

Statik und konstruktive Details einer Gitterschale aus Holz

Ingo Münch, Simon Loske

Institut für Baumechanik, Statik und Dynamik, Technische Universität Dortmund

Zusammenfassung: Der Beitrag thematisiert die konkrete Umsetzung einer Gitterschale, welche sich aus vorgefertigten Dreiecksmodulen aus Holz zusammensetzt. Hierbei wird insbesondere auf die Übertragung von Zugkräften in den Knotenpunkten der Gitterschale eingegangen, welche je nach statischen Erfordernissen vorspannbar sind. Im vorliegenden Fall lagert die Gitterschale auf einem Stahlrahmen, der wiederum über Seile an Bäumen verankert ist und das Tragwerk über den Boden hebt.

1 Motivation und Allgemeines

1.1 Motivation und Vorbemerkungen

Die notwendige Einsparung von Ressourcen und der Mangel an Wohnraum [1] sind einerseits aktuelle und dringende Themen im Bauwesen, andererseits eine Wiederauflage dessen, was den Architekten und Stadtplaner Friedrich Zollinger (1880-1945) vor ca. 100 Jahren u.a. dazu bewog, das nach ihm benannte Zollingerdach zu entwickeln. Dabei standen kostensenkende Faktoren wie z.B.

1. zügiger Baufortschritt durch Standardisierung
2. Vorfertigung und leichte Montage
3. Materialverfügbarkeit
4. Materialeffizienz

im Zentrum seiner Bestrebungen [2]. Diese konnten durch die rautenförmige Anordnung kurzer Brett- bzw. Bohlenstücke erreicht werden, vgl. Abb. 1. Aber auch ästhetische und stützenfreie Raumgestaltung wurden bei der Entwicklung des Zollingerdaches adressiert.



Abbildung 1: Mit Ausnahme einzelner Träger z.B. in First und Traufe, finden im Zollingerdach kurze Bretter Anwendung. Der Innenraum lässt sich stützenfrei und damit variabel gestalten.

Zur Beurteilung der Effizienz wird in [3] ein Spitzbogendach in Zollingerbauweise mit einem Mansarddach verglichen. Hierbei kann das Zollingerdach ca. 50% Material einsparen, was zudem durch kürzere Bretter und kleinere Querschnitte leichter verfügbar ist und weniger Verschnitt generiert.

Dieser historische Rückblick motiviert den vorliegenden Artikel, welcher das Bauvorhaben einer Gitterschale aus Holz vorstellt, die ebenfalls kurze Bretter für die Vorfertigung leichter Grundmodule vorsieht. Diese dreiecksförmigen Module lassen sich im freien Vorbau zügig zu einer räumlichen Tragstruktur verbinden, welche sowohl flächige als auch einzelne Lasten effizient abträgt. Allerdings handelt es sich bei dem vorliegenden Tragwerk um eine geodätische Kuppel, welche über Seile an eine Gruppe von Bäumen verankert ist und dadurch auf die Verwendung von Beton zur Fundamentierung vollständig verzichtet, vgl. Abb. 2.

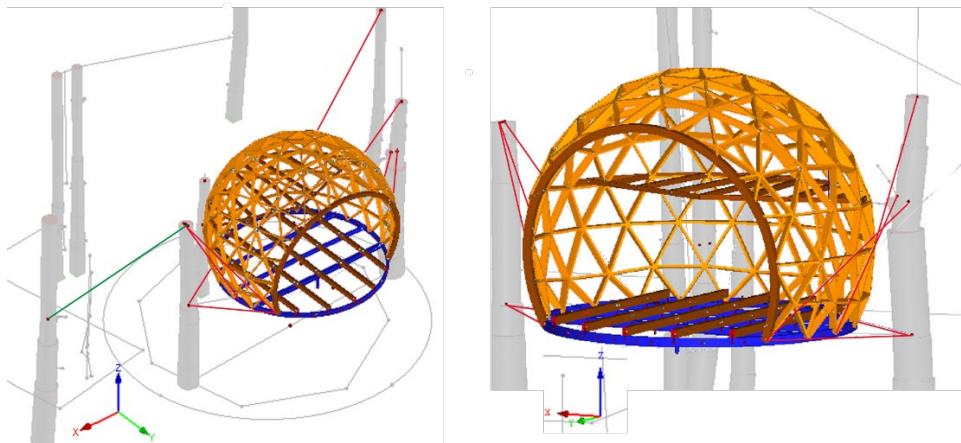


Abbildung 2: Tragwerkmodell der Gitterschale, welche über einen unteren, kreisrunden Randträger (blau) und Seile (rot) an Bäumen (grau) verankert ist.

Wichtige Aspekte bei der Verwendung vitaler Bäume als Tragelemente sind in [4-6] beschrieben und durch einen weiteren Artikel im vorliegenden Band unter dem Titel „Bäume statt Beton - Realisierung von Wohnkörpern im Baumbestand“ zu finden, weshalb hier nicht näher darauf eingegangen wird.

Erwähnenswert ist, dass sich der kreisförmige Randträger durch die punktuelle Abspannung über Seile verbiegt, was im Falle einer kontinuierlichen Fundamentierung am Boden nicht auftreten würde. Da sich die Gitterschale dieser Biegelinie widersetzt, was den Randträger unterstützt, entstehen lokal hohe Zug- und Drucknormalkräfte in deren Stäbe. Diese sind mit anderen Längskräften der Gitterschale ins Gleichgewicht zu stellen, was kraftschlüssige Druck- und Zugverbindung erfordert. Die konstruktive Umsetzung dieser Anforderung wird in Kap. 2 unter Beachtung des Holzbaus betrachtet. In Kapitel 3 wird die Tragwirkung der Gitterschale besprochen sowie weitere Hinweise zur Planung und Umsetzung gegeben. Der Beitrag schließt mit der Zusammenfassung und einem Ausblick in Kapitel 4.

2 Die Gestaltung der Grundmodule und der Gebäudehülle

Die Grundmodule der Gitterschale sind so gestaltet, dass zwei bekannte Schwächen des Zollingerdaches umgangen werden:

1. Die dünnen und hohen Bretter liegen beim Zollingerdach unter der Verschalung und somit frei im Innenraum. Sie sind bei Ausbruch eines Feuers sofort komplett den Flammen ausgesetzt.
2. Die Bolzenverbindung zwischen den Stäben des Zollingerdaches wird bei ungünstiger Laststellung auf Biegung beansprucht, was zu großer und bleibender Verformung des Daches führt.

Punkt 1 wird dadurch umgangen, dass die raumabschließende Verschalung über eingefräste Nuten mit den drei Randbrettern des Dreieckelementes fest verbunden wird, vgl. Abb. 4. So bleibt der Verlauf der Gitterschale zwar sichtbar, aber im Falle eines Feuers ist nur die schmale Brettseite sofort den Flammen ausgesetzt. Im vorliegenden Grundmodul wird die innere, raumabschließende Verschalung aus 8 mm dickem Sperrholz ausgeführt, da keine erhöhten Anforderungen an den Brandschutz gestellt sind. Ansonsten kann hier auf entsprechend dickere oder widerstandsfähigere Verschalung zurückgegriffen werden.

Sobald die Gitterschale erstellt ist, werden Installationen (Licht, Kabel, etc.) Dampfbremse und Dämmung in den Hohlraum der Grundmodule eingebracht, bevor eine diffusionsoffene Membran als winddichter Abschluss folgt. Durch unterbrochene, 3 cm hohe Distanzleisten auf den Stäben der Gitterschale wird eine durchgängige Hinterlüftungsschicht realisiert, bevor 12 mm dickes Sperrholz die Grundmodule als äußere Schalung vervollständigt. Es folgt eine Folie zur Abdichtung und die Bedachung aus Blech. Die Randbretter der Grundmodule sind durch die innere und äußere Schalung gegen Ausknicken um die schwache Achse gestützt, so dass deren Schlankheit unproblematisch ist.

Die Mittelfuge zwischen benachbarten Modulen wird verleimt oder verschraubt, was bereits eine zusammenhängende Struktur ergibt. Zudem sind die Module am Knotenpunkt ineinander verzahnt. Für die Weitergabe von Druckkräften oder geringen Zugkräften sind daher weitere Verbindungsmittel an den eigentlichen Knotenpunkten nicht erforderlich.

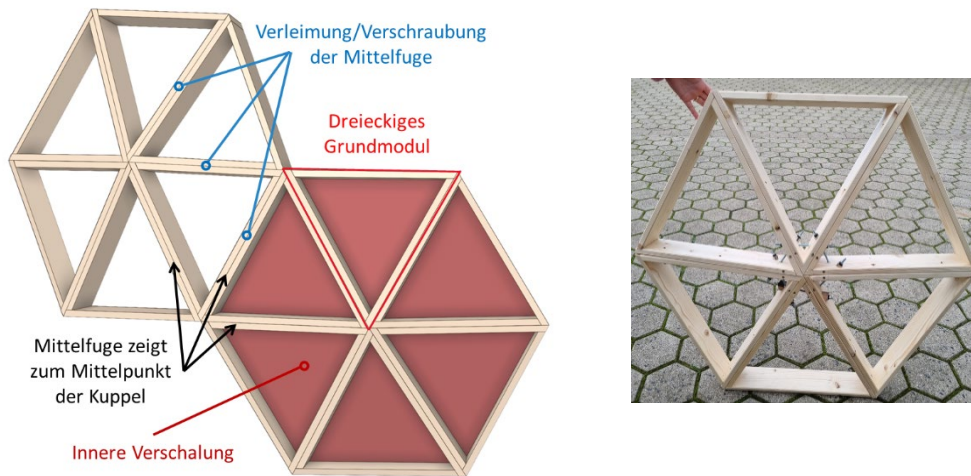


Abbildung 4: Schema des Grundmoduls sowie Prototyp im Maßstab 1:2.

Liegen jedoch in einzelnen Stäben nennenswerte Zugkräfte vor, können diese über den Knotenpunkt hinweg, z.B. mittels aufgenageltem Windrispenband, übertragen werden. Möchte man dies umgehen, oder genügen Windrispenbänder nicht den statischen Anforderungen, schlagen wir die Verstärkung des Knotenpunktes wie in Abb. 5 gezeigt vor.

Dazu werden die Stäbe der angrenzenden Grundmodule paarweise über einen diskreten Ring aus Bolzen so verschraubt, dass sie mit einer Drucknormalkraft vorspannbar sind. Die Bolzen lassen sich an erforderlichen Stellen nach der Erstellung der Gitterschale passgenau einbringen. Die Anwendung einer Bohrschablone ist hilfreich, um die Bolzen dicht aneinander vorbeizuführen, ohne sich zu kreuzen.

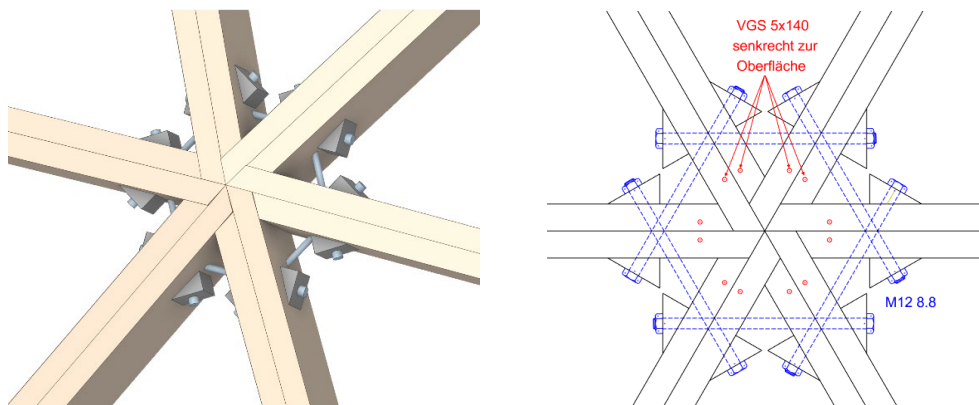


Abbildung 5: Knotenpunkt der Gitterschale zum Anschluss stark zugbeanspruchter Stäbe

Zur Einhaltung der bautechnischen Nachweise ist es notwendig, die entsprechenden Grundmodule im Bereich der vorgespannten Knoten zu verkleben, damit die für die Verschraubung notwendige Mindestholzdicke erreicht wird. Weiterhin sind Randabstände der Bolzen zum Hirnholz einzuhalten, um das Aufspalten der Bretter zu verhindern. In Abb. 5 sind zusätzliche Vollgewindeschrauben als Quersugbewehrung vorgesehen, welche vor Einbringung unbedingt vorzubohren sind.

3 Tragwirkung und Hinweise zur Gitterschale

Im Bauwesen wird die geodätische Kuppel bereits für den Bau des provisorischen Planetariums auf dem Dach der Zeiss-Werke in Jena im Jahr 1922 erwähnt [7]. Dort folgt ein engmaschiges Netz an Bewehrungsstäben einem Ikosaeder hoher Frequenz, vgl. Abb. 6 links. So konnte die Kuppel mit ca. 16 m Durchmesser mit lediglich drei Zentimeter dicker Betonschale realisiert werden. Heute basieren viele Tragwerke auf der Form des Ikosaeders oder des Dodekaeders, letzteres z.B. im Eden-Project in Cornwall [8], siehe Abb. 6 rechts.

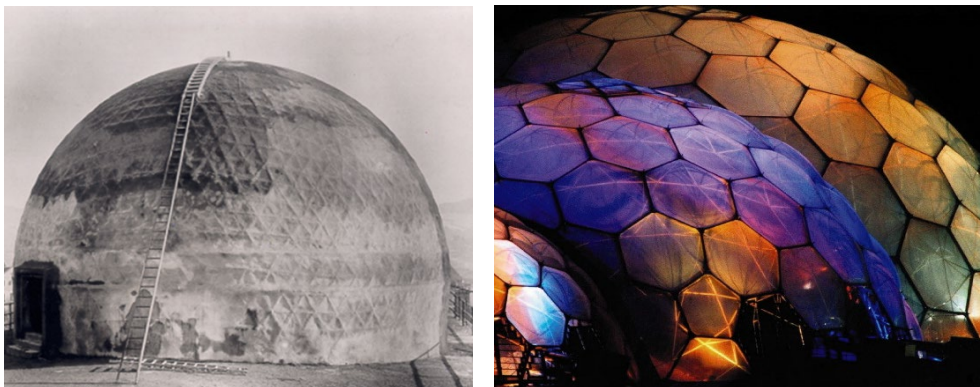


Abbildung 6: Historisches Bild des provisorischen Planetariums auf dem Dach der Zeiss-Werke in Jena 1922 (links) sowie Kuppeln des Eden-Projects in Cornwall (rechts).

Im hier vorliegenden Projekt beschreiben die Stäbe der Gitterschale dreiviertel einer vollen Kugel als Ikosaeder mit angepasster, horizontaler Standfläche an die Grundebene, vgl. Abb. 7. Blickt man auf den Pol der Kuppel, erkennt man die pentatonische Rotationssymmetrie der Struktur. Es handelt sich weiterhin um ein Ikosaeder der Frequenz 4, was die Anzahl der Dreiecke in Meridianrichtung spezifiziert [9].

Das einfachste Ikosaeder der Frequenz 1 besteht aus 20 Dreiecken. Im hier vorliegenden Projekt sind es $\frac{3}{4} \cdot 20 \cdot 4^2 = 240$ Dreiecke. Da es sich um einen platonischen Körper handelt, haben alle Knoten der Gitterschale gleichen Abstand zum Mittelpunkt der Kugel.

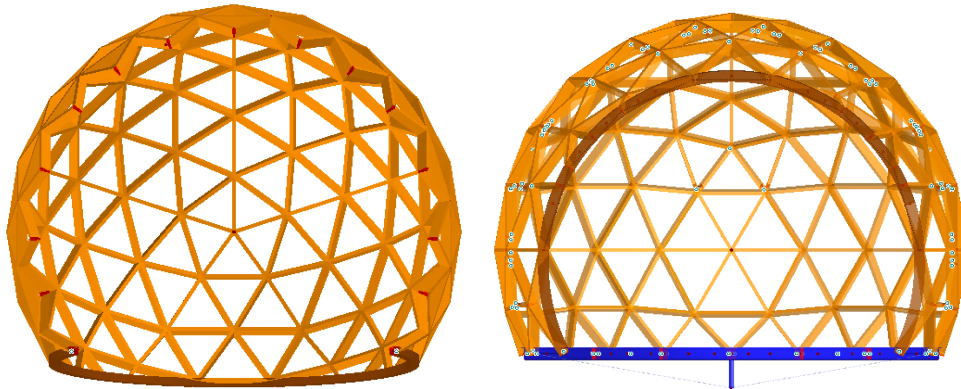


Abbildung 7: Blick von oben auf den Pol des Icosaeders (links) sowie in horizontaler Richtung in die vordere Öffnung der Gitterschale (rechts).

Mit Ausnahme der Standfläche und des Äquators verlaufen Breitenkreise der Gitterschale keineswegs horizontal. Für die kugelseitige Berandung der Zwischenebene sind daher zusätzliche Randstäbe erforderlich, was auch für die vertikale Glasfassade im Übergang vom Wohnraum zur Terrasse zutrifft, vgl. Abb. 8 links.

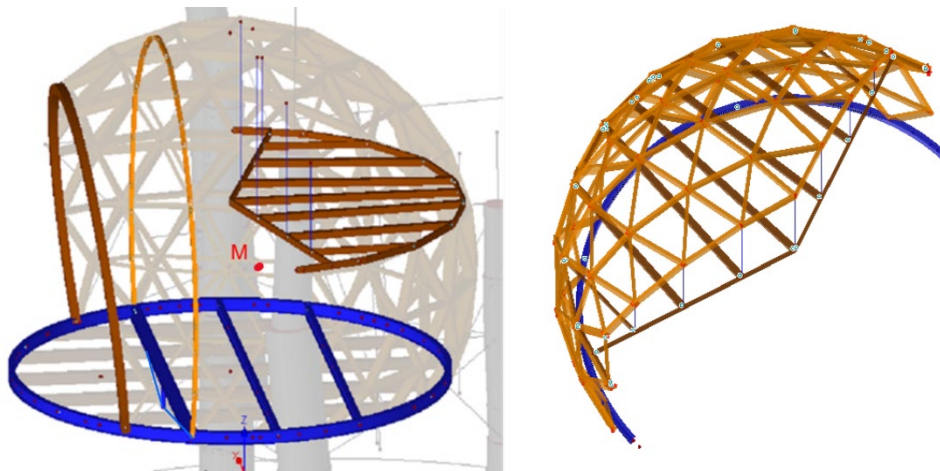


Abbildung 8: Links: Biegefesten Randbogen der Gitterschale (dunkelbraun), Randbogen der Glasfassade (hellbraun), Zwischenebene (dunkelbraun) sowie Grundebene mit Unterspannung (blau). Rechts: Schnitt durch die Gitterschale zur Darstellung der Zugstangen von der Zwischenebene zu zwei pentatonisch symmetrischen Meridianlinien.

In Abb. 8 rechts ist zu erkennen, dass die Brüstung der Zwischenebene mit Hilfe von Zugstangen an der Gitterschale hängt, um die Grundebene frei von Stützen bzw. Wänden zu halten. In der Aufsicht verläuft die Brüstung der Zwischenebene genau unterhalb zweier Meridianlinien der pentatonischen Rotationssymmetrie, was für die Statik der Gitterschale vorteilhaft ist.

Da die Kuppel zur Terrasse hin offen ist und einen erheblichen Teil ihrer Stäbe dafür reduziert, ist ein biegeformer Randbogen für die Brauchbarkeit des Systems notwendig. Dieser Sachverhalt wird bereits mit Hilfe der Abzählformel für Fachwerkstäbe offenbar, siehe Gl. (1). Betrachtet man die Stäbe der Gitterschale als Fachwerkstäbe, was selbst für vorgespannte Knoten der konstruktiven Ausführung entspricht, liefert die Abzählformel für die 268 Stäbe und 105 Knoten

$$n_{KV} = a + s - 3 \cdot k = 45 + 268 - 3 \cdot 105 = -2 \quad (1)$$

wobei 15 Knoten auf dem unteren Ring liegen und somit gelagert sind, vgl. Abb. 9 (links). Ergänzt man diese unvollkommene Struktur mit vier Zusatzstäben, um offene Dreiecke (Grundmodule) zu schließen, erhält man zwar $n_{KV} = +2$, dennoch bleibt das System unbrauchbar, vgl. Abb. 9 Mitte.

Ein biegeformer Randbogen sowie vier Zusatzstäbe pro Seite sind notwendig, um den Bogen durchgängig mit der Gitterschale zu verbinden und damit ein tragfähiges System zu erhalten, welches äußere Einwirkung vornehmlich durch Membrankräfte und somit geringer Verformung ins Gleichgewicht stellt.

Im vorliegenden Projekt sind lediglich 2.64 m^3 Nadelholz C24 für die Gitterschale notwendig, welche ein Volumen von 113 m^3 sowie 110 m^2 Oberfläche umfasst.

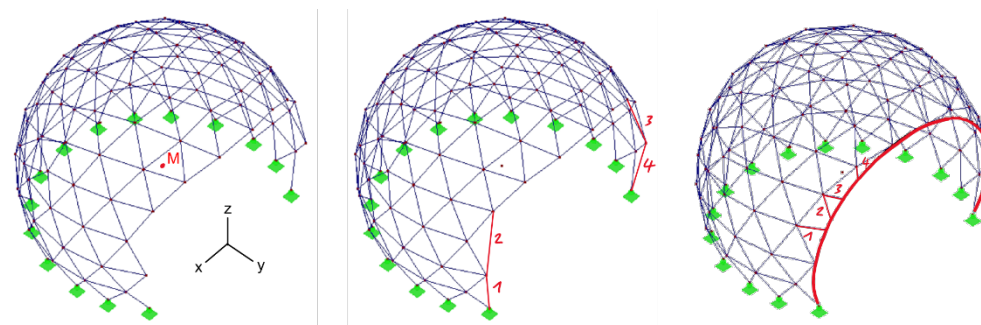


Abbildung 9: Links: Untaugliche Gitterschale ohne vorderen Randbogen. Mitte: Untaugliche Gitterschale mit vier Zusatzstäben (rot). Rechts: Taugliche Gitterschale mit Randbogen und vier Zusatzstäben pro Seite (rot).

Hohe Anforderungen an die Verformungsbegrenzung ergeben sich für die Ebene der Glasfassade, weshalb der darunterliegende Querträger unterspannt und zur Kompensation von Durchbiegung aus Eigenlast vorgespannt wird.

4 Zusammenfassung und Ausblick

Der vorliegende Artikel motiviert das Tragwerk eines kleinen Wohnkörpers als Gitterschale einer geodätischen Kuppel. Hinweise zur konstruktiven Durchbildung sowie zur Gesteuerung mit vorgefertigten Modulen werden gegeben. Aufgrund der besonderen Bauaufgabe, den

Wohnkörper mittels Abspannungen an einem biegeweichen Stahlrahmen über Grund zu heben, treten in der Gitterschale lokal große Zugkräfte auf. Dies stellt aber kein unüberwindbares Hindernis für den Einsatz von Holz für dieses hocheffiziente Tragwerk dar.

Einerseits lassen sich die Grundmodule über deren Seitenflächen kontinuierlich verschrauben, sodass Zug- und Druckkräfte aus der Membranwirkung der Gitterschale über die Grundmodule hinweg übertragbar sind. Andererseits wird auch für die Knotenpunkte der Gitterschale eine konstruktive Lösung vorgestellt, welche die ankommenden Stäbe im Knotenpunkt auf ein gewünschtes Niveau vordrückt und damit den Knoten zusammenhält.

Aus den konstruktiven Details ist auch erkennbar, dass die Gitterschale als Raumfachwerk mit gelenkigen Knotenpunkten zu modellieren ist. Werden große Teile der Gitterschale für Öffnungen entfernt, ist die Brauchbarkeit des Systems z.B. mit vereinfachten Untermodellen zu prüfen. Im vorliegenden Fall ist die Anordnung eines biegefesten Randbogens unerlässlich.

Abschließend und Ausblickend sei gesagt, dass für den hier vorgestellten, kleinen Wohnkörper, die Tragwirkung der Gitterschale derart effizient ist, dass bei der Dimensionierung der Holzquerschnitte konstruktive oder bauphysikalische Vorgaben wie Mindestholzdicke oder Dämmschichthöhe maßgebend sind. Die Gesteherung steht kurz bevor und wird zeigen, ob die hier kommunizierten Ziele zur Kosten- und Ressourceneffizienz erreicht werden. Diese abschließenden Sätze deuten aber auch darauf hin, dass die Ziele für größere Wohnkörper einfacher zu erreichen sind.

Literatur

- [1] Pestel Institut gGmbH & Arbeitsgemeinschaft für zeitgemäßes Bauen e. V.: Bauen und Wohnen in der Krise, 2023 <https://bauen-und-wohnen-in-deutschland.de/wp-content/uploads/2023/01/Studie-Bauen-und-Wohnen-in-der-Krise.pdf>
- [2] HEISE, K.: Friedrich Reinhardt Balthasar Zollinger. Städtebauer und Konstrukteur des gewölbten Lamellendachs. Deutsche Bauzeitung, Heft 2, S. 68–73, 2004
- [3] WINTER, K., RUG, W.: Innovationen im Holzbau – Die Zollinger-Bauweise. Bautechnik 69(4), S. 190–197, 1992#
- [4] ZELLER, M., MÜNCH, I.: Befestigung von Bauwerken in Bäumen mit Baumanker und doppelter Umreifung. Bautechnik 99, 13-22, 2022
- [5] LOSKE, S., MUENCH, I.: Experiments and Modelling of the Load Capacity of Green Wood. Proc. Appl. Math. Mech., 22(1), 1-6, 2022.
- [6] MUENCH, I., LOSKE, S.: A deterministic model combining NDT to estimate permissible bending loads on trees. ce/papers, 6(5), 258-263, 2023
- [7] KURRER, K-E.: Die Geschichte der Baustatik. 2. Auflage. Ernst & Sohn, Berlin, 2016
- [8] KNEBEL, K., SANCHEZ, J., ZIMMERMANN, S.: Das Eden-Projekt. Stahlbau 70(8), S. 3–15, 2001
- [9] KLIMKE, H., SANCHEZ, J.: Design, Analysis and Construction of Space Structures: The Mero Legacy. Independently published, ISBN 979-8575474326, 2021