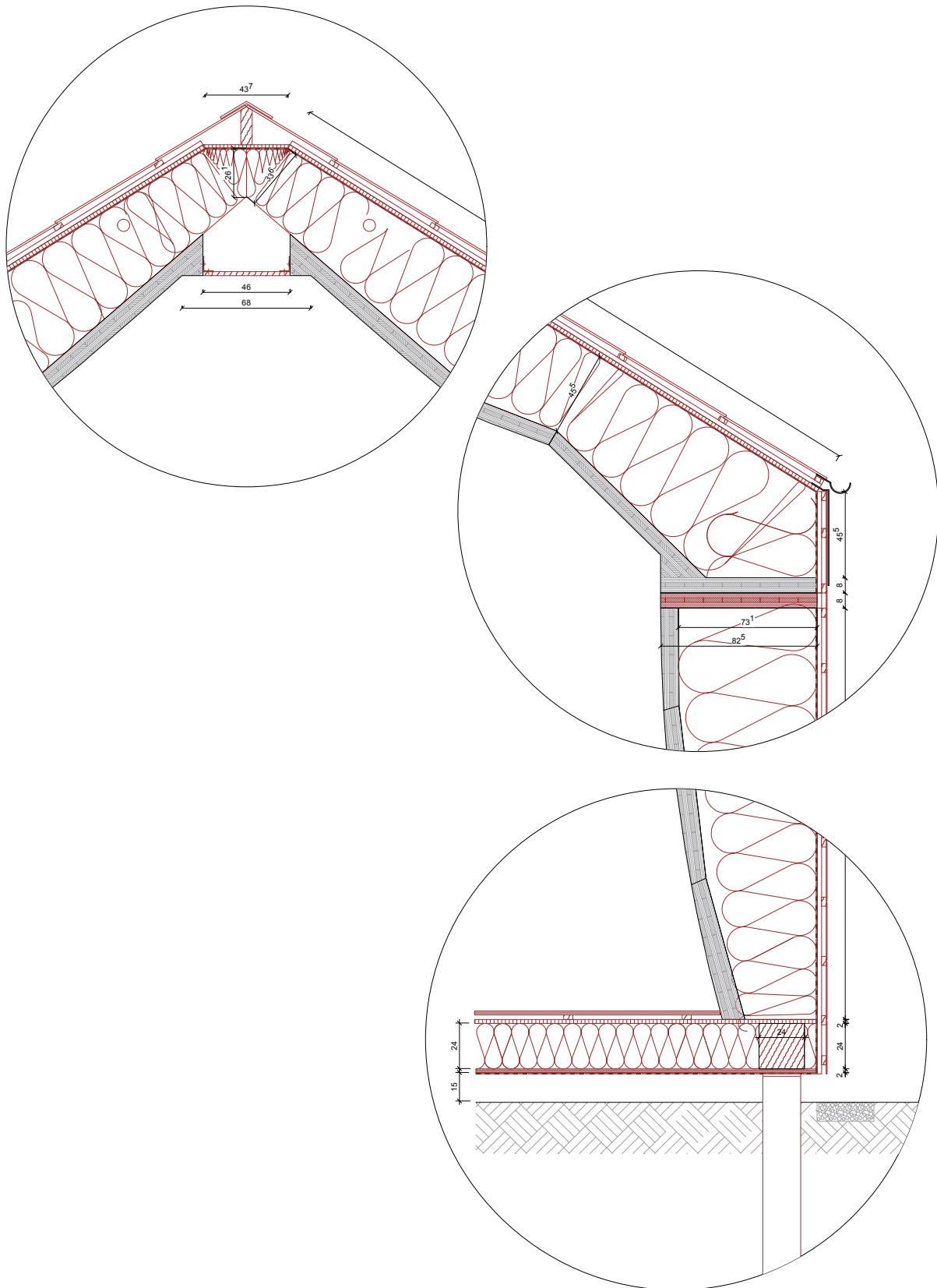


Abb. 70: Detailschnitte (schwarz: Schalungselemente, rot: ergänzende Bauteile); links oben: Firstanschluss; rechts oben: Traufanschluss mit Elementstoß; rechts unten: Sockelanschluss mit Fundamentierung

Materialität

Die Verwendung der Schalungen des Bahnhofs Stuttgart 21 bieten die Möglichkeit, eine einzigartige Architektur zu schaffen, die unter normalen Bedingungen unbezahlbar wäre. Denn die dreidimensional geschwungenen Holzoberflächen sind in der Herstellung äußerst aufwändig, indem meterdicke Schichten mehrfach blockverleimten Brettsperrholzes mit einem in acht Achsen beweglichen Roboterarm in die gewünschte Form gefräst wurden. Der vorliegende Entwurf kombiniert eine spezielle Auswahl von Schalungselementen (von denen es keine weiteren baugleichen Teile mehr gibt) auf eine Art und Weise, dass ein textil anmutender, zeltförmiger Innenraum entsteht, dessen Oberfläche jedoch aus massivem Holz besteht. Die Faszination des Raumerlebnisses wird umso deutlicher, je weniger Einbauten dieser Raum enthält. Außerdem ist geplant, den Bootslack, der die Schaloberfläche bisher bedeckt (und konserviert) zu entfernen. Dadurch kommt eine einzigartige Holzoberfläche zum Vorschein, die durch das amorphe, dreidimensionale Abfräsen der parallelen Lagen des Brettsperrholzes eine damaszenerstahlartige Struktur erhalten hat.



Abb. 71: Innenraum des Pilotprojekts: Die massiven Holz-Schalungselemente erhalten durch ihre Geometrie und Komposition eine textile Anmutung

7.2.2 Tragwerk

Material- und Querschnittsbeschreibung

Hauptabmessungen:

$L \times B \times H = 11,64 \times 12,22 \times 6,59 \text{ [m]}$

$BGF = 148 \text{ [m}^2\text{]}$

Dach:

Oberschalungselemente aus Hohlkastenträger-Bauteilen (HKT) bestehend aus BSP-Platte LENO 80 und stehenden BSP-Rippen LENO 100 ($L \times B \times H = \text{ca. } 7,8 \times 1,8 \times 1,5 \text{ [m]}$)

Elemente:

HKT-N1-1, HKT-N1-2, HKT-N1-3, HKT-N2-4, HKT-N2-5, HKT-N2-6, HKT-N3-1, HKT-N3-2, HKT-N3-3, HKT-N3-4, HKT-N3-5 und HKT-N3-6

Wände:

Oberschalungselemente aus Hohlkastenträger-Bauteilen (HKT) bestehend aus in BSP-Platte LENO 80 und stehenden BSP-Rippen LENO 100 ($L \times B \times H = \text{ca. } 3,05 \times 1,8 \times 1,5 \text{ [m]}$). Diese wurden in der Mitte geteilt.

Elemente:

HKT-N1-4, HKT-N2-1, HKT-N2-2, HKT-N2-3, HKT-N4-1 und HKT-N4-2

Primäre Tragwirkung, vertikaler Kraftfluss

Das Primärtragwerk ist ein statisch bestimmter Dreigelenkrahmen. An beiden Rahmenecken entstehen Biegemomente, die über eine geeignete Verbindung zwischen Stielen und Riegeln übertragen werden müssen. Da die Geometrie der bestehenden Elemente jedoch nicht immer eine passgenaue Fügung mit unmittelbarer Lastübertragung erlaubt, müssen die Kräfte ggf. umgeleitet werden, was mit einer Verringerung der Steifigkeit der Rahmenecke einherginge.

Die gesamte Dach- und Ausbaulast sowie äußere Einflüsse durch Schnee- und Windlasten werden über die Dachplatte und -scheibe auf die HKT-Deckenelemente abgetragen. Die Haupttragelemente sind die LENO-100-Rippen mit einer variierenden Höhe von durchschnittlich 60 cm. An den Eckpunkten, also dem Übergang der Wandelemente (Stiele) zu den Dachelementen (Riegeln), ist eine möglichst biegesteife Verbindung herzustellen. Dadurch können nicht nur Normalkräfte und Querkräfte, sondern auch Biegemomente übertragen

werden. Im Firstbereich und an den Auflagern erfolgt die Verbindung dagegen gelenkig. Zusätzlich zu den an den Rahmenecken entstehenden Schnittgrößen müssen die Wandelemente auch Biegebeanspruchungen aus horizontalen Windlasten aufnehmen. Die daraus resultierenden Normal- und Querkräfte werden schließlich in die Auflager abgeleitet.

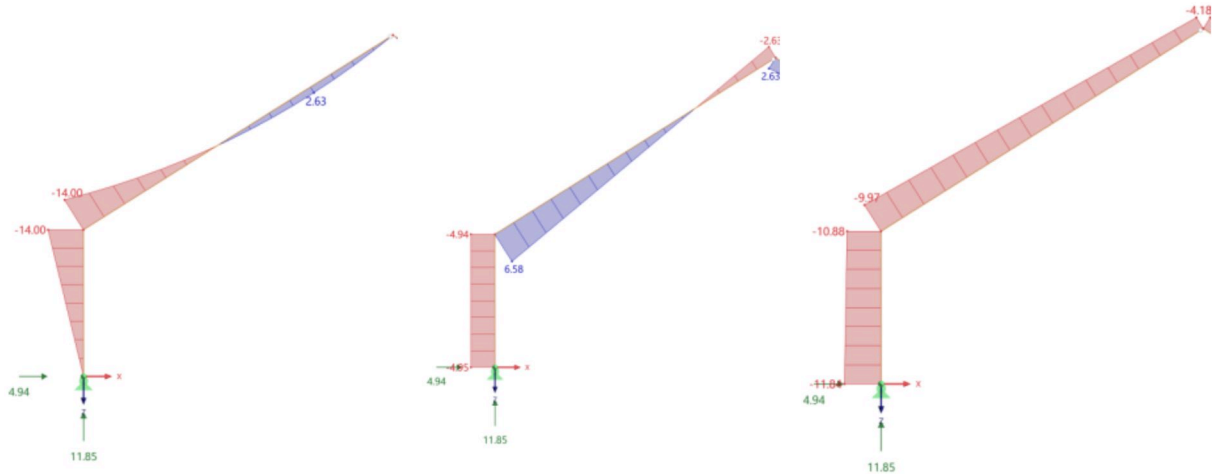


Abbildung 72: Schnittgrößen M_y , V_z , N der Biegesteife Rahmenecke

Die über einen Zugstab kurzgeschlossenen Rahmenaullager erfahren bei symmetrischer Belastung im Wesentlichen nur eine vertikale Beanspruchung. Dadurch können die Dimensionen der Gründung minimiert werden. Vorzugsweise erfolgt diese in Form von Schraubfundamenten aus Stahl.

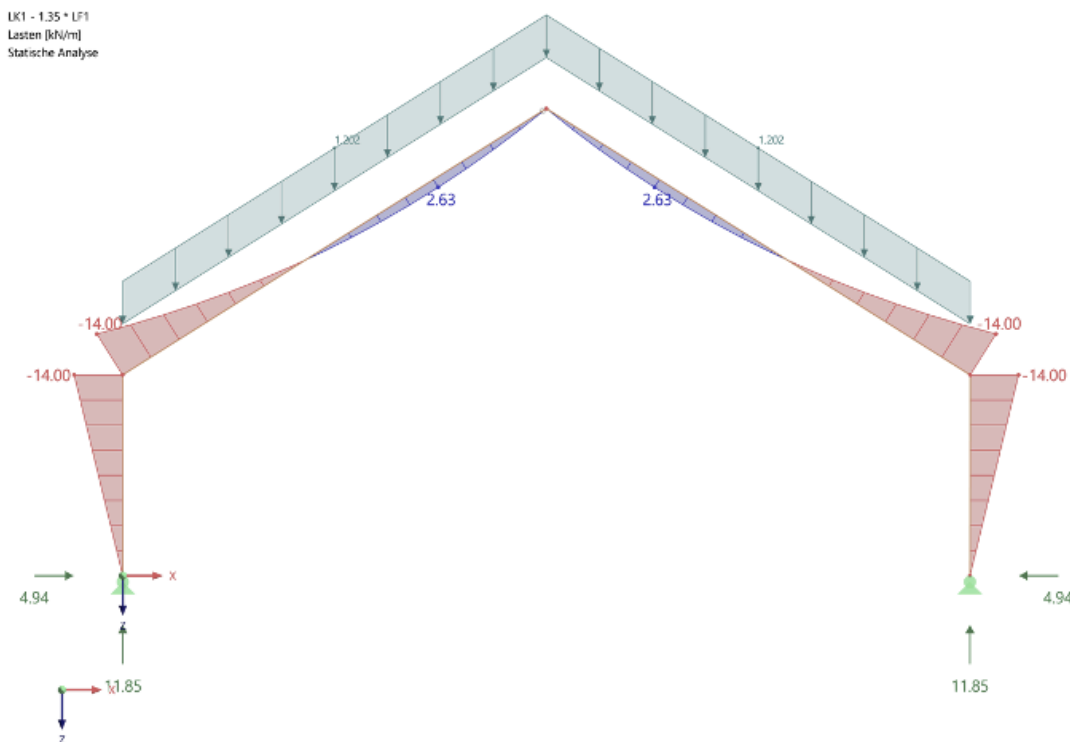


Abbildung 73: Momentenbild für das Gesamtsystem

Aussteifungskonzept, horizontaler Kraftfluss

Die Aussteifung kann auf zwei Wegen erfolgen:

- Über die Rahmentragwirkung in Kombination mit den Dachscheiben und den Scheiben in den beiden Längswänden.
- Anstelle der Rahmentragwirkung wird mindestens eine weitere Wandscheibe quer zu den beiden äußeren Wandscheiben angeordnet, idealerweise in Kombination mit einer Zwischendecke.

7.3 Reallabor Marbach

7.3.1 Entwurf

Die Gemeinde Marbach hatte sich bereits Anfang 2023 mit einer konkreten Bauaufgabe - einer Überdachung für Fahrradstellplätze am Friedrich-Schiller-Gymnasiums in Marbach - für die Umsetzung eines Reallabors beworben.

Die Vertreter der Gemeinde waren ursprünglich durch den Entwurf einer Fahrradüberdachung aus den U_1_A- bis U_6_A-Elementen der Kelchschalungen auf die Möglichkeiten des Forschungsprojekts aufmerksam geworden. Die dafür notwendigen Elemente waren jedoch einerseits bereits entsorgt (3. Schalsatz Unterschaltungen Kelche, vgl. Kapitel 6.2) oder bereits für den Rundbau in Stuttgart Vaihingen eingeplant.

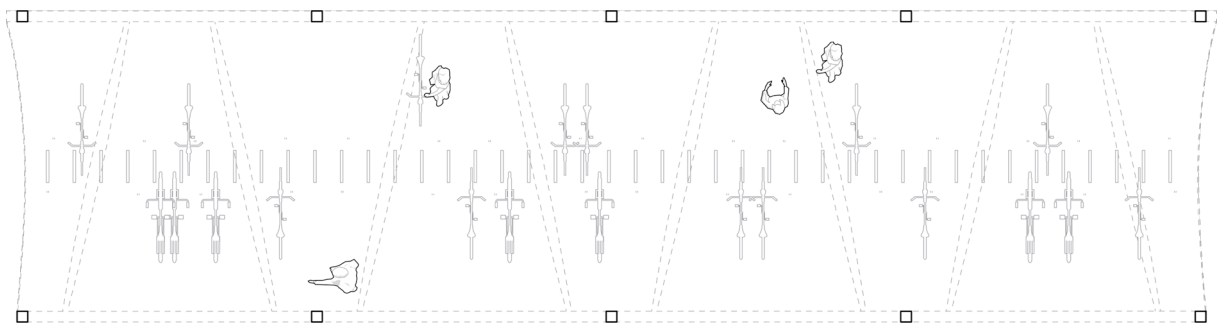


Abb. 74: Fahrradüberdachung aus den U_1_A- bis U_6_A-Elementen, Entwurf HTWG Konstanz; oben: Visualisierung; unten: Grundriss

Erster Entwurf Marbach

Daher wurde ein konkreter Entwurf für das Reallabor Marbach aus Schalungen A15_N01 bis A15_N08 sowie A15_S01 bis A15_S07 der seitlichen Tunnelwand des Stuttgarter Hauptbahnhofs erarbeitet, die zur Entsorgung anstanden.

Diese Elemente waren nur einmalig als Schalung im Einsatz gewesen und somit in sehr gutem Zustand. Wie im Entwurf aus den Kelch-Unterschaltungen bestand die Konstruktion aus einem Primärtragwerk aus Stahlstützen und Stahl- oder Holzträgern, zwischen die die Schalungselemente als Sekundärtragwerk eingelegt werden sollten.

Zunächst war geplant, die Fahrradüberdachung im Zusammenhang mit einem experimentellen Wasserstofflabor, das am Friedrich-Schiller-Gymnasium eingerichtet werden sollte, zu entwerfen. Der Entwurf integrierte diese zusätzliche Funktion durch ein gemeinsames Dach aus den Schalungselementen für Wasserstofflabor und Fahrradstellplätze.

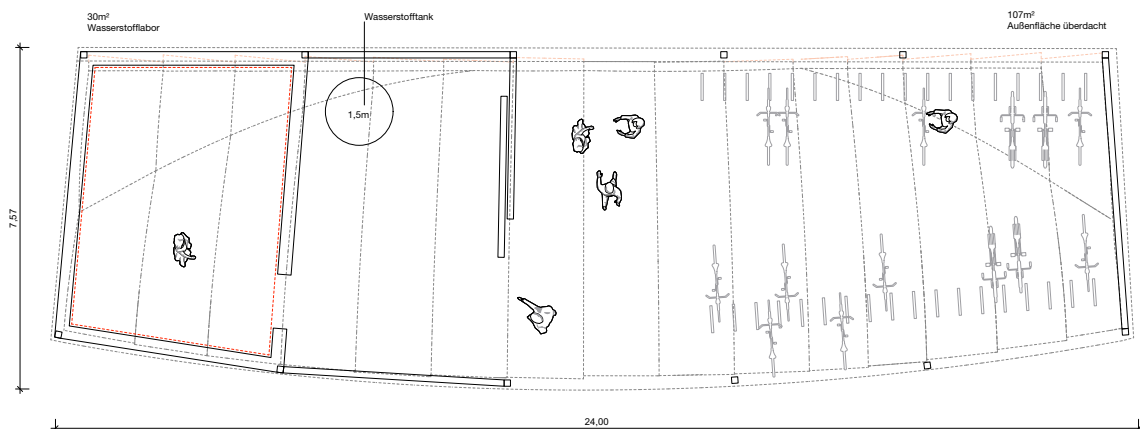


Abb. 75: Erster Entwurf Marbach aus den Elementen A15_N01 bis A15_N08 sowie A15_S01 bis A15_S07: Fahrradstellplätze und Wasserstofflabor des Friedrich-Schiller-Gymnasiums; oben: Visualisierung; unten: Grundriss

Unglücklicherweise wurden die Schalungselemente jedoch von der Baustelle in Stuttgart entsorgt, bevor sie gesichert werden konnten, obwohl die Weiterverwendung bereits vereinbart war.

Zweiter Entwurf Marbach

Nachdem die meisten Sonderschalungen zu diesem Zeitpunkt bereits entsorgt waren und der Rohbau des Stuttgarter Hauptbahnhofs auf seine Fertigstellung zuing, blieben nur noch Elemente der Wanderschaltungen (Kelchstützen und Schwindgassen) übrig, um einen umsetzbaren Entwurf für die Gemeinde Marbach zu erarbeiten. Dazu sollten Elemente der Schwindgasse (De:5, De:13, De:15, De:16 bzw. De:17 sowie De:2_1, De:2_2, De:3_1, De:3_2, De:4_1 bzw. De:4_2) mit Elementen der Unterschaltung (U_1_C bis U_12_C) kombiniert werden. Die Elemente der Unterschaltung, die als Kreisausschnitt zwei gerundete und zwei radial verlaufende Seiten haben, hätten dazu an vier Seiten zugeschnitten werden müssen, um eine rechteckige Form herzustellen. Es war geplant, die Elemente auf Stützen und Trägern aus Stahl aufliegen zu lassen, mit Konsolen aus Holz, die an die gekrümmte Geometrie der Elementoberflächen angepasst werden könnte. Nachdem der Entwurf vorsah, die Schwindgassenelemente mit den Rippen nach oben zu verwenden, sollten oberseitig aufgeschraubte, neue Furnierschichtplatten die Dachfläche herstellen. Außerdem hätten mit Hilfe dieser Platten zusammen mit zusätzlichen Rippen die Schalungselemente zu Kastenträgern verbunden werden können, um Stützen und Primärträger auf ein Minimum zu reduzieren.

Zwischenlager Ingersheim

Die für den Entwurf notwendigen Elemente wurden zusammen mit einigen Zusätzlichen und den Schalungen des Reallabors Ingersheim im Mai 2024 nach Ingersheim transportiert und dort zwischengelagert. Die Möglichkeit des Zwischenlagers in Ingersheim, das die Nachbargemeinde von Marbach ist und wo das erste Reallabor umgesetzt wurde, stellte sich als glücklicher Zufall heraus, ohne den es nicht möglich gewesen wäre, die Elemente rechtzeitig vor der Entsorgung zu bewahren.

Letztendlich stellte sich der Entwurf jedoch als zu aufwändig heraus. Sowohl hinsichtlich des Tragwerks als auch hinsichtlich der Geometrisierung sämtlicher Unterschaltungselemente. Daher wurde mit dem Transport der Schalungselemente von Ingersheim nach Marbach eine Inventur der vorhandenen Elemente vorgenommen und ein finaler Entwurf erarbeitet.



Abb. 76: Visualisierungen des finalen Entwurfs der Fahrradüberdachung Friedrich-Schiller-Gymnasium Marbach

Finaler Entwurf Marbach

Der finale Entwurf der Fahrradüberdachung Marbach besteht aus den Schalungen der Schwindgassen, die in der Dachkonstruktion des Stuttgarter Bahnhofs die Zwischenräume zwischen den Kelchstützen füllen. Dabei handelt es sich um relativ ebene Brettspertholzplatten, die keine so deutliche Krümmung der Oberfläche und spektakuläre Geometrie aufweisen. Dennoch bieten sie ein besonderes gestalterisches Potenzial, indem sie zweidimensional Teile der Grundrissgeometrie des Stuttgarter Hauptbahnhofs nachzeichnen. Auch bei diesem Entwurf ist es geplant, die Beschichtung zu entfernen und damit Entstehung, Einsatz als Schalung und Weiterverwendung nachvollziehbar zu machen. Außerdem bietet die großflächige Untersicht aus Holz eine warme und angenehme Ästhetik, die sich hochwertig von der üblicherweise sehr zweckmäßigen Materialisierung von Fahrradüberdachungen abhebt. Im Gegensatz zum 2. Entwurf für das Reallabor Marbach werden ausschließlich Schwindgassenelemente genutzt und so kombiniert wie sie als Schalung gestoßen waren. Dadurch ist keine Bearbeitung der Elementgeometrie nötig ist. Lediglich die Rippen werden am Rand gekürzt, um BSH-Träger einbauen zu können. Die Rippen zeigen nach oben, so dass die Schalungsseite die Deckenuntersicht der Fahrradüberdachung bildet. Oberseitig wird eine Holzwerkstoffplatte aufgebracht, die die Dachfläche herstellt, auf der die Abdichtung aufgebracht wird.

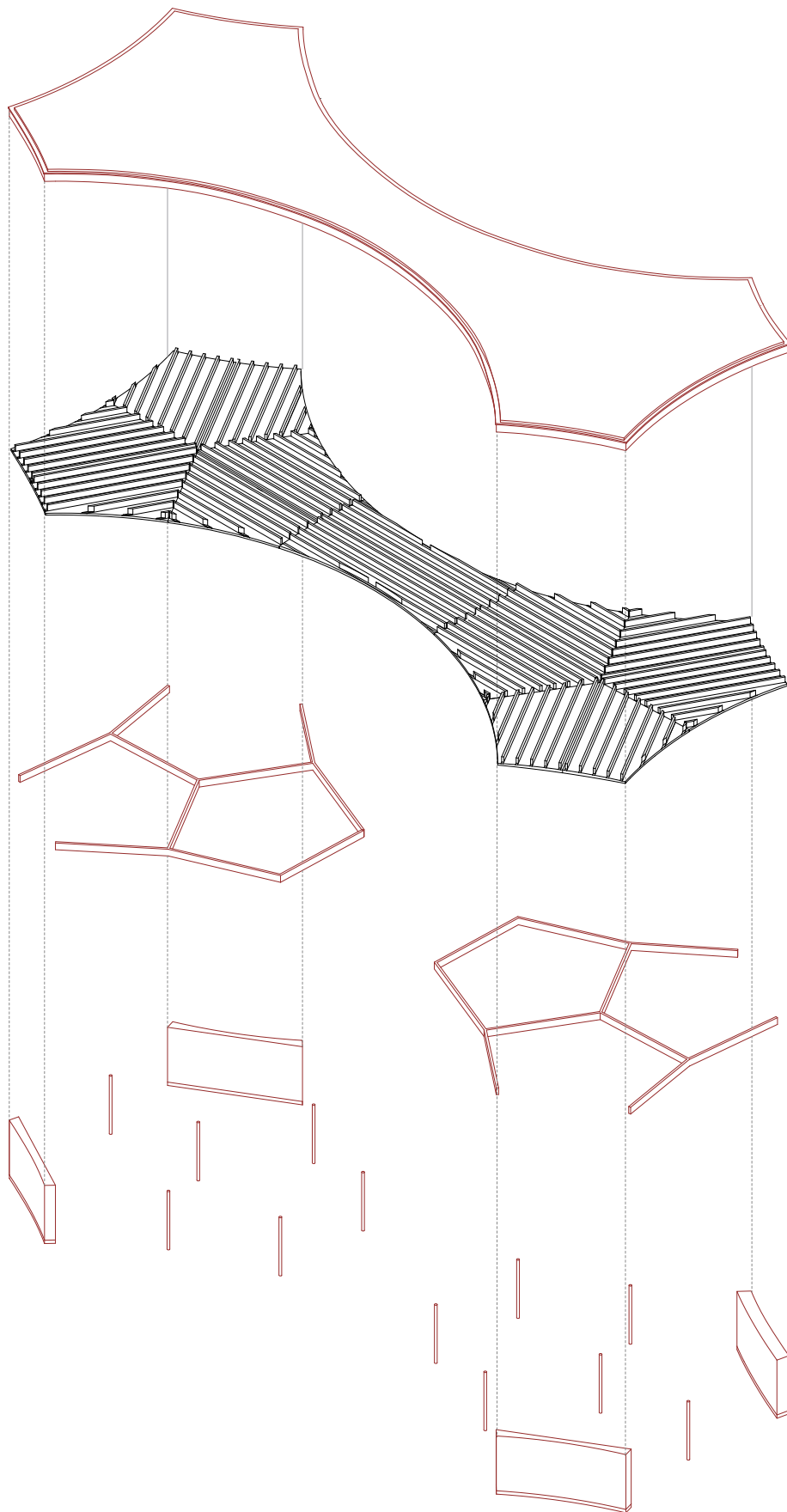


Abb. 77: Isometrie des finalen Entwurfs der Fahrradüberdachung Friedrich-Schiller-Gymnasium Marbach

Funktionalität

Die schmetterlingsartige Figur, die den Grundriss der Überdachung bildet, eignet sich in ihrer Grundrissgeometrie gut für die Überdachung der geforderten Fahrradstellplätze, überdeckt jedoch eine etwas größere Fläche als notwendig wäre. Dafür könne die Elemente ohne Verschnitt verwendet werden. Die zusätzliche witterungsgeschützte Fläche ist also „geschenkt“, da sie sonst künstlich und mit Aufwand reduziert werden müsste. Das zeigt ein generelles Potenzial bei der Weiterverwendung von Bauteilen: Zwar passen sie selten ganz genau auf die neue Nutzung, bieten aber durch ihre geringen Kosten bisweilen die Möglichkeit zusätzlichen Raumangebots.

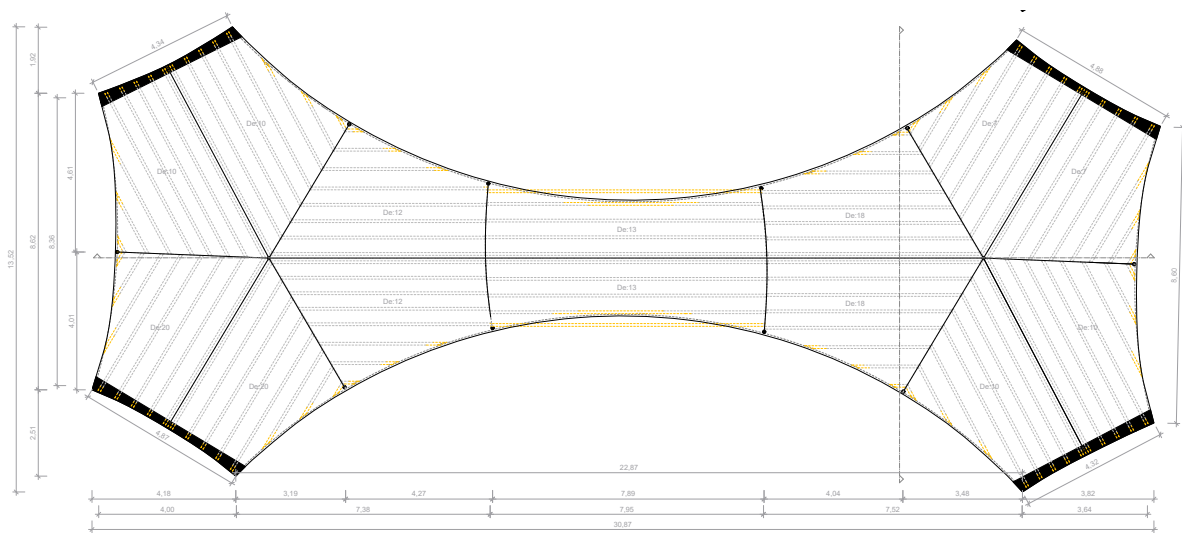


Abb. 78: Grundriss des finalen Entwurfs der Fahrradüberdachung Friedrich-Schiller-Gymnasium Marbach

Tragwerk

Die Last des Daches wird von Stahlstützen abgetragen, zwischen denen Primärträger aus Brettschichtholz spannen. An diese BSH-Träger werden die Schalungselemente seitlich angehängt und über die Rippen mit diagonalen Schrauben befestigt.

Die Aussteifung der Überdachung übernehmen vier Wandscheiben, die an den Stirnseiten der Konstruktion angeordnet sind, die in keinem gekrümmten Dachrand enden. Zusammen mit den Holzwerkstoffplatten der Dachfläche bilden die Schalungselemente eine steife Deckenscheibe aus.

7.4 Reallabor Ingersheim

7.4.1 Projektbeschreibung

Das Reallabor Ingersheim ist das erste umgesetzte Pilotprojekt und fungiert zukünftig als Jugendtreff. Die Gemeinde Ingersheim am Neckar nahe Stuttgart hatte sich 2023 auf die Umsetzung eines Entwurfs beworben, der aus zwei geometrisch besonders komplexen Schalungselementen bestand. Leider gingen diese beiden Teile jedoch auf der Baustelle des Stuttgarter Hauptbahnhofs verloren (siehe 7.5.3).

Die Suche nach einem Alternativentwurf griff daher auf Elemente zurück, die zunächst als ungeeignet eingeschätzt worden waren: Die sehr großen und aufwändig zu transportierenden Schalungen der Fußgängertunnels am südlichen Ende des Bahnhofs. Aus diesen Elementen liess sich zwar ein besonders skulpturaler Innenraum formen, eine geometrisch sinnvolle Gebäudehülle liess die Geometrie der Elemente allerdings nicht erzeugen. Daher sieht der Entwurf eine Gebäudehülle aus KVH, Brettschalungen und Dreischichtplatten vor, die auf die Schalungselementen aufgesetzt ist und nach außen eine autonome, elliptische Form bildet. Dadurch konnten einerseits geometrisch relativ einfach Dach- und Fassadenflächen hergestellt werden, die die Schalungselemente vor Witterung schützen. Andererseits ist diese Hülle, die die Schalungselemente von Außen verbirgt, Teil der architektonischen Inszenierung. Die spektakuläre Geometrie der Schalungen und deren faszinierende Holzoberflächen offenbaren sich dem Betrachter erst beim Betreten des Gebäudes.



Abb. 79: Fassade des neuen Jugendtreffs Ingersheim nach Fertigstellung, Foto: Achim Birnbaum

Besonders an diesem Projekt ist aber auch der Bauprozess, bei dem es der Bürgermeisterin Simone Lehnert gelang, in der Gemeinde eine breite Unterstützung des Projekts zu erzeugen und ehrenamtliche Helfer einzusetzen. Verschiedene Handwerksfirmen engagierten sich teilweise ehrenamtlich. Außerdem wurde die ovale Hülle aus Fichtenbrettern und -leisten von mehr als 40 internationalen Masterstudierenden Innenarchitektur (IMIAD) an der HFT Stuttgart (Deutschland, Türkei und Indien) unter Leitung von Prof. Andreas Kretzer in einem zweiwöchigen Workshop vorgefertigt und montiert. Das DRK, die Sportvereine Ingersheim und lokale Freiwillige unterstützten den Studiengang bei der Unterbringung und Verpflegung der Teilnehmerinnen.

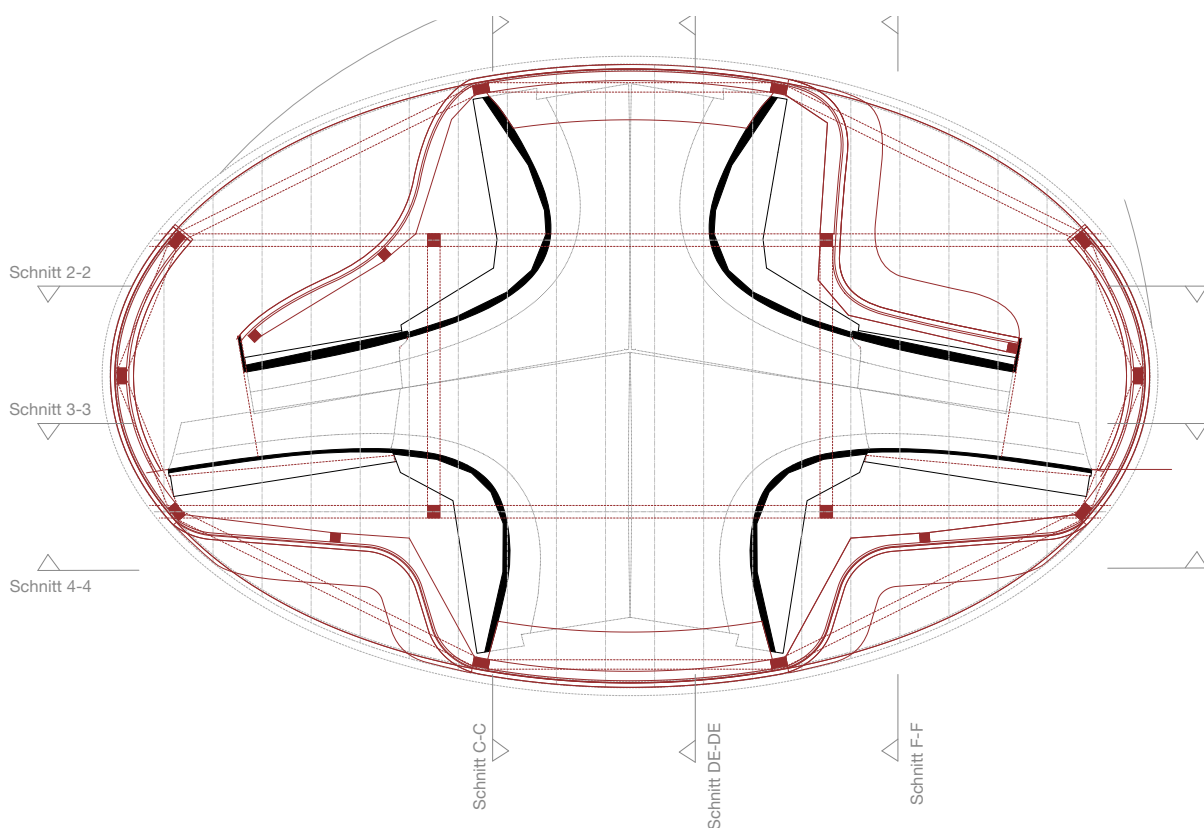


Abb. 80: Grundriss Jugendtreff Ingersheim: Die Schalungselemente bilden einen kreuzförmigen Innenraum, die ovale Hülle ist im Erdgeschoss zu Eingangsbereichen und Sitznischen gefaltet (schwarz: Schalungselemente, rot: neue Gebäudehülle)

Funktionalität

Mit seinem kreuzförmigem Grundriss, seiner relativ großen Raumhöhe und seiner spitzgewölbeförmigen Decke quasi sakraler Anmutung. Die Verwendung der Schalungen des Stuttgarter Bahnhofs stelle den üblichen Planungsprozess auf den Kopf: Während üblicher Weise zunächst Funktion und Raumprogramm durch den Bauherren bestimmt werden und danach die Umsetzung über Entwurf und Konstruktion die Materialität eines Gebäudes bestimmen, war der Ausgangspunkt der Entwürfe des Forschungsprojekt stets die Wiederverwendung

sehr spezieller Schalungselemente. Aus der geometrischen Vielfalt sämtlicher Elemente wurden möglichst sinnvolle Entwürfe angefertigt. Diese Entwürfe wurden zunächst auf die Verfügbarkeit und Transportierbarkeit der zu Grunde liegenden Elemente geprüft. Erst bei Klarheit über die technische und logistische Umsetzbarkeit wurden potentielle Bauherren über verschiedene Netzwerke und Veröffentlichungen kontaktiert und ihnen die Entwürfe und Schalungselemente zur Umsetzung angeboten. Die Gemeinde Ingersheim hatte zuvor in einer Bürgerbefragung den Bedarf für einen Jugendtreff ermittelt. Diese relativ offene Nutzungsbeschreibung ließ genug Interpretationsspielraum zu, den Entwurf dafür zu verwenden. Die Komposition der 12 Schalungselemente bildet einen Innenraum mit zwei engen Zugängen im Osten und Westen und einem sich weitenden Innenraum, der über große Fenster nach Norden und Süden sowie durch ein indirektes Oberlicht erhellt ist. Die zusätzlichen Maßnahmen der Gebäudehülle bilden Witterungsschutz für Konstruktion und Innenraum und formen außerdem fünf Sitznischen mit elegant geschwungene Holzbänken - drei nach Außen und zwei im Innenraum.

Die Zugänge verbergen sich hinter der Lattung der Hülle, so dass von Außen kein direkter Blick in den Innenraum möglich ist. Die Bewegungsführung in den Innenraum ist indirekt und labyrinthisch und sorgt für eine intime Atmosphäre.



Abb. 81: Eingangsnische mit Sitzbank als Teil der neuen Gebäudehülle, Foto: Achim Birnbaum

kreislaufgerecht

Die Schalungselemente bilden den wesentlichen Teil des Tragwerks und sämtliche Innenoberflächen. Die äußere Hülle besteht ausschliesslich aus Vollholz, das reversibel miteinander verschraubt ist. Außer der Dachabdichtung kommen keine Folien oder Unterspannbahnen zum Einsatz. Klebstoffe oder Lacke wurden nicht verwendet. Sämtliche Holzoberflächen bleiben naturbelassen.

Die Begleitforschung des Experimentalbaus untersucht neben baukonstruktiven, bauphysikalischen und ästhetischen Belangen vor allem auch die juristischen Rahmenbedingungen bei der Verwendung von Re-Use-Komponenten.

Einerseits kann so der konkrete Rechtsrahmen für die Wiederverwendung gebrauchter Bauteile weiterentwickelt werden, andererseits können aber auch verallgemeinerbare Empfehlungen zum experimentellen Bauen erarbeitet werden.



Abb. 82: Innenraum: Die massiven Holz-Schalungselemente erhalten durch ihre Geometrie und Komposition eine textile Anmutung, Foto: Achim Birnbaum

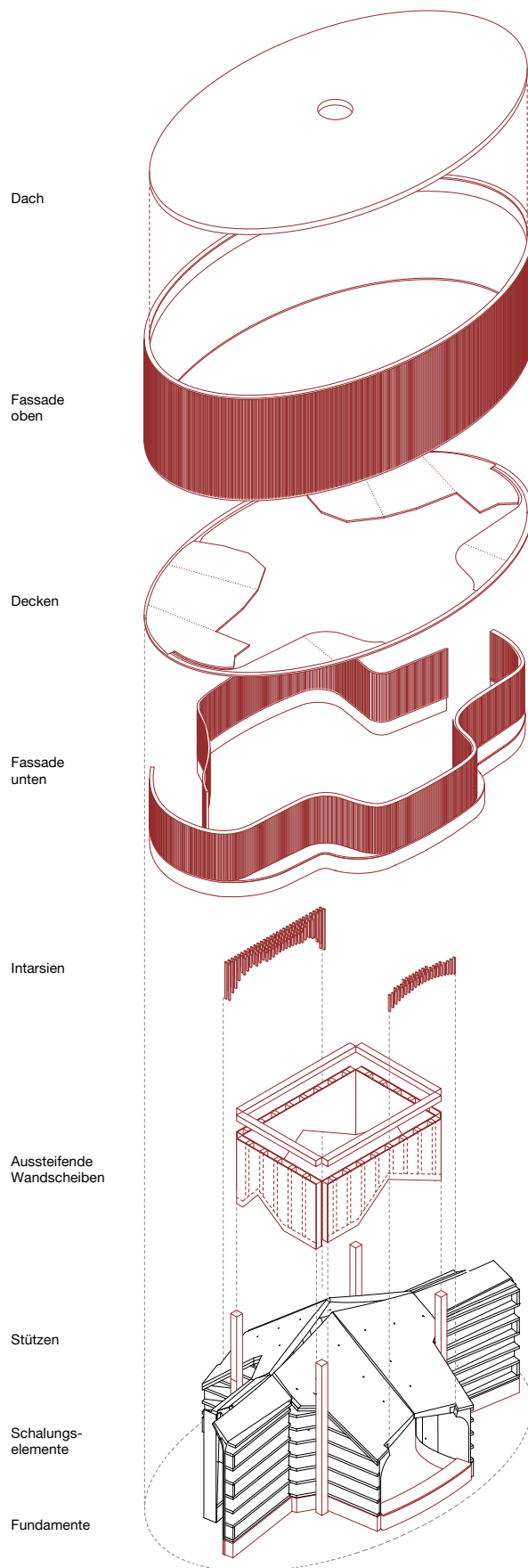
Gestaltung und Materialität

Die Verwendung der Schalungen des Bahnhofs Stuttgart 21 bieten die Möglichkeit, eine einzigartige Architektur zu schaffen, die unter normalen Bedingungen unbezahlbar wäre. Denn die dreidimensional geschwungenen Holzoberflächen sind in der Herstellung äußerst aufwändig, indem meterdicke Schichten mehrfach blockverleimten Brettsperrholzes mit einem in acht Achsen beweglichen Roboterarm in die gewünschte Form gefräst wurden. Der vorliegende Entwurf kombiniert eine spezielle Auswahl von Schalungselementen (von denen es keine weiteren baugleichen Teile mehr gibt) auf eine Art und Weise, dass ein textil anmutender, zeltförmiger Innenraum entsteht, der jedoch aus massivem Holz besteht. Außerdem wurde der Bootslack, der die Schaloberfläche für das Betonieren gebildet (und nebenbei die Elemente konserviert) hat, entfernt. Dadurch kommt eine einzigartige Holzoberfläche zum Vorschein, die durch das amorphe, dreidimensionale Abfräsen der parallelen Lagen des Brettsperrholzes eine damaszenerstahlartige Struktur erhalten hat.



Abb. 83: Innenraum: Die Holzoberfläche dokumentiert durch die abgefassten Brettsperrholzlagen den dreidimensionalen Bearbeitungsprozess des Roboterarms, Foto: Achim Birnbaum

7.4.2 Tragwerk



Die 12 Schalungselemente stehen auf einer Bodenplatte und Sockelwänden aus Stahlbeton. Zunächst war eine leichte und reversible Gründung über Schraubfundamente geplant. Die hohen Anforderungen an den Hochwasserschutz auf dem Baugrundstück machen diesen Plan jedoch hinfällig. Besonders ist dabei der Bauprozess. Denn um die Sockelwände den spezifischen Geometrien der Schalungselemente anpassen zu können, wurden zuerst die Elemente mit 50 cm Abstand über der Bodenplatte positioniert und danach die Sockelwände geschalt, bewehrt, verankert und betoniert. Die Sockelwände bilden quasi zusammen mit den Re-Use-Schalungselementen eine Holz-Beton-Verbundkonstruktion.

Die Schalungselemente sind über vier aufgesetzte Holz-Tafelbauwände, die zusammen mit einigen Stützen das Dach tragen und aussteifen, miteinander verspannt. Das Dach besteht aus einer einfachen Balkenlage, die auf den Tafelbauwänden und einem umlaufenden Randbalken aufliegt. Die Dachfläche bildet eine Beplankung der Balkenlage aus Dreischichtplatten, auf die eine Gefälle Dämmung und eine Flachdachabdichtung aufgebracht sind.

Der obere Fassadenbereich (Boden-Leisten-Schalung aus Fichtenbrettern) besteht aus vorgefertigten Elementen, die von der Attika des Daches abgehängt sind. Eine Zwischenebene zwischen Fassade und Schalungselementen steift die Fassade aus. Die Erdgeschossfassade ist vor Ort auf eine Unterkonstruktion aus Dreischichtplatten montiert.



Abb. 85: Innenraum: Der Versatz der Schalungselemente gestaltet ein Oberlicht, Foto: Achim Birnbaum

Projektbeteiligte Umsetzung Reallabor Ingersheim

Bauherr

Gemeinde Ingersheim, vertreten auch Bürgermeisterin Simone Lehnert

Entwurfsverfasser

Forschungsprojekt Stuttgart 210: Andreas Kretzer, Stefan Krötsch, Roman Kreuzer, Katharina Raabe, Maximilian Stemmler

Ausführungsplanung und Bauleitung

Klingelhöfer Krötsch Architekten Partnerschaftsgesellschaft mbB

Tragwerksplanung

Faltlhauser Krapf Beratende Ingenieurgesellschaft mbH

Holzbau

Koch Holzbau Ingersheim

Rohbau

Claus Kofink, TPW Bau GmbH

Fassade/Oberflächenbehandlung

Internationaler Workshop mit Studierenden des Master-Studiengangs Innenarchitektur (IMIAD), Hochschule für Technik Stuttgart

Leitung: Prof. Andreas Kretzer und Melissa Acker mit Roman Kreuzer, Melissa Acker, Katharina Raabe und Max Stemmler

Projektlaufzeit

Entwurf, Genehmigung und Ausführungsplanung: Februar bis Juni 2024

Transport Schalungselemente: Mai 2024

Bauausführung: Mai bis Oktober 2014

7.5 Machbarkeitsstudien

Im Rahmen des Projekts wurden verschiedene Entwürfe entwickelt, die jeweils spezifische Anforderungen und Projektziele berücksichtigen. Dabei wurde erkannt, dass nicht alle Schalungselemente für jeden Entwurf gleichermaßen geeignet sind. Jeder Entwurf wurde hinsichtlich der technischen, gestalterischen und praktischen Machbarkeit geprüft, um die einzigartigen Geometrien und Eigenschaften der Schalungselemente optimal zu nutzen. Ziel der Entwürfe war es, potentiellen Bauherren die Weiterverwendbarkeit der Schalungselemente aufzuzeigen und sie zur Umsetzung von Projekten zu motivieren. Dazu mussten nicht nur sehr unterschiedliche Arten der Verwendung gleicher Elemente erprobt werden, sondern auch sehr verschiedene Arten von Nutzungen antizipiert werden. Im Folgenden werden einige Entwürfe dargestellt, die zusätzlich zu den Entwürfen der Reallabore entwickelt wurden.

7.5.1 Überdachung

Die Entwürfe für Überdachungen sind auf die Unikatelemente und Restelemente des Stuttgarter Hauptbahnhofs ausgerichtet. Aufgrund der geometrischen Besonderheiten dieser Bauteile ist eine thermisch geschlossene Gebäudehülle nicht realisierbar. Diese Elemente sind jedoch für markante und charakteristische Konstruktionen geeignet, die eine visuelle Besonderheit darstellen. Gleichzeitig bieten sie funktionale Lösungen für alltägliche Anwendungen, wie zum Beispiel die Überdachung von Freiflächen oder Eingangsbereichen, wobei der Fokus auf der besonderen Formgebung der Elemente liegt. Eine Umsetzung dieser Entwürfe wurde nicht aktiv weiterverfolgt, weil der Transport dieser übergroßen Elemente äußerst aufwändig und teuer ist und im Vergleich zu diesem Aufwand keinen adäquaten Nutzen versprach. Außerdem meldete sich kein potentieller Bauherr, der eine der Konstruktionen umsetzen wollte.



Abb. 86: Überdachungen aus weingen, großen Schalungselementen, Entwurf HTWG Konstanz; Visualisierung

7.5.2 Markthalle

Zur Verwendung der U_1_A- bis U_6_A-Elemente der Kelchschalungen wurden neben dem Entwurf des Rundraums, der letztendlich im Reallabor in Stuttgart-Vaihingen umgesetzt werden soll, verschiedene Entwürfe entwickelt. Um neben der sehr speziellen Geometrie des Rundraums ein nutzungsneutraleres Angebot an potentielle Bauherren machen zu können, wurde eine „Markthalle“ entworfen, die die Unterschaltungen als sekundäre Dachkonstruktion zwischen einer Primärkonstruktion aus Stahlträgern und -stützen mit Achsabstand von 6 Metern nutzt.



Abb. 87: Markthalle aus den U_1_A- bis U_6_A-Elementen, Entwurf HTWG Konstanz; Visualisierung

Die gekrümmten Schalungselementen erscheinen dabei wie eine Zeltkonstruktion, die locker zwischen das Stahlgerüst gehängt ist. Das Beispiel der Markthalle oder eines größerer Verkaufsraums mit den Abmessungen 22 x 17 Metern (3-schiffig mit 4 Trägerachsen), alternativ in einer kleineren Variante von 22 x 11 Metern (2-schiffig mit 3 Trägerachsen), stand dabei stellvertretend für eine offene, nutzungsneutrale Struktur mit gewissem repräsentativem Anspruch. Für die Größere Variante wäre die Verwendung der Unterschalungselemente U_1_A-

bis U_6_A und U_12_A aller drei Schalsätze nötig gewesen, für die kleine Variante von zwei Schalsätzen.

Variante Würth-Store

Mit der Fa. Würth wurden mehrere Planungsgespräche geführt, um den Entwurf der Markthalle so anzupassen, dass er für eine Würth-Store verwendet werden könnte. Das Ausbaukonzept der Würth-Stores ist jedoch sehr präzise auf standardisierte Maße der Primärkonstruktion ausgelegt. Davon abzuweichen, um sich an die Abmessungen der Schalungselemente anzupassen, hätte zu unverhältnismäßig hohen Kosten geführt und wurde nach einigem Abwägen verworfen.



Abb. 88: Entwurf für einen Würth-Store mit Dachkonstruktion aus den U_1_A- bis U_6_A-Elementen, HTWG Konstanz

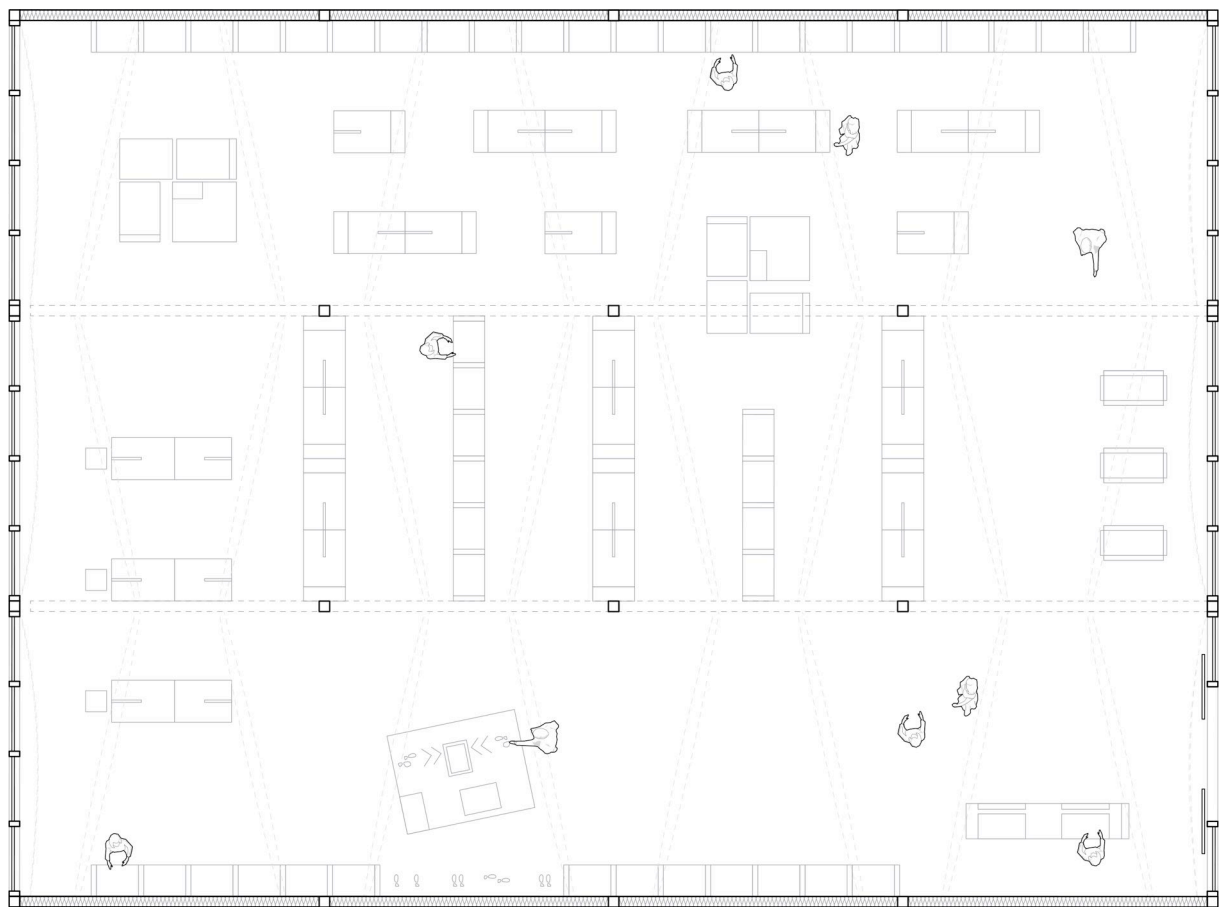


Abb. 89: Grundriss Würth-Store mit Dachkonstruktion aus den U_1_A- bis U_6_A-Elementen, HTWG Konstanz

7.5.3 Aussichtspavillon

Das geometrisch komplexeste Schalungselement des Stuttgarter Hauptbahnhof ist die sogenannte „Hutzenschalung“. Für den seitlichen Übergang der Kelchstützen in die Oberlichtöffnung wurde ein Schalungsteil hergestellt, für das alle Bewegungsrichtungen des 8-Achs-Roboterarms ausgenutzt werden mussten. Für diese Element wollte das Forschungsteam unbedingt eine Nutzungsmöglichkeit finden, um die besondere Form zu bewahren.



Abb. 90: „Hutzenschalung“ aus der Baustelle in Stuttgart, Foto: Stefan Krötsch

Durch Modellversuche konnte ein weiteres Schalungselement gefunden werden, dass sich mit der Hutzenschalung zu einer Form kombinieren ließ, die sich als Sitzmöbel nutzen lassen könnte. Zusammen mit einer an die Elemente angepassten Rückwand und Überdachung entstand daraus der Entwurf für einen Aussichtspavillon. Nach Veröffentlichung des Entwurfs bewarb sich die Gemeinde Ingersheim umgehend dafür, den Entwurf umzusetzen.



Abb. 91: Entwurf für einen Aussichtspavillon, HTWG Konstanz

Leider wurden die beiden für den Pavillon benötigten Elemente trotz langfristiger Vorankündigung versehentlich zersägt und entsorgt. Auch die beiden anderen baugleichen Elemente aus den weiteren Kelchstützen-Schalsätzen waren zu diesem Zeitpunkt bereits entsorgt. Deshalb entwickelte das Forschungsteam für die Gemeinde Ingersheim einen alternativen Entwurf, der als erstes Reallabor umgesetzt wurde (vgl. 6.4).

8. Ausstellung

Ausstellung „aus Schalen entworfen“

Von August bis November 2024 wurde an der Hochschule für Technik Stuttgart (HFT) eine Präsentation der Forschungsergebnisse als Wanderausstellung vorbereitet. Das Ausstellungskonzept berücksichtigt den Verpackung und Aufbau an unterschiedlichen Orten als Wanderausstellung. Die Inhalte zu Forschung und Reallaboren werden auf je 20 Tafeln dargestellt. Das zugehörige, identische Booklet umfasst 40 Seiten. 3D-Drucke der Schalungselemente im Maßstab 1:50 sind als „Schmetterlingskasten“ vor dunklem Hintergrund montiert. Von den geplanten Reallaboren wurden 3 (Ingersheim, Mannheim und Vaihingen) als Architekturmodelle im Maßstab 1:20 gebaut: um Hülle und Innenleben sichtbar zu machen, wurden 3D-gedruckte Schalungselemente aus PolyWood-Filament – wie Fliegen in Bernstein – in Volumina aus transparenter Seife eingegossen. Zum Reallabor „Jugendtreff Ingersheim“ ist eine etwa 30-minütige Filmdokumentation zu sehen. Eine interaktive VR-Station macht die Dimensionen der Schalungselemente erlebbar. Die Anwendung basiert auf Ideen und Entwicklungen von Studierenden eines Lehrprojektes des internationalen Master-Studiengangs Innenarchitektur im Sommersemester 2024.



Abb. 92: Ausstellung „aus Schalen entworfen“ von Januar bis März 2025 im Foyer der HFT Stuttgart, Foto: Andreas Kretzer



Abb. 93: Ausstellung „aus Schalen entworfen“ von Januar bis März 2025 im Foyer der HFT Stuttgart, Foto: Andreas Kretzer

Ankündigungstext

A kromms Holz gibt au a grads Feuer. Dieser Redensart und Plänen für eine thermische Verwertung zum Trotz untersuchte ein interdisziplinäres Team der Hochschulen Konstanz, Stuttgart und Karlsruhe im Verlauf von zwei Jahren zukunftsweisende Konzepte, wie durch die innovative Weiterverwendung von Schalungselementen aus dem Bau des neuen Stuttgarter Hauptbahnhofs ein ökologischer Beitrag im Bausektor geleistet werden kann. Über ästhetische und funktionale Aspekte hinaus beleuchtet die Ausstellung mit tragwerksplanerischen, juristischen und ökobilanziellen Fragen die Praxistauglichkeit des Re-Use sowie spezifische Herausforderungen eines Upcyclings im Großformat. Pläne, Fotografien und Modelle zeigen einen möglichen Einsatz von Schalungselementen in verschiedenen Reallaboren in Baden-Württemberg, um Rohstoffe zu schonen und CO₂-Emissionen zu reduzieren. An einer interaktiven Ausstellungsstation könne Besuchende die Reallabore und Dimensionen der wiederverwendeten Bauteile im Maßstab 1:1 räumlich erleben und sich an eigenen, virtuellen Bauten versuchen.



Abb. 94: Ausstellung „aus Schalen entworfen“ von Dez 2024 bis Jan 2025 im StadtPalais Stuttgart, Fotos: Andreas Kretzer




Abb. 95: Ausstellungsbesucher, die die interaktive VR-Simulation der Schalungselemente ausprobieren. Fotos: Andreas Kretzer und Stefan Krötsch

Virtual Reality

Die interaktive VR-Experience „Virtual Formworks 210“ ermöglicht auf anschauliche und spielerische Art und Weise in Echtzeit und unter Einsatz des Körpers aus einem vorgegebenen Archiv virtueller Betonschalungselemente der Bahnhofsbaustelle „Stuttgart 21“ neue räumliche Konstruktionen zu entwerfen und gleichzeitig im Maßstab 1:1 zu erfahren. In der Arbeit stehen alle Schalungselemente, die in den bisher entwickelten Reallaboren zum Einsatz kommen, als virtuelle Bauteile zur Verfügung. Mit Hilfe von „Buttons“ werden sie aus einem zweidimensionalen Bauteilarchiv in einen dreidimensionalen Arbeitsraum übertragen.

Hier erscheinen die großformatigen, virtuellen Schalungselemente im Maßstab 1:20, um sie einfacher und übersichtlicher handhaben zu können. Gleichzeitig sind alle Bauteile auch als Kopien im realen Maßstab 1:1 um den Benutzer herum sichtbar, so dass der räumliche Eindruck eigener Kompositionen direkt erlebbar wird. Jede Bewegung der Modellteile wird in Echtzeit auf die 1:1-Kopien übertragen. Eine maßstäblich verkleinerte Strichfigur zeigt die eigene Position in Relation zur Bauteilkonfiguration an. Die eigene Position kann im Rahmen des verfügbaren Platzes durch unmittelbare Körperbewegungen oder durch Greifen und Verschieben der Modellfläche (inkl. einer Veränderung der Höhe des Standpunktes) verändert werden. Über vier zusätzliche „Buttons“ können die bereits entworfenen Reallabor-Architekturen als fertige Bausätze aufgerufen werden. Auch hier entstehen sie gleichzeitig im Maßstab 1:20 und 1:1. Alle Teile des Archivs und der vorkonfigurierten Reallabore sind frei miteinander kombinierbar. Nicht mehr benötigte Elemente können mithilfe eines Recycling-Buttons aus dem Bauraum entfernt und in das Teilearchiv zurück verschoben werden. Räumliche Klänge verstärken den immersiven Eindruck der Erfahrung. Sie beziehen sich auf Geräusche von der Baustelle und aus dem laufenden Bahnhofsbetrieb.

AUS SCHALEN ENTWORFEN



Stuttgart 210 – weiterdenken, weiterbauen!

Das Forschungsprojekt wurde als Kooperation der Hochschulen HTWG Konstanz (Projektleitung), HFT Stuttgart und HKA Karlsruhe durchgeführt. Die Öffentlichkeitsarbeit und Koordination externer Projektpartner erfolgte durch profholz Baden-Württemberg. Fördergeber im Rahmen der Holzbauforschung ist das Ministerium für Ernährung, Ländlichen Raum und Verbraucherschutz Baden-Württemberg (MLR). Als externe Partner stellten die Firma Züblin Timber die Plangrundlagen und die Ed. Züblin AG die Schalungselemente zur Verfügung. Der Rechtsanwalt Michael Halstenberg ist mit der juristischen Beratung des Forschungsprojekts und der Reallabore beauftragt. In Ingersheim, Stuttgart, Marbach und Mannheim werden vier Reallabore mit weiteren Projektbeteiligten in unterschiedlicher Zusammensetzung umgesetzt. Die Nutzungsrechte des Urheberrechts der im Forschungsprojekt erarbeiteten Entwürfe werden an die Bauherren der Reallabore übertragen, die Planungsbüros mit der Erarbeitung von Genehmigungs- und Ausführungsplanungen beauftragen.

Projektbeteiligte

<p>Hochschule Konstanz Hochschule Konstanz</p> <p>Hochschule Konstanz Fakultät Architektur und Gestaltung</p> <p>Baukonstruktion und Entwerfen Prof. Dr.-Ing. Stefan Kitzsch</p> <p>Koordinierung der Forschungsergebnisse, Bauelementeentwurf und baurechtliche Themen</p> <p>Projektleitung Roman Kneiser M.A.</p> <p>Wissenschaftliche Mitarbeiter Katharina Bader M.A. Maximilian Dammert M.A. Alexander Mac-Nelly S.A.</p> <p>Energieeffizientes Bauen Prof. Dr.-Ing. Thomas Stark</p> <p>Entwicklung Ökobilanzierungsmethoden für Bauteile, Bauelemente, Bauelemente und Energiekonzept</p> <p>Projektleitung Dr.-Ing. Volke Jun</p>	<p>Hochschule für Technik Stuttgart Hochschule für Technik Stuttgart</p> <p>Entwerfen, Gestaltung und Darstellung Prof. Dr.-Ing. Andreas Kretzer</p> <p>Beauftragung der Bauelemente, Bauelementeentwurf und baurechtliche Themen</p> <p>akademische Mitarbeiter Dipl.-Des. Melissa Acker (Workshop)</p> <p>Wissenschaftliche Mitarbeiter Katharina Bader M.A. (Ausstellung) Daniel Giffgen M.A. (Modellbau)</p> <p>Workshop-Steuerung/Innenaussicht Jürgen Androsch, Reinhold Bartsch, Elisabeth Bartsch, VBB (Mau) (Ausstellung) Holger Blüthgen (3D-Druck)</p> <p>Ausstellungstechnik, Virtual Formworks 210 Norbert Pape, Dr. Philipp Reinhold</p> <p>Fotografie Andreas Bismarck</p>	<p>Hochschule Karlsruhe Hochschule Karlsruhe</p> <p>Baukonstruktion, Bauelemente und Bauelemente Prof. Dr.-Ing. Robert Pape</p> <p>Entwicklung von Bauelementen, Bauelementeentwurf und baurechtliche Themen</p> <p>akademische Mitarbeiter Christian Engel-Göttsch B.Eng.</p> <p>Kanalarbeiten und Bauelemente Kandlar Fricklen und Nosske, Düsseldorf</p> <p>Rechtsanwalt Michael Halstenberg</p> <p>www.stuttgart210.de</p>
---	---	---

HOCHSCHULE FÜR TECHNIK STUTTGART
klimakompetent resilient vernetzt

ZÜBLIN
Ed. Züblin AG, Stuttgart
Bereitstellung der Schalungselemente der Baustelle Stuttgart 210
Züblin Timber, Aichach
Bereitstellung der 3D-Produktionsdaten
Projektleitung
Dipl.-Ing. Stefan Moders

profholz Baden-Württemberg
Koordinierung und Öffentlichkeitsarbeit
Dr. Doreen Röhler
Ulrich Andri-Köhler
Esther Reinwald

VIRTUAL FORMWORKS 210

STUDIENPROJEKT

Konzeption und Leitung
Andreas Kretzer
Philipp Reinhold

Assistenz
Tolgaşin Güçüyeter
Kevin Spina

Studierende
Afrah Ashraf
Simay Cansu Bulut
Carolina Cargbassa
Haby Dembele
Nimisha Ghosh
Lea Elizabeth Jose
Elif Ezgi Karatas
Adrian Lotha
Chetna Nayak
Ceren Sahin
Sae Saeve
Beyza Topal

VR-EXPERIENCE

Konzeption und Ausarbeitung
Philipp Reinhold
Norbert Pape

Entwicklung und Realisierung
Norbert Pape

Sound Design
Franziska Aigner

Assistenz
Lawrence Forsythe

Die interaktive VR-Experience „Virtual Formworks 210“ ermöglicht auf anschauliche und spielerische Art und Weise in Echtzeit und unter Einsatz des Körpers aus einem vorgegebenen Archiv virtueller Bauteile neue räumliche Konstruktionen zu entwerfen und gleichzeitig im Maßstab 1:1 zu erfahren.

In der Arbeit stehen alle Schalungselemente, die in den bisher entwickelten Reallaboren zum Einsatz kommen, als virtuelle Bauteile zur Verfügung. Mit Hilfe von „Buttons“ werden sie aus einem zweidimensionalen Bauteilarchiv in einen dreidimensionalen Arbeitsraum übertragen.

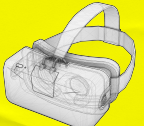
Hier erscheinen die großformatigen, virtuellen Schalungselemente im Maßstab 1:20, um sie einfacher und übersichtlicher handhaben zu können. Gleichzeitig sind alle Bauteile auch als Kopien im realen Maßstab 1:1 um den Benutzer herum sichtbar, so dass der räumliche Eindruck eigener Kompositionen direkt erlebbar wird. Jede Bewegung der Modellteile wird in Echtzeit auf die 1:1-Kopien übertragen. Eine maßstäblich verkleinerte Strichfigur zeigt die eigene Position in Relation zur Bauteilkonfiguration an. Die eigene Position kann im Rahmen des verfügbaren Platzes durch unmittelbare Körperbewegungen oder durch Greifen und Verschieben der Modellfläche (inkl. einer Veränderung der Höhe des Standpunktes) verändert werden.

Über vier zusätzliche „Buttons“ können die bereits entworfenen Reallabor-Architekturen als fertige Bausätze aufgerufen werden. Auch hier entstehen sie gleichzeitig im Maßstab 1:20 und 1:1.

Alle Teile des Archivs und der vorkonfigurierten Reallabore sind frei miteinander kombinierbar. Nicht mehr benötigte Elemente können mithilfe eines Recycling-Buttons aus dem Bauraum entfernt und in das Teilearchiv zurück verschoben werden.

Räumliche Klänge verstärken den immersiven Eindruck der Erfahrung. Sie beziehen sich auf Geräusche von der Baustelle und aus dem laufenden Bahnhofsbetrieb.

Die Anwendung basiert auf Ideen und Entwicklungen von Studierenden eines Lehrprojektes des internationalen Master-Studiengangs Innenarchitektur im Sommersemester 2024.



HOCHSCHULE FÜR TECHNIK STUTTGART
klimakompetent resilient vernetzt

Abb. 96: Zwei Beispiele der 40 Ausstellungstafeln (Zusammenstellung Tafeln in Anlage 5)

Ausstellungsstationen

5. Dezember 2024 bis 26. Januar 2025

StadtPalais • Museum für Stuttgart, Ausstellung im ersten Obergeschoss

Besuch und Führung Gemeinde Ingersheim am 14. Januar 2025

Finissage mit Beteiligten des Forschungsprojekts am 24. Januar 2025

7. Januar bis 16. Januar 2025 InfoTurmStuttgart (ITS), VR-Station im 2. Obergeschoss

27. Januar bis 31. März 2025 Hochschule für Technik Stuttgart, Foyer Bau 1

19. bis 21. April 2025 InfoTurmStuttgart (ITS), „Tag der offenen Baustelle“

24. Oktober bis 24. November 2025 Regierungspräsidium am Rondellplatz Karlsruhe



Abb. 97: Ausstellungsplakate

9. Literaturverzeichnis

- | | | |
|------|---|-------------------------|
| [1] | Graf, Jürgen, Krötsch, Stefan: Potentiale der Verwendung von Brettsperrholz-Produktionsabfällen zur Herstellung von Bauteilen im Holzbau - Recycling von Brettsperrholz-Produktionsabfällen
https://www.zukunftbau.de/fileadmin/user_upload/01_Forschungsförderung/Abschlussberichte/17.13_Forschungsbericht_20069017456.pdf (Stand 26.10.2024) | Vorwort |
| [2] | dena-Gebäudereport 2022, S. 55 | 1.1 |
| [3] | Webseite Umweltbundesamt 12/2023:
https://www.umweltbundesamt.de/daten/ressourcen-abfall/rohstoffe-als-ressource/gesamter-materialaufwand-deutschlands (Stand 08.01.2025) | 1.1 |
| [4] | Webseite Umweltbundesamt 12/2023: https://www.umweltbundesamt.de/daten/ressourcen-abfall/abfallaufkommen (Stand 08.01.2025) | 1.1 |
| [5] | https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32020R0852 (Stand 08.01.2025) | 1.1 |
| [6] | https://www.ingenhovenarchitects.com/projekte/weitere-projekte/main-station-stuttgart-de-de/description (Stand 12.01.2025) | 1.2 |
| [7] | https://www.kunstmuseum-stuttgart.de/ausstellungen/otto-herbert-hajek | 1.2.1 |
| [8] | gemäß Interview Stefan Mederle (Produktionsleitung Züblin Timber, Aichach) am 15.02.2023 | 1.2.2 |
| [9] | DIN EN 1990:2010-12; 1990/NA 2010-12
Nationaler Anhang - Eurocode 5: Grundlagen der Tragwerksplanung | 2.4.1 |
| [10] | DIN EN 1990:2010-12; 1990/NA 2010-12
Grundlagen der Tragwerksplanung | 2.4.1 |
| [11] | DIN EN 1991-1-1; 1991-1/NA A1 2015-05
Einwirkungen auf Tragwerke | 2.4.1 |
| [12] | DIN EN 1995-1-1:2010-12; 1995-1-1/NA 2013-08
Bemessung und Konstruktion von Holzbauten | 2.4.1 |
| [13] | DIN EN 338:2016-07
Bauholz für tragende Zwecke – Festigkeitsklassen | 2.4.1 |
| [14] | LENO Brettsperrholz abZ Z-9.1-501 | 2.4.1 |
| [15] | Selbstbohrende Schrauben als Holzverbindungsmittel ETA-11/0190 | 2.4.1 |
| [16] | Statische Berechnung der Schalungselemente, Züblin Timber | 2.4.2
2.4.3
2.4.4 |
| [17] | Loebjinski, M.: Bewertung der Tragfähigkeit von Holzkonstruktionen beim Bauen im Bestand – Ein Beitrag zur substanzschonenden Erhaltung von bestehenden Gebäuden, BTU Cottbus - Senftenberg, Dissertation, 2021 | 4.4
4.4.1
4.5.1 |
| [18] | Lißner, K.; Rug, W.: Ergänzung bzw. Präzisierung der für die Nachweisführung zur Stand- und Tragsicherheit sowie Gebrauchstauglichkeit von Holzkonstruktionen in der Altbausubstanz maßgebenden Abschnitte der DIN 1052, Dresden Ausgabe 2004. | 4.4
4.4.2 |
| [19] | Rug, W. (Hrsg.): Holzbau im Bestand - historische Holztragwerke – Beispiele für substanzschonende Erhaltung. Deutsches Institut für Normung, Beuth Praxis, Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2018. | 4.4.2 |

[20]	Küpfer, C.; Fivet, C.: Selektiver Rückbau - Rückbaubare Konstruktion: Studie zur Förderung der Abfallreduktion und der Wiederverwendung in der Baubranche. Lausanne/Freiburg - Schweiz 2021; DOI: 10.5281/zenodo.5131243 (160 Seiten)	4.5.1
[21]	Rosen, A.: Urban Mining Index – Entwicklung einer Systematik zur quantitativen Bewertung der Kreislaufkonsistenz von Baukonstruktionen in der Neubauplanung. Stuttgart, Dissertation, 2021	4.5.1
[22]	DIN EN ISO 14 040 bis 14 044 Ökobilanz	6.2
[23]	Schellnhuber, Hans Joachim, u.a. in: „Können wir uns aus der Klimakrise herausbauen?“, Vortrag bei ProHolz Oberösterreich, 2020	6.4.3
[24]	BMWK - Reallabore – Testräume für Innovation und Regulierung	7
[25]	https://www.circuleum.de/ueberuns (Stand 04.10.2024)	7.1

10. Anlagen

Anlage 1:

Katalog der Schalungselemente, HTWG Konstanz

Anlage 2:

Statische Berechnung der Schalungselemente, Züblin Timber

Anlage 3:

Parameterstudie Schalungselemente, HKA Karlsruhe

Anlage 4:

Gutachten Franßen & Nusser: Juristische Beratung im Forschungsprojekt "Stuttgart 210"

Anlage 5:

Ausstellungstafeln der Ausstellung „aus Schalen entworfen“