

ENTWICKLUNG EINES HOLZSCHALEN-SYSTEMS ALS WEITGESPANNTES DACHTRAGWERK

Masterarbeit
Wolfgang Windisch





Wolfgang Windisch, BSc

Entwicklung eines Holzschalen-Systems als weitgespanntes Dachtragwerk

Masterarbeit

zur Erlangung des akademischen Grades

Diplom- Ingenieur

Masterstudium Architektur

eingereicht an der

Technischen Universität Graz

Betreuer

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Stefan PETERS,

Institut für Tragwerksentwurf

Graz, Oktober 2017

Bei personenbezogenen Bezeichnungen gilt die gewählte Formulierung für die männliche als auch weibliche Form. Auf explizite Nennung beider Geschlechter wurde der einfacheren Lesbarkeit halber verzichtet.

EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

.....
Graz, am (Unterschrift)

INHALT UND STRUKTUR DER ARBEIT

EINLEITUNG

Vorwort	3
Analyse	4
Die Schale als Tragwerk	5
Werkstoff Holz	18
Geometrie	40
Nachhaltigkeit	48
Digitale Fabrikation	60

EINSATZGEBIET UND ANFORDERUNGEN

Einsatzgebiet	73
Systemvergleich	76
Anforderungen	82

ENTWURF UND KONSTRUKTION

Formfindung und Konstruktion	88
Bemessung	92
Krümmungsanalyse und Tesselierung	102
Entwurfsdarstellungen	116
Ansichten	
Schnitte	
Details	
Schaubilder	

MODELLSTUDIE UND FABRIKATION

Experimenteller Modellbau	138
Produktionsplanung	142
Fabrikation und Errichtung	146

ABSTRACT

For thousands of years, wood has been used for construction and development in wood technology pushed forward. Surprisingly, there is still no end to these material-related innovations.

This work is about transforming wood and wood based materials into new geometries, in order to develop a resource-efficient structure. The developed double-walled wood continuum shell is a totally prefabricated roof structure, that covers spans of 10 to 35 meters and meets the statutory as well as the aesthetic requirements.

A hyperbolic paraboloid shape was chosen due to the advantages for the construction. Investigations with finite element calculations have led to an optimization of the load bearing structure.

In order to meet sustainability requirements, as many connections as possible were designed to be detachable.

This means that the necessary maintenance is reduced and the dismantling/separating of the construction parts is easier.

Research was carried out to identify possible areas of application for wooden shells. In order to highlight the advantages of the developed wooden shell, a comparison with various parameters was made, with standard wooden structures.

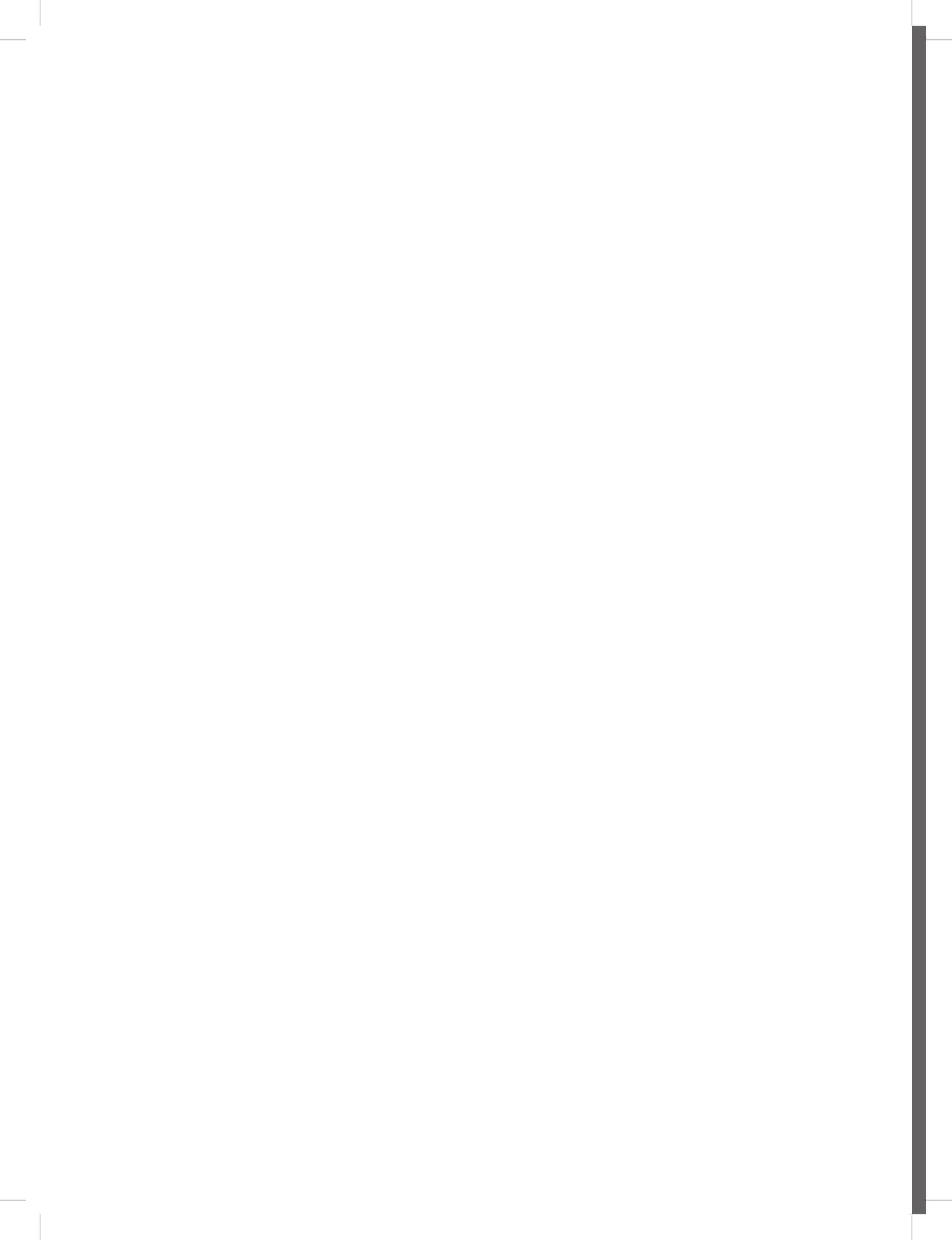
This work also focuses on a digital process chain. Parametric design models permit a continuous adaptation of the system. Due to the manifold possibilities and steady development in the area of digital fabrication, a proposal has been made for a robot-assisted manufacture.

Seit tausenden von Jahren wird mit dem Material Holz gebaut und immer neue Entwicklungen vorangetrieben. Erstaunlicherweise ist immer noch kein Ende dieser materialbezogenen Innovationen in Sicht. Diese Arbeit handelt davon Holz und Holzwerkstoffe in neue Geometrien zu überführen um ein ressourcenschonendes und effizientes Tragwerk zu entwickeln. Dabei handelt es sich um ein konstruktives Dachsystem, das für Spannweiten von 10 bis 35 Metern geeignet ist. Die in dieser Arbeit vorgestellte doppelwandige Holz-Kontinuumsschale ist ein hochgradig vorgefertigtes Dachtragwerk, das verschiedene Anforderungen erfüllt.

Mittels Geometriestudien wurde eine für die Konstruktion vorteilhafte hyperbolische Paraboloid Form gewählt. Untersuchungen mit Finite Elemente Berechnungen haben zu einer Optimierung des Tragwerks geführt. Ebenso im Fokus dieser Arbeit steht eine digitale Prozesskette. Parametrische Entwurfsmodelle lassen eine stufenlose Adaptierung des Systems zu. Mithilfe von digitalen Fabrikationsmitteln wird die Produktion erleichtert und arbeitsextensiver gestaltet. Aufgrund der mannigfaltigen Möglichkeiten und stetigen Entwicklung in diesem Gebiet, wird ein Vorschlag gemacht wie eine maschinenunterstützte Fertigung aussehen könnte.

Neben einer Recherche für mögliche Einsatzgebiete von Holzschalendächern ist auch der direkte Vergleich mit gängigen Vollholzhallensystemen gemacht worden. Verschiedene Vergleichsparameter wurden herangezogen, um die angestrebten Vorteile hervorzuheben. Um dem Aspekt der Nachhaltigkeit gerecht zu werden wurden möglichst viele Verbindungen lösbar konstruiert. Dies führt zu einem geringen Wartungsaufwand und zudem ist ein Rückbau und das Auftrennen der Baumaterialien erleichtert.

Letztendlich ist das Ziel dieser Arbeit zu zeigen, dass das Überführen von flächigen Holzwerkstoffen in die dritte Dimension (1D-Stab, 2D-Platte/Scheibe, 3D-Schale) ein sinnhafter Prozess sein kann, der die Entwicklungen im Holzbau vorantreibt.



EINLEITUNG

„[...] wood can no longer be understood as an outdated material with inferior properties and idiosyncratic characteristics as compared to industrially produced building materials. Instead, it is increasingly regarded as a most promising building material for the future with unrivalled environmental advantages.“^[1]

VORWORT

Woher meine Faszination für den Werkstoff Holz kommt, ist mir unbekannt, jedoch begleitet Sie mich schon seit jungen Jahren. Nachdem ich die HTL Ortweien in der Fachrichtung „Holz-Hochbau“ absolviert hatte, entschied ich mich zum Studium der Architektur, um als Planer meine Ideen zu verwirklichen. Ein Auslandsjahr auf der Aalto University in Finnland, dem flächenbezogen prozentuell walddreichsten Land Europas, nutzte ich um weitere Vertiefungen im Holzbau zu erlangen.

In Kombination mit den Fähigkeiten, die ich im Laufe des Studiums und von der Arbeit am Institut für Tragwerksentwurf erlangte, war es mir ein Anliegen, eine Technik und Entwicklungsbezogene Arbeit zu verfassen.

Jährlich werden an verschiedenen Universitäten mehrere einzigartige Forschungspavillons aus Holz fertiggestellt. Diese zielen auf die Entwicklung neuer Fertigungstechnologien oder die Untersuchung materialspezifischer Eigenschaften ab. Jedoch verbleiben viele dieser speziellen Entwicklungen im Stadium des Prototyps, ohne das erkennbare Ziel eines massentauglichen Einsatzes in der Architektur anzustreben.

Die von Teilen der Fachkreise geforderte Differenzierung von Bauen-Architektur-Baukunst ist mir schleierhaft, da diese subjektiv, variabel und in Grauzonen stattfindet. Jeglicher gebauter Raum beeinflusst uns und kann auch als kultureller Akt empfunden werden. Der Architekt sollte versuchen, seine Fähigkeiten in allen baulichen Belangen einzubringen, um die schon vor zweitausend Jahren geforderten Ansprüche der Firmitas, Utilitas und Venustas zu erfüllen.

Der Ursprung dieser Arbeit war die Idee, eine Kontinuumsschale aus Holz zu bauen, ohne eine spezielle Bauaufgabe im Sinn zu haben. Die thematische Weiterentwicklung fand im Prozess der Ausarbeitung statt und hat letztendlich zu einer allgemeingültigen Systementwicklung geführt.

ANALYSE

„Flächenaktive Tragsysteme sind gleichzeitig Hülle des Innenraums und Außenhaut des Baukörpers und bestimmen folglich innere Raumform und äußere Bauform. Sie sind daher endgültige Substanz des Bauens sowie Kriterium für seine Qualität; als zweckmäßig-wirtschaftliche Maschine, als ästhetisch-bedeutungsvolle Form.

Wegen der Identität von Tragwerk und Bausubstanz erlauben flächenaktive Tragwerke weder Toleranz noch Unterscheidung zwischen Tragwerk und Bauwerk. Da Tragform nicht willkürlich ist, und Raum und Form des Bauwerkes und mit ihnen der Wille des Architekten an das Gesetz der Mechanik gebunden.“^[1]



DIE SCHALE ALS TRAGWERK

Abb. 1: Teshima Art Museum, Kagawa, 2010; Die Schale als Tragwerk und raumbildendes Element

Als Schalen werden weitgespannte flächenaktive Tragsysteme bezeichnet, welche eine einfache oder doppelte Krümmung aufweisen.

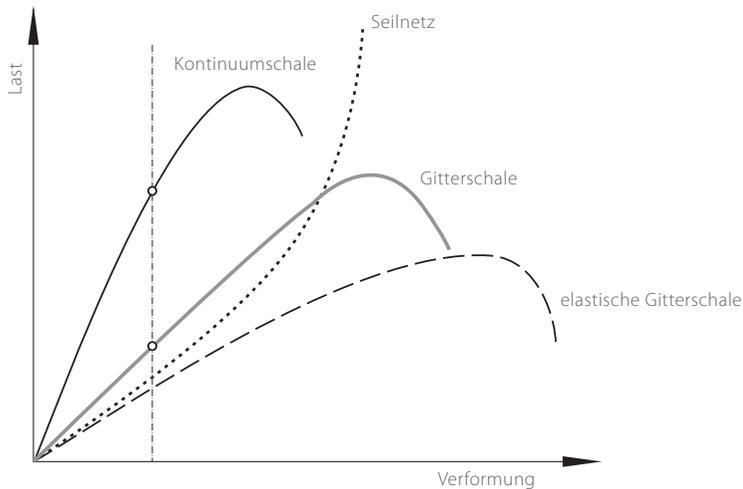
Das Hauptmerkmal für Schalen ist eine hohe Schlankheit, die sich aus großen Abmessungen in zwei Hauptrichtungen, zu einer im Vergleich sehr geringen Dicke, ergibt. Kontinuumschalen sind vollflächig ausgebildet und haben den Vorteil, dass sie, bei richtiger Formgebung und Konstruktion, eine Membrantragwirkung erzielen können.

Als Membrantragwirkung versteht man die Ableitung äußerer Kräfte nur durch Druck und Zugkräfte, innerhalb des gleichmäßig beanspruchten Schalenquerschnitts. Im Vergleich zu biegebeanspruchten Schalen weisen diese eine wesentlich effizientere Materialausnutzung auf.

Um einen solchen Tragmechanismus zu erzielen, bedingt dies in der Regel eine einspannungsfreie Auflagersituation sowie die Vermeidung von Steifigkeitssprüngen und die Aufbringung von großen Punktlasten.^[2]

2 Vgl. Block/ Gengnagel/ Peters 2013, 114f.

Abb.2: Vergleich des Verformungsverhaltens unter steigender Lasteinwirkung von unterschiedlichen Schalentypen und Seilnetzen



FORMAKTIVE TRAGWERKE

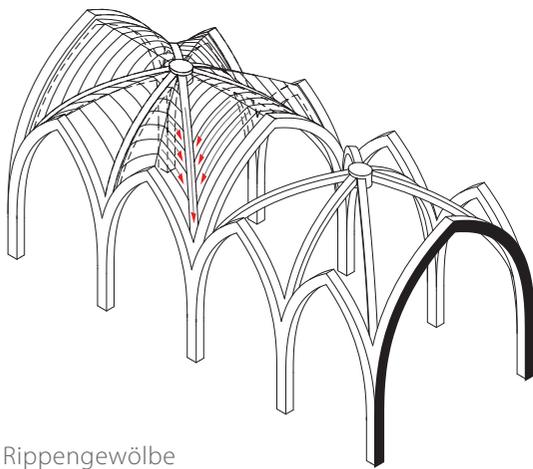
Nicht zu verwechseln sind Flächentragwerke mit formaktiven Tragwerken wie Seil-, Pneu- oder Bogentragwerken.

Auch wenn Gebilde wie Rippengewölbe oder Stabwerkskuppeln räumliche Ausdehnungen annehmen oder gar flächig ausgebildet sind, so unterscheiden sie sich von flächenaktiven Tragsystemen durch ihre Art der Lastabtragung, der Auflager und der resultierenden inneren Kräfte.

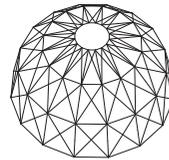
Das Kennzeichen solcher Systeme ist, dass äußere Kräfte in einfache Normalkräfte umgelenkt werden und so in das Auflager geleitet werden.

Die ideale Strukturform erlangen formaktive Tragsysteme durch das Folgen beziehungsweise das Abbilden des Kräfteverlaufs. Für Bogentragwerke ist das die sogenannte Stützzlinie und für Seiltragwerke die Hängelinie.^[3]

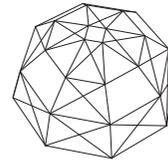
3 Vgl. Engel 1999, 57.



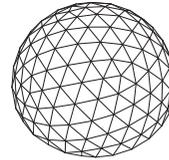
Rippengewölbe



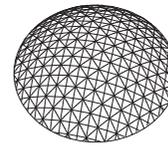
Schwedler-Kuppel



Zimmermann-Kuppel



Geodätische Kuppel



Netzkuppel

Abb.3: Verschiedene Stabkuppel- und Gitterschalenarten sowie Rippengewölbe

Im 20. Jahrhundert entwickelten sich aus Stabwerkskuppeln sogenannte Gitterschalen (Stabwerksschalen), welche durch die Kombination von Bögen, Ringen und Diagonalen eine Schalentragswirkung erzielen.^[4]

Die Festigkeit von Schalen wird nicht primär durch den verbauten Werkstoff erzielt, sondern vielmehr durch die Geometrie.^[5]

Schalen können durch geeignete Formgebung die Tragmechanismen der formaktiven Tragsysteme integrieren.

Die Entwicklung der richtigen Form für die Fläche, welche sowohl statisch, als auch nutzungsmäßig und auch ästhetisch funktioniert, ist ein kreatives Gesamtwerk.^[6]

4 Vgl. Block/ Gengnagel/ Peters 2013, 112.

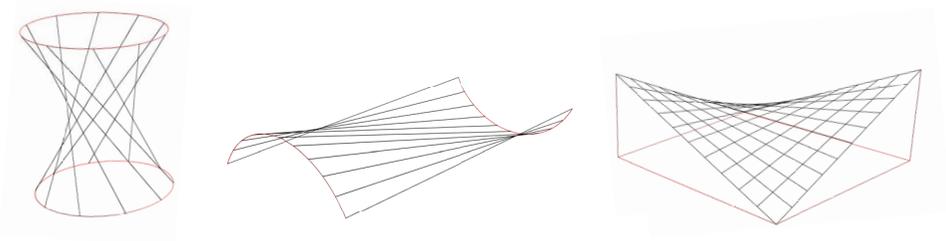
5 Vgl. Heinle/ Schlaich, 1996, 207.

6 Vgl. Engel 1999, 211.

GEOMETRIE UND KONSTRUKTION IM LAUFE DER GESCHICHTE

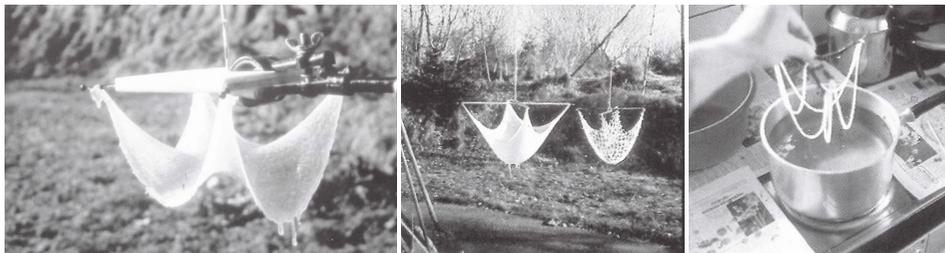
Der Schalenbau in den 1950er Jahren beschränkte sich vorwiegend auf geometrische Formen und Regelflächen, da diese sich auch damals schon mathematisch beschreiben und berechnen ließen. Zudem konnten diese mit vergleichbar geringerem Rüstungsaufwand realisiert werden.

Regelflächen:
Einschaliges Hyperboloid, Konoid und hyperbolisches Paraboloid



Auch Heinz Isler begann vorerst mit geometrischen Schalen, bevor er weitere Formfindungsmethoden entwickelte. Seine über 1400 realisierten Schalenprojekte bestehen vorwiegend aus Beton, da dieser Werkstoff das Prinzip der freien Formen besonders gut abbilden lässt.^[7] Er war einer der wenigen Pioniere in diesem Gebiet, welcher den Schalenbau auch in wirtschaftlichen Belangen mit anderen Systemen konkurrenzfähig machte. Seine spielerisch erforschten Formen entstanden aus Experimenten und Modellversuchen wie Pneu-Konstruktionen oder hängenden Tüchern oder er suchte sich Vorbilder aus der Natur.^[8]

Abb.4: Islers Modellversuche für Formfindung



7 Vgl. Ramm/ Schnuck, 2002, 7.
8 Vgl. Ramm/ Schnuck, 2002, 41..

Diese Modelle wurden empfindlich genau vermessen und in einem größeren Maßstab gezeichnet. Zudem entwickelte er ein Schalungssystem aus sorgfältig hergestellten gebogenen Leimholzträgern, welche den Rüstungsaufwand auf nur 20% der gesamten Baukosten reduzierte.

Bereits 1959 hatte Isler es geschafft materialeffiziente und wirtschaftliche Konstruktionen zu bauen. Zudem ließ er sich von den elegant geformten Schalen von Felix Candela inspirieren und versuchte die visuelle Ausdruckskraft dünner Schalen weiterzuentwickeln.^[9]



Abb.5: Felix Candela
Oceanografico in
Valencia



Abb.6: Eladio Dieste,
Caputto Fruit Plant. Salto,
Uruguay. 1971-72,
1986-87

Während die meisten Projekte aus Beton gefertigt wurden, entwickelte der uruguayische Ingenieur Eladio Dieste mithilfe von räumlicher Profilierung extrem dünne Bogenschalen aus bewehrtem Mauerwerk. Ein besonders gelungenes Projekt stellt hierbei das Caputto Fruit Plant, in Salto dar.

Die räumliche Profilierung beinhaltet verschiedene Stützlinien, welche sich in den Querschnitt der Schale einschreiben lassen, damit exzentrische Lasten sicher abgetragen werden können.^[10]

Aus rein konstruktiven und baupragmatischen Überlegungen entstanden puristische Gebilde, welche eine unvergleichbare Leichtigkeit aufweisen.

10 Vgl. Block/ Gengnagel/ Peters 2013, 210.

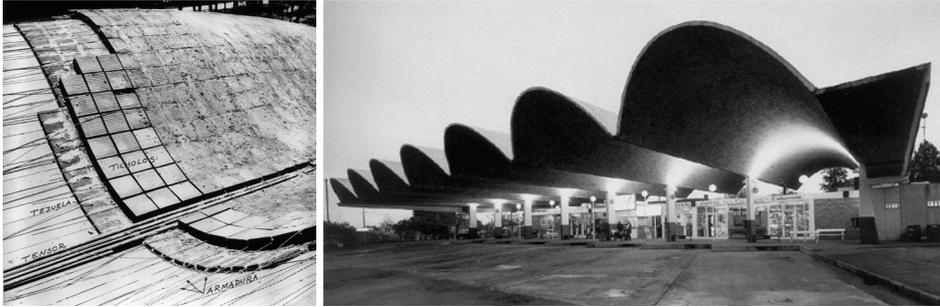


Abb.7: Eladio Dieste
Ziegelschalen

Aufgrund der Tatsache, dass die Arbeitsleistung im Vergleich zu den Materialkosten heutzutage zu teuer ist, kommen die zeitintensiven und aufwändig zu schalenden Schalenkonstruktionen kaum mehr zur Anwendung. Solche Art von Konstruktionen sind nicht aus technischer, sondern aus rein ökonomischer Sicht überholt.^[11]

An mehreren Universitäten wird an dem Thema der rationalen Fertigung doppelt gekrümmter Bauteile geforscht, wie auch am Institut für Tragwerksentwurf an der TU Graz. Mit dem FFG-Forschungsprojekt UHPC Schale wurde eine neuartige, energiesparende, prozesshafte Fertigteilbauweise für UHPC Schalenelemente und deren Fügung entwickelt.^[12]

Auch wenn die Frage einer erneuten wirtschaftlichen Herstellung geklärt sein mag, so entstehen neue Herausforderungen für solche Konstruktionen. Die Fragen nach der Dauerhaftigkeit, des Renovierungsaufwandes und der Nachhaltigkeit.

Zudem waren in den 60er und 70er Jahren die Dächer nur wenig gedämmt, während gegenwärtig auf eine 10 cm dünne Konstruktion noch weitere 20-30 cm Dämmung aufgebracht werden muss und das filigrane Erscheinungsbild damit im wesentlichen gestört ist.

11 Vgl. Lämmler/Wagner, 2008, 8-15.

12 Vgl. UHPC- Schale, <http://www.ite.tugraz.at/index.php?page=312>, 28.07.2017.

„Über die Beantwortung der technisch lösbaren Fragen hinaus sind Architekten und Ingenieure mit der Herausforderung konfrontiert, gemeinsam ein zeitgenössisches Formenvokabular zu entwickeln, das basierend auf statisch effizienten Konstruktionen, wachsenden ökologischen Bedürfnissen und dem Einsatz moderner Technik neue Bauten und Räume hervorbringt, die in ihrer Ausstrahlung über die bloße Gegenwart hinausweisen.“^[13]



Abb.8:
Muthalle Mannheim,
1975,
Frei Otto

Der Begriff Formenvokabular weist auf eine Analogie zur Sprache hin, was zu bedeuten hätte, dass für bestimmte Bauaufgaben eine dezidierte Form angebracht wäre.

Dabei wirken viele dieser expressiven Formen wie Skulpturen und referenzieren sich selbst, anstatt die zu beherbergende Nutzung. In anderen Fällen war nicht der ästhetische Ausdruck das primäre Ziel, sondern lediglich ein effizientes und wirtschaftliches Tragsystem zu erzeugen. Diese Objekte erlangten ihre Form aus der konstruktiven Logik und schaffen es durch ihre Klarheit zu bestechen.

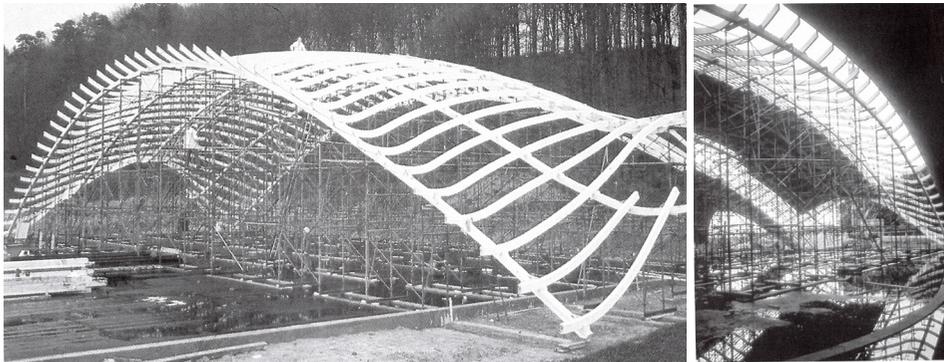
Der Umgang mit tragenden Flächen setzt somit die Kenntnis voraus wie solche Geometrien konstruiert werden, wie ihre tragenden Mechanismen funktionieren und über ihre Bedeutung für Form und Raum im Bauen.

„Kenntnis der Möglichkeiten, wie mit raumbildenden Flächen ein sich selbst tragendes und lastaufnehmbares Gefüge entwickelt werden kann, ist daher unerlässliches Wissen für den entwerfenden Architekten oder Ingenieur.“⁽¹¹⁴⁾

HOLZ - KONTINUUMS-SCHALEN

Obwohl die Schalung von solchen NAWI-Flächen [nicht abwickelbare Flächen] aus Holz gefertigt wurden, gibt es nur wenig gebaute Beispiele von Kontinuumschalen aus Holz. Holz war billig, verfügbar, leicht zu verarbeiten und zudem ein ökologischer Baustoff und wurde daher sehr oft für die Rüstungstechnik eingesetzt. Heinz Isler schaffte es, durch intelligente Holz-Rüstungstechnik und im Zusammenspiel mit ein und derselben Baufirma, die Kosten der Schalung von 50% der Baukosten auf 20% zu senken.^[15]

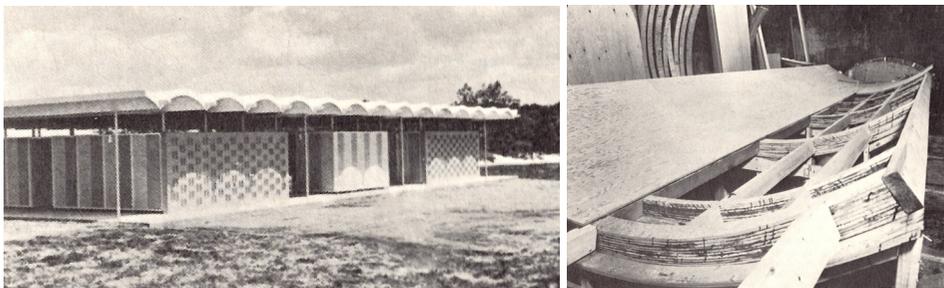
Abb.9: Schalung,
Tennishallen Düdingen
und Heimberg



Anm.: Rüstung weist
keine Schalen-wirkung
auf

In den 1930er Jahren haben sich kurzzeitig hölzerne Zylinderschalen im Industriebau und zur Überdachung von Versammlungsräumen durchgesetzt, da sie 55% günstiger waren als die kostengünstigsten Holzdächer zu dieser Zeit.^[16]

Abb.10: Holz-
Zylinderschalen aus
Furnierplatten



15 Vgl. Ramm, Schnuck (Hg.),2002, 13f.
16 Vgl. v. Halaasz, 1974, 354.

Für Holzschalen mit größeren Stützweiten und Wandungen aus Furnierplatten empfiehlt es sich, aus konstruktiven Gründen, die Schale doppelwandig auszubilden. Zudem ist es dadurch auch naheliegend die Wärmedämmung und Dampfsperren im Zuge einer Vorfertigung einzubringen. Um beide Schalwandungen zum gleichmäßigen Mittragen heranzuziehen, ist auf eine ausreichend schubfeste Verbindung der beiden Seiten zu achten.^[17]

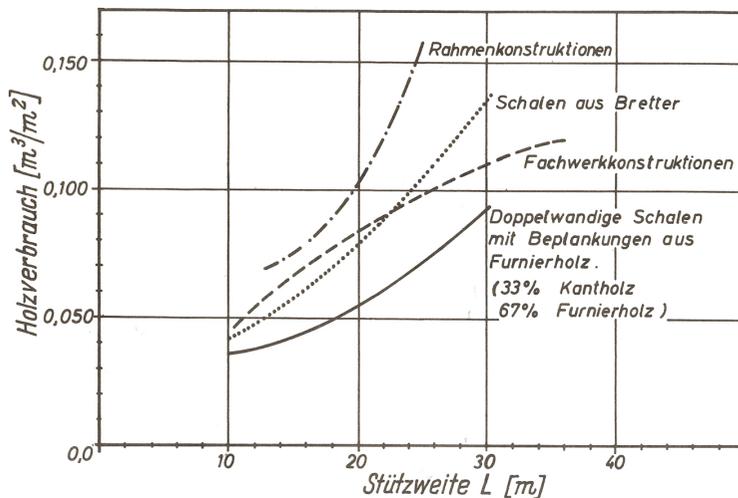


Abb.11: Vergleich verschiedener Konstruktionen

Anm.: Holzverbrauch zu überbauter Fläche in Abhängigkeit der Stützweite $[(\text{m}^3/\text{m}^2)/\text{m}]$

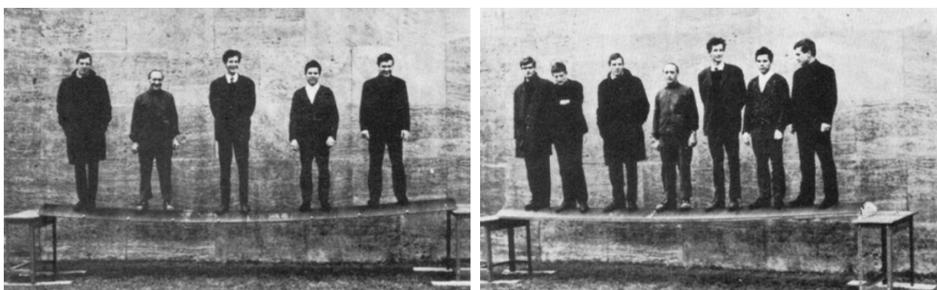
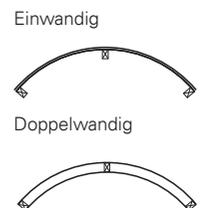


Abb.12: Einwandige Demonstrationsschale vs. doppelwandige Demonstrationsschale

Anm.: Systemschnitte:



Das Problem von doppelt gekrümmten Holzschalen ist der Umstand einer schwierigen Produktion von nicht abwickelbaren Flächen. Es eignen sich daher nur wenige Formen für einen wirtschaftlichen Schalenbau aus Holz, lediglich jene, welche sich aus einer Schar Geraden darstellen lassen.^[18]

Weitere Aussagen aus dem 1974 verfassten Buch sind, dass doppelt gekrümmte Holzschalen sich auf Einzelausführungen beschränkten und diese aus eher gestalterischen als aufgrund von wirtschaftlichen Überlegungen errichtet wurden.

Viele Architekten und Ingenieure beschäftigten sich zu dieser Zeit mit der Struktur von Schalenkonstruktionen da dies als Grundlagen- und Zukunftsforschung gesehen wurde. Jedoch die meisten der erforschten Schalenformen fanden im Holzingenieurbau keine Anwendung, da die Konstruktion sich nur schwer fertigen ließ und es noch keine geeigneten Berechnungsmethoden gab. Die Bemessungen erfolgten weitestgehend durch Modellversuche.^[19]

Abb.13: Robert von Halasz, Holzbautaschenbuch, 1974 erschienene 7te Auflage, bekannt als die Holzbaubibel oder „Der Halasz“

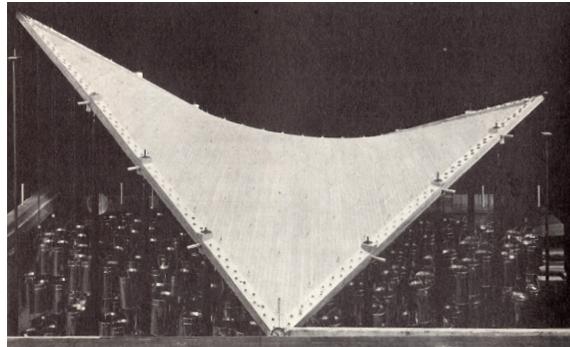
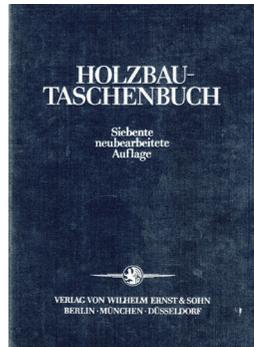


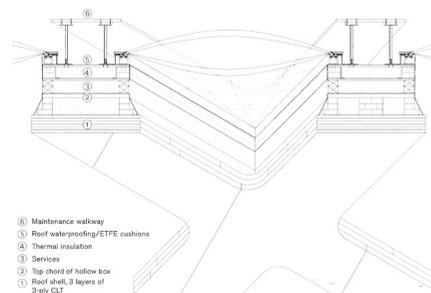
Abb.14: Belastungsversuch Holz H P-Schale, Maßstab 1:7

43 Jahre später haben wir die Möglichkeiten erlangt, solche Konstruktionen zu entwerfen, zu untersuchen und zu berechnen. Mit Hilfe digitaler Fabrikationsmittel können diese zudem arbeitsextensiver produziert werden. Ein erst kürzlich fertiggestelltes Projekt zeigt zudem auch die Leistungsfähigkeit von Holzschalen auf.

18 Vgl. Halasz (Hg.), 1974, 369-372.

19 Ebda.

Das in 2014 errichtete Elefantenhaus im Züricher Zoo überspannt dabei eine Fläche von circa 6000m², mit einem Durchmesser von rund 80 Metern. Die Geometrie der frei geformten Holzschale wurde mithilfe von computerbasierenden Modellversuchen erzeugt. Eine umgekehrte Membran-Hängekonstruktion gewährleistet, dass die Konstruktion hauptsächlich auf Druck beansprucht wird. Die sehr flach geschwungene Holzschale wurde zwischen den Geländekanten und der maximalen Bauhöhe eingepasst und misst an der höchsten Stelle lediglich 18 Meter.



- ⑥ Maintenance walkway
- ⑤ Roof water-proofing/ETFE cushions
- ④ Thermal insulation
- ③ Services
- ② Top chord of hollow box
- ① Roof shell, 3 layers of 3-ply CLT

Abb.15: Elefantenhaus Zürich Innenansicht & Isometrisches Detail

Die Tragkonstruktion besteht aus 3 Schichten 80mm dicken, einachsig vorgekrümmten Kreuzlagenholz, welche sich jeweils um 60° zueinander verdrehen. Der Verbund der Platten wird mittels 100 Nägeln pro m² hergestellt. 271 unregelmäßige Öffnungen perforieren das Dach in einem Ausmaß von circa 35%. Die Öffnungen wurden so gesetzt, dass sich annähernd durchgehende Trägerstrukturen ergeben, die bis zu den Auflagern oder dem umhergehenden vorgespannten Betonring gehen. Sowohl die Planung als auch ein großer Teil der Fertigung wurde computergestützt vollzogen. Die in etwa 600 verschieden geformten Kreuzlagenholzpaneele wurden mittels Roboter zugeschnitten und befräst.^[20]

WERKSTOFF HOLZ

„Mit der Frage, wie wir Holz [...] am besten als Baustoff nutzen können, setzt sich die Menschheit bereits auseinander, seit sie die Sesshaftigkeit für sich entdeckt hat. In diesem für menschliche Verhältnisse denkbar großem Zeitraum von zehntausend Jahren hat sich der Umgang mit Holz dem jeweiligen kulturellen Rahmen angepasst- von einer handwerklich-intuitiven Bearbeitung individueller Wuchsformen zu einer Standardisierung homogener Holzwerkstoffe in der Industrialisierung.“^[21]

DIE HOLZ-MENSCH-KULTUR GESCHICHTE

Holz ist wahrscheinlich nicht nur der älteste sondern auch der wichtigste Begleiter der Menschheit. In der Steinzeit lernte der frühzeitliche Mensch das Feuer zu beherrschen und leitete somit eine Evolution ein. Durch das Garen von Fleisch erfolgte eine Ernährungsumstellung und erlaubte, durch die Einnahme von genügend Nährstoffen, ein überproportionales Gehirnwachstum. Dies war ein Grundstein der Menschheitsentwicklung.^[22]

Nachdem der Mensch auch den Ackerbau beherrschte, wurde er sesshaft und baute sich seine ersten Behausungen aus Holz. Aufgrund der Verfügbarkeit und relativ leichten Bearbeitung wurde es das primäre Baumaterial.

Durch vermehrte Agglomerationen wurden Verteidigungsanlagen notwendig und Holz wurde teilweise von Stein und Lehmkonstruktionen abgelöst. Zudem waren die Faktoren der Dauerhaftigkeit und Brennbarkeit des Materials ein Grund für den teilweisen Austausch des Holzes durch andere Materialien.

Dennoch war Holz allgegenwärtig wie zum Beispiel in den Bereichen des Möbel-, Werkzeug-, Waagen- oder Schiffsbaues und zudem noch wichtigster Energieträger.^[23]

Bereits 1332 v.Chr. entwickelten die Ägypter die ersten Furniertechniken, um Holz als Dekor zu verwenden und Dinge zu veredeln.^[24]

Mit dieser technischen Errungenschaft wurde Holz von der reinen Pragmatik enthoben und die Möglichkeiten zur Anwendung der ästhetischen Vorzüge ausgedehnt.

„Holz wird sexy.“



Abb.16: HOLZ ist...
Imagebroschüren

Anm.:
Anspielung auf diverse
Holzmarketing Slogans

22 Vgl. Fuchs, o.J., auf: <http://www.steinzeitwissen.de/feuer/geschichte-des-feuers> [09.08.2017]

23 Vgl. Bürklin, o.J., auf: http://www.was-war-wann.de/geschichte/geschichte_des_hausbaus.html [06.08.2017]

24 Vgl. o.A, o.J., auf: <http://www.tischler-schreiner.org/furnierholz-2011966> [06.08.2017]

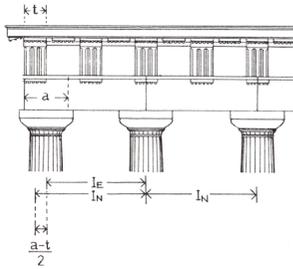
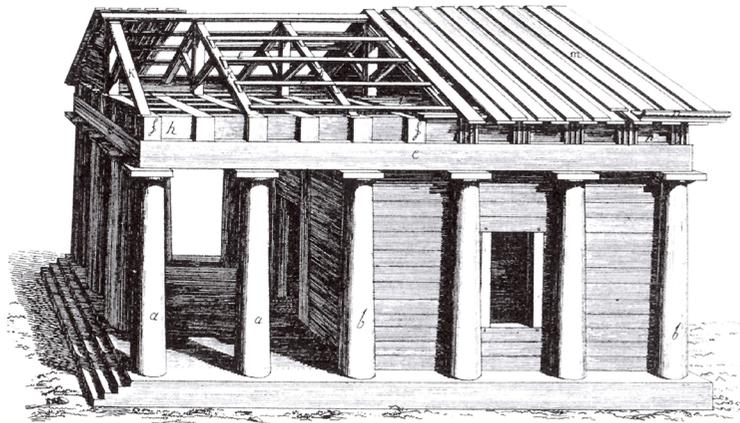


Abb.17: Ableitung
des dorischen
Gebälks aus dem
Zimmermannsbau



In Vitruvs zehn Bücher über Architektur befindet sich auch eine differenzierte Darstellung des Mensch- und Kulturwerdens, was als evolutionärer Prozess beschrieben wird. Seine 10 Bücher gelten als erstes architekturtheoretisches Werk, und sind zugleich Ratgeber für bautechnische Aspekte und wissenschaftliche Erkenntnisse aus dieser Zeit. Zudem behandelt er die Ursprünge der Baukunst, welche sich aus dem reinen „Bauen“ heraus entwickelten. (Siehe Abbildung 18.)

Fälschlicherweise steht in diesem Zusammenhang das oft zitierte und interpretierte Kapitel „Vom Ursprung der Gebäude“ (oftmals als „Vom Ursprung der Baukunst/ Architektur“ übersetzt). In diesem Buchausschnitt findet sich die bautechnische Beschreibung der sogenannten „Urhütte“. Diese Ursprünge sind wichtig, da erst aus dem Bauen heraus, in Verbindung mit der Sesshaftwerdung, sich Kultur entwickeln konnte. In Vitruvs zweitem Buch geht es mehr über die regional differenzierten Ausprägungen des Bauens, ihre Methoden und Erfindungen. Hierbei wird vielmehr versucht das Fach der Architektur, in Verbindung mit den Anfängen der Baupraxis, zu hinterleuchten, als die Begriffe „Bauen, Architektur und Baukunst“ von einander abzugrenzen.^[25]



Abb. 18: Marc-Antoine Laugier's Titelbild des *Essai sur l'Architecture*

Am wohl bekanntesten ist die bildliche Interpretation von Marc-Antoine Laugier's Titelbild des *Essai sur l'Architecture* aus dem Jahr 1755.

Zu sehen ist hierbei ein dreieckiges Holzgebälk aus naturbelassenen Ästen, welches auf vier Rundhölzern lagert, die wiederum auf vier Bäumen ruhen. In dieser Darstellung wird die Idee der Urhütte mit der Entwicklung der Baukunst und der Rolle des Architekten verheiratet.^[26] Dieses Bild könnte auch als Symbol der Nachhaltigkeit interpretiert werden. Die Säulen wachsen direkt aus dem Boden und das abgeschlagene Holz wird direkt als Dachkonstruktion verbaut.

Außerdem besagt es, dass aus einer einfachen und klaren Konstruktionslogik, basierend auf dem verwendeten Material, der resultierende Entwurf eine eigene Ästhetik entwickelt.

Das Abbild ist eine Analogie zum antiken Tempel, welcher durch das Weglassen von Überflüssigem und dem bewussten Einsatz weniger Elemente, das Ziel der „venustas“ erreicht.

Die Wichtigkeit des Holzes für den Menschen zeigt vor allem ein Beispiel mit einem desaströsen Ende, nämlich das der Osterinseln. Die Abholzung sämtlicher Palmen und Bäume, in Verbindung mit Nährstoffarmen Böden und fortschreitender Erosion, führte zu einem Ökokollaps und zum Ende einer Hochkultur.^[27]

Eine ähnliche Geschichte ereignete sich auch in Europa.

Island beherbergt die größte Wüste Europas, welche zudem auch noch menschengemacht ist. Im Laufe der letzten 1000 Jahre wurde die von Wald bedeckte Fläche von circa 40% auf 2% dezimiert. Schuld daran ist die Nutzung des Holzes als Brenn- und Baustoff, sowie die extensive Weidewirtschaft von Schafen. Letzterem sind sogar die größten Verluste zuzuschreiben.^[28]

Diese Umstände veränderten das Landschaftsbild Islands radikal. Mit enormen energetischen Mitteln wird heutzutage versucht die Waldflächen wieder zu vergrößern, bisher mit nur mäßigem Erfolg.^[29]

Auch im restlichen Europa wurde sehr sorglos mit den Wäldern und dem Holz umgegangen. So passierte es, dass es in Europa zu einer Rohstoffkrise kam. Holz galt nicht nur als wichtigstes Baumaterial, sondern auch als primärer Energieträger.

27 Vgl. Janssen, o.J., auf: <http://www.osterinsel.de/38-geschichte.htm> [04.08.2017]

28 Vgl. Glaubrecht, 2008, auf: <https://www.welt.de/wissenschaft/article2368519/Das-Raetsel-der-Osterinsel.html> [05.08.2017]

29 Vgl. derstandard, 2005, auf: <http://www.iceland.de/index.php?id=718> [04.08.2017]

Eine frühzeitliche Erkenntnis hatte Johann Carl von Carlowitz, als er im Jahre 1713 das erste forstwissenschaftliche Werk, mit dem Titel „Sylvicultura Oeconomica“ verfasste und in diesem erstmals eine vernünftige und „nachhaltende“ Nutzung der Wälder forderte. Er gilt als der Erfinder des Nachhaltigkeitsbegriffes.

Zudem forderte er, dass die wirtschaftlichen Interessen der Forstwirtschaft stets im Interesse des Gemeinwohls zu stehen haben und die gesellschaftlichen Funktionen des Waldes auch für zukünftige Generationen sicherzustellen sind.^[30]

Das „Sylvicultura Oeconomica“ beinhaltete zudem noch weitere Themen die zu einer Effizienzrevolution führen sollte. 16 Jahre nach Carlowitz Tod, im Jahr 1732, erschien das Buch in seiner zweiten Auflage und wurde in weiten Teilen Deutschlands zur Pflichtlektüre. Die Forstleute der Goethezeit nahmen die Gedanken der Nachhaltigkeit auf und basierten darauf ihre neue Wissenschaft. Verschiedene Forstakademien haben das Konzept weiter ausgearbeitet und somit auch weiter verbreitet.

Aus weiteren Überlegungen in diesem Bereich entstand im 19 Jhd. der Begriff der Ökologie. Ebenso verbreitete sich in diesem Zeitraum die Idee der Nachhaltigkeit, welche als „sustained yield forestry“ international zu einem Schlüsselbegriff wurde.^[31]



Abb.19:
Werbekampagne, 300
Jahre Nachhaltigkeit,
Deutsche Forstwirtschaft

30 Vgl. Hausegger, o.J., auf: <http://www.proholz.at/co2klimawald/carlowitz/> [09.08.2017]

31 Vgl. Grober, o.J., auf: http://www.zeit.de/1999/48/Der_Erfinder_der_Nachhaltigkeit [09.08.2017]

Abb.20:

- a: diverse Holzwerkstoffe
- b: Holz-Plastik Kompositwerkstoff
- c: Verbundwerkstoff: Wabenpappe mit Deckplatte



Mit dem Geist der Aufklärung und den technischen Hilfsmitteln der Industrialisierung begann am Anfang des 20. Jahrhunderts ein Paradigmenwechsel im Holzbau. Als Otto Hetzer 1906 das Leimholz erfand, revolutionierte er die Holzbautechnik. Das Herstellen von überlangen Holzträgern, Profilen, gebogenen Trägern oder Plattenwerkstoffen wurde ermöglicht. Zudem wurde mit technischem Fortschritt mehr und mehr versucht die vermeintlichen Schwächen des Materials auszugleichen um einen homogenen und allgemeingültigeren Werkstoff zu erlangen.

Dieses Bestreben gibt es nach wie vor. Zusätzlich zu den bereits zu hunderten verschiedenen entwickelten Holzwerkstoffen reihen sich nun auch sogenannte Holz-Verbundwerkstoffe. Durch das Verbinden, auftragen, beimengen von Fremdmaterial werden (schwer recyclingfähige) Hochleistungswerkstoffe mit natürlichem Ursprung entwickelt. In den letzten Jahren tauchen auch vermehrt biogene Kompositmaterialien auf, wie zum Beispiel naturfaserverstärkte Kunststoffe.^[32]



Kompositwerkstoffe und deren Notwendigkeit, der energetische Aufwand in der Produktion oder ihrer Recyclingfähigkeit und des damit einhergehenden Nachhaltigkeitsverlustes wird kontrovers diskutiert.

Sehr treffend dazu ist die Aussage von Mark Aurel Wyss in seinem Text „Die Unschuld des Materials - ein Holzweg“ :

„Der Einsatz der aktuellen technischen Möglichkeiten führt nicht automatisch zu konsistenten Produkten. Demnach muss beim Einsatz von Holz ein besseres Verständnis der konkreten Anwendung des Baustoffs im Fokus sein. Die angemessene und gezielte Verbindung mit den technischen Möglichkeiten der Zeit und die dezidierte Einbettung in das sozioökonomische Umfeld sind maßgebend.“^[33]

Mit dem Aufkommen neuer Materialien wie Stahlbeton oder Kunststoffen sowie der Entwicklung feingliedriger Stahlbaukonstruktionen im Zeitalter der Industrialisierung wurde das Holz als Baumaterial vermehrt an den Rand gedrängt. Die Verwendung von Holzkonstruktionen erreichte seinen Tiefpunkt in den Nachkriegsjahren.

Aufgrund der organischen Beschaffenheit von Holz war es für Ingenieure mühselig damit zu konstruieren, entwerfen und es zu berechnen. Zudem galt der Baustoff als weich, labil und vergänglich. ^[34]

Aufgrund unserer geographischen Lage mit großen Waldbeständen, wurde vor allem in ländlichen Bereichen der Holzbau weiter betrieben. Die sogenannte vernakuläre Architektur, welche sich auf Traditionen im Handwerk beruht, hatte weiterhin Bestand. Holz war günstig und zudem verfügbar, leicht zu bearbeiten und in einem „do-it-yourself“ Prinzip sehr effektiv in der Herstellung von Holzkonstruktionen und Häuser.



Abb.21: Bregenzerwald, Alt und Neu

Die vermehrte Rückbesinnung auf Holzkonstruktionen geschah über äußere Einflüsse in den 1970er Jahren. Durch die Ölkrise und dem erkennen der Grenzen des Wachstums wurden die Fragen nach energiebewusstem Bauen und dem schonenden Umgang mit Ressourcen aufgeworfen. ^[35]

34 Vgl. Bieler, 2014, 61-66.

35 Ebda.

Zudem hat in den letzten Jahren eine verstärkte Holzlobby diesen Werkstoff wieder in das mediale Licht gerückt, mit neuen Innovationen und gelungenen Projekten. Oftmals scheint es sogar so, dass Nachhaltigkeit das neue Dogma des Designs wird.

Ein „green lifestyle“ ist derzeit voll im Trend und dieser Umstand macht es Holz damit leicht, auch in andere Bereiche des Lebens einzutauchen. Holz bekommt damit einen eigenen Image-Charakter als ökologisches, rustikales und zugleich modernes Material, eventuell könnte es auch als „vintage“ bezeichnet werden. Viele Alltags und Funktionsartikel, wie auch Zukunftstechnologien werden mit einer rustikalen Optik versehen und lassen so einen gewissen Gegensatz auf den Betrachter wirken.^[36] Holz ist sowohl traditionell als auch modern und wird auch in Zukunft noch eine wichtige Rolle für den Menschen spielen.



Abb.22: verschiedene Produkte ungewöhnlicherweise aus Holz

HOLZ - HOLZWERKSTOFFE

Vom Konstruktionsholz zum konstruierten Holz

Weltweit gibt es in etwa 60.000 Pflanzenarten die Holz bilden. 6000 verschiedene Baumholzarten werden aktiv genutzt. Bäume gehören zu den ältesten und größten pflanzlichen Lebewesen der Welt, so schaffen es amerikanische Mammutbäume ein Alter von mehr als 4000 Jahren zu erreichen. Im europäischen Umfeld benötigen Bäume im Schnitt 100 - 150 Jahre bis sie schlagreif sind.

Bäume bilden verholzte Zellen, welche je nach Baumart verschiedene Eigenschaften ausbilden und damit das Holz charakterisieren. Zudem sind die Holzeigenschaften auch zeitlich abhängig, dies ist wachstumsbedingt. In unseren Breitengraden bilden Bäume Jahresringe, die den Wuchs des Kambiums in einer Wachstumsperiode, in Abhängigkeit der Witterungseinflüsse und Jahreszeiten, darstellen.^[37]

Die äußeren Jahresringe werden Splintholz genannt und dienen der Saft- und Wasserführung des Baumes. Nach in etwa 20 Jahren können verschiedene Baumarten auch das sogenannte Kernholz bilden, welches totes Holzgewebe darstellt. Die Saft und Wasserführung wird eingestellt, die Zellen werden mit Ablagerungsstoffen gefüllt und dadurch schwerer, fester und auch dauerhafter. Das Kernholz wird aufgrund von Gerbstoffen verfärbt. Baumarten, bei denen eine Verkernung der inneren Jahresringe ohne dem Stattfinden einer Verfärbung geschieht, werden Reifholzbäume genannt. Bäume, die weder Kern- noch Reifholz ausbilden, werden Splintholzbäume genannt.^[38]

Zudem gibt es auch Unterschiede im Aufbau von Laub und Nadelhölzern. Wobei Laubhölzer in ihrer inneren Organisation die weiterentwickelten Pflanzen sind, mit höherer Komplexität der Zellbildung.^[39]

37 Vgl. Büren, 1985, S173f.

38 Vgl. pw-Internet Solutions GmbH (Hg.), o.J., auf: <http://www.baumarkt.de/nxs/535///baumarkt/schablone1/HolzBiologie-Aufbau-eines-Baumstammes> [29.08.2017]

39 Vgl. Büren, 1985, S174.

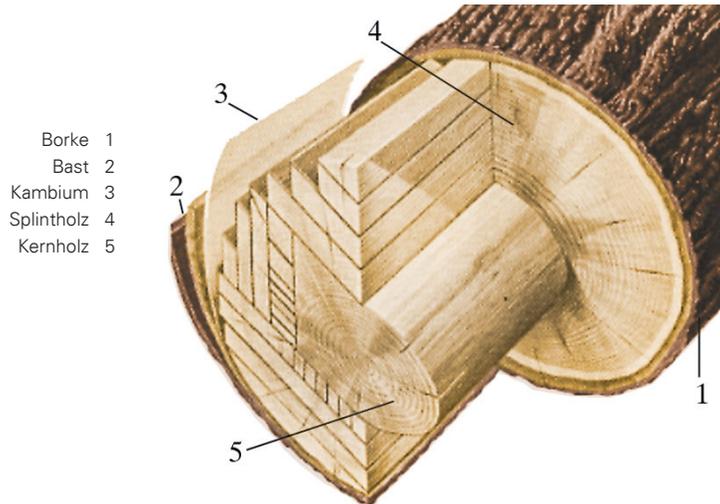


Abb.23: Aufbau eines Holzstamms

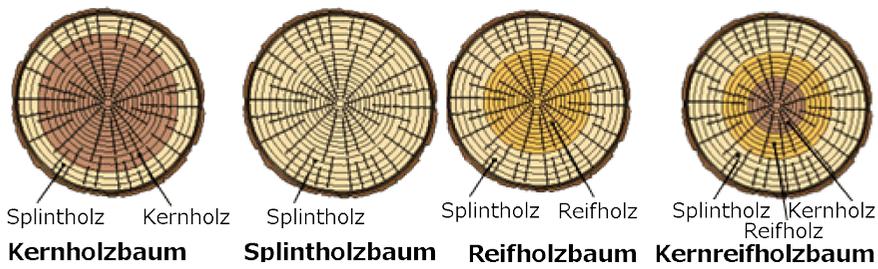


Abb.24: Baumarten nach Bezeichnung ihrer Holzausbildungen

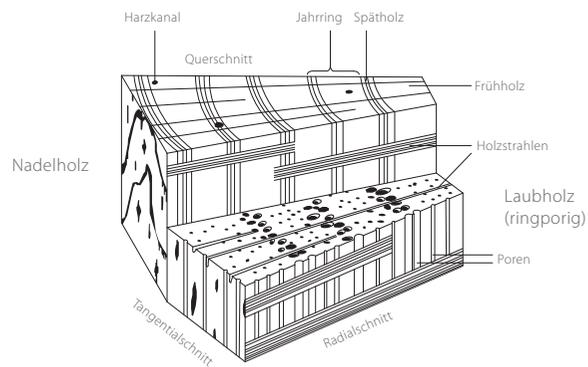
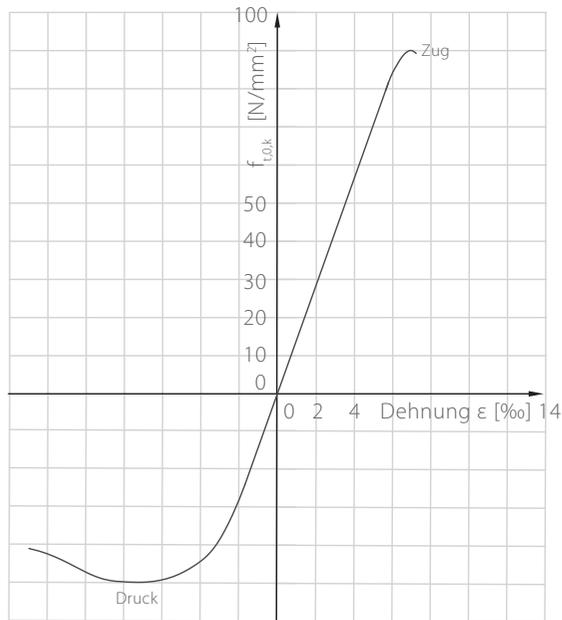


Abb.25: Aufbau von Laub und Nadelholz

Abb.26: Spannungs-Dehnungs-Diagramm in Faserrichtung



Die verschiedenen Eigenschaften des Holzes haben große Abweichungen unter den Holzarten, welche sich aus der Tatsache ergeben, dass es ein natürlich gewachsener, inhomogener und mit ausgeprägter Anisotropie behafteter Werkstoff ist.

Die meisten Eigenschaften sind stark richtungsabhängig und werden in längs und quer zur Faser unterschieden. Zudem reagiert es auf Zug und Druckbelastung unterschiedlich. Das Versagen auf Zugbeanspruchung geschieht vorwiegend spröde, während Druck und Biegebeanspruchung vorzeitig zu einer plastischen Verformung führen und ein mögliches Versagen ankündigen.^[40]

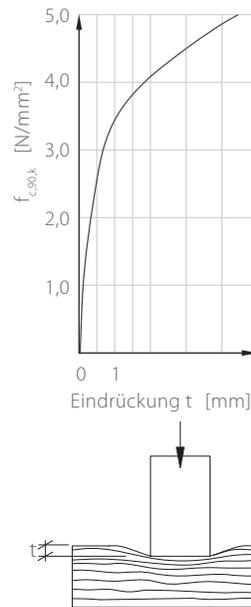
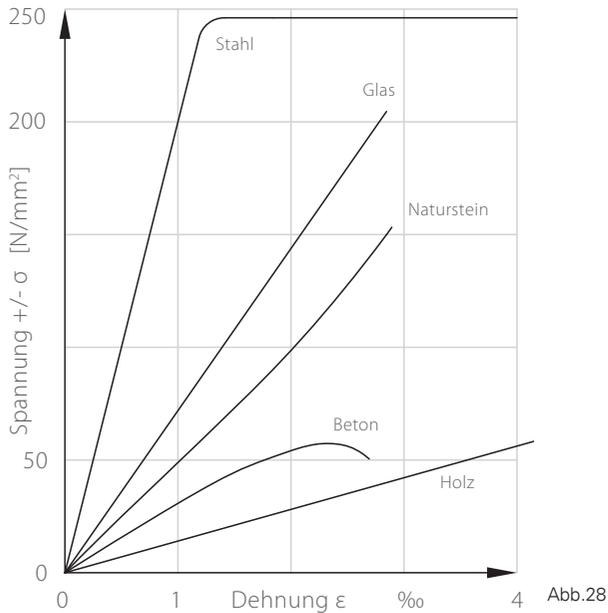


Abb.27: Spannungs-Dehnungs-Diagramm verschiedener Werkstoffe

Holz ist im Verhältnis von Eigengewicht zu Traglast extrem leistungsfähig und kann sich dahingehend mit Stahl oder Aluminium messen. Dieser Leistungsvergleich wird mit der sogenannten Reißlänge gemacht, dies bedeutet ein Versagen durch Eigengewichtsbelastung auf Zug.^[41]

Diese Vergleiche werden mit den Festigkeitseigenschaften längs zur Faser angestellt, da Holz in dieser Richtung wachstumsbedingt höhere Widerstände aufweist.

Quer zur Faser hingegen kann Holz kaum Zugkräfte aufnehmen und Druckbelastungen führen zu großen Verformungen - Eindrücken. ^[42]

41 Vgl. Büren, 1985, S173-175.

42 Vgl. Block, Gengagel, Peters, 2013, S164.

Abb.29: Käfer als
Holzschädling



Naheliegender ist, dass Holz als Naturbaustoff ebenfalls seine maßgebenden Feinde in der Natur wiederfindet.^[43]

Unterteilt werden diese Schadeinflüsse in biotisch und abiotisch, was soviel bedeutet, ob Lebewesen, wie Insekten, Käfer oder Pilze beteiligt sind. Einige solcher biotischen Schadeinflüsse lassen sich mittels chemischen Holzschutz oder durch das Einsetzen von dauerhafteren Holzsorten bekämpfen.^[44] Während Holz eine hohe Resistenz gegen chemische oder thermische Beanspruchungen aufweist, ist das Wasser und die Wechselfeuchte der größte Schadverursacher im Holzbau. Gegen Feuchtigkeitsangriffe hilft meist nur der konstruktive Holzschutz und sollte in der Planung besonders berücksichtigt werden.^[45] Feuchtigkeit kann in Gebäuden in unterschiedlicher Art und Weise auftreten und für das Holz zum Problem werden. Holzbauteile können problemlos permanent unter Wasser eingesetzt werden ohne Schäden zu erleiden, jedoch eine Wechselfeuchte würde schnell zu Mängeln führen. Zu vermeiden sind der direkte Kontakt mit feuchten Bauteilen, Tau- oder Tropfwasserbildung, das direkte Aussetzen von Witterungseinflüssen oder starke Schwankungen der Luftfeuchtigkeit

43 Vgl. Büren, 1985, S176.
44 Vgl. Halasz, 1974, S55-61.
45 Ebda.

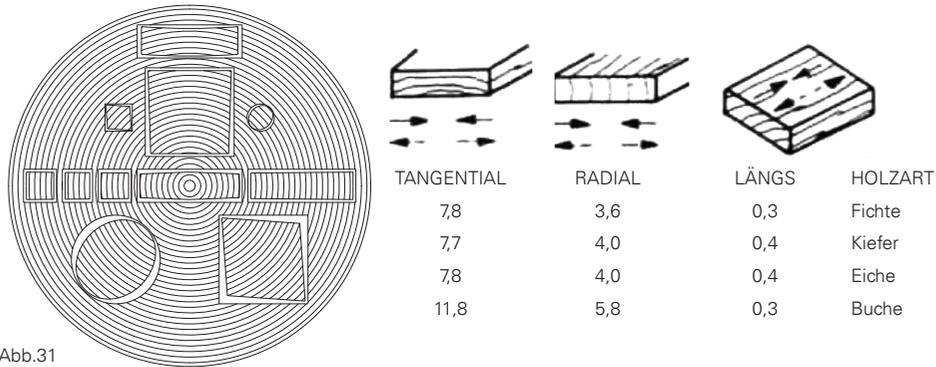


Abb.31

Abb.30: Unterschiedliche Verformungen von Vollholzquerschnitten bei Feuchteverändern

Abb.31: maximale Schwindmaße in Prozent für verschiedene Holzarten

Obwohl es sich bei Holz um totes Gewebe handelt, „arbeitet“ das Holz im hygroskopischen Bereich (unterhalb der Fasersättigung). Es wird dabei Feuchtigkeit aus der Luft aufgenommen oder abgegeben und verursacht Quell- und Schwindverformungen. Diese Maßänderungen sind, wie viele andere Eigenschaften, richtungsabhängig. In Faserrichtung sind die Ausdehnungsänderungen verschwindend gering, im Vergleich zu den 10-20-fach höheren in tangentialer oder radialer Richtung.

Holz reagiert auf die Umgebung und versucht eine Ausgleichsfeuchte einzustellen. Die Festigkeitseigenschaften sind ebenfalls vom Feuchtegehalt des Holzes betroffen, welche sich als prozentuelles Massenverhältnis relativ zum absolut trockenen Holz ausdrückt. Dabei sollte die Holzfeuchte bei unter 18% gehalten werden, um das Ausbilden und Angreifen von Pilzen zu verhindern.^[46]

Die Einsatzgebiete für den Holzbau werden in drei Nutzungsklassen gegliedert: NKL1: innen und trocken, NKL2: feucht & NKL3: außen. Sowohl die Holzfeuchte wie auch die Lasteinwirkungsdauer werden für die Bemessung von Holzbauteilen mittels eines Modifikationsbeiwertes (k_{mod}) berücksichtigt.^[47]

46 Vgl. Block, Gengagel, Peters, 2013, S164f.
47 Ebda.

Abb.32: Vollholzstütze mit Kopfband nach 40 minütiger Brandbeanspruchung

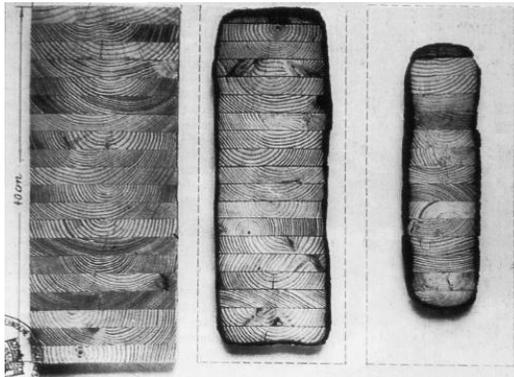


Abb.33: Brandversuch BSH Träger



Abb. 33

Holz ist, wie allgemein bekannt, brennbar und lässt sich auch entflammen. Dieser Umstand disqualifiziert den Baustoff aber nicht für den Einsatz als Deckschicht oder für tragende Bauteile.

In der ÖNorm 3806 und der OIB Richtlinie 2 werden die Anforderungen an das Brandverhalten von Bauprodukten (Baustoffen) und der Brandschutz definiert und zeigt auf, dass hölzerne Tragwerke und Verkleidungen bis zur Gebäudeklasse 4 annähernd problemlos einsetzbar sind.

Die erforderliche Tragfähigkeit unter zeitlich definierter Branddauer (R30 bis R90) kann durch eine entsprechende Überdimensionierung erfüllt werden. Holz hat den Vorteil eines vorhersehbaren Brandverhaltens. Das Feuer verkohlt die äußerste Schicht, welche dann eine dämmende Wirkung aufweist und den weiteren Abbrand verzögert und die Tragfähigkeit erhalten bleibt.^[48] Im Durchschnitt liegt die Abbrandgeschwindigkeit von Nadelholz bei 0,7mm/min. Dabei sind noch andere Faktoren wie Holzart, Rohdichte, oder das Oberflächen-Volumen-Verhältnis entscheidend. Dieses absehbare Brandverhalten in Kombination mit dem nur langsamen Verlust der Tragfähigkeit geben dem Holztragwerk Vorteile gegenüber Stahlkonstruktionen.^[49]

48 Vgl. Halasz, 1974, S90-91.

49 Vgl. pw-Internet Solutions GmbH (Hg.), o.J. auf: <http://www.baumarkt.de/lexikon/Abbrandgeschwindigkeit.htm> [30.08.2017].

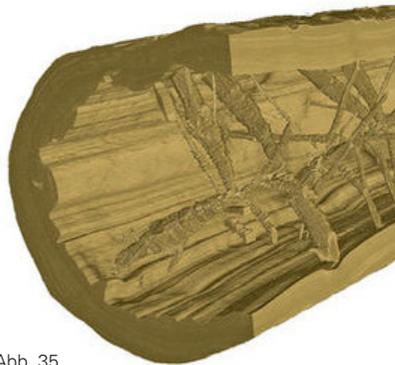


Abb. 35

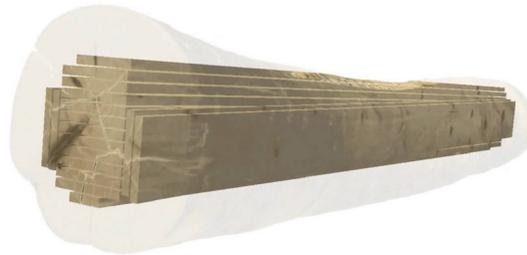


Abb.34: Computertomographie für umfassendes 3D Modell

Abb.35: Einschnittoptimierung für Rundholz nach 3D Farb- und Röntgenscan

Weitere positive Eigenschaften des Holzes sind eine leichte und einfache Bearbeitung und Adaptierung, gute wärmedämmende und schalldämpfende Eigenschaften. Zudem trägt Holz zu einem guten Raumklima bei und durch die warme Oberfläche auch zum Komfort.

Die Einsatzmöglichkeiten und Konstruktionslösungen von und mit Vollholz sind jedoch durch die natürlichen Wachstumsgrenzen der Bäume beschränkt. Beim Auftrennen von Rundholz zu Kanthölzern, Bohlen, Brettern und Latten ist eine geschickte Wahl der Querschnitte für eine effiziente Ausnutzung wichtig. Die Holzlängen sind so kurz wie möglich zu halten, um das Abfallen von Seitenwaren zu minimieren.

Die Ausbeute des Rundholzes für Konstruktionsholz liegt bei maximal 68%.^[50] Moderne Messtechniken helfen bei der Optimierung des Holzertrags und ebenfalls bei der Detektierung von Holzfehlern, die bisher oft als böse Überraschung verborgen im Rundholz lagen.^[51]

Der abfallende Rest fällt als Rinde, Kappholz, Seitenware oder Säge- oder Hobelspäne aus. Größere Sägewerke schaffen mittels technischen Anlagen 100% zu verwerten, ob als weiterverarbeiteter Holzwerkstoff oder als Energieträger für Bioenergiewerke.^[52]

Anm.:
Der Konstruktionsholzertrag liegt bei unter 68% des Rundholzvolumens

50 Vgl. Halasz, 1974, S17f.

51 Vgl. Menges, Schwinn, Krieg, 2017, 9f.

52 Vgl. o.A., o.J., auf: <http://www.theurl-holz.at/produkte/restholz/> [31.08.2017].

Abb.37: Querschnitts-
bezogene Verminderung
des Einflusses einer
Fehlstelle

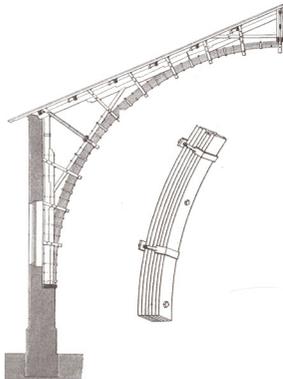


Abb.36: Émys
Bogenkonstruktion als
Bohlenstapel, 1825.

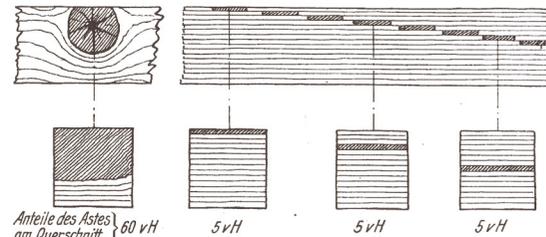


Abb. 38

Durch das 1906 eingereichte Patent von Otto Hetzer für das Verleimen von Holz wurde eine neue Ära des Holzbaus eingeleitet.

Davor waren Holzkonstruktionen auf die verfügbaren Dimensionen abzustimmen. Der Einfallsreichtum von Personen wie Philibert de l'Orme, Carl Friedrich von Wiebeking, Amand Rose Emy oder in späterer Folge auch Friedrich Zollinger haben zu Innovationen im Konstruieren mit Vollholz geführt.

Ziel war es dabei immer, weitgespannte Holztragwerke möglichst wirtschaftlich und effizient mithilfe neuester Entwicklungen zu erzeugen.

Mit dem Aufkommen der Leimtechnologie verlagerte sich das Interesse der technischen Neuerungen von den Konstruktionen hin zum konstruieren neuer auf Holz basierender Materialien. Die geistige Haltung zu dieser Zeit war es, durch industrielle Produktionstechniken eine stoffliche Umgestaltung stattfinden zu lassen, die das Holz von seinen „natürlichen Schwächen“ befreit- wie der begrenzten Größe, Anisotropie oder der gewachsenen Inhomogenität.^[53]

Holzwerkstoffe

Vollholzwerkstoffe	Furnierwerkstoffe	Spanwerkstoffe	Faserwerkstoffe	Verbundwerkstoffe	Kompositwerkstoffe
Massivholzplatten	Furnier-Schichtholz	OSB	MDF	Tischlerplatte	BioKomposite
Brettschichtholz	Sperrholz	Spanplatte	HDF	Stäbchensperrholz	naturfaserverstärkte Kunststoffe
Brettstapelplatten	Furnierstreifenholz (Paralam)	Spanstreifenholz	poröse Faserplatte	kunststoffbeschichtetes Sperrholz	



Brettsperrholz



Sperrholz



OSB



MDF



Tischlerplatte



Wood Polymer Composit

Abb.38: Überblick der Holzwerkstoffe

Das Zerteilen des Holzes in eine Vielzahl kleiner Schichten und wiederzusammenfügen dient dem Minimieren des Einflusses von potentiellen Fehlstellen und Ungleichmäßigkeiten. Zudem befreiten sich diese Werkstoffe der geometrischen Zwänge und eine wirtschaftliche Herstellung von Platten und Profilen wurde ermöglicht.^[54]

Jedoch werden durch den zunehmenden Zerkleinerungsgrad die biologisch optimierten Strukturen des Holzes zerstört und nur mithilfe synthetischer Bindemittel und energetisch aufwändigen Verfahren zu neuen homogeneren Werkstoffen gefügt. Diese haben in der Regel schlechtere Festigkeitseigenschaften als das unzerstörte Holz.

Neue Entwicklungen versuchen Hochleistungswerkstoffe aus und mit Holz zu erzeugen, in Form von Verbundwerkstoffen (z.B. Sandwichplatten mit Papierwabenkern) oder biogenen Kompositwerkstoffen (z.B. naturfaserverstärkte Kunststoffe).^[55] Diese sind aufgrund ihres energetischen Aufwands hinsichtlich ihres Nutzens zu hinterfragen, hinzu kommt auch die Frage der Recyclierbarkeit.

54
55

Vgl. Wagenfuhr, 2014, S52f.
Ebda.

MATERIALGERECHTES KONSTRUIEREN

Abb.39: Holzmassivbauweise einer Kinderkrippe



Abb.40: Shigeru Ban, Haesley Nine Bridges Golf Club House, 2010, Korea



Stein wird geschichtet und vermauert, Beton wird gegossen, Stahl geschweißt oder verschraubt. Und Holz? ^[56]

HOLZ WIRD KONSTRUIERT.

Es ist damit nicht die Auswahl der Konstruktionsweise und die damit einhergehenden Verbindungsmittel gemeint, sondern das Material selbst. Nachdem Holz nicht mehr nur ein in seinen Dimensionen stark beschränkter linearer Baustoff ist, sondern als Platten- oder profilierter und geformter Werkstoff verfügbar ist, sind ihm heutzutage wenig Grenzen gesetzt.

Es ist nicht möglich eine allgemeingültige klare Aussage über die geeignetste Konstruktion für Holz zu machen.

In den letzten Jahren lassen sich zwei Richtungen erkennen. Der neuere Holz-Massivbau, der mit seiner Plattentektonik kartenhausartig versucht formal sowie funktional motivierte Raumstrukturen zu schaffen. Als Pendant dazu steht die Entwicklung komplizierter Tragwerke aus doppelt gekrümmten individuellen Bauteilen, welche oftmals schon annähernd barocke Raumerlebnisse erzeugen.^[57]

56 Bieler, 2014, S61.

57 Vgl. Kraft, 2010, S4.



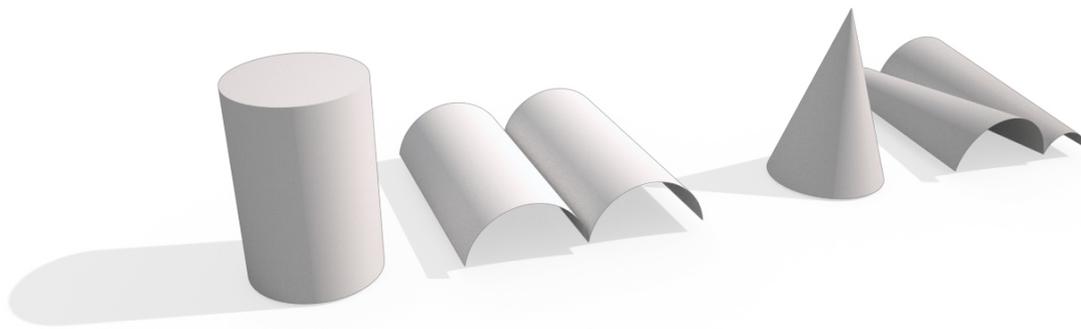
Abb.41: Frei Otto, Multihalle Mannheim 1975 als Paradebeispiel für eine gelungene Holzkonstruktion

Durch die leichte Verarbeitbarkeit und Elastizität ist die Entwicklung von dreidimensionalen Formen aus Holz immer mehr ins Rampenlicht gerückt. Oftmals fehlt bei diesen eher experimentellen Bauten die Synthese von Form, Konstruktion und Material.

Durch das Auftrennen der Kompetenzen im Lauf des 19ten und 20ten Jahrhunderts wurden die Statik und der Entwurf unabhängig voneinander gesehen. Durch digitale Entwurfsmethoden sind wir verleitet geometrisch komplizierte Formen zu entwerfen, befreit von jeglicher Materialität, Raum pur sozusagen.^[58]

Im materialspezifischen Entwerfen soll der Versuch gemacht werden, diese verloren gegangene Beziehung wiederherzustellen. Mit dem Anspruch der Materialgerechtigkeit muss auf die spezifischen Eigenschaften des Holzes eingegangen werden, um eine gelungene Synthese von Form, Konstruktion und Material herzustellen.^[59]

58 Vgl. Kraft, 2010, S4.
59 Vgl. Ebda. S4.



Einachsig gekrümmte
Flächen, Zylinder &
Kegel

Die Suche nach der geeigneten Schalenform für ein flexibles System erfolgte mit dem Fokus auf die Herstellbarkeit und einer inhärenten Konstruktionslogik.

Einachsig gekrümmte Schalen wurden von vornherein ausgeschlossen da diese bereits in großem Ausmaß untersucht und ausgeführt wurden. Außerdem unterscheiden sich doppelt gekrümmte Schalen nicht nur in ihrer geometrischen Form von den Zylinder oder Kegelschalen, sondern, noch viel wichtiger, in ihrem wesentlich höheren Tragverhalten.

FREIE FORMGEBUNG

Doppelt gekrümmte Flächen lassen sich auf verschiedenste Arten konstruieren und lassen so eine unendlich große Formenvielfalt zu. Vorerst wurden die Konstruktionsweisen solcher Flächen untersucht.

Frei geformte Flächen haben die größte Bandbreite, da diese unabhängig von Konstruktionsprinzipien oder Regeln herzustellen sind, z.B. aus einem Punktraster, aus Kurvennetzwerken, aus Randflächen oder aus Hängemodellversuchen. Obwohl die statische Optimierung durch Hängemodelle als sinnvoll erscheint, bleibt die Frage nach der Herstellung und Konstruktion ungelöst.

TRANSLATION UND ROTATION DER FLÄCHEN

Translationsflächen oder in spezielleren Fällen Rotationsflächen werden durch die Verschiebung einer Profilkurve entlang einer Leitkurve erzeugt. Bei Rotationsflächen ist die Leitkurve ein Kreis beziehungsweise ein Kreisabschnitt. Sowohl die Leitkurve als auch die Profilkurve finden sich beliebig oft in der Fläche wieder.

Eine, in zwei Richtungen aufgelöste Gitterrost / Gitterschalenkonstruktion, könnte sich für diese Art von Geometrie als Sinnvoll erweisen.

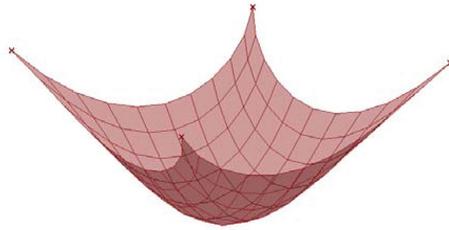
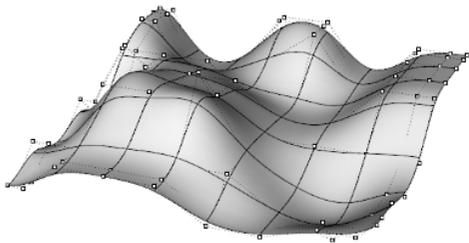
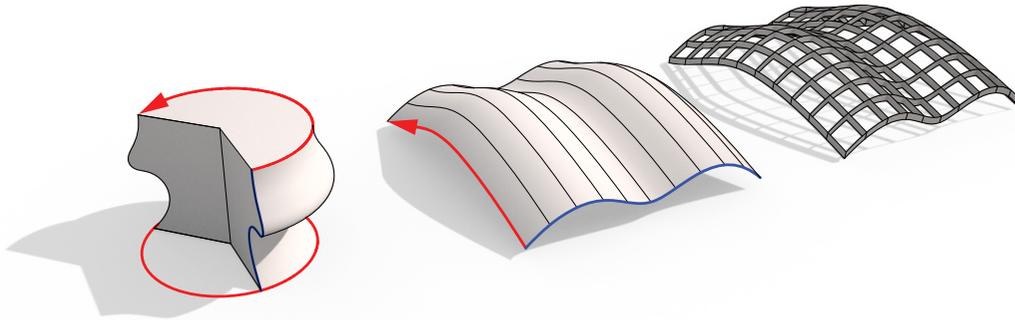


Abb.43: Freiform aus Kontrollpunkten und parametrisches Hängemodell



Rotations- und Translationsfläche, Translationsfläche als Gitterstruktur

REGELFLÄCHEN

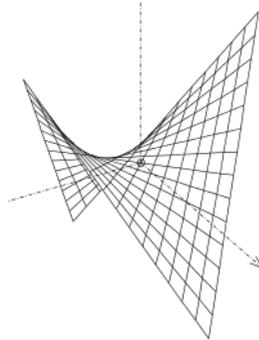
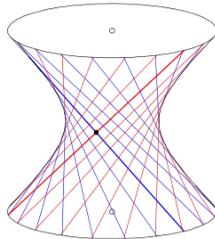
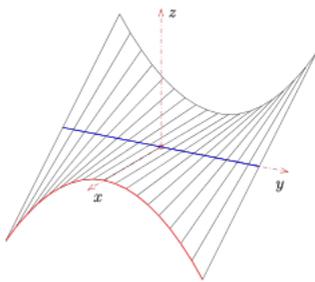
Die in der Vergangenheit am Häufigsten verwendeten Geometrien waren diverse Regelflächen. Das Konstruktionsmerkmal dieser Flächen besagt, dass diese sich durch eine Schar von Geraden herstellen lassen. Diese Geraden werden entlang zweier Randkurven bewegt.

Obwohl es eine Vielzahl dieser Flächen gibt, eignen sich im Grunde nur drei für den Einsatz im Bauwesen, nämlich das Konoid, das einschalige Hyperboloid und das hyperbolische Paraboloid (kurz HP). Das Konoid wurde aufgrund des mangelnden Tragverhaltens ausgeschlossen.

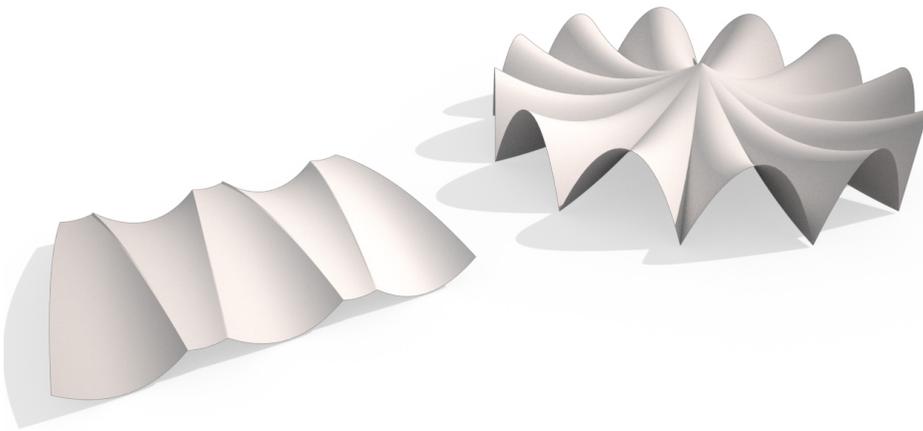
FORMENVIELFALT DURCH TRANSFORMATION VON REGELFLÄCHEN

Durch den Umstand das diese Arten von Flächen ihren eigenen Regeln unterworfen sind, stoßen diese sehr schnell an die Grenzen ihrer Formenvielfalt.

Wie in der Vergangenheit schon mehrmals angewandt kann, durch die geschickte Auswahl von Ausschnitten oder dem Aneinanderreihen, der Formenkanon erweitert werden.

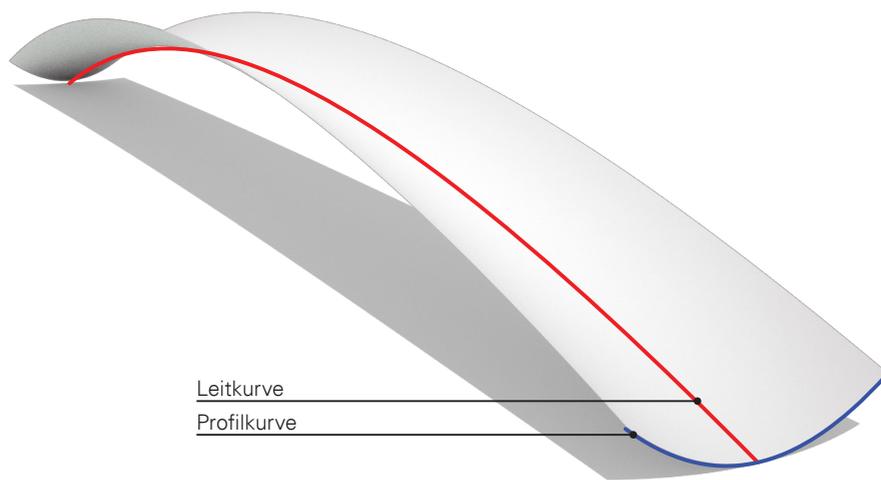


Regelflächen von links
nach rechts:
Konoid, Hyperboloid
& parabolisches
Paraboloid

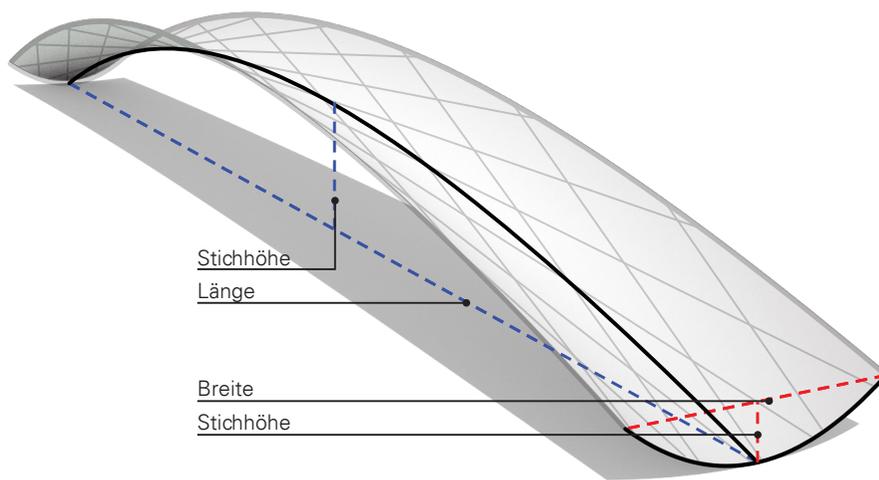


HP Flächen Ausschnitte
aneinandergereiht

HP Fläche als
Translationsfläche mit
Geraden



Das Hyperboloid sowie die HP Fläche sind sowohl Regelflächen als auch Translationsflächen. Für das Hyperboloid stellt die Leitkurve ein Kreis beziehungsweise ein Kreisabschnitt und für die Profilkurve eine Hyperbel dar, während für die HP Fläche beide Kurven Parabeln sind.



HP Fläche als
Translationsfläche mit
Geraden

Um solche Flächen zu Konstruieren sind nur vier Parameter notwendig. Länge, Breite und die jeweiligen Stichhöhen. Diese gewählten Abmessungen der Kurven ergeben automatisch den Winkel jener Geraden, die sich auf der Fläche befinden.

NACHHALTIGKEIT

Im globalen Überblick benötigt die Baubranche infolge von Herstellung, Errichtung, Nutzung und Bewirtschaftung in etwa 30% aller Stoff- und Energieströme.^[60]

Nicht nur ressourcenschonendes und energieeffizientes Bauen tragen hierbei zu einer Entlastung des Ökosystems bei, sondern eine ganzheitliche Sichtweise ist notwendig. Daher gewinnt die Vergleichbarkeit der Nachhaltigkeit im Bauen immer mehr an Bedeutung.

Eine mittlerweile veraltete Sichtweise war das sogenannte „Cradle-to grave“-Prinzip, welches einen linearen Ablauf von Stoffströmen von der Produktion bis hin zum Abbau, zum Abriss oder zur Entsorgung beinhaltete. Dieses Prinzip wurde von der Sichtweise eines biologischen Kreislaufes abgelöst. „Cradel-to-Cradel“ ist ein Verweis auf die überholten Anschauungen und entfernt sich damit von der geistigen Haltung der sogenannten Abfallwirtschaft.

Biologische und technische Kreisläufe werden miteinander verknüpft und sollen zu einem geschlossenen Prozess zusammengeführt werden. Im Mittelpunkt steht hierbei die Verwendung von Ressourcen nach der Nutzung und die Rückführung in den Kreislauf.^[61]

Wie im Kapitel „Holz-Mensch-Kultur Geschichte“ beschrieben, entwickelte sich der Nachhaltigkeitsbegriff langsam aus dem ersten, von Carl von Carlowitz geschriebenen, forstwissenschaftlichen Werk „Sylvicultura Oeconomica“.

Den internationalen Durchbruch erlangte der Begriff durch den 1987 verfassten Brundtland Bericht mit dem Titel „Our common Future“. In diesem wird eine Entwicklung dann als nachhaltig bezeichnet wenn die Bedürfnisse dieser Generation gestillt werden, ohne die der nachfolgenden zu gefährden.^[62]

60 Vgl. Dolezal, 2010, S1.

61 Vgl. Bittner, Was ist eigentlich Cradle to cradle?
auf: <https://enorm-magazin.de/was-ist-eigentlich-cradle-cradle> [23.08.2017].

62 Vgl. Dolezal, 2010, S2-12.

In den 1990er Jahren haben sich die ersten Zertifizierungssysteme und Gütesiegel entwickelt, um eine Vergleichbarkeit zu ermöglichen. Der Begriff der Nachhaltigkeit hat sich immer wieder erweitert und adaptiert und so sprechen wir heute von einem Drei-Säulen Modell, das ökologische, ökonomische und soziokulturelle Aspekte beinhaltet. Kern dieses Modells ist eine ganzheitliche Betrachtung der Lebenszyklusanalyse von Bauwerken, Bauteilen und/oder Baustoffen.

Der ökologische Aspekt zielt auf einen bedachtsamen Umgang von Ressourcen ab, um diesen auf ein ökologisch vertretbares Maß zu begrenzen. Die Material- und Konstruktionswahl sind entscheidende Parameter.

Direkt daran anknüpfend sind die ökonomischen Aspekte, welche nicht nur die Betriebskosten (und damit den einhergehenden Energieverbrauch) in der Nutzungsphase betrachten, sondern auch die Reparaturfähigkeit und den Rückbau. Adaptive Systeme, die den Um-, Aus- oder Rückbau mithilfe von leicht zu ersetzenden Elementen bewerkstelligen können, sind nicht nur ökonomisch sondern auch ökologisch sinnvoll.

Das dritte Standbein des derzeitigen Nachhaltigkeitsbegriffs stellt die soziokulturelle Dimension dar, welche nicht nur gesundheitliche Aspekte wie Sicherheit und Behaglichkeit beinhaltet, sondern auch das Schützen von immateriellen Werten und Kulturgütern.^[63]

*„Menschen in Industrienationen verbringen
95% ihres Lebens in Gebäuden.“^[64]*

63 Vgl. Dolezal, 2010, S2-12.

64 o.A., Siemens (Hg.), 2009, S11.

Komfort und Behaglichkeit haben nicht nur gesundheitliche Auswirkungen auf den Nutzer, sondern auch auf die Akzeptanz eines Gebäudes und deren Nutzungssicherheit. Unbehagliche Arbeitsräume können die Produktivität senken oder gar zu Leerstand führen und die baulichen Maßnahmen obsolet machen. Dieser umfassende Nachhaltigkeitsbegriff versucht sämtliche Aspekte eines Gebäudes quantitativ belegbar und damit auch vergleichbar zu machen.

Weltweit gibt es eine Vielzahl solcher „green building labels“; siehe Abb. 22. ^[65]

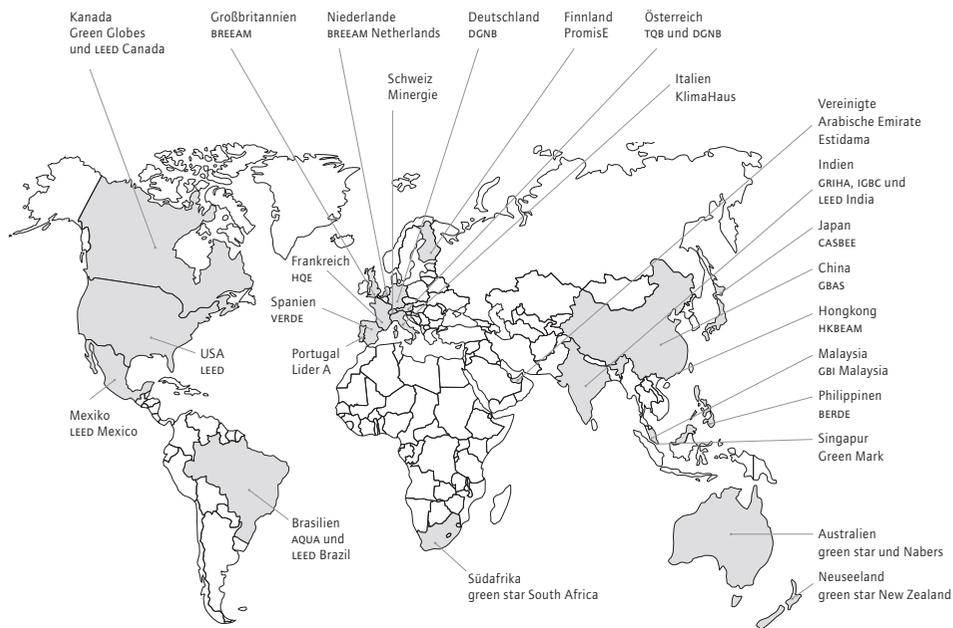


Abb.44: Weltkarte mit einer Auswahl an internationalen Zertifizierungssystemen

In Österreich sind folgende Zertifizierungssysteme gängig. Einerseits das deutsche Gütesiegel für Nachhaltiges Bauen oder das in Österreich aus dem Ökopass und klima:aktiv entwickelten TQB-System (Total Quality Building) von der Gesellschaft für nachhaltiges Bauen.

Das TQB-System wird in 5 Teilbereiche gegliedert mit jeweils 20% Gewichtung.

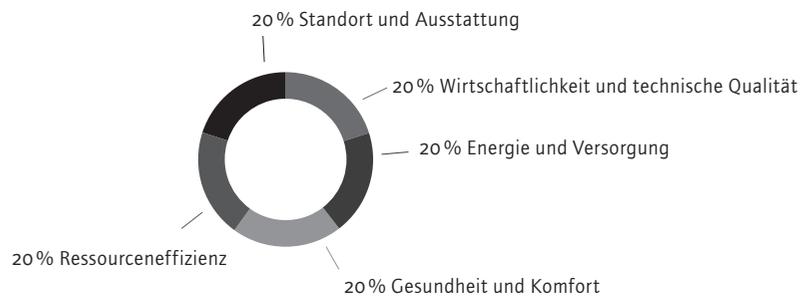


Abb.45: TQB Kategorien

Die ersten vier Kategorien sind so gut wie unabhängig von der Konstruktion und den verwendeten Baustoffen. Lediglich im Vergleich der Ressourceneffizienz werden die Ökobilanzen der verwendeten Materialien einbezogen. In diesem Bereich hat Holz einen Vorteil gegenüber anderen Baustoffen, jedoch hat dieser Aspekt nur eine Gewichtung von 50 Punkten, was in der gesamten Gebäudebewertung nur mit bis zu 5% einfließt.^[66]

Ausgangspunkt für die Berechnung der Ressourceneffizienz ist der Ökoindex 3, mit dessen Hilfe die Ökokennzahlen berechnet werden. Folgende ökologische Kennzahlen werden dabei ermittelt:

GWP - Treibhauspotential

Das Treibhauspotential GWP (Global Warming Potential) beschreibt den Beitrag eines Spurengases zur globalen Erwärmung relativ zu Kohlendioxid.

AP- Versauerungspotential

Versauerung wird hauptsächlich durch die Wechselwirkung von Stickoxid- (NOx) und Schwefeldioxidgasen (SO2) mit anderen Bestandteilen der Luft verursacht. Zu den eindeutig zugeordneten Folgen zählt die Versauerung von Seen und Gewässern, welche zu einer Dezimierung der Fischbestände in Zahl und Vielfalt führt. [...] Das Versauerungspotential wird [...] in kg-S=2-Äquivalenten dargestellt.

PEI- Primärenergiegehalt

Als Primärenergiegehalt (abgekürzt PEI) wird der zur Herstellung eines Produktes oder einer Dienstleistung erforderliche Gesamtbedarf an energetischen Ressourcen bezeichnet. Der Primärenergiegehalt wird aus dem unteren Heizwert aller eingesetzten energiehaltigen Ressourcen berechnet und in MJ angegeben. [...]

In der IBO-Richtwerte-Tabelle wird der Primärenergiegehalt getrennt in PEI aus nicht erneuerbaren Ressourcen (PEI n.e.) und aus PEI aus erneuerbaren Ressourcen (PEI ern) angeführt. ^[67]

Entwickelt wurde der Ökoindex3 vom österreichischen Institut für Baubiologie und Bauökologie, genauso wie der Entsorgungsindikator.

Der Entsorgungsindikator bewertet den Entsorgungsweg einzelner Bauteilkomponenten und deren Verwertungspotential. Da es sich um ein allgemeingültiges Werkzeug zur Vergleichbarkeit handelt, werden die Materialien verallgemeinert beurteilt. Die zu diesem Zeitpunkt wirtschaftlichen so wie technischen Möglichkeiten zur Entsorgung und Verwertung von Materialien werden je nach Masse gewichtet um die Auswirkung auf die Umwelt zu bilanzieren. ^[68]

Sowohl bei der Berechnung der Ressourceneffizienz als auch bei dem Entsorgungsindikator hat Holz einen natürlichen Ökobonus. Während des Wachstums nimmt ein Baum das CO₂ aus der Luft auf. Mithilfe der Photosynthese wird der Sauerstoff wieder in die Luft abgegeben und der Kohlenstoff für die gesamte Lebensspanne des Holzes gespeichert.

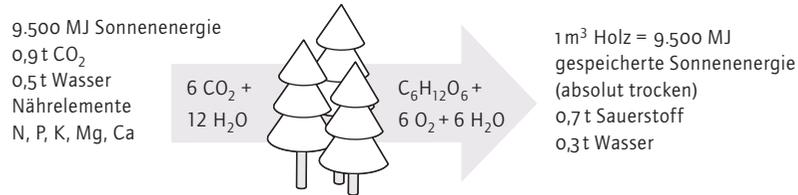


Abb.46: Photosynthese und Kohlenstoffspeicherung im Holz

So schafft es 1m³ Holz mit einem Gewicht von ca 500 kg eine Tonne CO₂ zu binden. Erst wenn das Holz verrottet oder verbrennt wird die genau gleiche Menge CO₂ wieder freigesetzt. Somit kann von einem nachwachsenden und CO₂ neutralem Rohstoff gesprochen werden. Während der gesamten Lebensspanne des Holzes bleibt das CO₂ gebunden und dient als CO₂-Langzeitspeicher, um Emissionen zu reduzieren. ^[69]

68 Vgl. o.A., IBO – Österreichisches Institut für Baubiologie und Bauökologie (Hg.), Ökokennzahlen / OI3 Leitfaden, auf: <http://www.ibo.at/de/oekokennzahlen.htm>, 23.08.2017.

69 Vgl. Dolezal, 2010, S6-8.

Für eine längere Kohlenstoffbindung wird eine Kaskadennutzung vorgeschlagen, welche das Holz in einem eigenen Kreislauf mit mehrfacher Nutzung vorsieht, bevor es als nachwachsender Rohstoff zum Brennstoff wird.^[70]

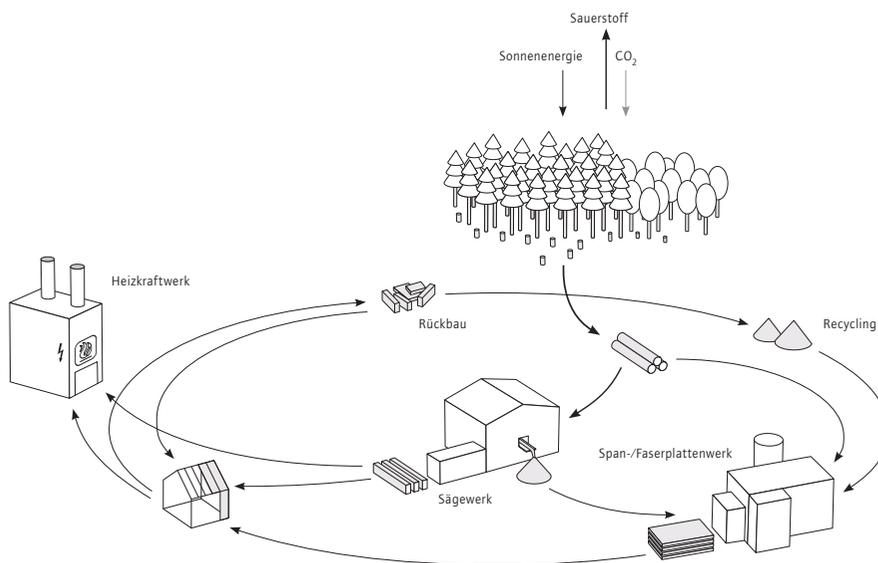


Abb.47: Lebenszyklus Holz, Kaskadennutzung

Ein weiterer nachhaltiger Ansatz beschäftigt sich mit dem sogenannten „Substitutionseffekt“

Die Idee dabei ist es, andere Baustoffe, die in ihrer Herstellung Emissionen verursachen, mit Holz zu ersetzen -substituieren- um damit einen CO₂ Speicher zu generieren.^[71]

Jedoch sollte Holz mit Bedacht eingesetzt werden, da das Einsatzgebiet und die Dauerhaftigkeit der Anwendung entscheidend für eine Nachhaltigkeit ist.

70 Vgl. Dolezal, 2010, S6-8.

71 Vgl. o.A., Pro:Holz Arbeitsgemeinschaft der österreichischen Holzwirtschaft (Hg.) Wald und Holz sind CO₂-Langzeitspeicher, auf: <http://www.proholz.at/co2-klima-wald/co2-speicher-wald/wald-und-holz-sind-co2-langzeitspeicher/>, 25.08.2017.

Zudem könnte dies zu einem unreflektierten übermäßigen Verbrauch von Holz führen. Obwohl ein hoher Holzverbrauch aus ökologischer Sicht sogar argumentierbar wäre, widerspricht das doch dem Verständnis von Ressourceneffizienz.

Derzeit ist Österreich zu 48% mit Wald bedeckt, das entspricht in etwa einer Waldfläche von 4 Millionen Hektar. Jährlich wachsen mehr als 30 Millionen Vorratsfestmeter nach und davon werden nur rund zwei Drittel genutzt. Derzeit wächst in Österreich mehr Holz nach als wir nutzen, was auch einer nachhaltigen Forstwirtschaft entspricht.^[72]

Problematisch wird es dann, wenn die Leistungsgrenze des Waldes erreicht ist und die Lebensdauer des Holzes geringer ist als der Zeitraum den es braucht um nachzuwachsen. Dies würde zu einer Entwaldung führen und das langsam gespeicherte CO₂ freigeben. Europaweit werden 42% des Holzvolumens für die Energiegewinnung genützt, 24% landen in Sägewerken, 17% für die Papierindustrie und 12% für die Holzplattenindustrie.^[73] Beinahe 60% werden derzeit für kurzfristige und temporäre Anwendungen verwendet. Auch im europaweiten Schnitt werden nur zwei Drittel des jährlichen Holzzuwachses verwendet, was eine allgemeine Holznutzung in jeglichem Sinne legitimiert.



Abb.48: Waldflächen Österreichs

72 Vgl. o.A., Pro:Holz Arbeitsgemeinschaft der österreichischen Holzwirtschaft (Hg.) Waldfläche und Waldvorrat in Österreich, auf: <http://www.proholz.at/co2-klima-wald/waldflaeche-und-vorrat/waldflaeche-und-waldvorrat-in-oesterreich/> 25.08.2017.

73 Vgl. o.A., Pro:Holz Arbeitsgemeinschaft der österreichischen Holzwirtschaft (Hg.) Wald in der EU, auf: <http://www.proholz.at/zuschnitt/51/wald-in-der-eu/> 25.08.2017.

Mit der Entwicklung neuer Holzwerkstoffe werden energieaufwändige Transformationen am Holz vorgenommen, um diese auch in neuen Anwendungen zum Einsatz zu bringen.

*„Holz ist kein Hightech-Spezialist,
sondern ein Multitech-Baustoff.“^[74]*

Holz bezieht seine Stärke nicht aus einer Einzeldisziplin, sondern aus der Summe mehrerer Disziplinen. Diese Multifunktionalität ist unter den Baustoffen einzigartig. Kein anderer Baustoff kann sowohl tragend, wärmedämmend, schallabsorbierend, brandhemmend oder mit gestalterischer Funktion eingesetzt werden.^[75]

Besser und effizienter. So beschreibt Katrin Künzi den Weg der Entwicklung von Holzprodukten in ihrem Aufsatz „Wandlungsfähig, leistungsstark und nachhaltig- heutige Attribute des Holzes im Spiegel der Tradition“. Das stetige Streben nach Optimierung von Baumaterialien, Bauteilen und Bauprozessen, in Verbindung mit der Weiterentwicklung des Holzes zu Kompositmaterial mit verbesserten Eigenschaften, soll zum besseren und effizienterem Bauen führen.^[76]

Jedoch, wie schon zuvor in dieser Arbeit erwähnt, führt nicht jede neue technische Möglichkeit automatisch zu einer sinnhaften und konsistenten Produktentwicklung.^[77]

74 Blumer, 2014, S323.

75 Vgl. Blumer, 2014, S323f.

76 Vgl. Künzi, 2014, S327.

77 Vgl. Wyss, 2014, S281.

Ein neu entstehender Begriff für den Drang des technischen Fortschritts und der Optimierung ist der der „digitalen Nachhaltigkeit“. Derzeit ist die weiter verbreitete Definition die niederschwellige Weitergabe immaterieller Güter durch digitale Mittel.

Im Kontext des Bauens versteht man aber das strategische vernetzen einzelner Prozesse, deren Optimierung und die Entwicklung einer synergetischen Evolution. Das Resultat daraus ist eine integrative Architektur aus der Wechselwirkung unterschiedlicher Einflussfaktoren wie Raumwirkung, Formfindung, Materialisierung und Konstruktionsprinzipien.

Mittels digitalen Prozessen kann eine Optimierung in schier nie vollendeten Schritten ermöglicht werden. Wenn möglichst alle Prozesse in einem der Natur vergleichbarem Kreislauf eingebunden werden, kann dies zu einer echten Nachhaltigkeit führen. Die Natur kann uns ein Vorbild sein, da die Evolution zu einer selbstverständlichen Komplexität geführt hat, die uns als Schlüssel zur Definition einer eigenwilligen Ästhetik dient.

In Zeiten der Informationsgesellschaft ist es wichtig, den Planungsprozess sukzessive mit weiteren Informationen zu erweitern und den Computer als interaktives Planungsinstrument einzusetzen. Diese künstliche Intelligenz sollte als kreative Erweiterung verstanden werden, um konsistente und anpassungsfähige Entwurfsmodelle zu generieren. Die anfangs angestrebte Optimierung kann nach Bedürfnissen angepasst werden, da mehrere Aspekte berücksichtigt werden können. ^[78]

DIGITALE FABRIKATION

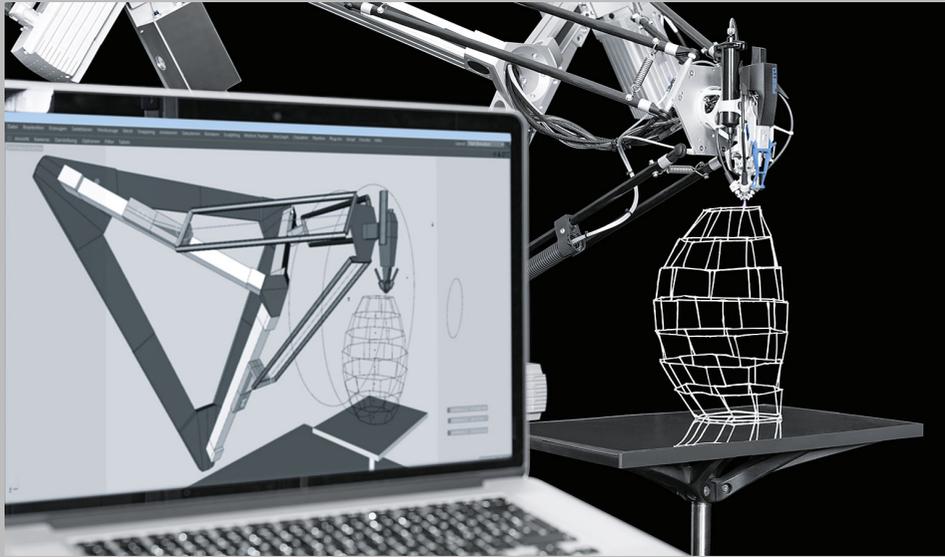


Abb.49: Digitale
Fabrikation, 3D
Cocooner, Prototyp
Firma Festo

„Der Computer ist das umfassendste und dynamischste Werkzeug, das der Architekt für seine Arbeit je zur Verfügung hatte und das ihm gleichzeitig größtmögliche Freiräume im Entwurf bietet. Zur Ausgestaltung dieses Potenzials bedarf es jedoch der Fähigkeit, den Computer als interaktives Instrument einzusetzen und seine künstliche Intelligenz als kreative Erweiterung zu begreifen. Ein professioneller Umgang mit digitalen Medien sorgt dafür, dass die architektonische Qualität vom Entwurf bis zur Realisierung im Kompetenzbereich des Gestalters bleibt, und erweitert gleichzeitig dessen Einfluss auf die zukünftige Entwicklung von Architektur.“^[1]

Der klassische Architekt ist heutzutage ein Generalist und Netzwerker, der sich mit technischen, wirtschaftlichen, funktionalen und gestalterischen Belangen auseinandersetzt. Der Begriff „Architekt“ kommt ursprünglich vom griechischen Wort „architekton“, was soviel wie „Oberster Handwerker“ bedeutet.^[79]

Jedoch trennten sich im Laufe der Zeit die Ausbildungswege von Ingenieuren und Architekten zunehmend. Dies führte dazu, dass sich bereits im 19. Jhd. das *Was* und das *Wie* eines Gebäudes als verschiedene Dinge angesehen wurden.^[80]

In späterer Folge wurden auch die architektonische Zeichnung, der Plan, und das Gebäude als zwei getrennte Dinge angesehen und nicht mehr als Mittel zum Zweck. Mit Hilfe der digitalen Fabrikation gibt es großes Potential die Lücke zwischen Repräsentation und Gebäuden zwischen dem Designen und dem Bauen zu verkleinern.

Heutzutage ist es kaum mehr vorstellbar ein Gebäude ohne die Hilfe von Computern zu entwerfen, da dieser bereits in jedem Schritt des Architekturprozesses eingebunden ist.

Architekten zeichnen nun bereits seit annähernd 30 Jahren mit dem Computer. Trotzdem hat erst das Modellieren, Simulieren und Verarbeiten von dreidimensionalen Geometrien, in Verbindung mit digitaler Fabrikation, die Grenzen von architektonischen Formen und Konstruktionen wesentlich erweitert.

Innerhalb einer kurzen Zeitperiode hat sich ein aktives Netzwerk um dieses Thema gebildet. Aus projektspezifischen Anwendungen haben Architekten, Designer und Fabrikanten originelle Produktionstechniken entwickelt. Dieser Einfallsreichtum hat damit zu tun, dass der ganze Prozess der Konstruktion und Fabrikation neu gedacht und umstrukturiert wird.^[81]

*Heutige Technologien geben dem Architekten
das Werkzeug wieder in die Hand zurück.*

79 Vgl. <https://de.wikipedia.org/wiki/Architekt> ; 11:45, 24.07.2017.

80 Vgl. Pedro/ Braig/ Tillmanns, 2013, 148.

81 Vgl. Iwamoto, 2009, 4f.

Das Bauwesen wird häufig als innovationsträge betitelt, da viele Technologien erst Jahre später aus anderen Industriezweigen abgeändert, modifiziert oder skaliert werden, um diese in die Architekturfabrikation zu übersetzen. Jedoch breitet sich der Einfluss der digitalen Revolution auch in der Architektur deutlich spürbar aus. Zu beobachten ist dies nicht nur in der formalen Ausgestaltung von Gebäuden und in der veränderten Wahrnehmung unserer gebauten Umwelt durch den Einsatz von Computern, sondern vielmehr noch in der veränderten Arbeitsweise (Entwurfsmethodik) und in der Verknüpfung der am Bau involvierten Akteure.^[82]

Entscheidend für die digitale Fabrikation ist der papierlose Austausch von Informationen für -im besten Fall- alle Beteiligten. Die Kommunikation zwischen Bauherrn, Planern und ausführenden Gewerken wird mithilfe des Computers bereits frühzeitig ein wichtiger Bestandteil für eine integrative Planung und daraus resultierende Architektur.^[83]

Aber letztendlich geht es um den Produktionsprozess von Elementen, Bauteilen oder gar ganzen Gebäuden. Mit dem „file-to-factory“ Prinzip werden keine gesondert gezeichneten Pläne erstellt, um das gewünschte Werkstück zu fertigen, sondern digitale Daten werden lediglich für die Fabrikation benötigt.

Mithilfe von rapid-prototyping-Maschinen können Modelle oder Teile in Originalgröße sehr schnell erzeugt werden. Unnötige Zwischenschritte zwischen dem Entwerfen und der Fabrikation werden eliminiert. Für die Architektur bietet dies Potential für noch fließendere Übergänge vom Design zur Konstruktion.^[84]

82 Vgl. Hemmerling, Böke & Püchner, 2013, 146f.

83 Vgl. Pottgiesser, Strauß, 2013, 32.

84 Vgl. Iwamoto, 2013, 5.



Abb.50: [c] space Pavilion by Alan Dempsey and Alvin Huang, 2008

Parametrisches Entwerfen erlaubt die Untersuchung einer Vielzahl von Varianten innerhalb eines Prinzips. Mittels Programmierkenntnissen werden Geometrien, Konstruktionen oder Informationen zu flexiblen Algorithmen übersetzt. Durch veränderbare Randbedingungen und die daraus resultierende Lösungsanzahl lassen sich verschiedenste Dinge optimieren und in Relation bringen.

Diese Fülle an Information verändert die Entscheidungsfindung und damit einhergehend auch die Entwurfsmethodik. Wissen aus anderen Disziplinen wird bereits im Entwurfsstadium eingebunden und hat damit auch direkten Einfluss in der Architektur.

Derzeit ist es noch ungeklärt welche Gewichtung andere Disziplinen bereits im Entwurfsprozess erhalten werden und zu welchen ästhetischen und funktionalen Ergebnissen dies führt.^[85]

AKTUELLE TENDENZEN IN DER FORSCHUNG

Oftmals ist es schwierig Sachverhalte klar einzugliedern, da sie aufgrund ihrer Komplexität nicht auf eine einzige Facette herunter zu brechen sind. Dennoch wird hier versucht eine thematische Gliederung der Forschungswelt rund um das Thema digitaler Fabrikation mit Holz und im Holzbau vorzunehmen.

ASSEMBLY-DRIVEN DESIGN PROCESSES

Gramazio Kohler Research an der ETH Zürich beschäftigen sich seit 2012 intensiv mit robotergestützter Assemblierung komplexer Holztragwerke.

Dabei wird versucht sowohl materialspezifische als auch konstruktive Aspekte in den digitalen Entwurfs- und auch Herstellungsprozess einzubinden.^[86]

Der springende Punkt ist der automatisierte Herstellungsprozess von nicht standardisierten Holzkonstruktionen. Die weitverbreiteten CNC Maschinen sind in ihrer Flexibilität sehr schnell am Ende und erfordern immer noch hohen Personalaufwand.

Roboter-Systeme schaffen es, rechenintensive Design-Daten direkt zu verarbeiten und vollautomatisierte Herstellungsprozesse abzuwickeln.

Vormals arbeitsintensive Verbindungen stellen durch die Automatisierung kein wirtschaftliches Problem mehr da. Auch mit weiteren Aspekten, wie dem teilweisen Weglassen von Gerüstbau oder der Minimierung von Bautoleranzen, kann dadurch ein Mehrwert erzielt werden.^[87]

86 Vgl. <http://gramaziokohler.arch.ethz.ch/web/d/forschung/184.html>
24.07.2017

87 Vgl. Willmann/ Gramazio & Kohler, 2017, 13-17.



Abb.51: Roboter-
gestützte
Assemblierung
komplexer
Holztragwerke

MATERIAL-DRIVEN DESIGN PROCESS

Auch wenn wir im Bereich des Holzbaus bleiben, gibt es hier immer noch zwei unterschiedliche Denkansätze.

Der Erste erkennt die natürliche Form des Holzstammes an und versucht mit all seinen Eigenschaften eine Konstruktionslogik zu ermitteln.^[88]

Ein extremes Beispiel hierfür ist das „biomass Boiler House“ von der Architectural Association School of Architecture London, im Hook Park. Mithilfe von 3D Scannern wurden krummwachsende Bäume digitalisiert und mithilfe eines digitalen Modells in ein expressiv natürlich geformtes Gebäude umgewandelt.

Die Idee war es, Holz nicht mit Zwängen in die „richtige“ Form zu bringen, sondern ähnlich wie im früheren Schiffsbau die passenden Holzstücke zu suchen, um den gewünschten Entwurf zu realisieren.^[89] Dieses Projekt dient als Vorreiter für eine natürlich geformte Holzarchitektur, jedoch mit wenig Anspruch auf Massentauglichkeit.

Der zweite Ansatz verfolgt das Verarbeiten von Holz zu einem allgemeingültigeren Baustoff (Verlust der Anisotropie oder Veränderung der Form- Plattenwerkstoffe) und versucht dabei noch gewisse positive Eigenschaften des Holzes zu behalten. Mit diversen Erfindungen und Produkten versucht die Holztechnologie es noch einfacher zu machen, Holz in verschiedenen Bereiche einzusetzen.^[90]

Am Institute for Computational Design an der Universität von Stuttgart werden auch Forschungen speziell im Bereich der strategischen Nutzung von Materialeigenschaften getätigt.^[91]

88 Vgl. Menges, Schwinn, Krieg, 2017, 5-9.

89 Vgl. Wang, 2017, 169-179.

90 Vgl. Menges, Schwinn, Krieg, 2017, 5-9.

91 Vgl. Krieg, 2017, 125f.



Abb.52:
 a: Hooke Park
 Biomass Boiler House
 b: gebogene Bäume
 im Hooke Park
 c: Anleitung für
 Materialgewinnung für
 den Schiffsbau
 d: 3D Scan der Bäume

CONSTRUCTION/TECHNOLOGY-DRIVEN DESIGN PROCESS

Das größte Potential für die Forschung findet sich im Bereich der Konstruktion und Technologie, da dieser auch das größte Feld und Bandbreite darstellt.

Viel Eifer und Ressourcen werden in die Erforschung von Form, Konstruktion und Fügung investiert und unzählige Beispiele könnten dies untermauern. Jedoch reicht auch ein Beispiel aus, um das Ausmaß und die Vernetzung dieser Bereiche aufzuzeigen.

Die Landesgartenschau Exhibition Hall ist das Resultat jahrelanger Forschung und Weiterentwicklung des Research Pavilions 2011 am Institute of Computational Design and Construction an der Universität von Stuttgart.

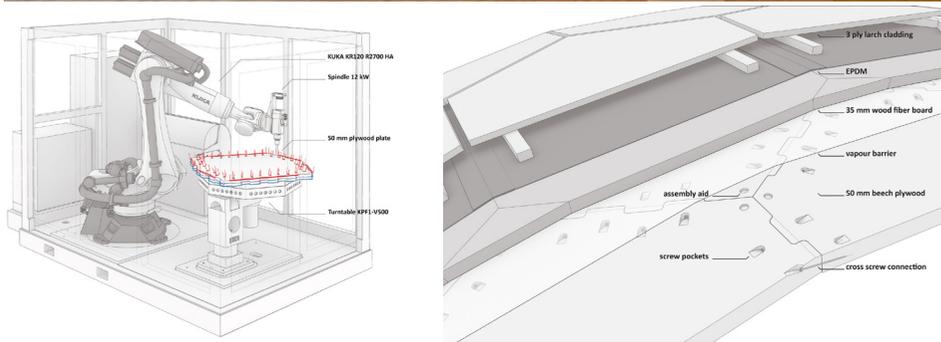
Mit dem Bau des Pavillons aus dem Jahre 2011 wurde untersucht, ob es möglich ist, roboter- gefertigte „finger-joints“ für eine großmaßstäbliche und geometrisch schwierige Plattenstruktur zu verwenden. Da diese Art der Verbindung nur Querkraft entlang der Plattenkanten und Druckkräfte aufnehmen und ableiten kann, wurden eigene Entwurfsregeln aufgestellt, um geeignete und fertigbarbare Formen zu entwickeln.

In weiterer Folge wurde bei der Landesgartenschau Exhibition Hall die Symbiose von Ressourceneffizienz und räumlichem Ausdruck durch ein hohes Maß an Integration von Fabrikation im computerunterstützten Entwerfen untersucht. ^[92]

92 Vgl. Menges, 2017, 97-100.



Abb.53:
Landesgartenschau
Schwäbisch Gmünd
2014, Exhibition Hall
a: Innenansicht
b: Robotergestützte
Fertigung
c: Aufbau und
Konstruktionsdetail



EINSATZGEBIET UND ANFORDERUNGEN

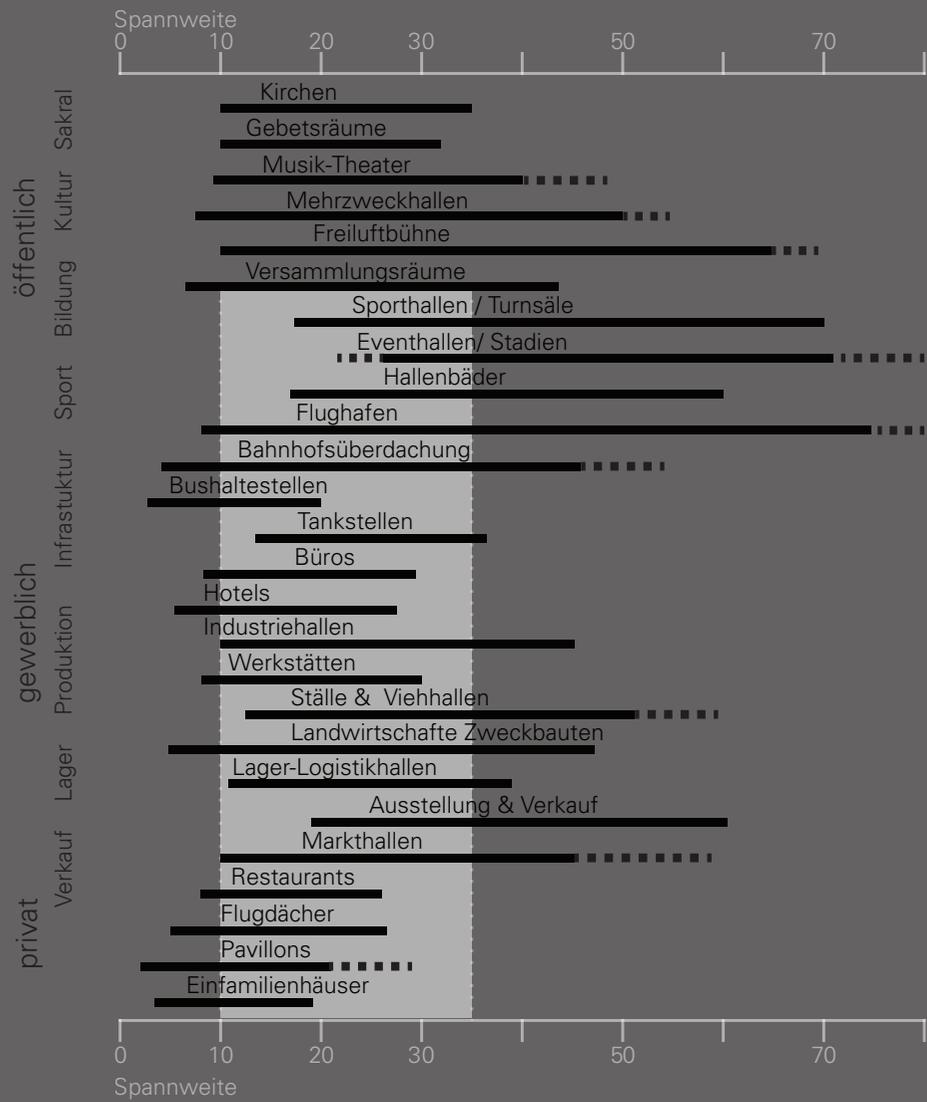


Abb.54: Bauaufgaben und deren Spannweiten

EINSATZGEBIET

Mit dem Anspruch ein Schalendach-System zu entwickeln, mit variablen Abmessungen und industrieller Vorfertigung, stellt sich automatisch die Frage nach dem Einsatzgebiet.

Vorerst wurden verschiedenste Bauaufgaben in ihren Funktionen gegliedert, von öffentlichen über gewerblichen bis zu den privaten Anwendungen. Danach wurden die üblichen Spannweiten für diese Bauaufgaben eruiert.

Bei einem allgemeingültigen Bau-System kann nicht davon gesprochen werden, dass dieses auf einen bestimmten Ort Bezug nimmt. Nein, nicht einmal die zu beherbergende Funktion wird im Erscheinungsbild berücksichtigt. Auch nicht, dass es in einer bautechnischen oder baukulturellen Tradition steht.

Öffentliche Gebäude mit kulturellem Wert wurden von vornherein ausgeschlossen, genauso wie Sakralbauten, da ein Systembau für diese Bauaufgaben ungeeignet erscheint. Andere öffentliche Zweckbauten, wie Sporthallen oder weitgespannte Infrastruktur Projekte, wurden wiederum in Betracht gezogen.

Im privaten als auch im gewerblichen Sektor wurden keine Differenzen gemacht, da diese Funktionen dem Gesetz des freien Marktes unterliegen (Siehe Abb.62.)

Um ein besseres Verständnis für die möglichen Einsatzgebiete zu bekommen, wurden die Anteile von Holztragwerken aller Bauvorhaben untersucht. Österreichweit wurden 39% aller Bauvorhaben mit einer Primärkonstruktion aus Holz errichtet.

Der landwirtschaftliche, gewerbliche und industrielle Sektor verbucht beinahe 50% der gesamten gebauten Nutzfläche, wobei 45 % davon als Holzbau (Definition: Holzanteil der tragenden Konstruktion größer als 50%, jedoch ohne Keller oder Fundament) errichtet worden sind.^[93]

Die weitere Aufschlüsselung gibt Auskunft über den Verwendungszweck und dessen Häufigkeit. Diese Daten sind ein guter Überblick für eine potentielle Marktforschung und für die gezielte Entwicklung und Platzierung eines Produktes.

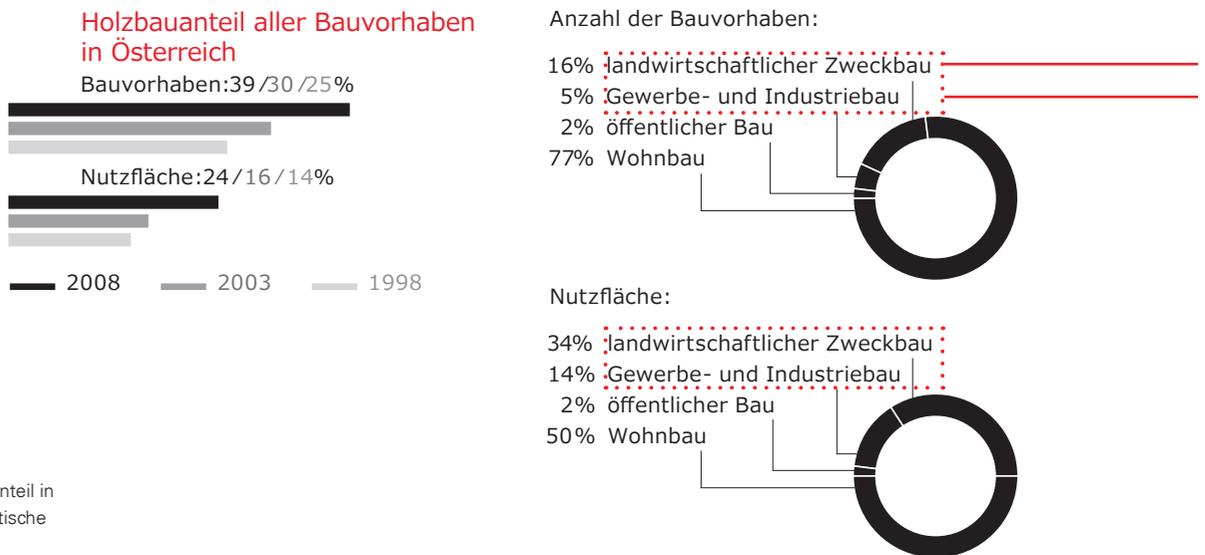
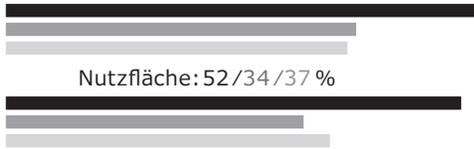


Abb.55: Holzbauanteil in Österreich, Statistische Erhebung von Hochbauvorhaben, Quelle: proHolz Austria

93 Vgl. ProHolz Austria (Hg.), 2011, S4,8,20-24.

Holzbauanteil von landwirtschaftlichen Zweckbauten in Österreich

Bauvorhaben: 54/40/39 %

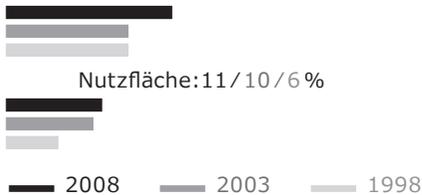


Nutzfläche: 52/34/37 %



Holzbauanteil von Gewerbe- und Industriebauten in Österreich

Bauvorhaben: 19/14/14 %



Nutzfläche: 11/10/6 %



2008 2003 1998

Verwendungszweck

Maschinenhallen: 35/35/38%

Lagerhallen und Scheunen: 24/28/27%

Rinderställe: 21/19/14%

Wirtschaftsgebäude: 7/6/8%

Jagd- und Fischerhütten: 2/2/3%

Almhütten: 1/2/3%

Pferdeställe und Reithallen: 4/3/2%

Geflügelställe: 2/2/2%

Schweineställe: 1/2/2%

Schafställe: 2/1/2%

Verwendungszweck

Gastronomiebetriebe: 26/27/26%

Büro- und Betriebsgebäude: 25/24/25%

Hallenartige Gewerbebetriebe: 26/23/24%

Geschäftslokale/-gebäude: 14/18/17%

Hotelgebäude: 6/4/4%

Industriegebäude/-hallen: 3/4/4%

SYSTEMVERGLEICH

Das Ziel ist es, eine Alternative für die bestehenden weit gespannten Holzdach-Tragsysteme zu finden. Hierzu wurden vier gängige Vollholzhallen mit einer Spannweite von 25 Metern und einer Länge von 50 Metern miteinander verglichen.

Die gewählten Konstruktionen sind:

- der industriell gefertigte Brettschichtholzträger
- das Holzfachwerk mit ingenieurmäßigen Verbindungen
- der mit Stahlseilen unterspannte Bogenträger
- das an der TU Graz entwickelte Kielsteg Element und
- die in dieser Arbeit entwickelte Holzschale.

Die Vergleichsparameter sind folgende:



Ausgehend von dem Materialverbrauch des Brettschichtholzträger-Systems, welches mit 100% verbucht ist, sind alle anderen Systeme mit diesem in Bezug gesetzt worden.



Der Platzbedarf, jenes Volumen von der Kante des Auflager bis zum Raumabschluss zwischen der Konstruktion, welches nicht genützt aber dennoch beheizt werden muss.



Der Vorfertigungsgrad nimmt im Holzbau immer größeren Stellenwert ein. Er bietet die Möglichkeit ganzjährig in konditionierten Bedingungen zu produzieren.



Die auf der Baustelle benötigte Errichtungszeit. Ein hoher Grad an Vorfertigung kann zu einer schnelleren Errichtung Vorort führen.



Der erhöhte Transportaufwand ist ein nachteiliger Rückschluss einer fortgeschrittenen Vorfertigung.



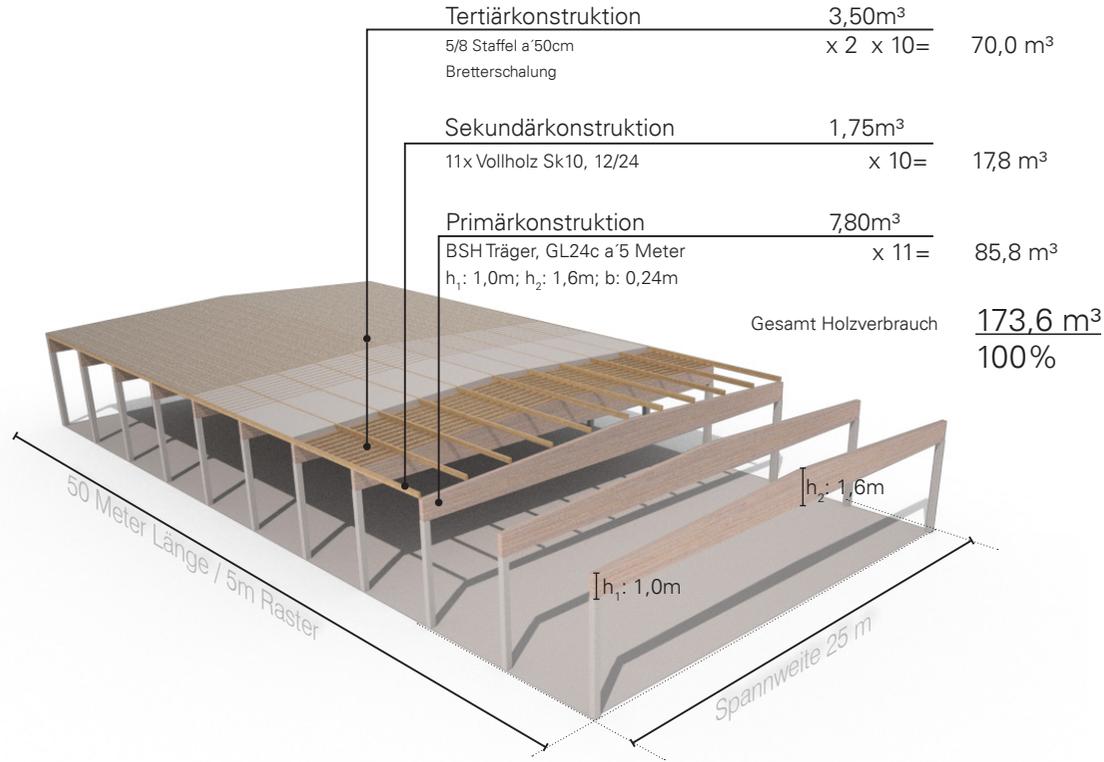
Der Wartungsaufwand bezieht sich auf Instandhaltungsarbeiten und Schäden in der Primärkonstruktion. Wie groß gestaltet sich der Aufwand ein Feld auszutauschen oder Vorort zu reparieren.



Der letzte Vergleichsaspekt, das Raumerlebnis, ist geschmacksabhängig und kann somit nicht als ein allgemeingültiges Kriterium gesehen werden.

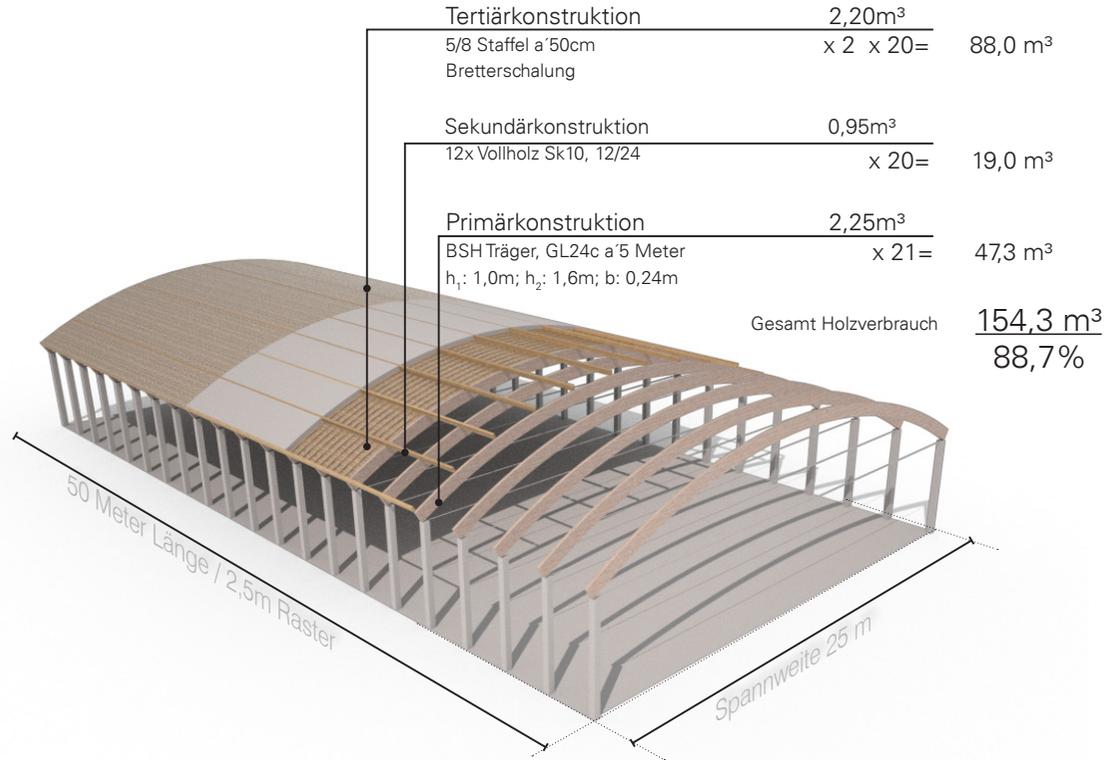
BRETTSCHICHTHOLZTRÄGER

-  Materialverbrauch
-  Platzbedarf, beheizter Raumbedarf
-  Vorfertigungsgrad
-  Errichtungszeit
-  Transportaufwand
-  Wartungsaufwand
-  Raumerlebnis

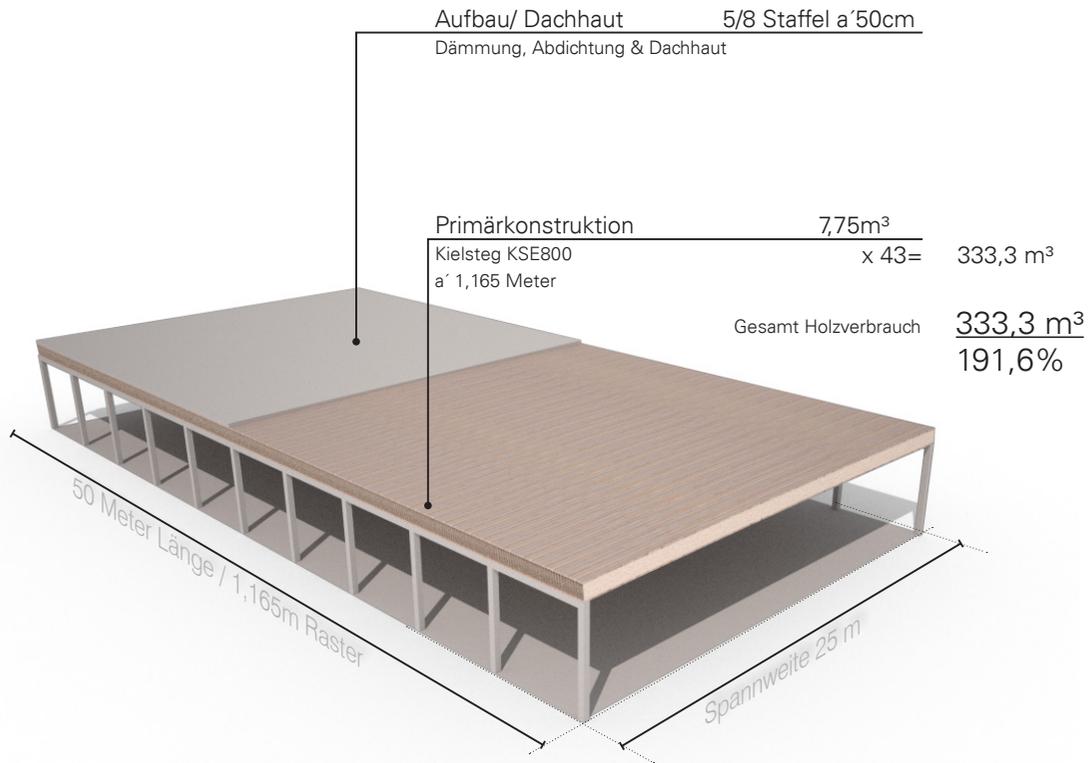


BRETTSCHICHTHOLZ BOGEN

-  Materialverbrauch
-  Platzbedarf, beheizter Raumbedarf
-  Vorfertigungsgrad
-  Errichtungszeit
-  Transportaufwand
-  Wartungsaufwand
-  Raumerlebnis

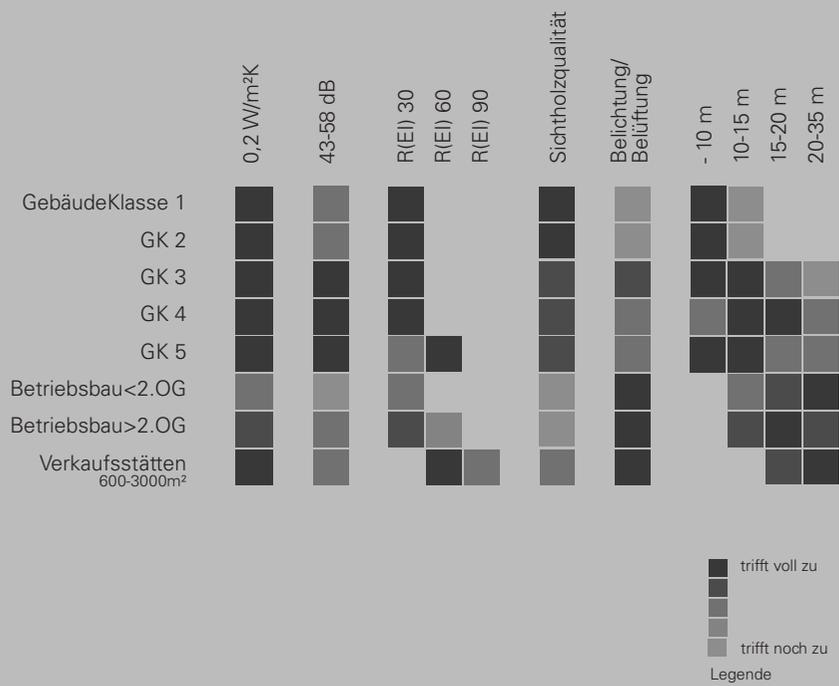


KIELSTEG ELEMENT DACH



ANFORDERUNGEN

Anforderungen nach
Gebäudeklassen



Jedes Bauteil muss gewissen Anforderungen gerecht werden. Die wichtigsten von diesen werden gesetzlich vorgeschrieben und betreffen statische, sicherheitstechnische oder bauphysikalische Eigenschaften. Die statischen Anforderungen nach Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit sind bei allen Anwendungen gleich. Andere, wie der des Schall- oder Brandschutzes, können je nach Einsatzgebiet variieren. Die in Österreich geltenden OIB-Richtlinien unterscheiden die Einsatzgebiete durch das Verwenden von sogenannten Gebäudeklassen und den Einsatz als Betriebsbau (ein- oder mehrstöckig), siehe links. Andere Forderungen müssen nicht unbedingt zwingend von diesem Bauteil erfüllt werden, können aber dadurch zusätzliche Vorteile erlangen zum Beispiel Belichtung und Belüftung. Weitere Ansprüche an das Bauteil können durch Kundenwünsche entstehen, wie die Ausbildung von qualitätsvollen Sichtoberflächen.

BRANDSCHUTZ

In den OIB Richtlinien 2 & 2.1 werden die Anforderungen an die Feuerwiderstandsklassen in Verbindung mit Anforderungen an Baustoffe definiert. Für die meisten Decken über dem letzten Geschoß sind Erleichterungen im Brandschutz angedacht. Werden die zusammenhängenden Flächen (Brandabschnitte) größer, so erschwert sich der Brandschutz, wie zum Beispiel bei den Verkaufsstätten. Ab einer Fläche von 1800m² sind Holzoberflächen nicht mehr zulässig und automatische Rauch- und Wärmeabzugsöffnungen müssen integriert werden.^[94]

Für beinahe alle anderen Bereiche stellen Holzoberflächen kein Problem dar. Obwohl diese als entflammbar und brennbar gelten haben diese vorhersehbare Brandeigenschaften. Der notwendige Brandschutz kann durch eine geringe Überdimensionierung der freiliegenden Flächen gewährleistet werden. Bei einer durchschnittlichen Abbrandgeschwindigkeit von 0,7mm pro Minute wären das 21mm, um einen 30 minütigen Feuerwiderstand zu erreichen.^[95]

SCHALLSCHUTZ

Der Schallschutz hängt mit dem zu erwartenden Außenlärmpegel zusammen. Wobei die Außenbauteile von Verwaltungs- und Bürogebäuden geringere Anforderungen haben als Gebäude mit Schlafmöglichkeiten wie Wohnungen, Hotels und Krankenhäuser sowie Schulen und Kindergärten. Die Mindestanforderung an die Schalldämmung liegt bei 33 bis 48 beziehungsweise 53 dB.^[96]

94 Vgl. OIB-Richtlinie 2, 2015, S15&19.

95 Vgl. Vismann (Hg.), 2012²⁴, S310.

96 Vgl. OIB-Richtlinie 5, 2015, S2.

BELICHTUNG / BELÜFTUNG

Für Aufenthaltsräume und Arbeitsstätten werden gewisse Mindestfensterflächen vorgeschrieben. Diese können nur in wenigen Ausnahmen unterschritten werden.

Für natürlich belüftete Räume sind mindest- Luftwechszahlen vorgeschrieben, welche über Öffnungen zum Außenraum gewährleistet werden müssen.^[97]

Diese oft in Kombination stehenden Öffnungen (Fenster) werden meist in den Wänden integriert. Diese Elemente werden vorallem bei tiefen Räumen, z.B. in Hallen, in den Decken untergebracht.

WÄRMESCHUTZ

Für Dächer von Gebäuden gilt in Österreich ein mindest- U-Wert von 0,2 W/m²K. Ausnahmen sind Gebäude welche nur frostfrei gehalten werden, Gottesdienst und für religiöse Zwecke genutzte Gebäude, provisorische Gebäude (<zwei Jahre), Wohngebäude mit zeitlich begrenzter Nutzung sowie Industrieanlagen, Werkstätten und landwirtschaftliche Nutzgebäude deren Raumheizung durch Abwärme abgedeckt wird.^[98]

TRAGFÄHIGKEIT UND GEBRAUCHSTAUGLICHKEIT

Neben der Tragfähigkeit und der Gebrauchstauglichkeit ist auch die Dauerhaftigkeit ein Kriterium das einzuhalten ist.^[99] Für Holzbauten wird die Dauer der Einwirkung in Kombination der Nutzungsklasse berücksichtigt und mittels eines Modifikationswerts eingerechnet.^[100]

97 Vgl. OIB-Richtlinie 3, 2015, S6-7.

98 Vgl. OIB-Richtlinie 6, 2015, S2,6.

99 Vgl. OIB-Richtlinie 1, 2015, S2.

100 Vgl. Block/ Gengnagel/ Peters 2013, 165.

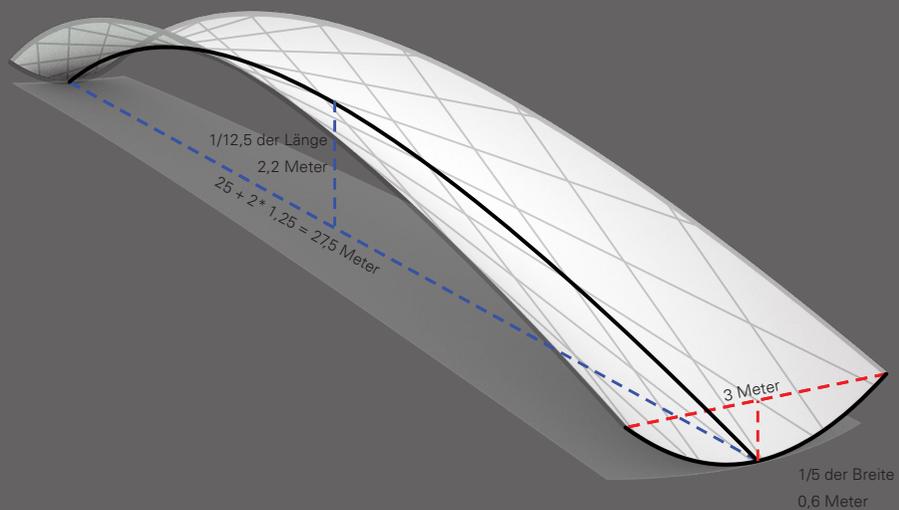
ENTWURF & KONSTRUKTION

FORMFINDUNG UND KONSTRUKTION

FORMFINDUNG

Wie bereits im Kapitel „Geometrie“ beschrieben wurde, weist die sogenannte HP-Schale neben der simplen Erzeugung besondere Eigenschaften auf, die zu einer logischen Konstruktion führen können. Lediglich vier Parameter werden benötigt, um diese steife Sattelfläche zu generieren.

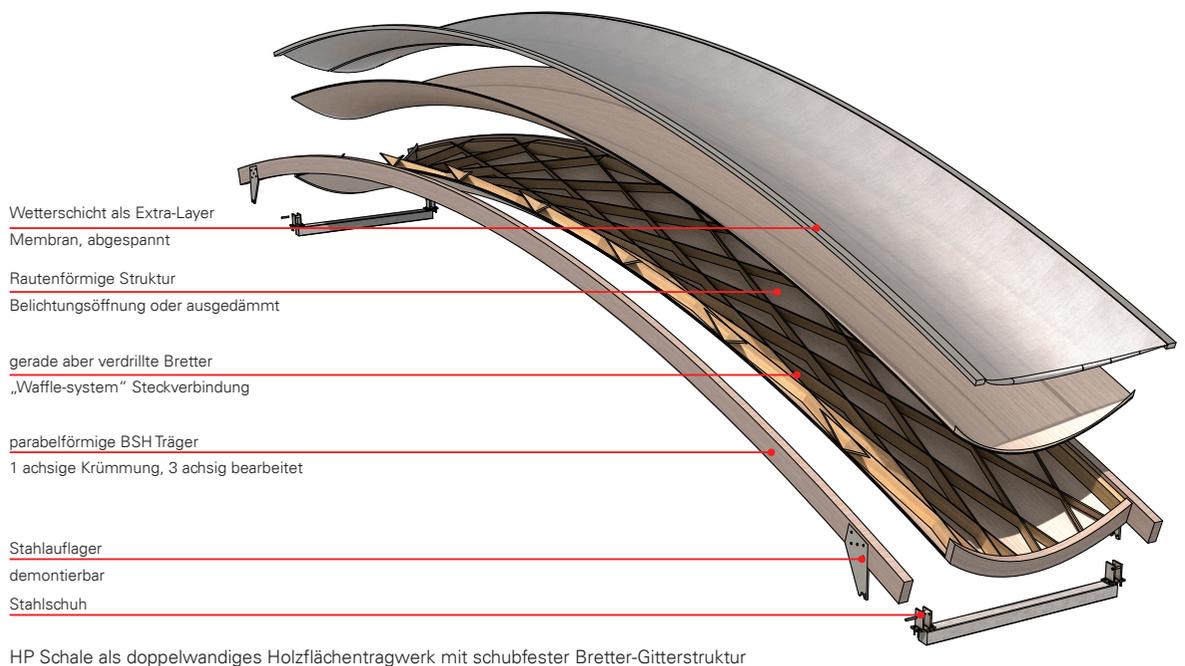
Die Länge ergibt sich aus der angepeilten Spannweite von 25 Metern und eines eingeplanten Dachüberstands. Die Breite wurde aufgrund der üblichen Transportmaße auf 3 Meter beschränkt. Die Größenordnung der jeweiligen Stichhöhen (längs und quer), sowie der Materialeinsatz werden den zu erwartenden Belastungen angepasst, um die benötigte Steifigkeit zu erreichen.



HP Fläche als Translationsfläche mit Geraden

KONSTRUKTIONSPRINZIP

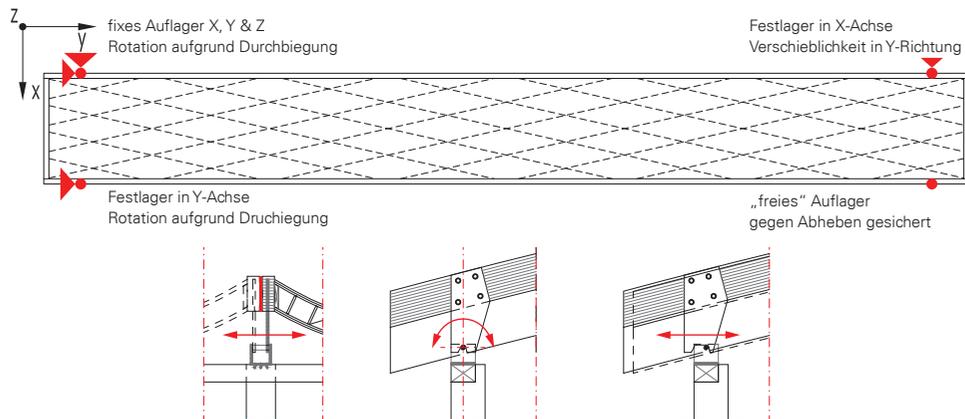
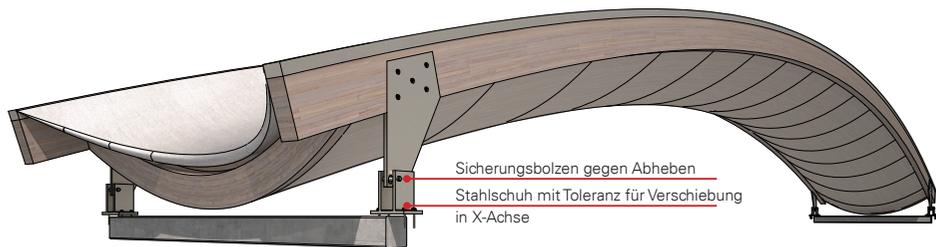
Die Leitidee dieses Systems ist es, eine doppelwandige Holzschale zu konstruieren, welche einen besonders hohen Vorfertigungsgrad aufweist. Zudem wird auf eine einfache Wartung und hohe Recyclingfähigkeit geachtet. Das als Kaltdach konstruierte Dachsystem soll das Instandhalten und Austauschen der Witterungsschicht ohne Beschädigung der Tragstruktur zulassen. Die beiden Schalenflächen werden schubnachgiebig über das Brettergitter verbunden. Die verschraubte Konstruktion wird Innen mit einem Zellulose-Dämmstoff ausgeflockt. Die benötigte Dampfbremse und Abdichtung, sowie Anschlüsse zu möglichen Öffnungen werden bereits im Werk eingebunden.



AUFLAGER

Das Schalendachsystem ist unabhängig von der Unterkonstruktion entworfen. Es wird davon ausgegangen, dass keine horizontalen Kräfte in die Auflager eingeleitet werden können. Die Auflager sind so konzipiert, dass es zu keinerlei Einspannung kommt und es sich um ein statisch bestimmtes System handelt.

Dies hat zur Folge, dass die Verformung der Schale das Resultat der Eigensteifigkeit ist. Die Nachgiebigkeit der einzelnen Verbindungen werden aufsummiert und führen zu jenen Verformungen, die die Auflager kompensieren müssen, um frei von Zwängen zu sein.

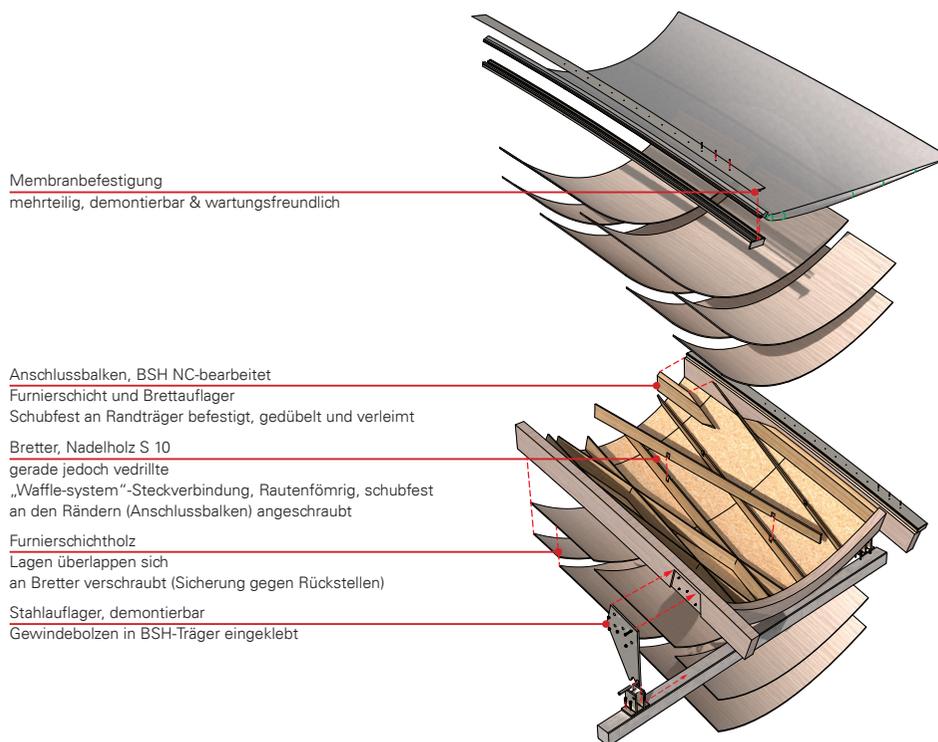


Isometrische Darstellung Auflager, Draufsicht Auflagerreaktionen, Schemata Aufnahme der Verschiebungen

VERBINDUNGEN

Um eine schnelle Instandsetzung eventuell entstandener Schäden sowie ein hohes Maß an Rückbaubarkeit zu erreichen, sind so viele Verbindungen wie möglich wieder lösbar konstruiert worden. Die Auflager werden nach dem Transport montiert, um mehrere Dachelemente gestapelt verladen zu können. Die transluzente Membran- Wetterschicht wird nach dem Einheben in Verbindung mit dem Nachbarerlement befestigt.

Sämtliche Platten werden an das Bretter-Gitter geschraubt, um ein Trennen der Baustoffe nach dem Rückbau zu gewährleisten oder die Instandhaltung zu erleichtern, um den Lebenszyklus zu verlängern.



Explosionszeichnung, Verbindungen

BEMESSUNG

FINITE ELEMENTE BERECHNUNG

Für die statische Berechnung wurde das Programm Dlubal RFEM 5.09 gemeinsam mit dem Plug-In RF-LAMINATE benutzt. Insgesamt wurden zwei unterschiedliche Methoden verwendet um die Berechnungsmodelle zu generieren. Das erste Modell wurde detailgetreu abgebildet. Sämtliche konstruktiven Überlegungen und Details wurden eingearbeitet um aussagekräftige Ergebnisse zu erhalten.

Es handelt sich hierbei um einen schalenartigen Biegeträger, der durch seine räumliche Profilierung seine Biegesteifigkeit erhält. Die statisch bestimmte Auflagersituation (ohne Einspannungen und horizontaler Verschieblichkeit) bietet den Vorteil, dass keine horizontalen Kräfte in die Unterkonstruktion eingeleitet und keine Spannungen aufgrund temperaturbedingter Längenänderungen verursacht werden.

Die erste Erkenntnis bei diesem genau abgebildeten Modell war, dass die gesamte Konstruktion verhältnismäßig weich ist.

Es wurde die vier folgenden Lösungsansätze aus der gewonnen Erkenntnis abgeleitet.

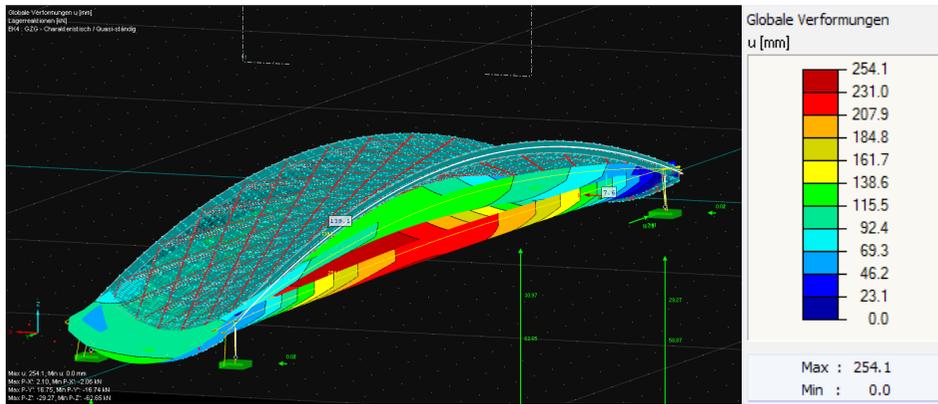
Der erste Gedanke war, das Tragsystem wesentlich zu ändern und ein Stahlseil einzusetzen, um die Auflager vor der Verschiebung zu sichern. (Bogentragwirkung durch Zugband)) Dies hätte jedoch einen wesentlichen Eingriff in die Raumwahrnehmung und wurde aus architektonischer Sicht abgelehnt.

Der zweite Schritt war, die Nachgiebigkeit der Verbindungsmittel durch das Vergrößern der Nägeldurchmesser zu reduzieren. Die daraus gezogene Erkenntnis gab zu verstehen, dass die Verschraubung der Platten eine wesentlich geringere Rolle spielten als gedacht.

Der Versuch, die fehlende Steifigkeit mit höherem Materialaufwand in den Griff zu bekommen, wurde sehr schnell aufgegeben. Da lediglich 1 cm mehr Plattenstärke zu einem 0,75m³ höheren Materialverbrauch führt.

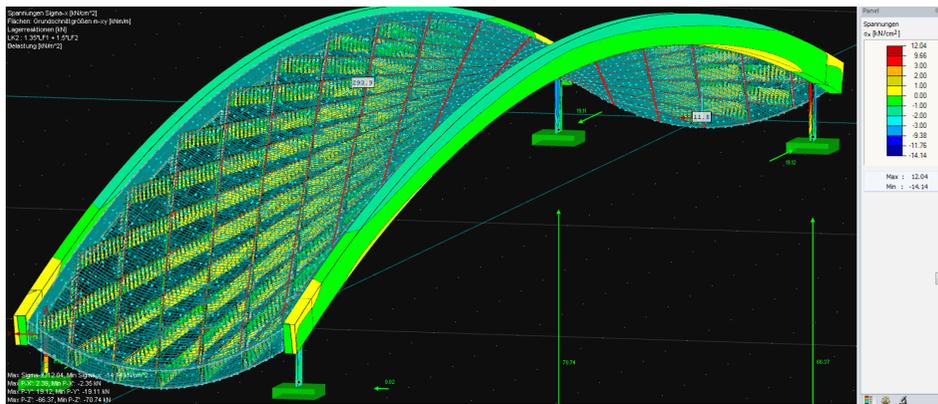
Letztendlich wurde die Gesamtgeometrie in weiteren Varianten überprüft. Ein vereinfachtes Rechenmodell sollte als Parameterstudie dienen.

AUSWERTUNG ERSTER UNTERSUCHUNGEN



Detailliertes RFem Modell, Durchbiegung unter Eigengewicht und Schnee

Anm.:
Durchbiegung
ungefähr 1/100 der
Spannweite
Darstellung 100-Fach
überhöht.



Spannungsverlauf in den Randträgern und Brettern

Anm.:
Randträger 12/26
noch zu gering
dimensioniert,
Auslastung > 100%

MODELLBILDUNG

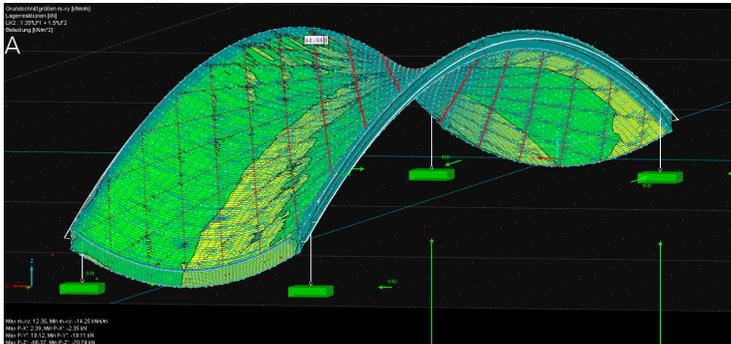
Die beiden Schalenflächen wurden als NURBS-Flächen aus den Randkurven erzeugt und mittels RF-LAMINATE wurde die Schichtung simuliert. Das Bretter-Gitter wurde aus Achsen als Rechteckprofil mit 2/20 cm abgebildet. Von den Achsen wurde normal auf die Flächen Starrstäbe erzeugt, welche mittels Endgelenken (Federn) die Schraubverbindungen abbilden und die Nachgiebigkeit des Verbunds berücksichtigen. Die Randträger sind als gebogene Balkenstäbe modelliert. Der verschraubte Anschluss der Flächen an die Randträger findet über ein Verbindungsstück statt. Dies ist fest mit den Randträgern verbunden (verleimt).

GRENZZUSTAND DER TRAGFÄHIGKEIT

Werkstoffe:

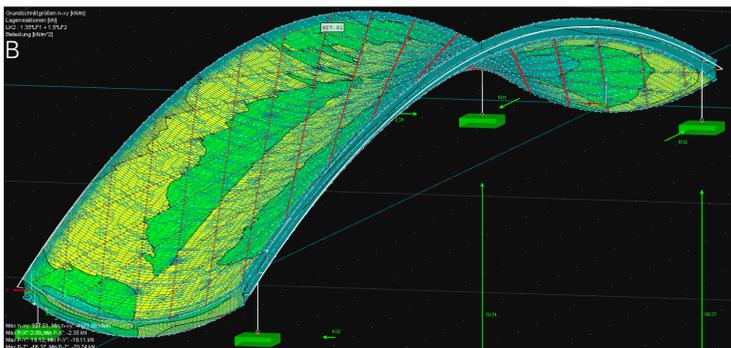
Randträger	BSH GL28
Schalen Flächen	Furnierschichtholz Ultralam X
Bretter	Nadelholz C24
Auflager	Baustahl St355
Nägel	Stahlnägel Durchmesser 4mm a`10cm Nachgiebigkeit der Verbindungsmittel lt. ÖN1995-1

Die Einhaltung der Grenzspannung in jedem Punkt muss gewährleistet sein. Für die Randträger wurde der Nachweis händisch geführt, während für die Flächen bereits der Ausnutzungsgrad nach den Bemessungswerten ermittelt wird. Die Platten-Verschraubung am Randbereich muss verdichtet werden, um die auftretenden Schubkräfte einleiten zu können. Auch der Randträger muss nach dem ersten Rechenmodell noch verstärkt werden, da dieser zu gering dimensioniert wurde.



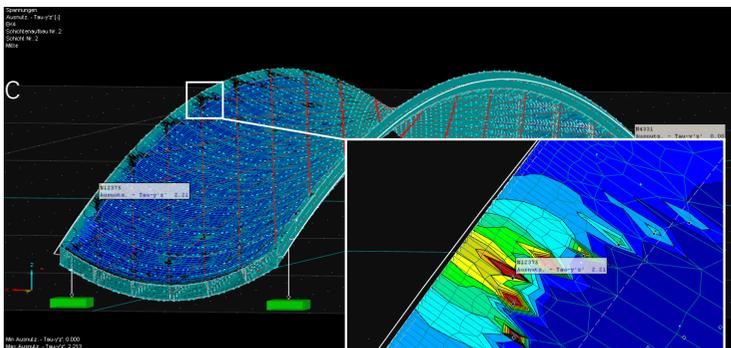
Anm.:
Auswertung der Fläche (Laminate)
auf Biegung M_{xy}

Ausnutzung < 100%



Anm.:
Auswertung der Fläche (Laminate)
auf Normalkraft (Druck/Zug) N_{xy}

Ausnutzung < 100%



Anm.:
Auswertung der Fläche (Laminate)
auf Schub T_{yz}

Ausnutzung an Punkten > 100%
Dichtere Verschraubung notwendig
um die Schubkräfte in die Randträger
einzuleiten

Spannungsverläufe in den Flächen:
A: Biegemoment M_{xy}
B: Normalkraft N_{xy}
C: Schubkraft T_{yz}

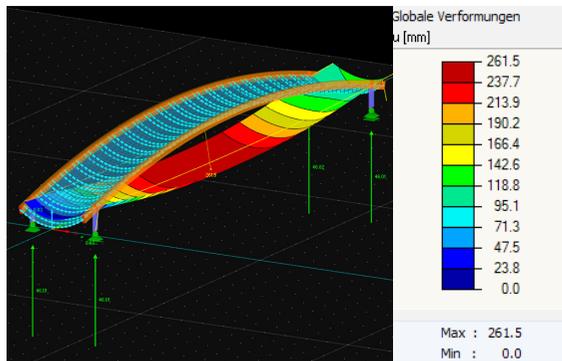
VARIANTENSTUDIE

Die für das erste Berechnungsmodell angenommenen Stichhöhen waren zu gering und führten zu einer Überschreitung der Gebrauchstauglichkeitskriterien für die zulässigen Verformungen.

Vier vereinfachte Berechnungsmodelle mit unterschiedlichen Stichhöhen wurden untersucht, um das Tragsystem zu optimieren. Neben den variierenden Stichhöhen wurden auch unterschiedliche Dimensionen für die Randträger und Schalenflächen-Ausbildungen untersucht.

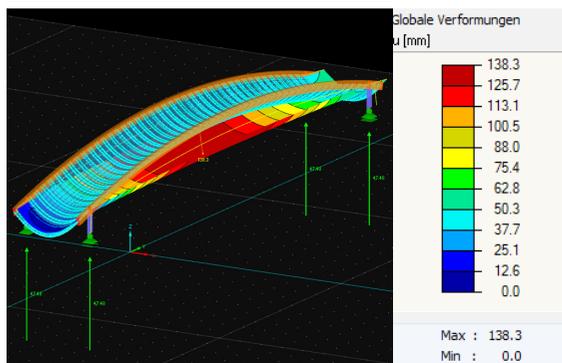
Die erste Variante bildet das ursprüngliche Modell ab, wobei es zu einer Verschlechterung der Durchbiegung kommt, da die mittlere Brettgitterlage keine Tragwirkung mehr, sondern lediglich den Schubverbund der Schalenflächen, übernimmt.

Anm.
Die angeführte Durchbiegung ist das Resultat der Überlagerung aller Einwirkungen. Berechnung lt. Önorm 1995-1 werden die Durchbiegungen separat ermittelt und rechnerisch überlagert.



VARIANTE 01

Querstich	1/6	0,50 m
Längsstich	1/14,3	1,75 m
Durchbiegung		261,5 mm

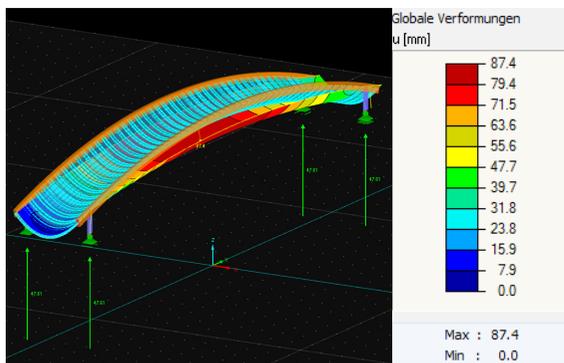


VARIANTE 02

Querstich	1/4	0,75 m
Längsstich	1/14,3	1,75 m
Durchbiegung		138,3 mm

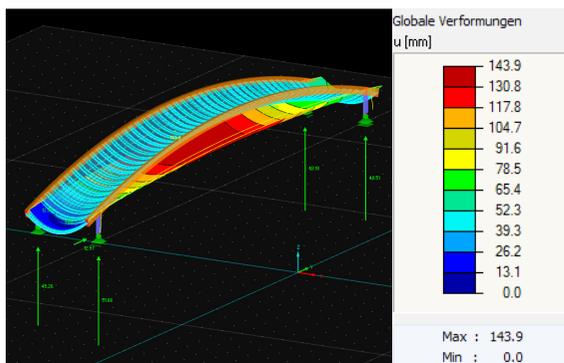
Die Varianten 1 zu 2, sowie die Varianten 3 zu 4 zeigen den Einfluss auf die Verformung durch die Veränderung der Querstichhöhen zueinander. Die Varianten 2 zu 3 zeigen zudem den veränderten Einfluss des Längsstichs auf die Durchbiegung.

Neben den Anforderungen der Tragfähigkeit und der Gebrauchstauglichkeit stellen sich auch die Fragen der Produktion (Produzierbarkeit) und des optischen Erscheinungsbilds. Zu starke Krümmungen sind in beiderlei Hinsicht nicht optimal. Der durch Proportionen ermittelte Querstich hat den größten Einfluss auf die Eleganz sowie die Frage der Herstellung- in Form biegen des Werkstoffs.
(siehe Abschnitt „Krümmungsanalyse“)



VARIANTE 03

Querstich	1/4	0,75 m
Längsstich	1/12,5	2,00 m
Durchbiegung		87,4 mm



VARIANTE 04

Querstich	1/5	0,60 m
Längsstich	1/12,5	2,00 m
Durchbiegung		143,9 mm

GRENZZUSTAND DER GEBRAUCHSTAUGLICHKEIT BZW. DURCHBIEGUNG NACH ÖNORM 1995-1

Die Gebrauchstauglichkeit eines Bauteils wird über die maximale Verformung (Durchbiegung) definiert. Lt. ÖNORM 1995-1 sind für Bauteile, bei denen die Durchbiegung eine untergeordnete Rolle spielt, größere Verformungen zulässig.

Die elastische Anfangsdurchbiegung $w_{inst,1}$, resultierend aus der Durchbiegung unter Eigengewicht, Schneelast und Anteilen der Windlast, muss kleiner sein als das zwei hundertstel der Spannweite.

$$w_{inst} = w_g + w_s + \Psi_0 * w_w$$

$$w_{inst} < L/200$$

Die gesamte Enddurchbiegung darf nicht größer sein als einhunderfünzigstel der Spannweite. Diese setzt sich aus der elastischen Anfangsdurchbiegung für quasi-ständige Einwirkungskombinationen $w_{inst,2}$ und der Durchbiegung auf Grund von Langzeiteinflüssen w_{creep} ($=1 + k_{def}$) weniger der Überhöhung des Bauteils w_c zusammen.

$$w_{net,fin} = [w_g + \Psi_2 * w_w] * (1 + k_{def}) - w_c$$

$$w_{net,fin} < L/150$$

Nationale Festlegung zu ÖNORM EN 1995-1-1:2015, Abschnitt 7.2 (2)

Die in [Tabelle NA.7.2](#) angegebenen Grenzwerte sind für beidseitig aufliegende Bauteile mit gerader Stabachse definiert. Bei gekrümmten oder geknickten Stabachsen ist die geradlinige Verbindung der Auflager als Bezugslinie zu wählen und die Durchbiegungen im rechten Winkel darauf zu bestimmen.

Tabelle NA.7.2 — Grenzwerte der Durchbiegungen von Bauteilen

Bauteil	Empfohlener Grenzwert der Durchbiegung	
	w_{inst} nicht umkehrbar (Schadensvermeidung)	$w_{net,fin}$ umkehrbar (Erscheinungsbild)
Durchbiegung infolge Einwirkungskombination		
Auswirkungen am Tragwerk		
Bauteile wie z. B. Decken, Teile von begehbaren Dächern und ähnlich genutzte Bauteile	//300	//250
Bauteile, bei denen die Durchbiegung eine untergeordnete Bedeutung hat, wie z. B. nicht oder nur zu Instandhaltungszwecken begehbare Dächer, Dach- und Deckenkonstruktionen	//200	//150
Es bedeutet:		
w_{inst} elastische Anfangsdurchbiegung des betrachteten Bauteils nach (7.2-E1), in mm		
$w_{net,fin}$ gesamte Enddurchbiegung (Enddurchbiegung abzüglich Überhöhung) des betrachteten Bauteils nach (NA.7.2), in mm		
l Bezugslänge des betrachteten Bauteils, in mm		

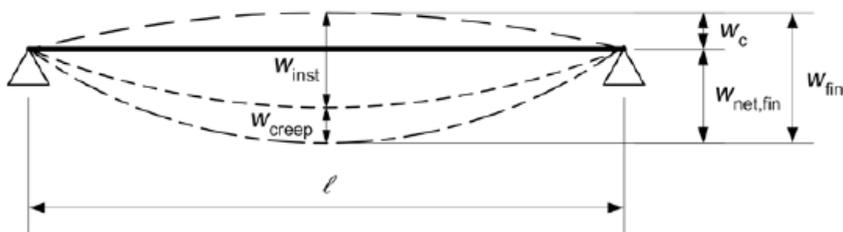


Abb.56: Grenzwerte der Durchbiegung & Anteile Durchbiegung nach ÖNORM 1995-1

GRENZUSTAND DER GEBRAUCHSTAUGLICHKEIT
BERECHNUNG DURCHBIEGUNG: FINALE VARIANTE 04*

*Anm.:

Schichtaufbau und
Randträger wurden
noch verändert.

w_g	Durchbiegung	Eigengewicht	60,6	mm
w_s		Schnee	47,5	mm
w_w		Wind	13,5	mm
w_c	Überhöhung des Bauteils		0,0	mm
k_{def}	Verformungsbeiwert für Furnierschichtholz, Nutzungsklasse 1/2/3:		0,8/1,0/2,0	
Ψ_0	Kombinationsbeiwert Schnee u.1000/Wind		0,5 / 0,6	
Ψ_2	Kombinationsbeiwert Schnee u.1000/Wind		0 / 0	
L	Spannweite		2500	cm

ELASTISCHE ANFANGSDURCHBIEGUNG

$$w_{inst} = w_g + w_s + \Psi_0 * w_w$$

$$w_{inst} = 60,6 + 47,5 + 0,6 * 13,5$$

$$w_{inst} = \underline{116,2} < L/200 = \underline{125 \text{ mm}}$$



GESAMTE ENDDURCHBIEGUNG

$$w_{net,fin} = [w_g + \Psi_2 * w_w] * (1 + k_{def}) - w_c$$

$$w_{net,fin} = [60,6 + 0 * 13,5] * (1 + 1,0) - 0,0$$

$$w_{net,fin} = \underline{121,2} < L/150 = \underline{167 \text{ mm}}$$



GRENZUSTAND DER TRAGFÄHIGKEIT

BERECHNUNG DER SPANNUNGSNACHWEISE DES RANDTRÄGERS

$$f_d = \frac{f_k}{\gamma_M} * k_{mod}$$

$$\sigma_{B,d} = \frac{M_d}{W}$$

$$\sigma_{t,0,d} = \frac{N_d}{A}$$

$$\sigma_d < f_d$$

$$\frac{\sum \sigma_d}{\sum f_d} < 1$$

$f_{B,d}$	= Biegefestigkeit,	Bemessungswert
f_{mk}	= Biegefestigkeit,	charakteristisch
$f_{t,0,d}$	= Zugfestigkeit,	Bemessungswert
$f_{t,0,k}$	= Zugfestigkeit,	charakteristisch
γ_M	= Teilsicherheitsbeiwert für Baustoffe (BSH 1,25)	
k_{mod}	= Modifikationsbeiwert Holz (Vorbemessung 0,8)	
$\sigma_{x,d}$	= Biegespannung in x,	Bemessungswert
M_d	= Biegemoment,	Bemessungswert
N_d	= Normalkraft,	Bemessungswert
W	= Widerstandsmoment	
A	= Fläche	

RANDTRÄGER:

BSH GL28	14/36 cm
f_{mk}	2,4 kN/cm ²
$f_{t,0,k}$	1,8 kN/cm ²
$W = 14 * 36^2 / 6 =$	3024 cm ³
$A = 14 * 36 =$	504 cm ²

SPANNUNGEN:

Bemessungswerte

$M_{y,d}$	2756 kNm
N_d = Zug	297 kN

Biegebemessung:

$$\sigma_{B,d} = \frac{M_d}{W} = \frac{2756 \text{ [kNm]}}{3024 \text{ [cm}^3\text{]}} = 0,91 \text{ [kN/cm}^2\text{]}$$

$$0,91 \text{ [kN/cm}^2\text{]} < 1,79 \text{ [kN/cm}^2\text{]}$$

$$f_{B,d} = \frac{f_{mk}}{\gamma_M} * k_{mod} = \frac{2,4}{1,25} * 0,8 = 1,79 \text{ [kN/cm}^2\text{]}$$

Normalkraftbemessung:

$$\sigma_{t,0,d} = \frac{N_d}{A} = \frac{297 \text{ [kN]}}{504 \text{ [cm}^2\text{]}} = 0,59 \text{ [kN/cm}^2\text{]}$$

$$0,59 \text{ [kN/cm}^2\text{]} < 1,25 \text{ [kN/cm}^2\text{]}$$

$$f_{t,d} = \frac{f_{t,0,k}}{\gamma_M} * k_{mod} = \frac{1,8}{1,25} * 0,8 = 1,25 \text{ [kN/cm}^2\text{]}$$

Überlagerung:

$$\sigma_{zul} > \frac{N_d}{A} + \frac{M_d}{W} \quad \text{im Holzbau:} \quad \frac{\sigma_{t,0,d}}{f_{t,d}} + \frac{\sigma_{B,d}}{f_{B,d}} < 1,00 \quad \rightarrow \quad \frac{0,59}{1,25} + \frac{0,91}{1,79} = 0,98 < 1,00$$

KRÜMMUNGSANALYSE UND TESSELIERUNG

KRÜMMUNGSANALYSE

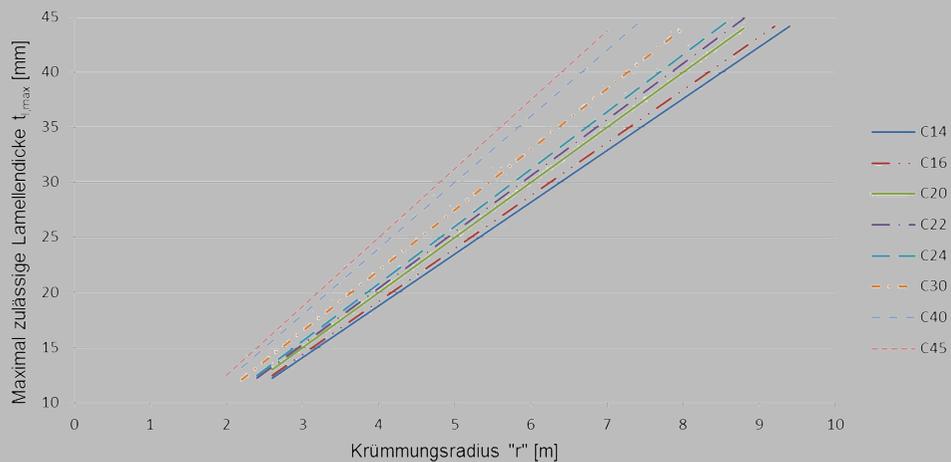
Durch die Steigerung der Stichhöhen verändert sich nicht nur die Steifigkeit des Systems, sondern auch die Krümmung der Furnierschichtplatten. Der maßgebende Krümmungsradius sowohl für die Tragfähigkeit als auch für die Produzierbarkeit ist jener in Querrichtung.

Je kleiner der Radius ausfällt, desto dünner muss das Material werden. Empirische Versuchsreihen haben eine Auswertung ergeben, in der der Krümmungsradius in Bezug zur Materialdicke und der Holzgüte gebracht wurde.

„Es ist zu erkennen, dass eine höhere Holzfestigkeitsklasse kleinere Krümmungsradien zulässt als niedrige, da die Biegezugfestigkeit schneller ansteigt als der E-Modul. Das bedeutet, dass zur Herstellung kleiner Krümmungsradien hohe Festigkeitsklassen erforderlich sind.“^[101]

Anm.:
Tabelle spiegelt die normativen Regelungen zur Krümmung von Holzbauteilen wieder. z.B. Zur Produktion von Brettsper Holz

Abb.57: Zulässige Lamellendicken für verschiedene Krümmungsradien und Festigkeitsklassen nach [E DIN EN 16351:2011-12]

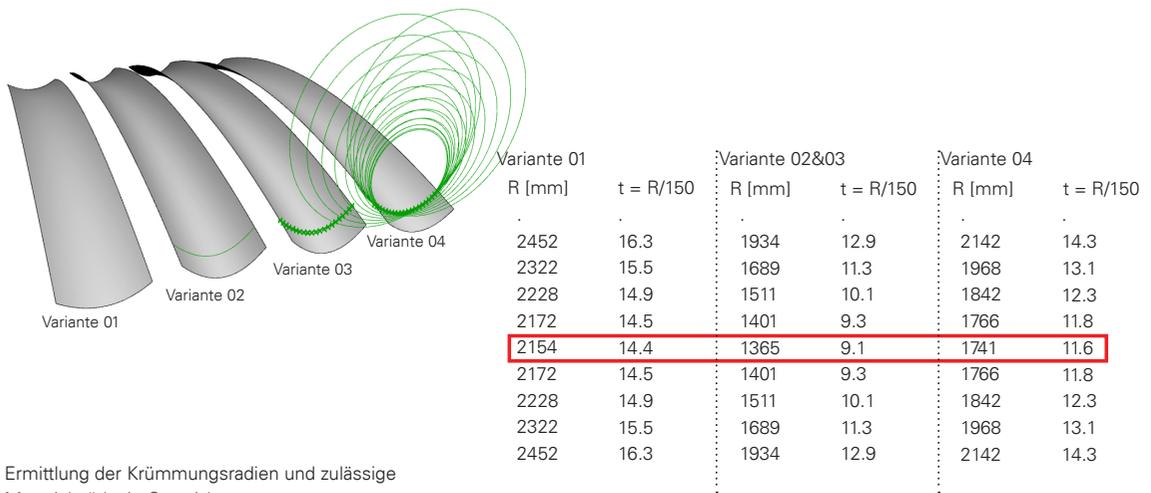


Das für die Finite-Elemente-Berechnung herangezogene Produkt (Ultralam LVL X) ist für kaltbiegen und den Einsatz als tragendes beziehungsweise aussteifendes Bauteil geeignet. Rund 20% der Furnierschichten laufen quer zur Haupttragrichtung. Daher wurde der Ansatz der DIN EN 16531 weiterverfolgt und der minimale Biegeradius auf $150 \cdot t$ festgelegt da folgende Bedingung eingehalten wurde:

$$t \leq 13 + 0,4 \cdot \left[\frac{R}{t} - 150 \right]$$

R... Biegeradius [mm]
t... Lamellendicke [mm]

Die Elastizität lässt sich nur bedingt steuern, indem weichere Schichten eingearbeitet werden, um die Verformungseigenschaften zu begünstigen. Das ist das Konstruktionsprinzip des Biegeperholzes. Jedoch werden durch diese Maßnahmen die Festigkeitseigenschaften reduziert.



Bei minimalem Krümmungsradius und maximaler Lamellenstärke wird das Holz bis über den zulässigen Ausnutzungsgrad beansprucht (Siehe Abbildung darunter). Zudem stellen sich Kräfte ein die das Holz in die ursprüngliche Form zurückbiegen wollen.

Nicht nur aus statischen sondern auch aus fertigungstechnischen Gründen wäre es sinnvoll, die Furnierplatten bereits im gebogenen oder zumindest im vorgebogenen Zustand zu verarbeiten. Bei Serienfertigung kann dies auch wirtschaftlich begründet werden, da die zu erzeugende Schalenform (Lehrgerüst) zu einem verschwindend geringen Kostenfaktor werden kann.^{[102][103]}

Abb.58: Vorhandene Spannungen bei maximaler Lamellenstärke und minimalem Krümmungsradius

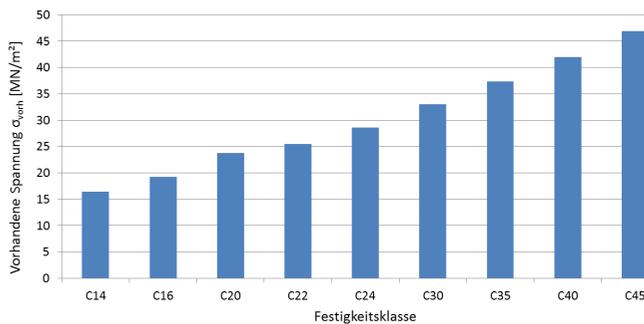
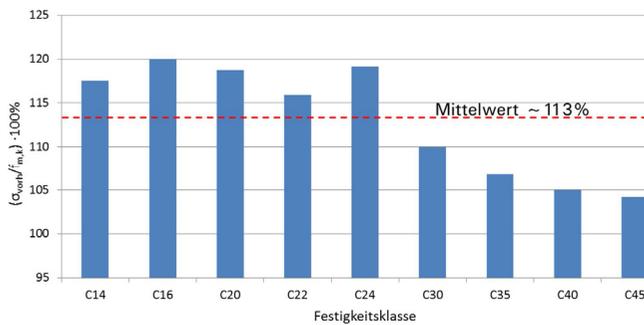


Abb.59: Ausnutzungsgrad bei maximaler Lamellenstärke und minimalem Krümmungsradius



102 Vgl. Aondio, 2014, S68f.
103 Vgl. Halasz, 1974, S368f.

TESSELIERUNG UND ABWICKLUNG DER FLÄCHEN

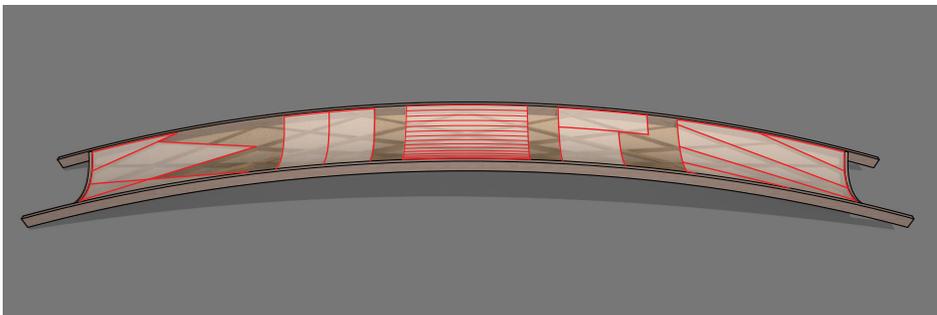
Unter Tesselierung versteht man eine Technik, die komplexe Polygone in einfache Geometrien zerlegt.

Verwendet wird diese Technik vor allem bei der Herstellung komplexer Geometrien für die visuelle Darstellung (Renderings). Am häufigsten werden Dreiecke und in manchen Fällen auch Vierecke verwendet, da diese planar und einfach zu handhaben sind.^[104]

Als abwickelbare Flächen werden zweidimensionale Flächen bezeichnet, welche sich ohne Stauchungen und Dehnungen in die euklidische Ebene transformieren lassen.^[105]

Im Fall der vorliegenden HP-Schale handelt es sich um eine doppeltgekrümmte Fläche, welche aus planaren Platten erzeugt werden muss. Trotz des Umstandes, dass es sich um eine Regelfläche handelt, ist diese dennoch nicht abwickelbar.

Mit der Absicht die Durchführbarkeit der Abwicklung, den entstehenden Materialverbrauch und Bearbeitungsaufwand sowie den Fertigungsprozess zu untersuchen, wurden verschiedene Arten der Tesselierung angewandt.



Holzschale, Suche nach der besten Art der Abwicklung einer HP-Fläche

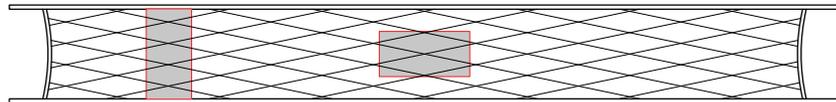
104 Vgl. Sekic, 2002, auf:
<http://www-lehre.inf.uos.de/cg2/material/20021218/Tesselation.htm>
[29.09.2017]

105 Vgl. https://de.wikipedia.org/wiki/Abwickelbare_Fl%C3%A4che
[29.09.2017]

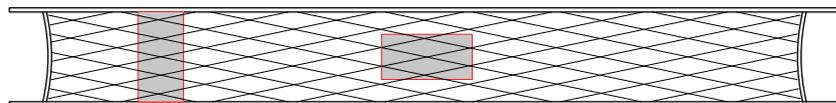
Vorerst wurde untersucht welchen Einfluss ein dichteres Bretter-Gitter auf den Materialverbrauch und die damit steigende Möglichkeit der Befestigung der Platten hat. Der Abstand variiert zwischen 50 und 70 cm. Zudem sind in der unten angeführten Grafik auch grau-rote Rechtecke eingefügt, um die maximalen Abmessungen gängiger Furnierplatten (circa 1,5m auf 3,0m) darzustellen.

Die Ausrichtung der Bretter ergibt sich aus den gewählten Stichhöhen, also aus der resultierenden Form und kann daher nicht manuell verändert werden. Zudem sind die Bretter gerade, jedoch verdrillt. Ihre Schmalseiten sind dabei immer normal zur Schalfäche.

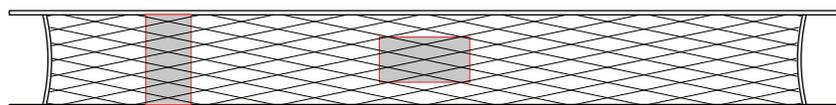
Bretterabstand 70 cm
 Holzverbrauch 0,95m³
 Σ Brettlänge 216m



Bretterabstand 60 cm
 Holzverbrauch 1,12m³
 Σ Brettlänge 255m



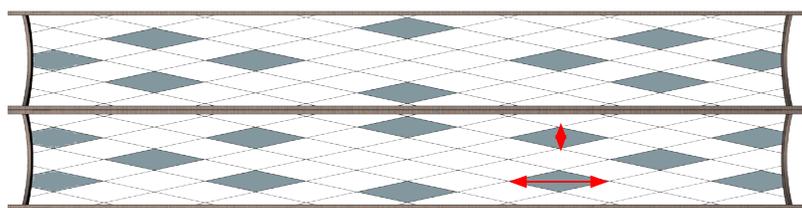
Bretterabstand 50 cm
 Holzverbrauch 1,34m³
 Σ Brettlänge 305m



Draufischt M1_250, Bretter-Gitter Abstandsvariationen

Ein entscheidender Faktor für die Dichte des Gitters ist die Möglichkeit Fensterflächen in die Struktur zu integrieren. Dabei sollte darauf geachtet werden, dass die Perforation nicht zu groß wird und die Schal-Fläche nicht komplett unterbrochen wird. Statisch stark beanspruchte Bereiche sollten frei von Fensteröffnungen sein oder mittels Verstärkungen kompensiert werden. Die größten Spannungen treten nahe der Randträger oder in der Schalenmitte auf.

Die, auf dieser Seite befindende, Grafik soll unterschiedliche Variationen der möglichen Positionen von Fensteröffnungen veranschaulichen. Je dichter die Bretterstruktur, desto größer die Variantenbildung.



Bretterabstand 70 cm

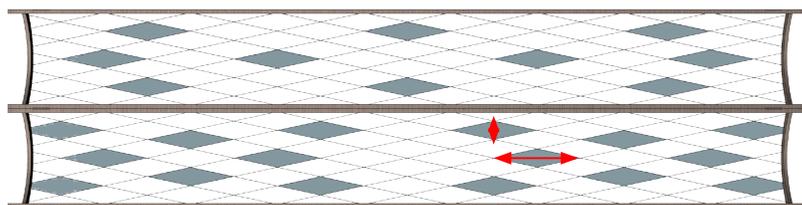
überschaubare Variantenbildung

Fensterabmessungen

A= 1,2 m²

b= 0,7 m

l= 3,4 m



Bretterabstand 60 cm

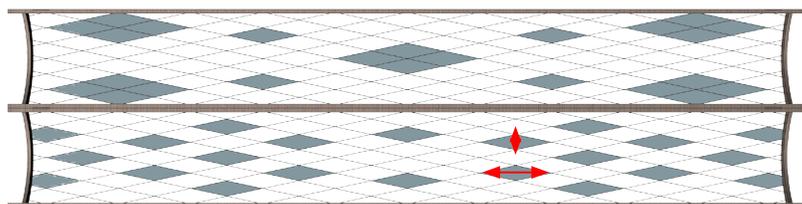
Lage der Öffnungen besser steuerbar

Fensterabmessungen

A= 0,90 m²

b= 0,6 m

l= 2,9 m



Bretterabstand 50 cm

Größe und Lage sehr variabel

Fensterabmessungen

A= 0,6 m²

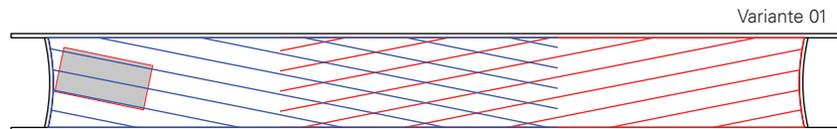
b= 0,5 m

l= 2,4 m

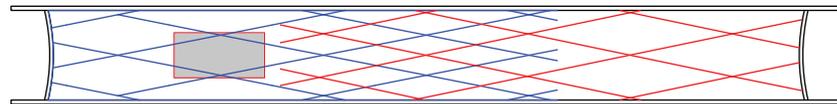
Draufsicht M1_250, mögliche Ausbildung von Fensteröffnungen

Aus konstruktiver Sicht ist es notwendig die Schal-Flächen doppelt zu beplanken, um die Übertragung der auftretenden Druckkräfte nicht nur über die Stirnseiten der Platten zu gewährleisten. Zum einen ist es ungewiss, ob die Platten derartig passgenau beschnitten und in Form gebracht werden können und zum anderen ist Holz ein lebendiger und arbeitender Werkstoff (quellen und schwinden). Diese Toleranzen sollten möglichst innerhalb der Konstruktion kompensiert werden. Die jeweiligen Stöße der Plattenschichten (zumindest 2) sollten daher nicht an der selben Stelle liegen.

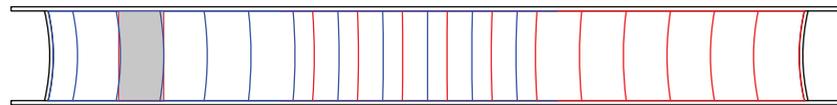
Anm.:
links - erste Schicht
mitte - Überlagerung
rechts - zweite Schicht



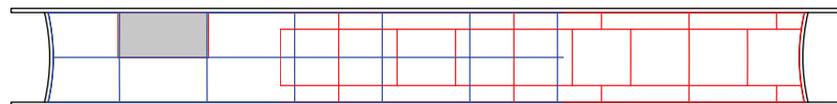
Variante 02



Variante 03



Variante 04



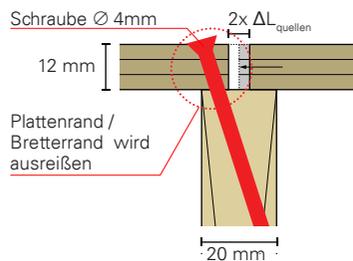
Anm.:
Bretter Schalung
links - erste Schicht
mitte - zweite Schicht
rechts - dritte Schicht

Variante 05



Draufischt M1_250, Tesselierungsvarianten

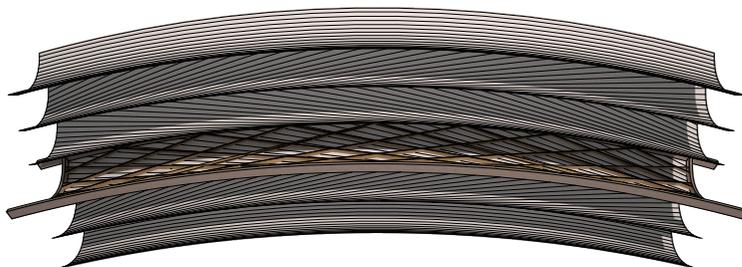
Die zweite konstruktive Überlegung für die Tesselierung war es, dass keine Plattenteilung auf den Brettachsen stattfinden kann. Eine zwei-zentimeter starke Schmalseite eines Bretts bietet nicht genügend Auflagerfläche, um dort einen Stoß sowie die Befestigung von zwei Platten zu gewährleisten.



Problematik Verbindungsdetail M1_2

Außerdem wurde die Herstellung der Fläche aus einzelnen Brettern abgelehnt. Die Ausführung müsste dreischichtig erfolgen, was zu einem erhöhten Materialaufwand führen würde.

Obwohl diese Variante auch den Vorteil hätte, der Problematik der Stauchung/Dehnung, zur Herstellung doppelt gekrümmter Flächen, weitestgehend aus dem Weg zu gehen, da diese über die Vielzahl der Fugen kompensiert werden würde. Jedoch gestaltet sich die Fertigung wesentlich arbeitsaufwändiger und bedingt mehr Material, sowohl Holz als auch Verbindungsmittel.



Anm.:
Schalflächen aus Brettern gefertigt

2 Seiten aus je 3 Lagen 20mm starken Brettern

Der Materialverbrauch steigt um 53% gegenüber der Furnierplatten Variante von 7,5m³ auf 11,5m³

Überlegung die Holzschale aus Brettern zu fertigen

Mittels Arbeitsmodellen im Maßstab 1:25 wurden die Tesselierungsvarianten in der Praxis getestet. Die circa einen Meter langen Modelle dienten vor allem dazu, die erzeugten Flächenabwicklungen auf ihre Genauigkeit zu prüfen.

Unerwarteterweise erwies sich die anfangs favorisierte Variante 01, welche aus den Ausschnitten der geraden Bretterachsen besteht, aufgrund der ungenauen Abwicklung als praxisuntauglich. Variante 02 wurde ebenfalls durch die Bretterachsen tesseliert und besteht aus großen Rautenförmigen Elementen. Diese weisen jedoch die gleiche Problematik wie Variante 01 auf, nämlich das nur schwer machbare Stoßen und Befestigen der Platten an der Schmalseite der Bretter. (siehe Abbildung 80.) Zudem würden rautenförmige Ausschnitte aus rechteckigen Plattenwerkstoffen zu erheblichen Verschnitten führen.

Varianten 03 & 04 ähneln sich sehr, wobei die Variante 03 bevorzugt wird, da diese die gesamte Breite mit nur einer Platte überspannt. Dies kann zu einer verbesserten Performance bei auftretenden Querzug und Schubkraftübertragung an den Rändern führen.

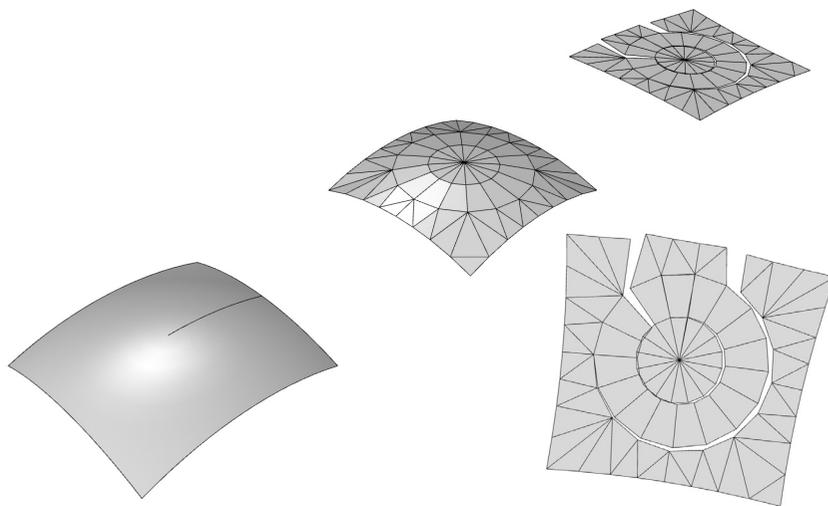
Variante 04 ist für die Anwendung etwaig breiteren Elementen angedacht, wenn die standardisierten Plattengrößen nicht mehr ausreichen.



Foto Arbeitsmodelle M 1_25, Auflager, Tesselierungs- und Abwicklungsstudie

Die Erzeugung von NAWI-Flächen aus Holz bedeutet mit Stauchungen und Dehnungen des Werkstoffes umzugehen. Dies erfordert vom Material eine gewisses Maß an Elastizität. Zudem erzeugt die Verformung, wie im vorherigen Kapitel „Krümmungsanalyse“ erwähnt, Spannungen innerhalb des Werkstücks, noch vor einer möglichen Belastung. Da es für biachsig gekrümmte Flächen keine Möglichkeit der Abwicklung gibt, kann diese nur angenähert werden. Mit dem 3D Zeichenprogramm Rhinoceros gibt es verschiedene Methoden diese Annäherung durchzuführen. Diese wurden händisch überprüft um die exakteste Methode zu ermitteln.

Die einzusetzende Holzwerkstoffplatte muss die angenäherte Abwicklung, der abgezielten Fläche abbilden und kleine Intoleranzen mit etwaigen Stauchungen und Dehnungen beim Einbau kompensieren. Diese müssen sich im Rahmen der von dem Werkstoff befindlichen Grenzen halten.



Anm.:
Veranschaulichung der Auftretenden Stauchung/Dehnung beim Versuch für die Abwicklung doppelt gekrümmter Fläche.

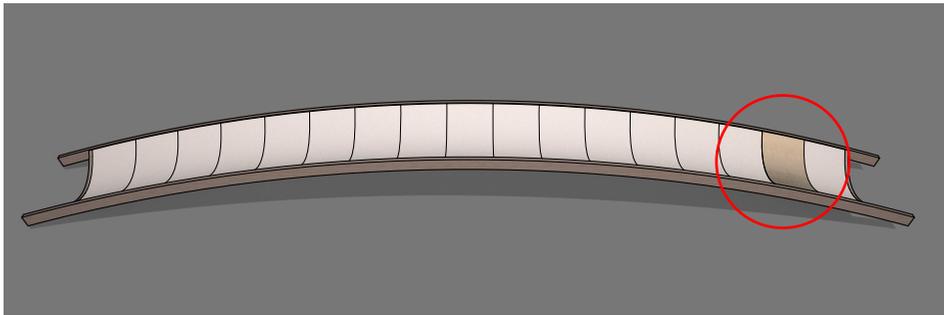
Eine Kugelkalotte mit einer Grundfläche von 1x1m und einem Radius von 1,5m wurde als Probekörper gewählt. Zuerst wurde die gleichmäßig gekrümmte Fläche mithilfe von Polygonen angenähert. Die in Dreiecken aufgelöste Fläche kann nun abgewickelt werden, wobei diese sich in manchen Bereichen entlang der Dreieckskanten auflöst.

Tessellierung einer biachsig gekrümmten Fläche und die Annäherung einer Abwicklung

ABWICKLUNG VARIANTE 04

Zuerst wurden die Flächen in einem 1,5 m Breiten Raster geteilt, wobei sich die obere und untere Lage jeweils um die Hälfte überlappen, um die Kraftübertragung mittels Schrauben und Nägel gewährleisten zu können.

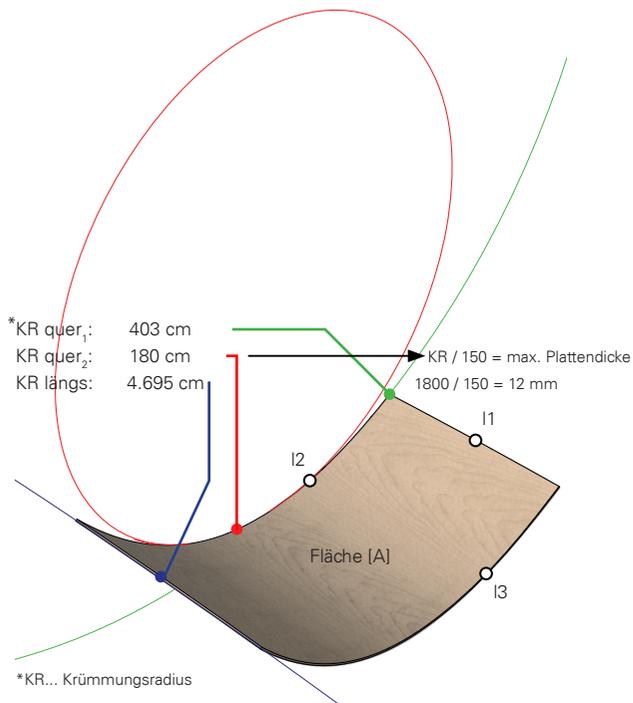
Probekörper,
12mm starke
Furnierschichtplatte
Abmessungen: 3,3 x
1,5 Meter



Eine 12 mm Starke, 1,5 m Breite und circa 3,3 m Lange Furnierschichtplatte wurde ausgewählt und als Probekörper genauer untersucht.

Einerseits um die Auswirkung der Verformung zu analysieren. Hierzu wurden die die Längen und Flächen der beiden Seiten (Ober und Unterseite der Platte), beziehungsweise deren Änderung vermessen. Außerdem die auftretenden Krümmungsradien um das Ausmaß der biachsialen Krümmung festzustellen. Dabei lies sich eine nur marginale Krümmung entlang der Breitseite feststellen. Aufgrund des parabelförmigen Stichts ist die Verformung und damit einhergehend auch die Beanspruchung in der Mitte des Trägers am höchsten.

Untersuchungsparameter Probekörper



	A [cm ²]	l ₁ [cm]	l ₂ [cm]	l ₃ [cm]
Unten	49.237,7	150	331,3	330,8
Oben	49.004,6	150	329,6	329,2
Δ	233,1	0	0,7	1,6
Δ [‰]	4,7 ‰	0	2,1 ‰	4,8 ‰

Untersuchung Stauchung / Dehnung am Probekörper

Krümmungsanalyse

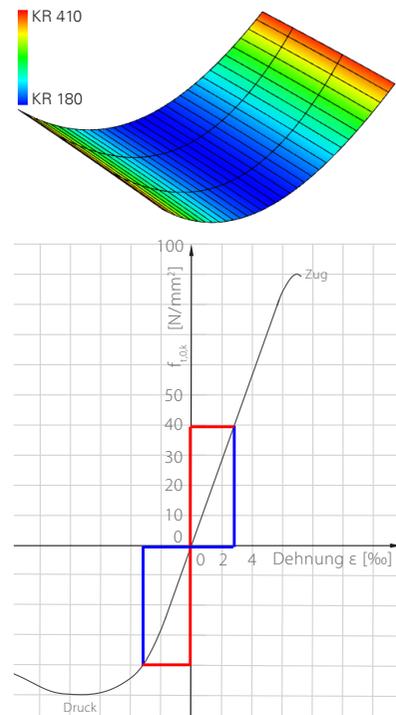


Abb.60: Arbeitslinie-Holz
 Verteilung der Längenänderung bei
 gleichmäßiger Beanspruchung

Anm.:
 Angenommen die Platte biegt sich um seine
 Nullachse. Die resultierende Verformung bei
 gleicher Belastung ist innerhalb der Druckzone
 größer.

Andererseits wurden die beiden Seiten des Probekörpers mittels 3 unterschiedlichen Methoden einer Abwicklungsannäherung unterzogen und deren Resultate mit dem gekrümmten Original verglichen.

Obwohl es sich bei diesem Beispiel um nur eine sehr schwach zweiachsig gekrümmte Fläche handelt, sind alle die Ergebnisse doch sehr unterschiedlich. Die Methode des „flatten“ erwies sich dabei um ungenauesten, sowohl in der Flächendarstellung wie auch das Abbilden der Seitenlängen. Das Tessellieren in kleinere Flächen „polymeshes“ weist zwar die genaueste Randabwicklung auf, jedoch überlagern sich einzelne Teilflächen und verfälschen somit das Ergebnis.

Die Methode des „unrollen“, in der deutschen Version von Rhinoceros auch „abwickeln“ genannt, weist hierbei sehr genaue Resultate auf, welche zu 99,5% auch mit dem gekrümmten Original übereinstimmen.

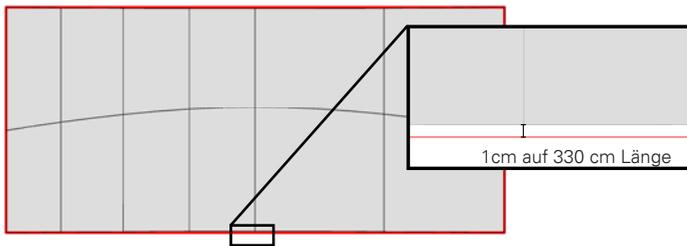
Zudem können die Flächen übereinandergelegt werden um das Kantenschnittbild zu erzeugen.

In diesem Fall sind an den Längskanten ein nur mit einem 1cm hohen Bogenstich zu entfernen um den fugenlosen Plattenstoß zu gewährleisten. Eventuell kann dieser Bearbeitungsschritt den Platten, außer der untersten Schicht- der Sichte Ebene, erspart bleiben, da es sich hierbei nur um einen optischen Mangel handelt.

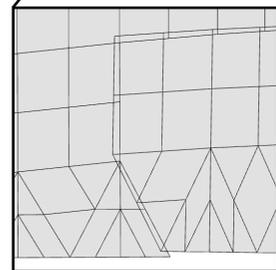
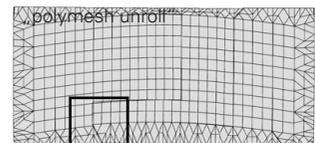
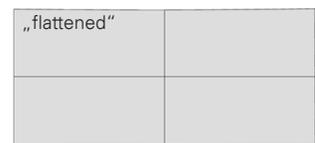
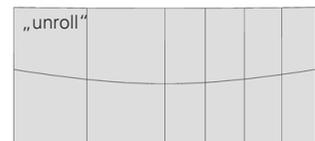
Fläche Oben	A [cm ²]	ΔA	l_1 [cm]	l_2 [cm]	l_3 [cm]
Original	49.004,6		150	329,6	329,2
„unrolled“	49.002,1	-2,5	150	329,4	329,4
„flattened“	48.888,8	-115,8	150	328,9	328,4
„polymesh ur“	48.993,6	-11,0	149,9	329,6	329,1

Fläche Unten	A [cm ²]	ΔA	l_1 [cm]	l_2 [cm]	l_3 [cm]
Original	49.237,7		150	331,3	330,8
„unrolled“	49.235,2	-2,5	150	331,1	331,1
„flattened“	48.980,5	-257,2	150	329,6	329,1
„polymesh ur“	49.226,7	-11,0	150,1	331,2	330,8

Vergleich der unterschiedlichen Abwicklungsmethoden



Randausbildung, Abweichung der Abwicklung zur Standard-Platte



ENTWURFSDARSTELLUNGEN

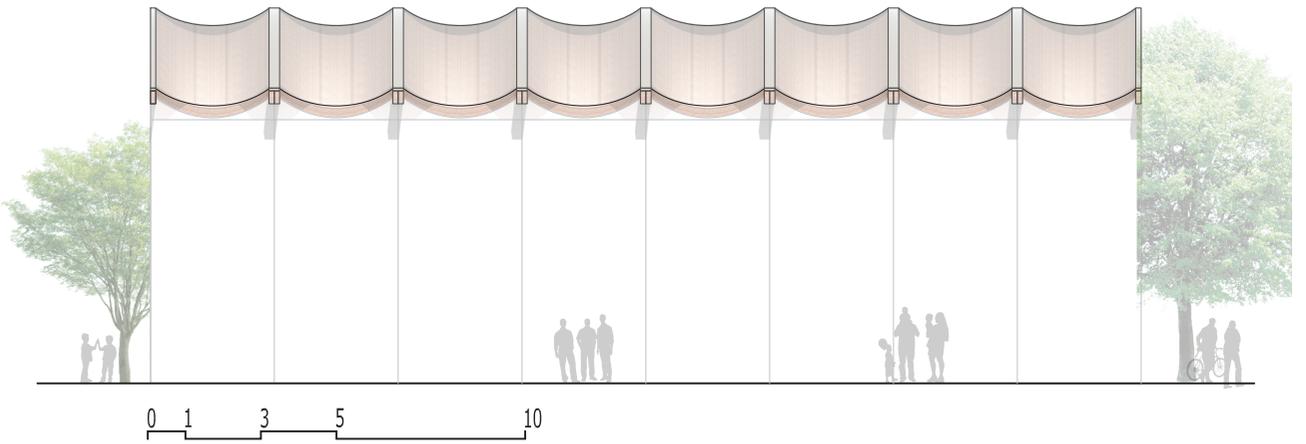


Abb.61: Fotomontage,
Vgl. Titelbild des
Essai sur l'Architecture
von Marc-Antoine Laugier

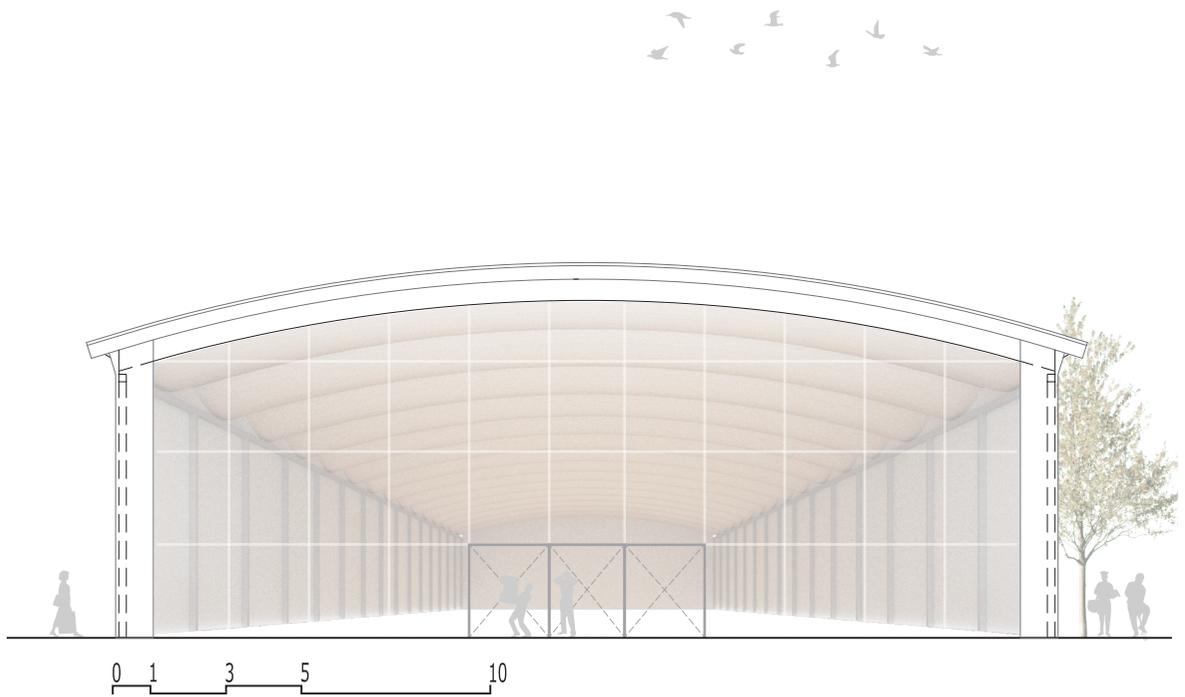
Für die planliche Darstellung der Ansichten und Schnitte wurde ein vereinfachter Hallenentwurf angenommen. Auf die detaillierte Ausführung der eingespannten Stützen und der Verglasung wurde der einfacheren Lesbarkeit halber verzichtet.

Für die Details wurden zum Teil Explosionszeichnungen oder axonometrische und planare Ansichten angefertigt für eine bessere Lesbarkeit.

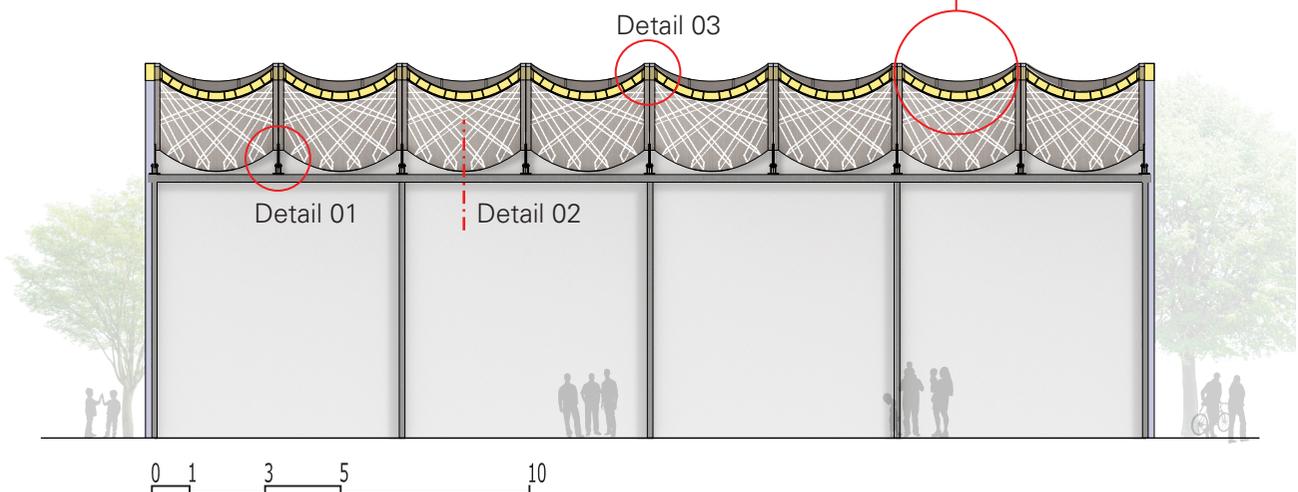
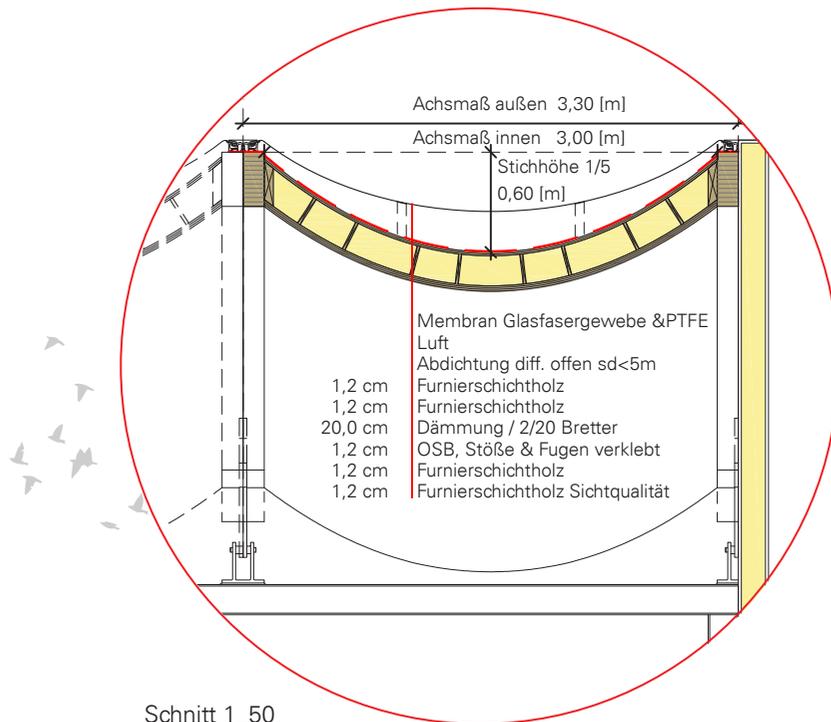
Die Schaubilder basieren auf Fotos oder Darstellungen anderer Projekte. Diese Arbeit handelt von der Entwicklung eines Holzschalen-Systems mit vielfältigen Anwendungsmöglichkeiten. Da kein konkreter Entwurf angestrebt wurde, welcher explizit veranschaulicht werden kann, sind Referenzprojekte mit gewissen thematischen Analogien ausgewählt worden, um diverse Einsatzoptionen darzustellen.

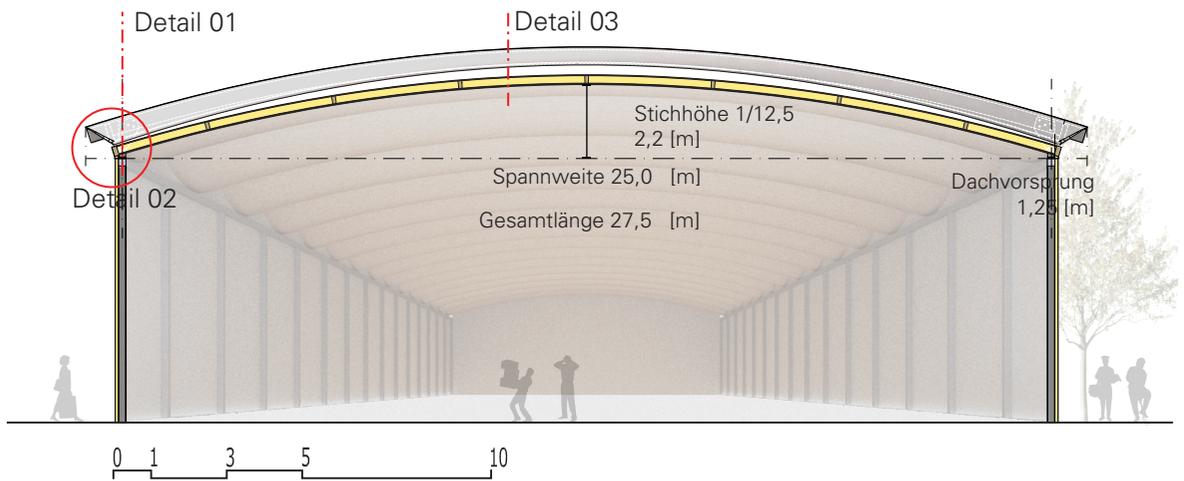


Ansicht Quer M1_200



Ansicht Längs M1_200

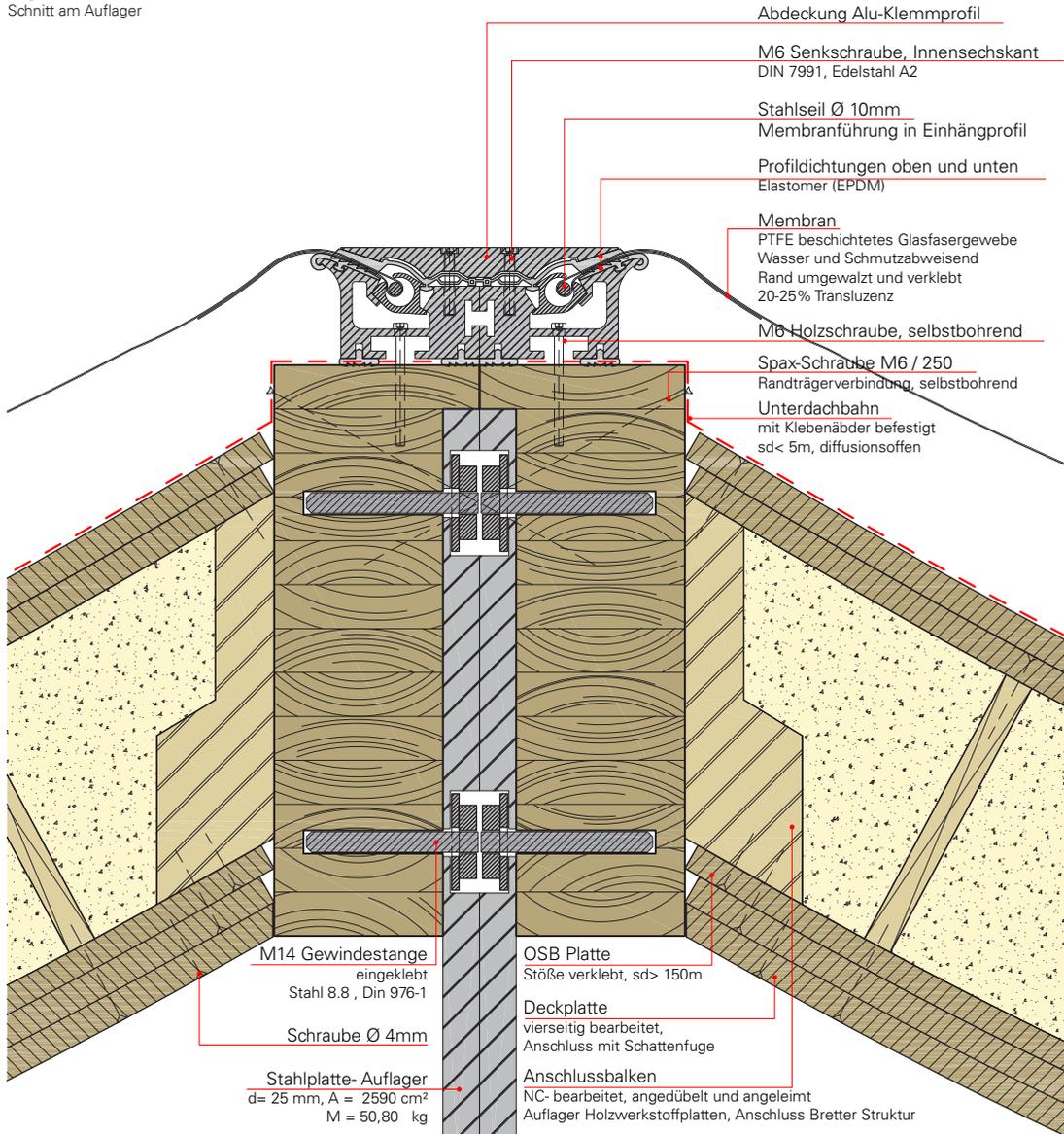




Schnitt Längs M1_200



Lage Detail
Schnitt am Auflager

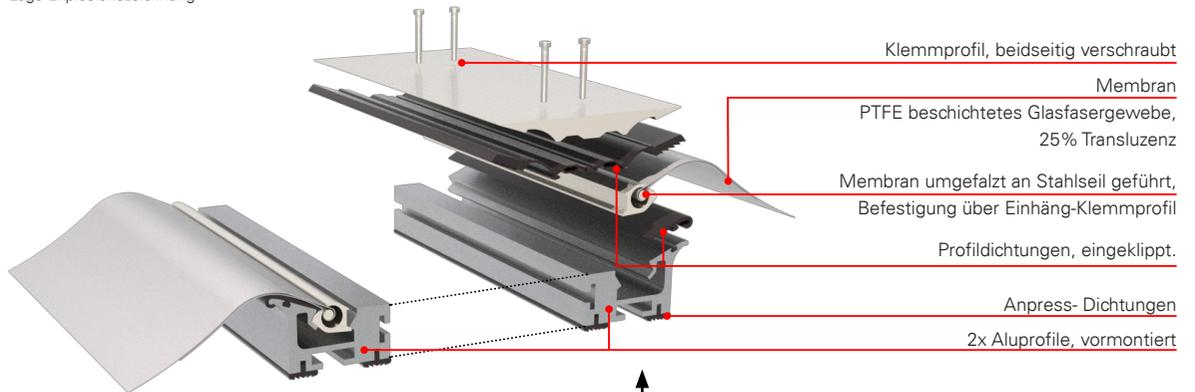


Detail 01, M1_5

Auflager, Plattenanschluss, Membranbefestigung



Lage Explosionszeichnung



Klemmprofil, beidseitig verschraubt

Membran

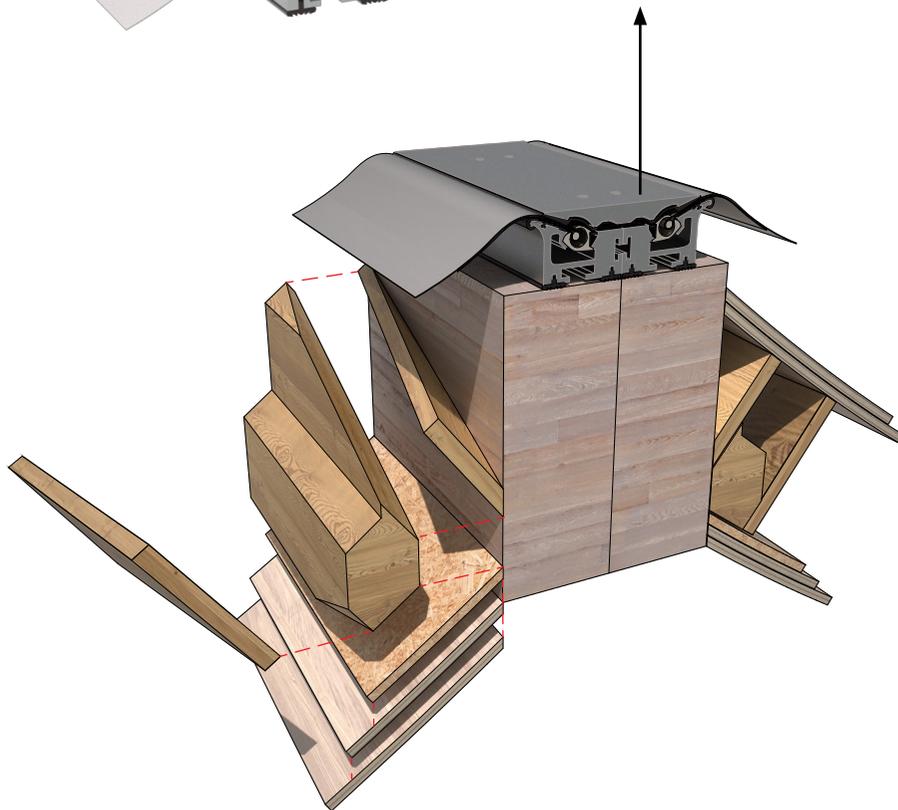
PTFE beschichtetes Glasfasergewebe,
25% Transluzenz

Membran umgefaltet an Stahlseil geführt,
Befestigung über Einhäng-Klemmprofil

Profildichtungen, eingeklippt.

Anpress-Dichtungen

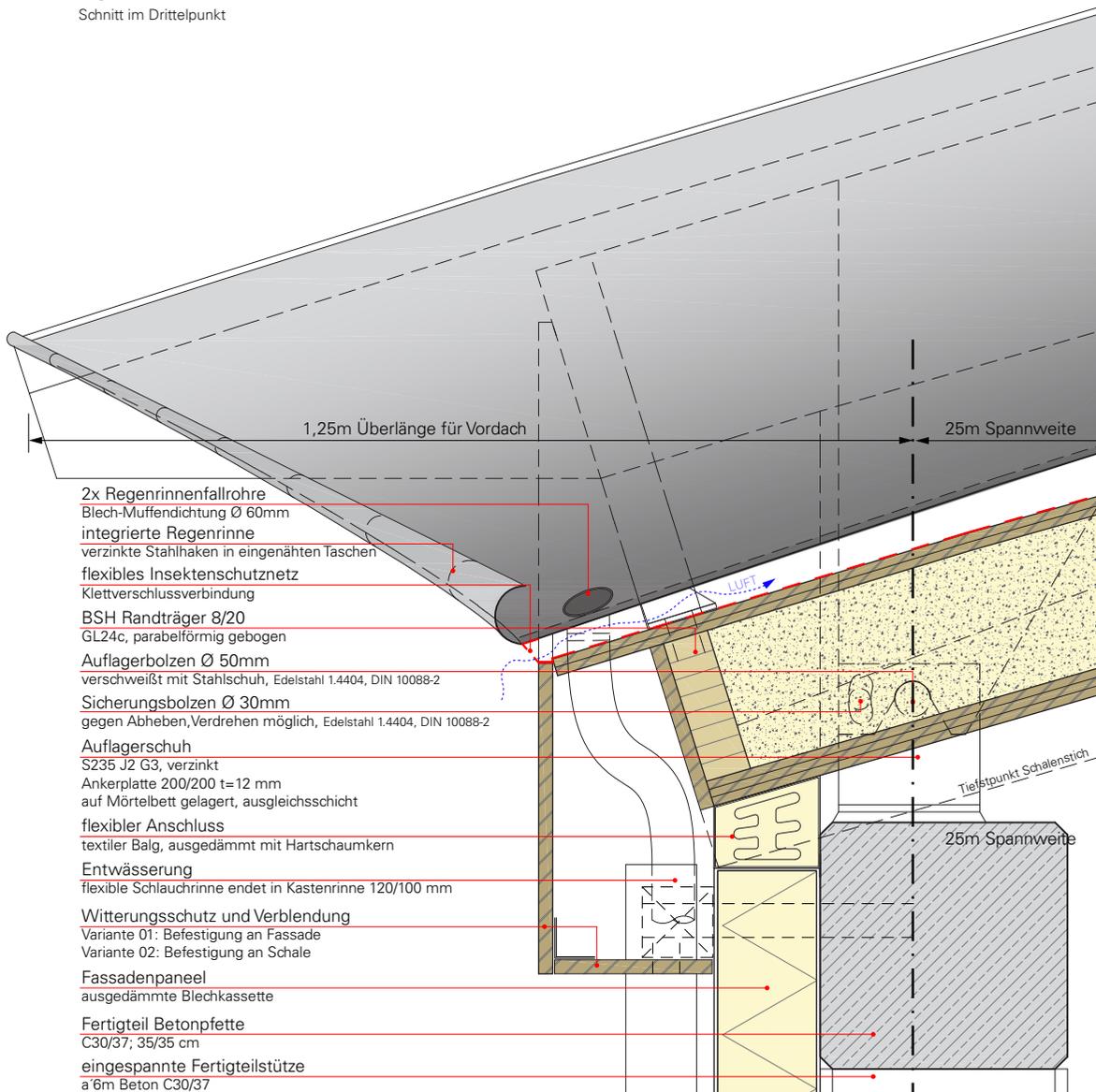
2x Aluprofile, vormontiert



Explosionszeichnungen Membranbefestigung und Randanschluss

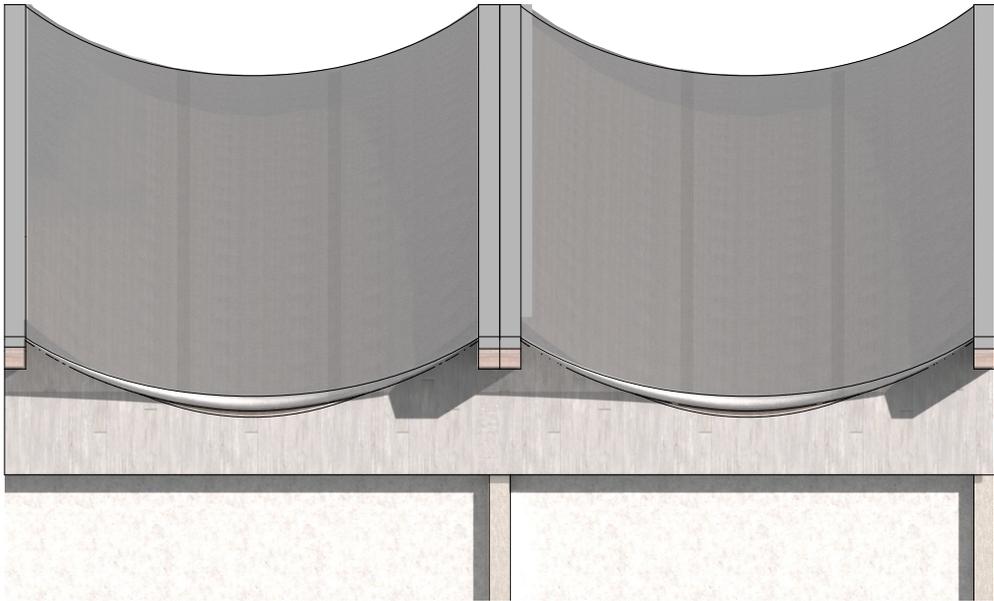


Lage Detail
Schnitt im Drittelpunkt

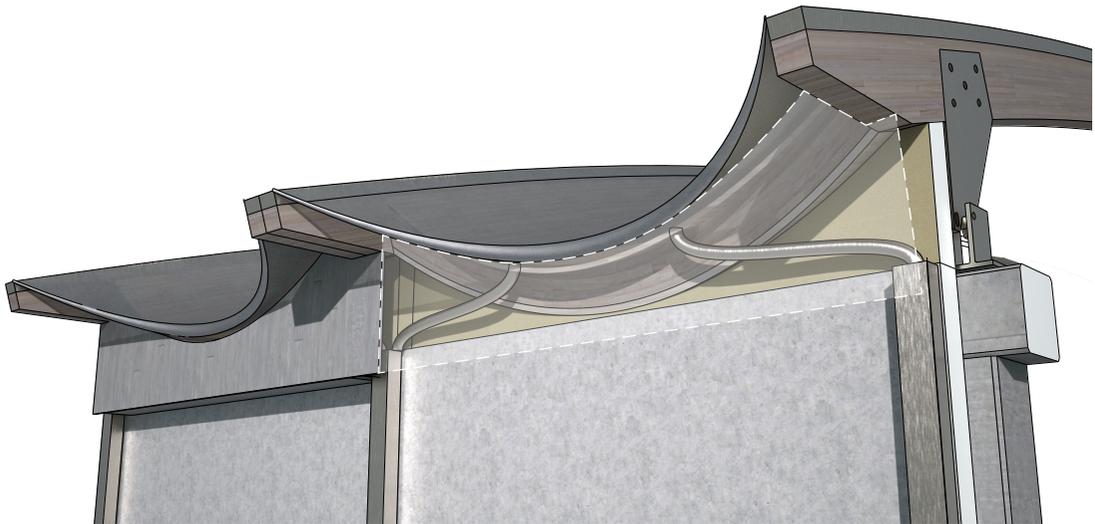


Detail 02 _ Variante 1 M1_10

Vordach 1,25m, Entwässerung verborgen



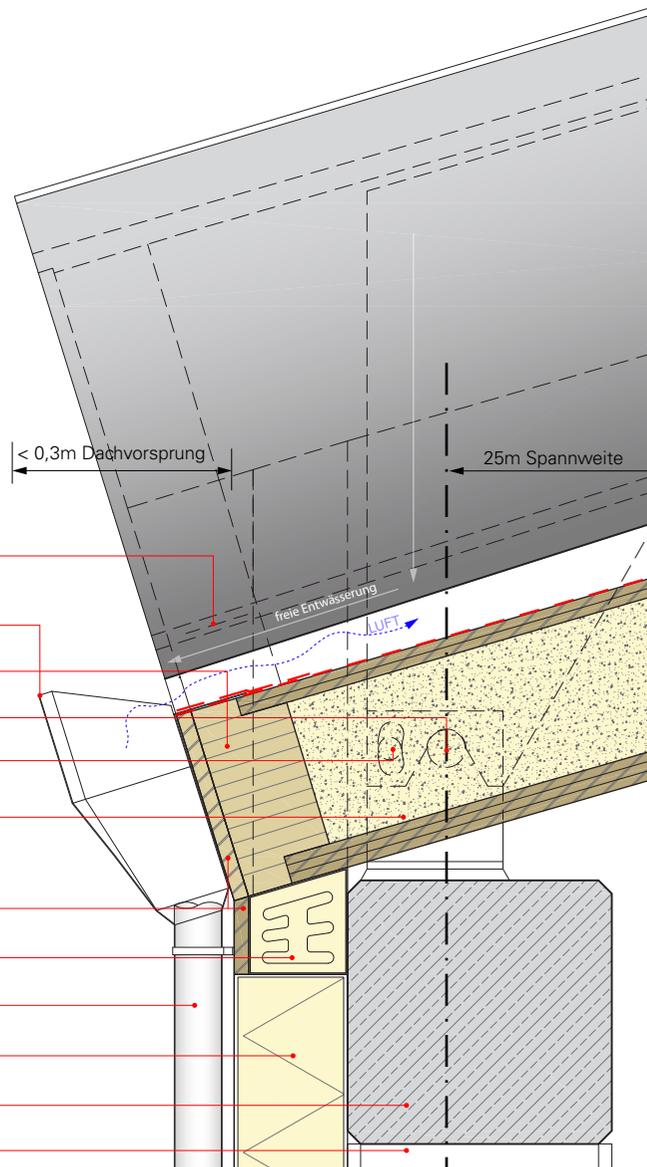
Ansicht M1_50



Axonometrische Darstellung Variante 01



Lage Detail
Schnitt in der Mittelachse



Membranabspannung

Spanngurthalterungen an den Drittelpunkten, verschraubt
Spanngurte in eingenähten Taschen geführt

Wasserfangkasten für freie Entwässerung
mit Überschallschutz, an Unterdach angedichtet

BSH Randträger 12/26

GL24c, parabelförmig gebogen, 3-achs bearbeitet

Auflagerbolzen Ø 50mm

verschweißt mit Stahlschuh, Edelstahl 1.4404, DIN 10088-2

Sicherungsbolzen Ø 30mm

gegen Abheben, Verdrehen möglich, Edelstahl 1.4404, DIN 10088-2

Auflagerschuh

S235 J2 G3, verzinkt

Ankerplatte 200/200 t=12 mm

auf Mörtelbett gelagert, ausgleichsschicht

Verblendung -Witterungsschutz

Faserzementplatte

flexibler Anschluss

textiler Balg, ausgedämmt mit Hartschaumkern

Entwässerung

Fallrohr Ø 100mm

Fassadenpaneel

ausgedämmte Blechkassette

Fertigteil Betonpfette

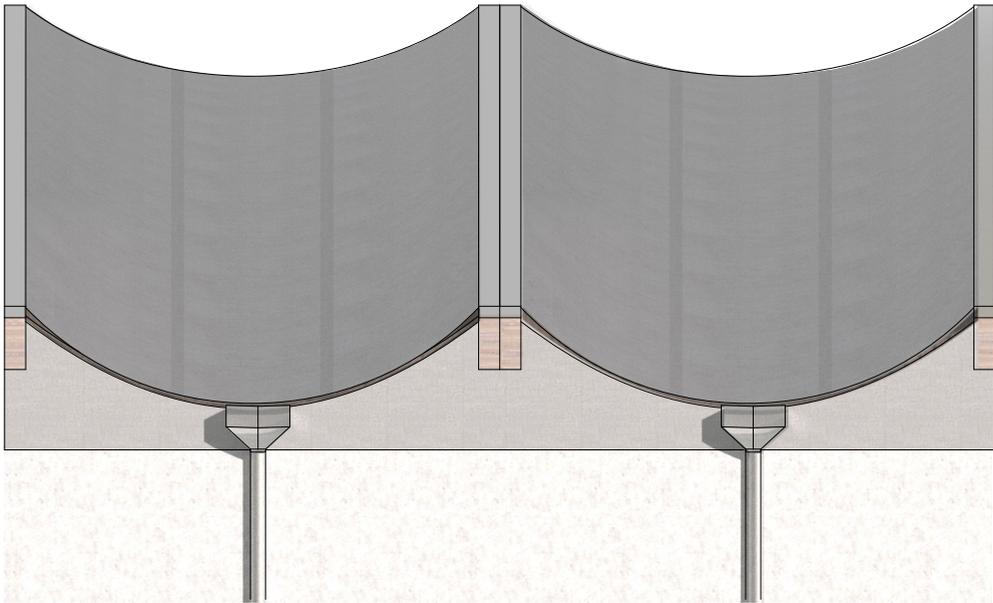
C30/37; 35/35 cm

eingespannte Fertigteilstütze

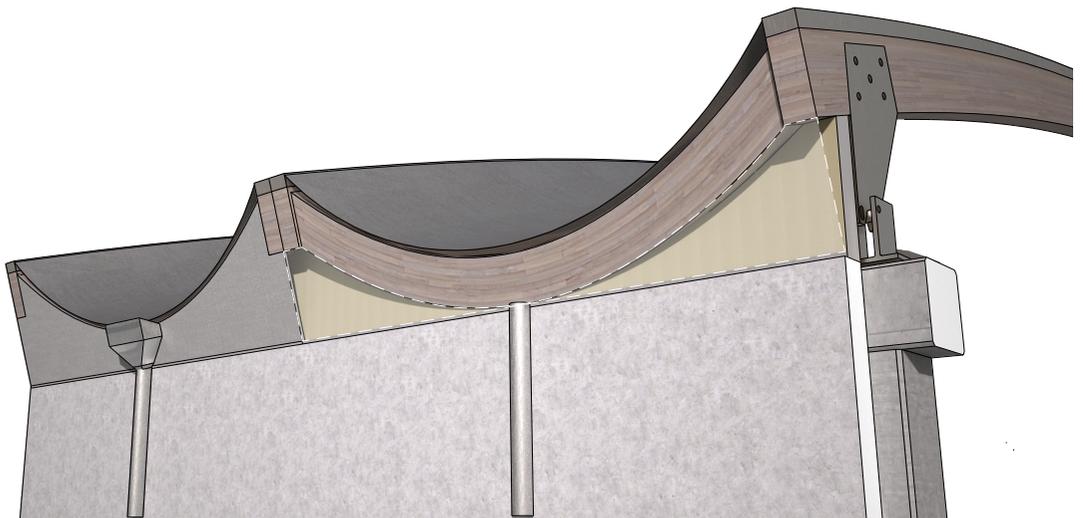
a 6m Beton C30/37

Detail 02 _ Variante 2 M1_10

Bündiger Abschluss, freie Entwässerung, außen mittels Wasserfangkasten gefasst



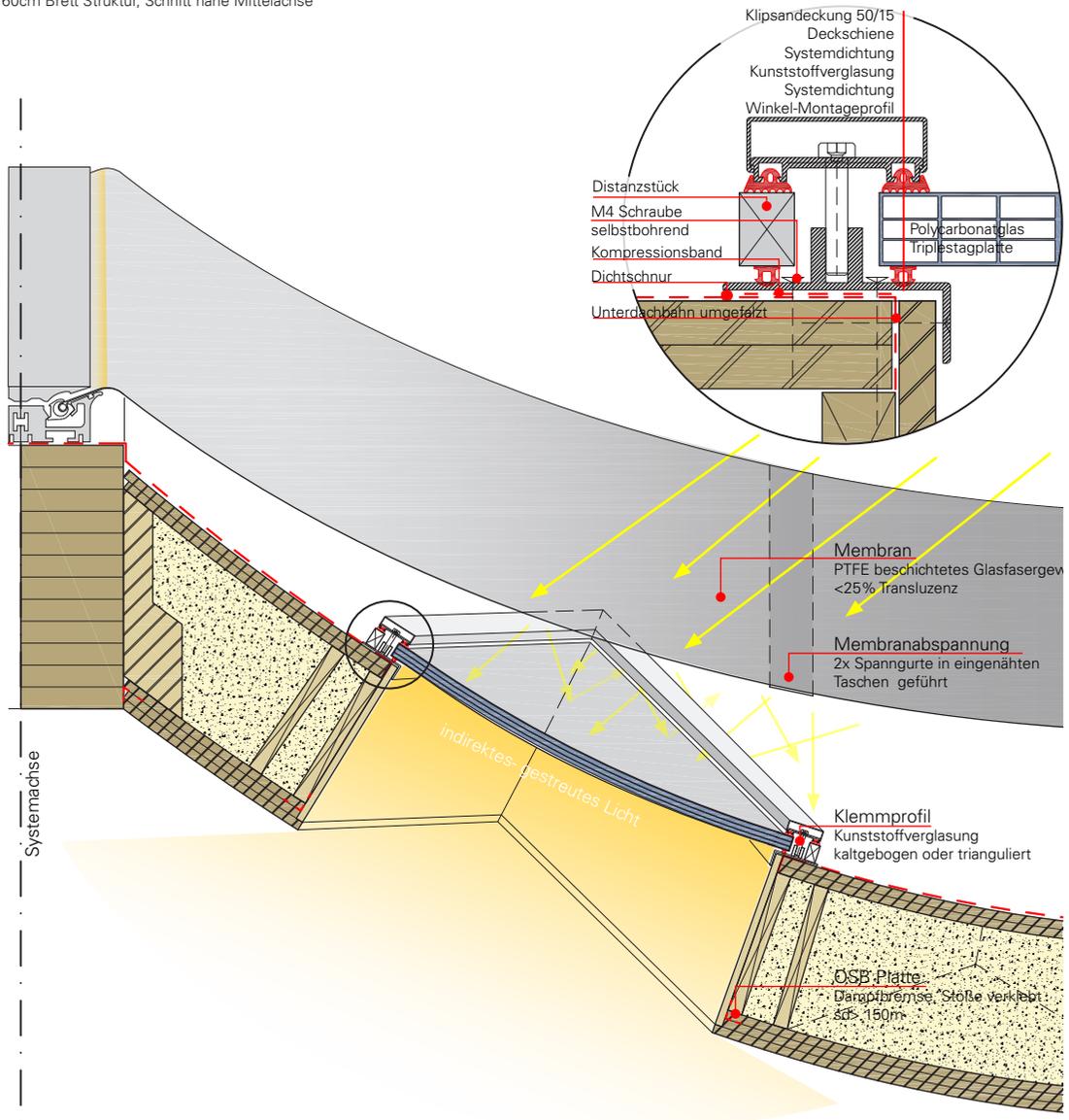
Ansicht M1_50



Axonometrische Darstellung Variante 02



Lage Detail
60cm Brett Struktur, Schnitt nahe Mittelachse



Detail 03 M1_10
Belichtungsöffnung

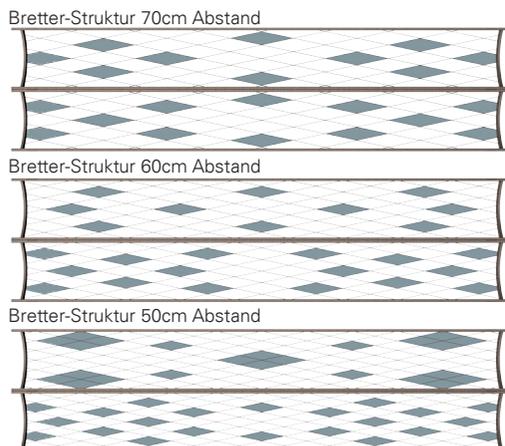
BELICHTUNG

Die rautenförmigen Belichtungsöffnungen können aus kaltgebogenen Kunststoffgläsern (Polycarbonatgläser) hergestellt werden oder trianguliert und aus ebenen Gläsern hergestellt werden. Kunststoffgläser weisen einen sehr guten Dämmwert auf und lassen sich außerdem sehr gut kaltverformen.

Ein Winkel-Montageprofil wird oberhalb der Unterdachbahn befestigt und mittels Kompressionsband und Dichtschnur abgedichtet. Da es sich in diesem Bereich um das Unterdach handelt, ist kaum mit Niederschlag zu rechnen, lediglich geringe Ausmaße von Tauwasser können anfallen.

Die Größe der Belichtungsöffnung ist an die bestehende Bretter-Struktur anzupassen. Die darüber liegende Membran weist eine Transluzenz von bis zu 25% auf. Es resultiert ein indirektes und gestreutes Restlicht, das wohl kaum für den erforderlichen Tageslichtquotienten ausreicht, jedoch eine angenehme Grundbelichtung ergibt.

Der erlaubte Perforierungsgrad des Dachs, durch die Öffnungen, muss statisch ermittelt werden. Der statisch wirksame Materialverlust in der Fläche könnte auch durch Aussteifungen innerhalb der Öffnungen kompensiert werden.



Draufsicht M 1_400

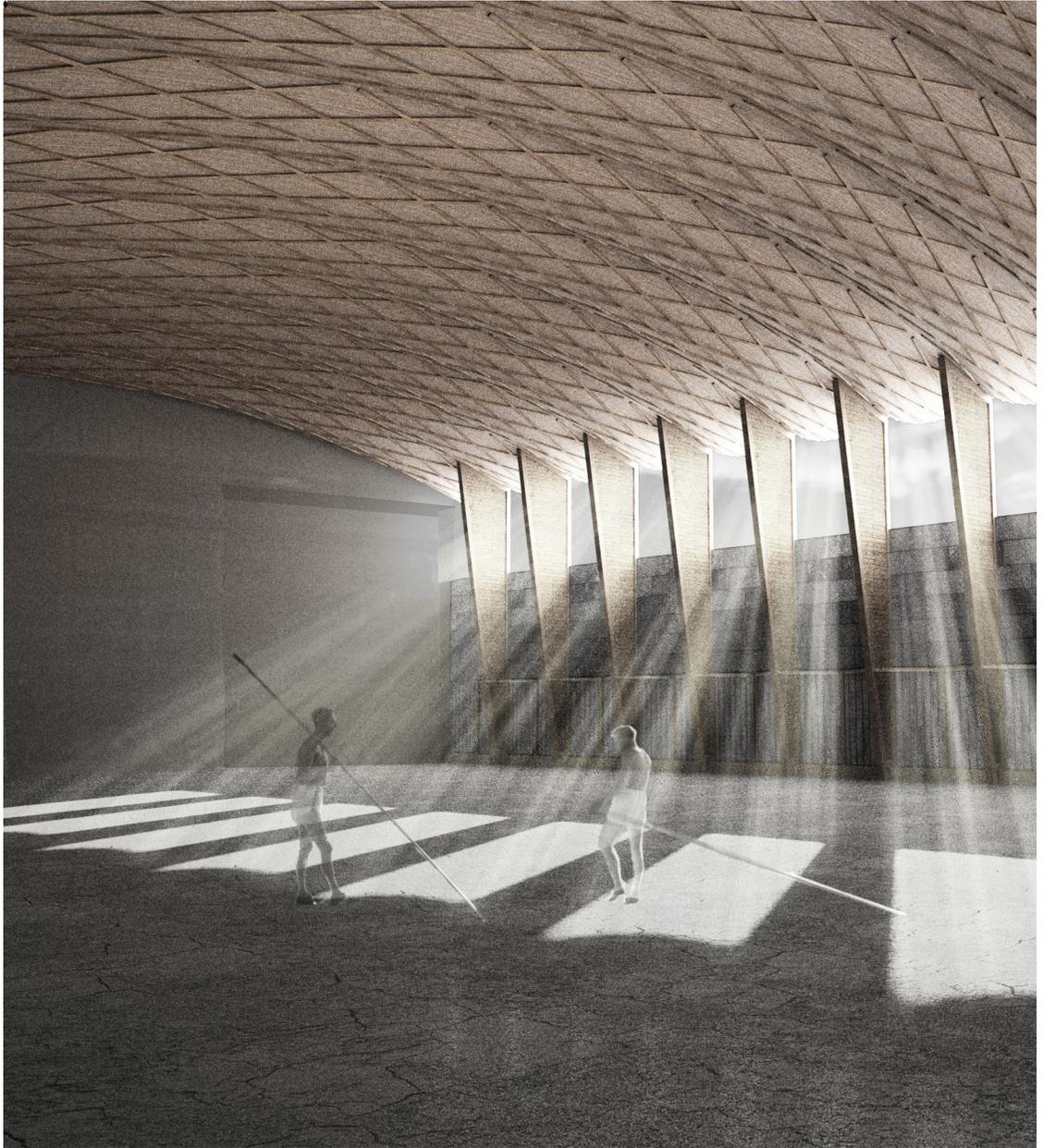
Variantenbildung der Belichtungsöffnungen





Abb.62: COBE, Wettbewerbsbeitrag für ein Hallenbad in Kopenhagen.

Anm.
 Obwohl dieses Projekt nur im Stadium einer Wettbewerbseinreichung blieb, sind die innenräumlichen Qualitäten vorallem dem Dachtragwerk verschuldet. Diese sehr klare hölzerne Dachstruktur mit den triangulierten Öffnungen diente als Vorlage für diese Abbildung. Hölzerne Tragwerke haben gegenüber anderen Materialien den Vorteil der chemischen Resistenz. Die auftretenden Angriffe durch das in Schwimmbädern verwendete Chlor würden bei Stahlbeton oder Stahl Konstruktionen zu verstärkter Korrosion führen.



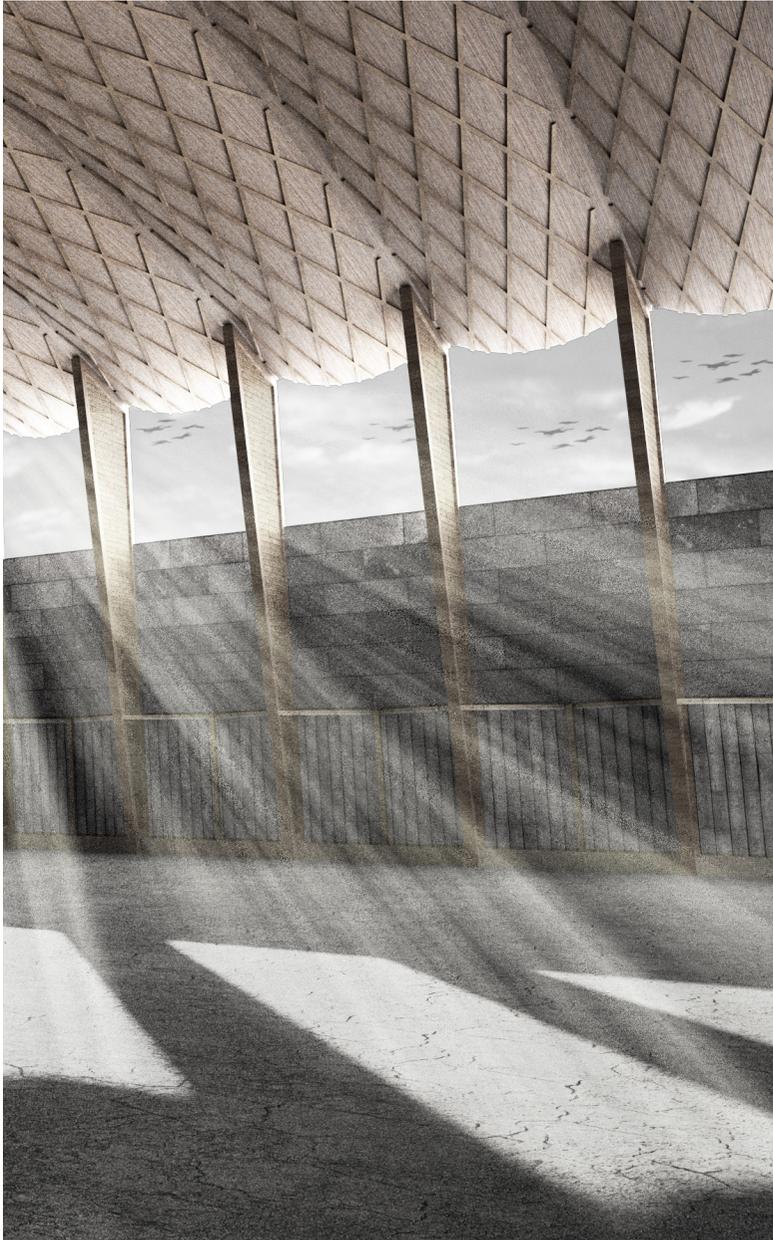


Abb.63: Alvar Aalto 1949–1952: Sport hall for the Helsinki university of Technology in Otaniemi, Espoo. Photo Heikki Havas / Alvar Aalto Museum.

Anm.

Dieses Bild wurde aus mehreren Gründen als Ausgangspunkt für die Perspektivische Innendarstellung gewählt. Zum einen habe ich persönliches Verhältnis zu dieser Halle durch meinen Auslandsaufenthalt in Finnland. Dabei konnte ich die extrem filigrane Struktur dieser Halle immer wieder betrachten.

Die Abmessungen der Hauptträger dieser Halle variieren hinsichtlich ihrer Spannweite und Bauhöhe. Dies wurde durch akribische Handwerksarbeit bewerkstelligt.

Parametrische Entwurfsmethoden und digitale Fertigung werden gegenwärtig eingesetzt um solche variierenden Strukturen problemlos zu fertigen.

Zum anderen ist es die Ausstrahlung des Fotos die in dieser Replika nachempfunden wird.

Ausblick

Auf der Unterseite sind der Bretterstruktur folgend Rippen angebracht. Dies hat einerseits einen optischen Effekt der dem feingliedrigeren Original mehr ähnelt. Andererseits könnten diese auch statisch wirksam und notwendig werden wenn größere Spannweiten angestrebt werden.





Abb.64: Kaufmann Holz AG, Halle Au

Anm.

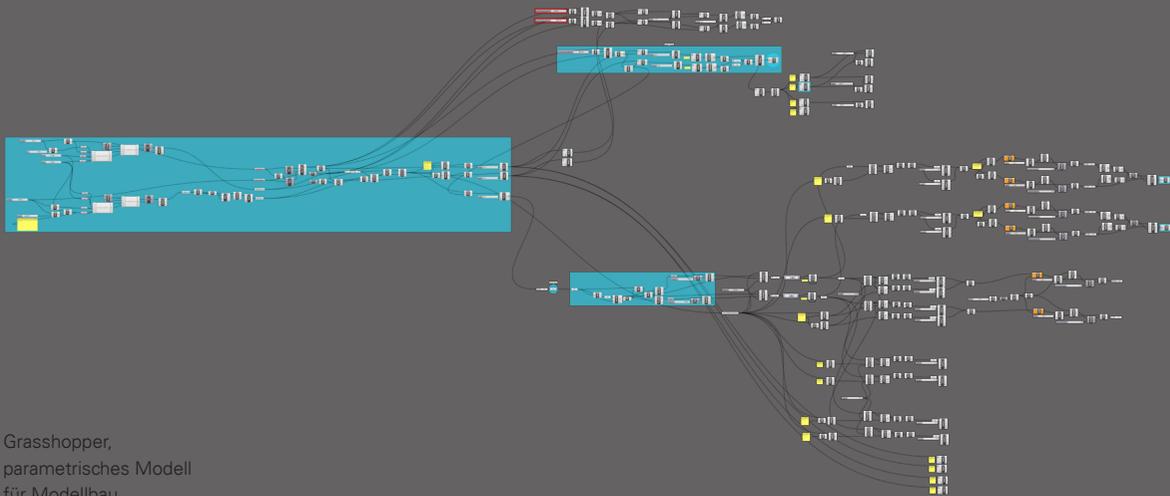
Die 1992 errichtete Halle Au wurde in weniger als 3 Wochen geplant, fabriziert und errichtet. Außerdem wurden neue Holzwerkstoffentwicklungen verwendet um die Tragstruktur effizienter und leichter zu machen. Die großformatigen gebogenen Fertigteile dieser mehrfach publizierte Halle gaben der Halle die nötige Korrelation um als Vorbild für die Außendarstellung zu sein.

MODELLSTUDIE UND FABRIKATION

EXPERIMENTELLER MODELLBAU

Die im Maßstab 1:25 gefertigten Arbeitsmodelle wurden für Untersuchungen unterschiedlicher Abwicklungsmöglichkeiten und Auflagervariationen gebaut. Zudem konnte auch am Modell die Steifigkeitsänderungen der Schale mit keiner, einer und zwei Lagen Schalwandungen beobachtet werden.

Der Bau diente außerdem potentielle Fehlerquellen und Verbesserungen der Konstruktion zu finden. Die daraus gewonnen Erkenntnisse sind in die Detailplanung eingeflossen. Notwendigen Toleranzen und Fabrikationsmethoden sind dadurch stärker in den Fokus gerückt.



Grasshopper,
parametrisches Modell
für Modellbau

Die Geometrie und der Maßstab wurden vorab festgelegt, mit dem Blick auf eine aussagekräftige Modellstudie unter Berücksichtigung der Materialstärken. Danach wurde eine Strategie für die Fertigung erarbeitet, da die Größe der Einzelteile für die, für Studenten zugänglichen, Maschinen entweder zu groß oder zu klein waren. (Lasercutter, CNC-Fräse)

Sämtliche Zeichnungen der Einzelteile wurde mit dem parametrischen Entwurfsprogramm „Grasshopper“ erstellt. Dies bringt den Vorteil, falls das selbe Modell in einem größeren Maßstab, mit den selben Maschinen gebaut werden soll, sind nur wenige Arbeitsschritte notwendig die Werkzeichnungen zu generieren.

Sofern eine Fertigungsstrategie festgelegt wurde, kann das parametrische Modell so angepasst werden, das stufenlose Änderungen vorgenommen werden können, ohne Aufwand zur Erstellung von Werkzeichnungen. Digitale Fabrikationsmittel könne diese Einzelteile in variierenden Größen problemlos herstellen, sofern ihre Grenzen beachtet werden.



Foto Arbeitsmodelle M 1_25, Auflager, Tesselierungs- und Abwicklungsstudie

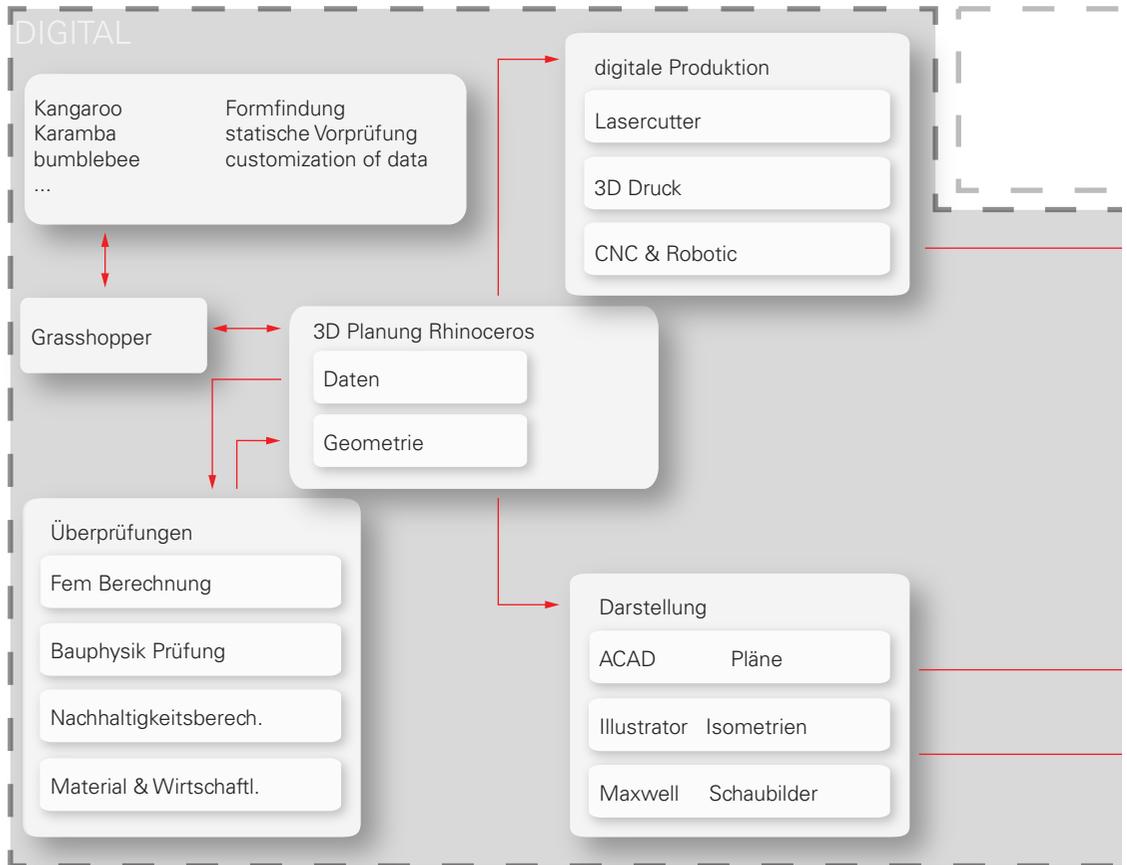
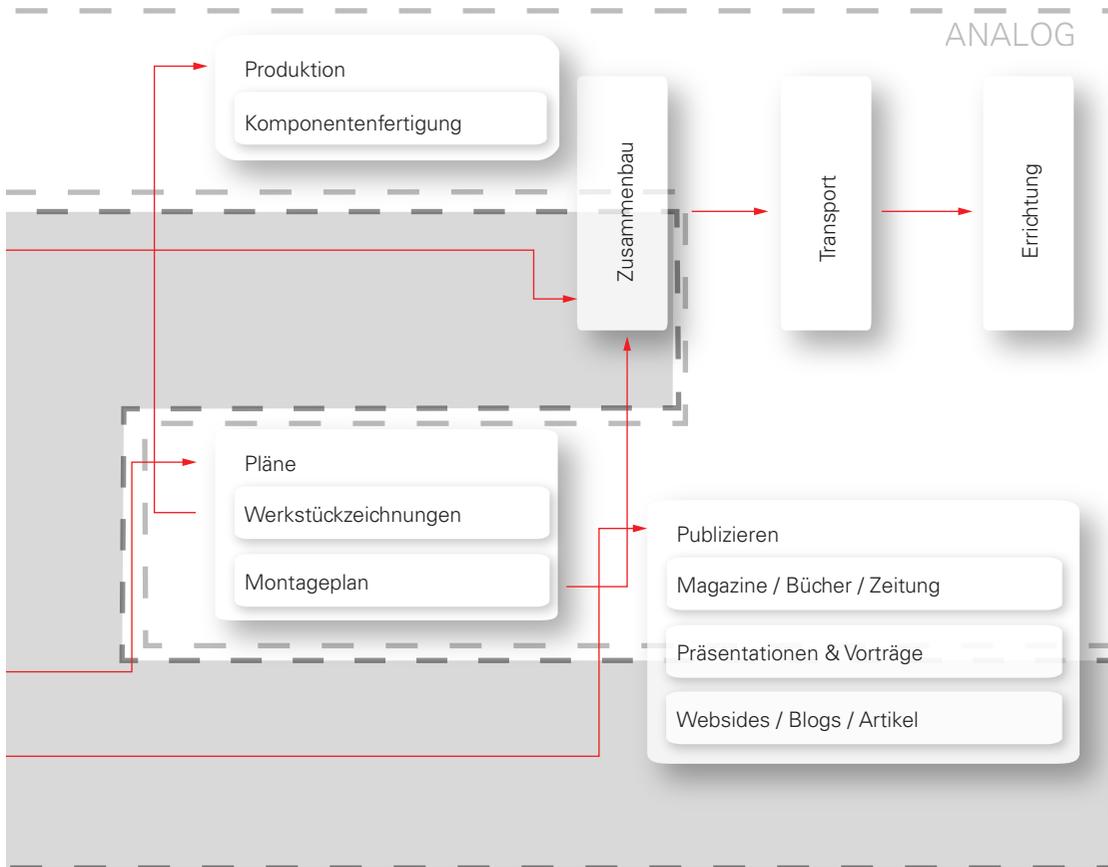


Diagramm der digitalen und analogen Prozesskette

DIGITALE UND ANALOGE PROZESSKETTE

Der Entwurf wurde aufgrund der geometrischen Komplexität und dem Anspruch parametrisch und damit flexibel zu sein gänzlich mit digitalen Mitteln erarbeitet. Andere Schnittstellen, wie zum Beispiel die der statischen Überprüfung, wurden direkt vom gleichen 3D Modell angesteuert. Auffällig in dieser Abbildung ist das die Produktion gänzlich von der Darstellung abgetrennt ist.



Die zweidimensionale Darstellung des Entwurfs dient zur Erläuterung der Idee/Konzeptes, zum bessern Verständnis von Geometrie oder zur Veranschaulichung konstruktiver Überlegungen oder räumlicher Qualitäten, jedoch sind diese für die Produktion der einzelnen Elemente nicht mehr zwingend notwendig. Da es sich hier um eine Maschinenunterstützte-Fertigung handelt ist der Zusammenbau und Errichtung noch mit händischer Arbeitskraft zu bewerkstelligen.

PRODUKTIONSPLANUNG

Die erste Ebene für eine Produktionsplanung ist jene der konzeptuellen Ausrichtung. Was ist das Produkt, welche Technologien sind zur Herstellung gebraucht, wie groß ist die Kapazität und wo wird produziert?^[106]

Die Antworten auf diese Fragen ist: Es handelt sich um ein Großteils vorgefertigtes Hallendachtragsystem, das mittels maschinell-unterstützter Fertigung hergestellt wird. Die Produktionskapazität wird durch die Anzahl und die Leistungskapazität der eingesetzten Maschinen beschränkt.

Der Standort spielt nur eine untergeordnete Rolle, da es sich um ein System handelt, welches Großteils mit handelsüblichen Maschinen und wenigen notwendigen Adaptierungen herstellbar ist. Der Standort ist in bedacht auf folgende Punkte auszuwählen: geringe Wege der Rohstoffzulieferung, keine/wenige Infrastrukturellen Einschränkungen für den Transport von großen Elementen- Sondertransporttauglichkeit und einen umliegenden Absatzmarkt. Vorzugsweise in der Nähe von Autobahnen oder RailCargo Anbindungen.

Die zweite Ebene der Produktionsplanung betrifft die angedachte/ angestrebte Personal- und Maschinenausstattung, die Produktionsorganisation sowie die Strategien in bedacht auf die ökonomischen als auch sozialen Auswirkungen.^[107]

Das Herzstück der Produktionsanlage ist die von automatisierten Maschinen (vorzugsweise Industrieroboter) bewerkstelligte Schalwandung Herstellung. Diese bis dato in den Zimmereien eher unüblichen Maschinen machen den größten Part des finanziellen Aufwands aus, für die notwendige Aufrüstung, zur Herstellung des Systems. Die Hälfte des Personals ist in dem Bereich der Fertigungstechnik angesiedelt, aufgrund des hohen Anteils der halb- bis vollautomatischen Produktionsmaschinen.

Das hohe Pensum der maschinellen Produktion ist nicht nur der Gewinnmaximierung verschuldet, durch die Automatisierung der Arbeit, sondern vielmehr der Machbarkeit. Der erreichte Maßstab lässt sich durch händische Arbeit zum Teil nicht, oder nur schwer herstellen. Es ist nicht das Ziel den Arbeiter aus seinem Handwerk zu verdrängen, da das fachmännische Gespür für ein derartig heterogenes Material unabdingbar ist.

VERNETZTE PRODUKTION

Die Produktion der Einzelteile passiert zum Teil gleichzeitig, beziehungsweise werden branchenfremde Elemente in Auftrag gegeben. Die Montage der Einzelteile erfolgt in einer linearen Fertigungsstraße.^[108] Hierbei sind die Aufgabenbereiche in Stationen, mit klar strukturierten Tätigkeiten, aneinandergereiht. Die Finalisierung des Elements findet auf der Baustelle statt, um den Transport so Effizient wie möglich zu gestalten.

MASCHINENPARK:

Die meisten der angeführten Maschinen gehören bereits zum Einmaleins von mittelgroßen Zimmereien mit dem Anspruch einer Serienfertigung. Die zu tätige Erweiterung, für eine reibungslose und zügige Produktion, ist der Anteil der industrie-roboter gestützten Fertigung.

Einerseits entsteht durch die großen Abmessungen des Trägers und der verbauten Einzelteile ein Maßstab, der durch menschliche Arbeitskräfte sich nur schwer stemmen lässt.

Andererseits sind die Schraubverbindungen zwischen den Platten und Brettern sehr exakt, in tausendfacher Zahl und ohne sichtkontakt herzustellen.

Diese Probleme können durch eine, auf die Anwendung angepasste, Fertigungsanlage gelöst werden. Dieser maschinelle Aufwand kann ausschlaggebend für eine wirtschaftliche Herstellung des Dachtragwerks werden.

108 Vgl. Palupski, 2002, S280-281.

automatisch adjustierbare BSH Presse

z.B. "Flexipress"

2x stabförmige Abbundmaschine
unterschiedliche Dimensionen

z.B. „Hundegger
Zuschnittautomat SC3“

Plattenabbundmaschine
Automatisch beschickt
mit Beschriftungsoption

z.B. „Hundegger Speed-Panel-
Maschine SPM“

„Schmetterlingswender“

z.b. Firma Weinmann

2x Industrieroboter
auf linearer Bewegungsachse
kooperatives/simultanes Arbeiten
automatisches Werkzeugwechseln

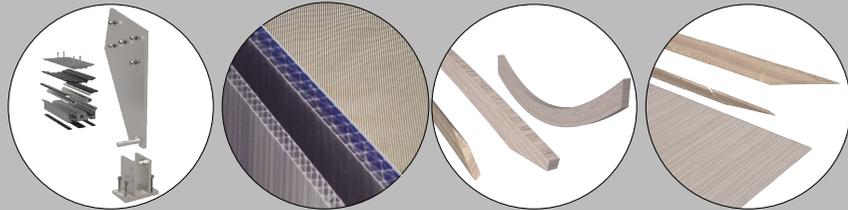
„Pick & Place“ + Verschrauben
Stöße kleben + Klebestreifen aufbringen
Abdecken mit Folie + schneiden

Kranbahnmanipulieren und verladen des Dachträgers

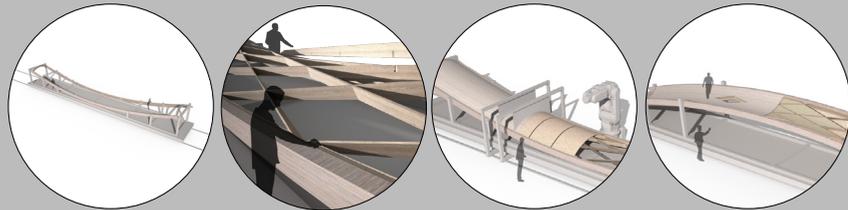
FERTIGUNG UND ERRICHTUNG

Nachfolgend findet sich eine chronologische Auflistung der wichtigsten Arbeitsschritte. Diese sind in drei Teilbereiche gegliedert:

Fertigung Einzelteile



Montage



Transport und Errichtung



Anlieferung und Lagerung von Rohmaterial und in Auftrag gegebenen Komponenten

Externe Fertigung:

ALU- UND STAHLTEILE

Auflagerschuh inklusive Bolzen und Befestigungsschrauben

Stahlplatten für Auflager, zugeschnitten und befräst

Gewindestangen für die Befestigung im Holz, in der richtigen Länge abgebunden

Rinnenhaken für die Entwässerung

Klemmprofile für Belichtungsöffnungen

Aluminiumprofile und Abdeckungen, für Membranbefestigung inklusive Gummidichtungen

MEMBRANE, TEXTILE UND GLÄSER

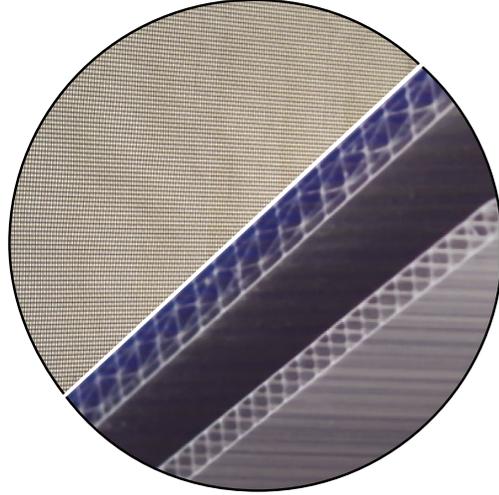
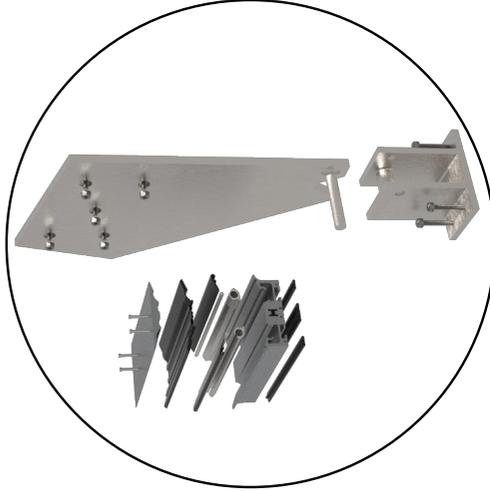
Textiler Balg, als flexibler Wärmedämmanschluss, leistungsfähige Klettverschlussbänder zur Befestigung

Glasfasergewebe mit PTFE Beschichtung, bereits zugeschnitten,

Taschen, Löcher und Führungslaschen eingearbeitet

Glasscheiben bzw. Polycarbonatplatten für Belichtungsöffnungen

FERTIGUNG EINZELTEILE



Interne Fertigung:

PARABELFÖRMIG GEBOGENER BSH TRÄGER

Randträger quer, Randträger längs und Anschlussbalken

Bretter keilzinken, hobeln und beleimen

Formverleimung mittels automatisch adjustierbarer BSH-Pressen

Randträger: Abbund und Bearbeitung durch 3-achs Maschinen, z.B. Ausnehmungen für Verbindungsmittel

Anschlussbalken: NC-Bearbeitung, beziehungsweise im Raum geführte Schnitte mittels Lagerung auf Lehrgerüst herstellen

Anbauen und Einsetzen notwendiger Teile

z.B. Gewindestangen und Anschlussbalken für Plattenaufleger

BRETTIER

für reutenförmige Bretter-Struktur,

Schubverbund der beiden Schalen-Wandungen

Linearer Abbund sägerrauer Bretter, 3 achsig Zuschnitt, Randbesäumung und Einschnitte für „Waffle-system“ Verbindung

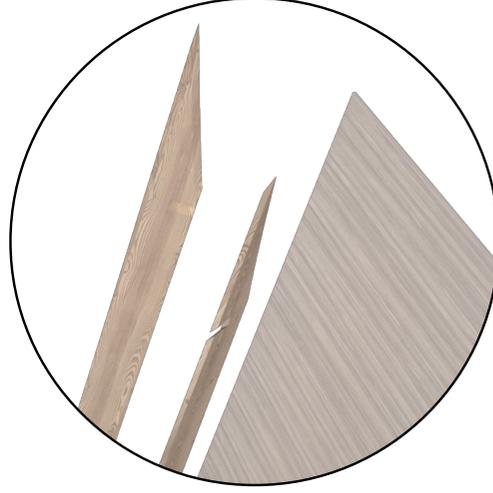
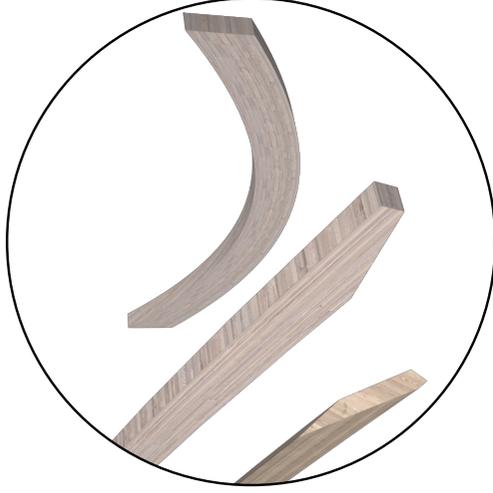
HOLZ-WERKSTOFF PLATTEN

für Schalen-Wandungen

Automatischer Abbund und Beschriftung der Platten

Der Zuschnitt verdeckter Platten beschränkt sich auf das Abbinden in die richtige Länge und Breite

Die bündig gestoßenen Kanten der Platten an der Sichtoberfläche bedingen einer 4achsigen Bearbeitung



Lineare Fertigung

Fließproduktion

RANDTRÄGER -LEHRGERÜST

180° gedrehtes (auf dem Kopf liegendes) Zusammenfügen und Befestigen der vier Randträger inklusive Anschlussbalken auf temporären Montagegerüst, zum besseren Heben, Wenden und Zwischenlagern

Auf manipulierbarem (Schienen geführten) „Zimmermeister-Tisch“ heben und fixieren

BRETTIER-STRUKTUR ERSTELLEN

Randträger-Lehrgerüst an Montageplatz bewegen

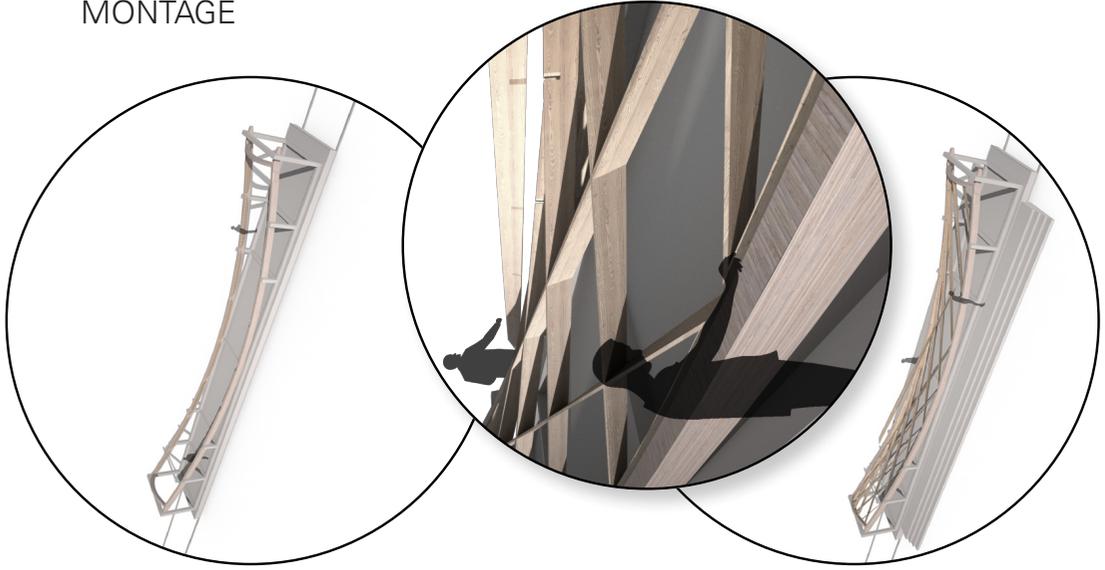
Händisches Versetzen und Befestigen der verarbeiteten Bretter Prinzip einer Steckverbindung „Waffle-system“ beide Bretter sind halbseitig eingeschnitten um sich gegenseitig in ihrer Lage zu fixieren

Erste Lage in eine Richtung herstellen. Bretter werden von beiden Seiten gehalten und in die richtige Position gebracht. Eine leichte Verdrillung stellt sich ein.

Bretter werden mit dem Anschlussbalken verschraubt.

Einbringen der zweiten Bretterlage von oben einpassen in die Steckverbindung und seitliches verschrauben

MONTAGE



AUFBRINGEN DER SCHALENWANDUNGEN
maschinell-gestützte- Fertigung

Grundstruktur als Lehrgerüst für die Schalen-Wandungen an die eingemessene Null-Position fahren.

Eventuell ist eine visuelle Sensorik notwendig.
Optisches Abgleichen der hergestellten Bretterstruktur mit dem planlichen „Soll“:
Kann vorab durch Versuche überprüft werden, ob die Struktur innerhalb eines viablen Toleranzbereichs liegt.

Die weiteren Arbeitsschritte erfordert das Zusammenspiel zweier halb automatischer Fertigungsmaschinen.

Abfolge für das Montieren der erste Lage (OSB platten)

MASCHINE 01
„Pick & Place“ -
mittels Schablone in Form biegen

MASCHINE 02
Verschrauben
Werkzeugwechsel-„Fräser“
Belichtungsöffnungen herstellen.
Werkzeugwechsel-„Handabroller“
verkleben der Stöße

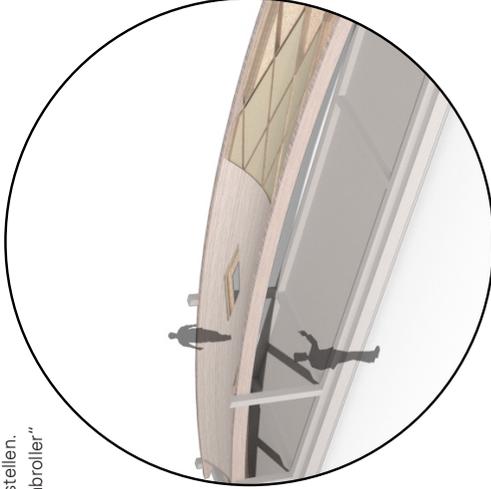
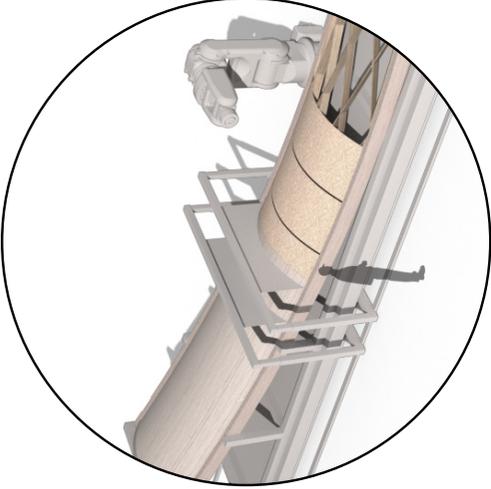
Gleiche Abfolge für das Montieren der zweiten und dritten Lage (außer dem Verkleben der Stöße)

„Zimmermeister-Tisch“ inklusive Montagegerüst weiterbewegen.
Händisches Einbringen des Dämmstoffs.

Fortbewegen zur Wendestation mit „Schmetterlingswender“
Gedrehtes Montagegerüst zurückbewegen auf die- Null-Position.

Montieren der beiden oberen Schichten

Weiter Bewegen und Finalisieren.
Händisches Aufbringen der Unterdachbahn mittels Klebestreifen
Montage der Belichtungsöffnung und Membranbefestigungen.



TRANSPORT UND ERRICHTUNG

TRANSPORT

Loslösen des großteils vorgefertigten Elements vom Montagegerüst.

Auf das Transport- und Errichtungsgestell heben und befestigen.

In dreier Gruppen stapeln und für Transport sichern.

3x 4,1 Tonnen = 12,3 Tonnen Gewicht.

Aufladen auf Anhänger: Tieflader- Anhänger, nicht gekoppelt (Sondertransport durch Überlänge, 225m² Dachfläche pro Transport)

Übrige Teile für die Errichtung beilegen:

Auflager-Stahlplatten, Membran,

flexibler Wärmedämmanschluss, Kleinteile und Alu-Deckschienen.

ERRICHTUNG

Herunterheben und zwischenlagern auf Montagegerüst.

Anfügen der Auflager-Stahlplatten,
Membran einhängen und abspannen.

Einbringen der Sonderteile:

Klettverschluss-Verbinder für flexiblen Anschluss, Insektenschutz,
Rinnenhaken und Muffendichtung für Entwässerung.

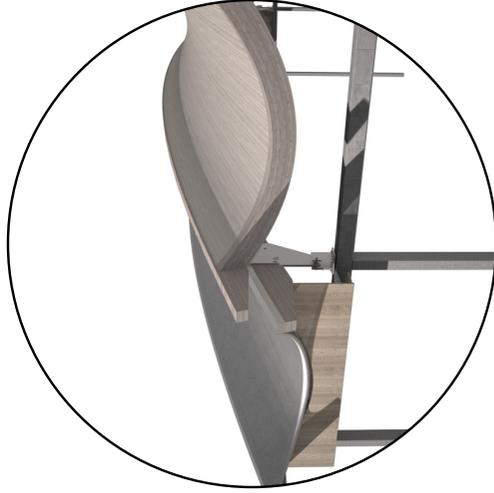
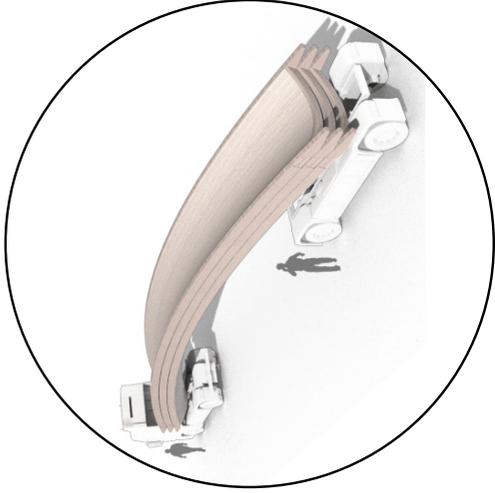
Einheben auf die eingemessenen und vorab befestigten Stahlschuhe,
fixieren mittels Sicherungsbolzen.

Paarweises Verbinden mithilfe der Deckschienen.

Anbinden des flexiblen Wärmedämmanschlusses an Fassadendämmung
mittels leistungsfähige Klettverschlussbänder

Entwässerung- Fallrohre anschließen

Abdeckung montieren



RESÜMEE

Holz wird seit Hundert Jahren, durch technische Fortschritte, in ebene Holzwerkstoffe weiterverarbeitet. Das Ziel dieser Arbeit war es zu zeigen, dass das Überführen von flächigen Holzwerkstoffen in die dritte Dimension (1D-Stab, 2D-Platte, 3D-Schale) zu einem effizienten Tragsystem führen kann.

Diese Arbeit handelt von der Entwicklung (Entwurf, Bemessung und Konstruktion) eines schalenartigen Biegeträger-Systems, das für Spannweiten von 10 - 35 Metern geeignet ist. Eine Spannweite von 25 m + Dachüberstand wurde für eine genauere Überprüfung angepeilt. Untersuchungen für mögliche Einsatzgebiete und aufgeschlüsselte Analysen des derzeitigen Holzbauanteils aller Bauvorhaben haben gezeigt das die Anwendungsmöglichkeiten vielseitig sind.

Das Ziel war es eine Alternative für bestehende weit gespannte Holzdach-Tragsysteme zu finden. Dass eine doppelwandige Holz-Kontinuumsschale durchaus zu einem material-effizienten Tragsystem führt, hat ein direkter Vergleich, mit anderen Vollholzhallensystemen, belegt. Der hohe Vorfertigungsgrad führt dabei zu einer kurzen Errichtungszeit, wobei weitere Vergleichsparameter ebenso betrachtet wurden.

Zudem wurde die Tragfähigkeit und die Gebrauchstauglichkeit unter Beweis gestellt. Die theoretische Produzierbarkeit wurde mithilfe von digitalen Analysen untersucht.

Ebenso thematisiert wurde die praktische Umsetzung, mit einem Vorschlag, wie eine maschinell Unterstützte Fertigung aussehen könnte.

Die Ergebnisse der Arbeit können als Grundlage für die Überprüfung der Wirtschaftlichkeit dienen.

REFERENZEN

LITERATURVERZEICHNIS

BÜCHER

- Aondio, Patrick: Berechnung von Zylinderschalen aus Holz und Holzwerkstoffen unter Berücksichtigung der Spannungsrelaxation, Diss., TU München, 2014.
- Bieler, Walter, Holzbau erhebt Ansprüche: in: Holz: Stoff oder Form, Transformation einer Konstruktionslogik, Sulgen, 2014.
- Block, Philippe, Gengnagel, Christoph, Peters, Stefan, Faustformel, Tragwerksentwurf, München, 2013.
- Blumer, Hermann: Das Holz und seine Wege, in: Holz: Stoff oder Form, Transformation einer Konstruktionslogik, Sulgen, 2014.
- Büren, Charles von: Funktion & Form, Gestaltungsvielfalt im Ingenieur-Holzbau, Basel, 1985.
- Engel, Heino: Tragsysteme Structure Systems, Darmstadt, 1999.
- Fischer, Güntehr: Vitruv NEU oder Was ist Architektur?, Basel, 2009.
- v. Halasz, Robert: Holzbau Taschenbuch?, Berlin, 1974.
- Heinle, Erwin/ Schlaich, Jörg: Kuppeln, aller Zeiten- aller Kulturen, Stuttgart, 1996.
- Hemmerling, Marco / Nether, Ulrich: Digitale Architektur, Vom Entwurf zur Produktion, in: Produktentwicklung Architektur ,Visionen/ Methoden/ Innovationen, Basel, 2013.
- Hemmerling, Marco/ Böke, Jens/ Püchner, Frank: Digitales Entwerfen und Konstruieren, in: Produktentwicklung Architektur ,Visionen/ Methoden/ Innovationen, Basel, 2013.
- Iwamoto Lisa: Digital Fabrications, Architectural and Material Techniques; Princeton Architectural Press, New York, 2009.
- Jeska S., Pascha K.S.: Neue Holzbautechnologien, Materialien Konstruktionen Bautechnik Projekte, Basel, 2015.
- Krieg, Oliver David: HygroSkin- Meteorosensitive Pavilion, in : Advancing Wood Architecture. A computational approach, New York 2017.
- Künzi Katrin: Wandlungsfähig, Leistungsstark und nachhaltig- heutige Attribute des Holzes im Spiegel der Tradition in: Holz: Stoff oder Form, Transformation einer Konstruktionslogik, Sulgen, 2014.
- Lämmler, Rahel/ Wagner, Michael: Ulrich Müther Schalenbauten in Meckleburg-Vorpommern, Zürich, 2008.
- Menges, Achim: Integrative design computation for advancing wood architecture, in; Advancing Wood Architecture, a computational approach, New York, 2017.
- Menges, Achim/ Schwinn, Tobias/ Krieg, Oliver David: Advancing Wood Architecture, An Introduction, in : Advancing Wood Architecture. A computational approach, New York 2017.
- Menges, Achim/ Schwinn, Tobias/ Krieg, Oliver David: Advancing Wood Architecture, a computational approach, New York, 2017.
- Rinke, Mario: Konstruktive Metamorphosen- Holz als immerwährendes Surrogat, in: Holz: Stoff oder Form, Transformation einer Konstruktionslogik, Sulgen, 2014.
- Padro, Xavier Ferres/ Braig, Thomas/ Tillmanns, Jorn: Prozesse optimieren und steuern, in: Produktentwicklung Architektur ,Visionen/ Methoden/ Innovationen, Basel, 2013.
- Palupski, Rainer: Management von Beschaffung, Produktion und Absatz, Wiesbaden, 2002.
- Pottgiesser, Uta/ Strauß, Holger (Hg.): Produktentwicklung Architektur, Visionen / Methoden / Innovationen, Basel, 2013.
- Ramm, Ekkehard/ Schnuck, Eberhard: Heinz Isler Schalen, Zürich, 2002.
- Rudofsky, Bernard: Architecture Without Architects, A Short Introduction to Non-Pedigreed Architecture, New York, 1987.
- Vismann, Ulrich (Hg.): Wendehorst Bautechnische Zahlentafeln, Auflage 34, Wiesbaden, 2012.
- Wagenfuhr, Andre´: Die Holzverwendung im Wandel der Zeit: Evolution oder Revolution? in: Holz: Stoff oder Form, Transformation einer Konstruktionslogik, Sulgen, 2014.
- Wang, Yingzi: Hooke Park Biomass Boiler House, in: Advancing Wood Architecture. A computational approach, New York, 2017.

William, Jan/ Gramazio, Fabio/ Kohler, Mathias: New paradigms of the automatic. Robotic timber construction in architecture, in: Advancing Wood Architecture. A computational approach., Routledge, New York 2017.

Wys Mark Aurel: Die Unschuld des Materials- Ein Holzweg?, in: Holz: Stoff oder Form, Transformation einer Konstruktionslogik, Sulgen, 2014.

ZEITSCHRIFTEN

Dolezal, Franz: att. Zuschnitt, Gebäudezertifizierung und nachhaltiges Bauen, Ökostandards in Österreich, Wien, 2010.

Halász, Robert von/ Cziesielski, Erich: Berichte aus der Bauforschung Heft 90, Konstruktion und Berechnung hölzerner Zylinderschalen aus Furnierholz, Berlin, 1973.

Kraft, Sabine: Essay, Konstruieren neu denken, in: Zuschnitt 38, 2010.

ProHolz Austria (Hg.): att. Zuschnitt, Holzbauanteil in Österreich, Statistische Erhebung von Hochbauvorhaben, Wien, 2011.

Siemens (Hg.): Was macht Unternehmen ökonomischer und ökologischer?, Schweiz, 2009.

LEITFÄDEN, RICHTLINIEN, NORMEN & GESETZE

OIB Richtlinie 1; Mechanische Festigkeit und Standsicherheit, 2015

OIB Richtlinie 2; Brandschutz, 2015

OIB Richtlinie 3; Hygiene, Gesundheit und Umweltschutz, 2015

OIB Richtlinie 5; Schallschutz, 2015

OIB Richtlinie 6; Energieeinsparung und Wärmeschutz, 2015

o.A., IBO – Österreichisches Institut für Baubiologie und Bauökologie (Hg.): OI3 Indikator, Leitfaden zur Berechnung von Ökokennzahlen für Gebäude, Wien, 2016.

INTERNETQUELLEN

- Bittner, Phillip: Was ist eigentlich Cradle to cradle?
auf: <https://enorm-magazin.de/was-ist-eigentlich-cradle-cradle> [13.08.2017].
- Brüder Theurl GmbH (Hg.): Restholz, auf: <http://www.theurl-holz.at/produkte/restholz/> [31.08.2017]
- Bürklin, Jürgen-M: Geschichte des Hausbaus, o.J.,
auf: http://www.was-war-wann.de/geschichte/geschichte_des_hausbaus.html [06.08.2017].
- derstandard: Island arbeitet hart an der Wiederaufforstung seiner Wälder, 2005,
auf: <http://www.iceland.de/index.php?id=718> [04.08.2017].
- Fuchs, Christian: Die Geschichte des Feuers, o.J.,
auf: <http://www.steinzeitwissen.de/feuer/geschichte-des-feuers> [09.08.2017].
- Glaubrecht, Matthias: Das Rätsel der Osterinsel, 2008,
auf: <https://www.welt.de/wissenschaft/article2368519/Das-Raetsel-der-Osterinsel.html> [05.08.2017].
- Gramazio Kohler Research (Hg.), o.J., auf:
<http://gramaziokohler.arch.ethz.ch/web/d/forschung/184.html> [24.07.2017].
- Grober, Ulrich: Der Erfinder der Nachhaltigkeit, o.J.,
auf: http://www.zeit.de/1999/48/Der_Erfinder_der_Nachhaltigkeit [09.08.2017].
- Hausegger, Gudrun: Carl von Carlowitz und die Erfindung der Nachhaltigkeit, o.J.,
auf: <http://www.proholz.at/co2klimawald/carlowitz/> [09.08.2017].
- ITE (Hg.), Forschung, UHPC- Schale, auf:<http://www.ite.tugraz.at/index.php?page=312>, [28.07.2017].
- Janssen, Wilhelm: Die Geschichte der Osterinseln ist eine traurige Geschichte, o.J.,
auf: <http://www.osterinsel.de/38-geschichte.htm> [04.08.2017].
- Lohberg, Rolf: Zellen, So wächst ein Baum,
auf: <http://wald.lauftext.de/welt-der-pflanzen/zellen/> [29.08.2017].
- NewsGreen Team: Holz:Comeback eines Traditionsreichen Wertstoffs,Ist jetzt alles in Holz oder was?,2016,
auf: <https://www.newsgreen.com/de/holz-comeback-eines-traditionsreichen-wertstoffes/> [10.08.2017].
- o.A, Furnierholz des alten Ägypten und der Neuzeit, o.J.,
auf: <http://www.tischler-schreiner.org/furnierholz-2011966> [06.08.2017].
- o.A., IBO – Österreichisches Institut für Baubiologie und Bauökologie (Hg.): Ökokennzahlen / OI3 Leitfaden, auf: <http://www.ibo.at/de/oekokennzahlen.htm>, [23.08.2017].
- o.A., Johann Heinrich von Thünen-Institut (Hg.),Wirkung der Holznutzung auf das Klima
auf: <http://www.holzundklima.de/hintergrund/index.html> [24.08.2016].
- o.A., Pro:Holz Arbeitsgemeinschaft der österreichischen Holzwirtschaft (Hg.): Wald und Holz sind CO2-Langzeitspeicher; auf: <http://www.proholz.at/co2-klima-wald/co2-speicher-wald/wald-und-holz-sind-co2-langzeitspeicher/> [25.08.2017].
- o.A., Pro:Holz Arbeitsgemeinschaft der österreichischen Holzwirtschaft (Hg.): Waldfläche und Waldvorrat in Österreich; auf: <http://www.proholz.at/co2-klima-wald/waldflaeche-und-vorrat/waldflaeche-und-waldvorrat-in-oesterreich/> [25.08.2017].
- o.A., Pro:Holz Arbeitsgemeinschaft der österreichischen Holzwirtschaft (Hg.): Wald in der EU;
auf: <http://www.proholz.at/zuschnitt/51/wald-in-der-eu/> [25.08.2017].
- pw-Internet Solutions GmbH (Hg.), o.J., auf: <http://www.baumarkt.de/nxs/535///baumarkt/schablone1/HolzBiologie-Aufbau-eines-Baumstammes> [29.08.2017].
- pw-Internet Solutions GmbH (Hg.), o.J. auf: <http://www.baumarkt.de/lexikon/Abbrandgeschwindigkeit.htm> [30.08.2017].
- Sekic, Amir, Tesselation, 2002,
auf: <http://www.lehre.inf.uos.de/cg2/material/20021218/Tesselation.htm> [29.09.2017].
- Wikipedia: Architekt; auf: <https://de.wikipedia.org/wiki/Architekt> [24.07.2017].
- Wikipedia: Abwickelbare Flächen, auf: https://de.wikipedia.org/wiki/Abwickelbare_Fl%C3%A4che [29.09.2017].

ABBILDUNGSNACHWEIS

Sämtliche Darstellungen, Grafiken und Fotos, mit Ausnahme der im folgenden Verzeichnis angeführten Abbildungen, wurden von dem Verfasser dieser Arbeit selbst erstellt und sind geistiges Eigentum des Autors: Wolfgang Windisch.

Abb.1: Teshima Art Museum, Kagawa, 2010; Die Schale als Tragwerk und raumbildendes Element, auf: [https://media-cache-ak0.pinimg.com/originals/98127dd9cff199e1fcd44902ff012e.jpg](https://media-cache-ak0.pinimg.com/originals/98/12/7d/98127dd9cff199e1fcd44902ff012e.jpg) [01.06.2017]

Abb.2: Vergleich des Verformungsverhaltens unter steigender Lasteinwirkung von unterschiedlichen Schalentypen und Seilnetzen, in: Block, Philippe, Gengnagel, Christoph, Peters, Stefan, Faustformel, Tragwerksentwurf, S115.

Abb.3: Verschiedene Stabkuppel- und Gitterschalentypen sowie Rippengewölbe, in: Block, Philippe, Gengnagel, Christoph, Peters, Stefan, Faustformel, Tragwerksentwurf, S112f.

Abb.4: Islers Modellversuche für Formfindung, in: Ramm, Ekkehard/ Schnuck, Eberhard: Heinz Isler Schalen, S85f.

Abb.5: Felix Candela Oceanografico in Valencia, Vgl. auf: <https://www.baunetzwissen.de/beton/fachwissen/schalentypen/geschichtliche-entwicklung-von-schalentypen-151122> [04.06.2017].

Abb.6: Eladio Dieste, Caputto Fruit Plant, Salto, Uruguay, 1971-72, 1986-87, auf: <https://benhuser.com/2012/01/31/eladio-dieste-porto-alegre-rs/> [04.06.2017].

Abb.7: Eladio Dieste Ziegelschalen, auf: <https://www.pinterest.at/liukunpeng/eladio-dieste/?lp=true> & <https://www.pinterest.dk/pin/86975836535093451/> [04.06.2017].

Abb.8: Multihalle Mannheim, 1975, Frei Otto, auf: <http://www.bdb-bw.de/home/> [06.06.2017]

Abb.9: Schalung, Tennishallen Düdingen und Heimberg, in: Ramm, Ekkehard/ Schnuck, Eberhard: Heinz Isler Schalen, S77.

Abb.10: Holz-Zylinderschalen aus Furnierplatten, in: Halasz, Robert von: Holzbautaschenbuch?, S356.

Abb.11: Vergleich verschiedener Konstruktionen, in: Halasz, Robert von: Berichte aus der Bauforschung, Heft 90, S23.

Abb.12: Einwandige Demonstrationsschale vs. doppelwandige Demonstrationsschale in: Halasz, Robert von: Berichte aus der Bauforschung, Heft 90, S5.

Abb.13: Robert von Halasz, Holzbautaschenbuch, 1974 erschienene 7te Auflage, in: v. Halasz: Holzbautaschenbuch?, Cover.

Abb.14: Belastungsversuch Holz HP-Schale, Maßstab 1:7, in: v. Halasz: Holzbautaschenbuch?, S280.

Abb.15: Elefantenhaus Zürich Innenansicht & Isometrisches Detail, in: Hascher, Rainer: Emergent Timber Technologies, S137f.

Abb.16: HOLZ ist... Imagebroschüren, auf: <http://www.gelo.de/Service.htm> [20.09.2017].

Abb.17: Ableitung des dorischen Gebäcks aus dem Zimmermannsbau, in: Fischer, Günther: Vitruv NEU oder was ist Architektur?, S46.

Abb.18: Marc-Antoine Laugier's Titelbild des Essai sur l'Architecture, in: Fischer, Günther: Vitruv NEU oder was ist Architektur?, S186.

Abb.19: Werbekampagne, 300 Jahre Nachhaltigkeit, Deutsche Forstwirtschaft, auf: http://forstcast.net/nachhaltigkeit_carlowitz/1846 [01.08.2017]

Abb.20: a: diverse Holzwerkstoffe, auf: <https://www.tu-braunschweig.de/iwvf/fup/ft/forschung/ftpo/huv> [01.08.2017]
b: Holz-Plastik Kompositwerkstoff, auf: <http://idolza.com/qz/u3j1590/wood-laminate-flooring/ss5095/> [01.08.2017]
c: Verbundwerkstoff: Wabenpappe mit Deckplatte, auf: <https://www.hoechsmann.com/lexikon/28573/halbformat.html> [01.08.2017]

Abb.21: Bregenzerwald, Alt und Neu, auf: <https://www.austria.info/ch/aktivitaeten/stadt-und-kultur/architektur-in-osterreich/architektur-highlights-in-osterreich/vorarlberg-architektonische-highlights> [13.08.2017]

Abb.22: verschiedene Produkte ungewöhnlicherweise aus Holz, auf: <http://cafeedesign.com/wp-content/uploads/2010/09/Bamboo-Pro-with-Apex.jpg>
<https://www.inside-handly.de/news/34134-holz-rueckdeckel-xiaomi-mi-4-jetzt-mit-holz-cover>
<https://s-media-cache-ak0.pinimg.com/originals/48/3b/fc/483bfcbe1f720065a2c6a544648724ed>. [17.08.2017].

Abb.23: Aufbau eines Holzstamms, auf: <http://www.baustoffwissen.de/wissen-baustoffe/baustoffknowhow/grundstoffe/holz/woraus-besteht-holz/> [30.08.2017].

Abb.24: Baumarten nach Bezeichnung ihrer Holzausbildungen, auf: <http://www.baumarkt.de/nxs/535///baumarkt/schablone1/HolzBiologie-Aufbau-eines-Baumstammes> [29.08.2017].

Abb.25: Aufbau von Laub und Nadelholz,
in: Block, Philippe, Gengnagel, Christoph, Peters, Stefan, Faustformel, Tragwerksentwurf, S164.

Abb.26: Spannungs-Dehnungs-Diagramm in Faserrichtung,
in: Block, Philippe, Gengnagel, Christoph, Peters, Stefan, Faustformel, Tragwerksentwurf, S165.

Abb.27: Spannungs-Dehnungs- Diagramm verschiedener Werkstoffe,
in: Block, Philippe, Gengnagel, Christoph, Peters, Stefan, Faustformel, Tragwerksentwurf, S158.

Abb.28: Zusammenhang von Druckspannung und Eindrückung, quer zur Faser
in: Block, Philippe, Gengnagel, Christoph, Peters, Stefan, Faustformel, Tragwerksentwurf, S165.

Abb.29: Käfer als Holzschädling, auf: <https://www.ofen.de/blog/holz-schaedlinge.html> [05.08.2017].

Abb.30: Unterschiedliche Verformungen von Vollholzquerschnitten bei Feuchtewechsels
in: Block, Philippe, Gengnagel, Christoph, Peters, Stefan, Faustformel, Tragwerksentwurf, S165.

Abb.31: maximale Schwindmaße in Prozent für verschiedene Holzarten,
auf: <https://www.gdholz.net/fachwissen-holz/qls-wie-holz-quilt-und-schwindet.html> [29.08.2017].

Abb.32: Vollholzstütze mit Kopfband nach 40 minütiger Brandbeanspruchung
auf: <http://www.db-bauzeitung.de/allgemein/schuetzender-deckmantel/#slider-intro-2> [30.08.2017].

Abb.33: Brandversuch BSH Träger,
auf: <http://www.db-bauzeitung.de/allgemein/schuetzender-deckmantel/#slider-intro-2> [30.08.2017].

Abb.34: Computertomographie für umfassendes 3D Modell,
auf: https://www.holzkurier.com/schnittholz/2013/04/voller_rundholzdurchblick.html [30.08.2017].

Abb.35: Einschnittoptimierung für Rundholz nach 3D Farb- und Röntgenscan,
auf: https://www.youtube.com/channel/UCeVr2VEc96_eyGtn0JeaQ [03.09.2017].

Abb.37: Querschnittsbezogene Verminderung des Einflusses einer Fehlstelle
in: Rinke, Maria/ Schwartz, Joseph (Hg.): Holz: Stoff oder Form, Transformationen einer Konstruktionslogik, S52.

Abb.36: Èmys Bogenkonstruktion als Bohlenstapel, 1825,
in: Rinke, Maria/ Schwartz, Joseph (Hg.): Holz: Stoff oder Form, Transformationen einer Konstruktionslogik, S270.

Abb.38: Überblick der Holzwerkstoffe,
Angelehnt an: Block, Philippe, Gengnagel, Christoph, Peters, Stefan, Faustformel, Tragwerksentwurf, S166.

Abb.39: Holzmassivbauweise einer Kinderkrippe, auf: <http://nachrichtenamort.de/zapfendorf/gemeinderat-17-01-2013-neue-kinderkrippe-neubau-christophorus/attachment/holzmassivbauweise-titelbild/> [15.09.2017]

Abb.40: Shigeru Ban, Haesley Nine Bridges Golf Club House, 2010, Korea,
auf: <https://www.world-architects.com/es/pages/insight/materials-shigeru-ban> [12.09.2017].

Abb.41: Frei Otto, Multihalle Mannheim 1975 als Paradebeispiel für eine gelungene Holzkonstruktion auf: https://de.wikipedia.org/wiki/Frei_Otto#/media/File:Multihalle07.jpg [09.09.2017].

Abb.42: Parametrische Flächen und Körper,
Vgl.: <https://www.pinterest.de/pin/374221050273558809/?lp=true> [10.08.2017].

Abb.43: Freiform aus Kontrollpunkten und parametrisches Hängemodell,
auf: <https://parametricmonkey.com/tutorials/> [10.08.2017].

Abb.44: Weltkarte mit einer Auswahl an internationalen Zertifizierungssystemen,
in: proHolz (Hg.), att. Zuschnitt, Gebäudezertifizierung und nachhaltiges Bauen, Ökostandards in Österreich, S10.

Abb.45: TOB Kategorien
in: proHolz (Hg.), att. Zuschnitt, Gebäudezertifizierung und nachhaltiges Bauen, Ökostandards in Österreich, S11.

- Abb.46: Photosynthese und Kohlenstoff-speicherung im Holz
in: proHolz (Hg.), att. Zuschnitt, Gebäudezertifizierung und nachhaltiges Bauen, Ökostandards in Österreich, S7.
- Abb.47: Lebenszyklus Holz, Kaskadennutzung
in: proHolz (Hg.), att. Zuschnitt, Gebäudezertifizierung und nachhaltiges Bauen, Ökostandards in Österreich, S7.
- Abb.48: Waldflächen Österreichs, auf: <http://www.proholz.at/co2-klima-wald/waldflaeche-und-vorrat/waldflaeche-und-waldvorrat-in-oesterreich/> [25.08.2017].
- Abb.49: Digitale Fabrikation, 3D Cocooner, Prototyp Firma Festo,
auf: <https://www.festo.com/group/fr/cms/11958.htm> [24.07.2017].
- Abb.50: [c] space Pavilion by Alan Dempsey and Alvin Huang, 2008,
auf: <http://openbuildings.com/buildings/cspace-drl10-pavilion-profile-5758> [24.07.2017].
- Abb.51: Robotergestützte Assemblierung komplexer Holztragwerke, auf: <http://www.dfab.ch/de/media-release/architecture-and-digital-fabrication-new-continuing-education-programme-at-eth-zurich/> [24.07.2017].
- Abb.52: a: Hooke Park Biomass Boiler House
b: gebogene Bäume im Hooke Park
c: Anleitung für Materialgewinnung für den Schiffsbau
d: 3D Scan der Bäume
auf / in: a: <https://i.pinimg.com/564x/da/5e/5e/da5e5e43d7a5bbd259b9af097c9fd656.jpg> [28.07.2017].
b,c,& d in: Menges u.a.: Advancing Wood Architecture, A computational approach, S 171f.
- Abb.53: Landesgartenschau Schwäbisch Gmünd 2014, Exhibition Hall
a: Innenansicht
b: Robotergestützte Fertigung
c: Aufbau und Konstruktionsdetail
auf: <http://www.archdaily.com/520897/landesgartenschau-exhibition-hall-icd-itke-iigs-university-of-stuttgart> [29.07.2017].
- Abb.54: Bauaufgaben und deren Spannweiten, eigene Abbildung.
- Abb.55: Holzbauanteil in Österreich, Statistische Erhebung von Hochbauvorhaben,
Vgl: in: proHolz Austria (Hg.): att Zuschnitt, Holzbauanteil in Österreich, Statistische Erhebung von Hochbauvorhaben, S 8,20-23.
- Abb.56: Grenzwerte der Durchbiegung & Anteile Durchbiegung nach ÖNORM 1995-1, in: ÖNORM EN 1995-1-1, 2015.
- Abb.57: Zulässige Lamellendicken für verschiedene Krümmungsradien und Festigkeitsklassen nach [E DIN EN 16351:2011-12], in: DIN EN 16351:2011-12.
- Abb.58: Vorhandene Spannungen bei maximaler Lamellenstärke und minimalem Krümmungsradius
in: Aondio, Patrick: Berechnung von Zylinderschalen aus Holz und Holzwerkstoffen unter Berücksichtigung der Spannungsrelaxation, Diss. TU München, S68.
- Abb.59: Ausnutzungsgrad bei maximaler Lamellenstärke und minimalem Krümmungsradius
in: Aondio, Patrick: Berechnung von Zylinderschalen aus Holz und Holzwerkstoffen unter Berücksichtigung der Spannungsrelaxation, Diss. TU München, S68.
- Abb.60: Arbeitslinie-Holz, Verteilung der Längenänderung bei gleichmäßiger Beanspruchung
Vgl.: Block, Philippe, Gengnagel, Christoph, Peters, Stefan, Faustformel, Tragwerksentwurf, S165.
- Abb.61: Fotomontage, Vgl. Titelbild des Essai sur l'Architecture von Marc-Antoine Laugier
Photomontage von Nicole Antunovic & Matthias Hierzer, angelehnt an: Titelbild des Essai sur l'Architecture in: Fischer, Güntehr: Vitruv NEU oder Was ist Architektur?, S186.
- Abb.62: COBE, Wettbewerbsbeitrag für ein Hallenbad in Kopenhagen,
auf: <http://afasiaarchzine.com/tag/cobe/page/3/> [01.10.2017].
- Abb.63: Alvar Aalto 1949–1952: Sport hall for the Helsinki university of Technology in Otaniemi, Espoo. Photo Heikki Havas / Alvar Aalto Museum, auf: <http://architecture.tumblr.com/> [01.10.2017].
- Abb.64: Kaufmann Holz AG, Halle Au, auf: <http://admin.mkp-ing.com/projekte/industrie-gewerbe/lagerhalle-reuthe-a> [10.09.2017].

DANKSAGUNG

Als allererstes möchte ich meiner Familie danken, die mich auf meinem Weg stets begleitet und unterstützt hat. Ohne diesen bedingungslosen Rückhalt wäre vieles nicht möglich gewesen.

Ein großes Dankeschön auch an meinen Betreuer Univ.-Prof. Dr.-Ing. Stefan Peters, für die aufgebrachte Geduld und die Anregungen, welche mich immer wieder zu neuen Erkenntnissen geführt haben.

Desweiteren möchte ich dem gesamten Institut für Tragwerksentwurf meinen Dank aussprechen. Besonders hervorheben möchte ich folgende Personen, Dipl.-Ing. Joshua Tapley, DDipl.-Ing. Eva Maria Pirker, Dipl.-Ing. Stefan Leitner und Dipl.-Ing. Gernot Parmann, die stets ein offenes Ohr oder eine helfende Hand für mich hatten.

Dem kunterbunten Haufen von fantastischen Menschen, bekannt als AZ Turm, möchte ich für die gelungene Studienzeit und der notwendigen Ablenkung danken, ohne die der Alltag viel zu grau wäre. Danke auch an Nici und Hierzi für die Unterstützung. Besonderer Dank gilt dir Simone, für die Hilfe in thematischen und vor allem in stilistischen Angelegenheiten.

