



*Franz Tschümperlin
Holzingenieur FH
SJB.Kempter.Fitze AG
Eschenbach, Schweiz*

Von der Idee bis zur leistungsfähigen Verbindung

**Idee – Modell – Prüfung – Bemessung –
Realisierung**

Von der Idee bis zur leistungsfähigen Verbindung

Idee – Modell – Prüfung – Bemessung – Realisierung

Die Geschichte

Das Centre Pompidou ist seit 1967 eine kulturelle Institution, welche der modernen und zeitgenössischen Kultur eine Plattform bietet, sich der Öffentlichkeit zu präsentieren. Das Museum Centre Georges Pompidou Paris ist eines der weltweit wichtigsten Museen und wurde 1977 in Paris eröffnet. Im Jahre 2003 wurde entschieden, in Metz die erste Aussenstelle des Centre Pompidou zu realisieren. Der international ausgeschriebene Architekturwettbewerb wurde vom Team um den Japaner Shigeru Ban gewonnen. Die Arbeiten der Holzkonstruktion wurde durch Holzbau Amann ausgeführt. Das Centre Pompidou in Metz wurde im Sommer 2010 eröffnet und wird im ersten Jahr der Eröffnung bereits über 700'000 Besucher begrüßen können.

Wettbewerb

Am Anfang stand die Idee des chinesischen Strohhutes, bei welchem in drei Richtungen das Stroh derart geflochten wird, dass die Oberfläche in regelmässige Sechsecke und Dreiecke aufgeteilt wird.



Abbildung 1 & 2: Chinesischer Strohhut / Modell des CPM ©CA2M / Shigeru Ban

Dieser Hut soll dabei von drei grossen, aufeinandergestapelten Stahlbetonröhren durchdrungen werden. Den Spitz des Hutes symbolisiert ein ebenfalls sechseckiger Stahlurm.



Abbildung 3 & 4: Visualisierung / Stahlurm ©CA2M / Shigeru Ban

Holzkonstruktion im Wettbewerb

Der Lösungsansatz der Grundvariante bestand aus Kerto-FSH, welches auf der Baustelle in einer Schalung mit Nägeln oder Schrauben miteinander verbunden wird und auf der Baustelle in die Form gebogen wird.

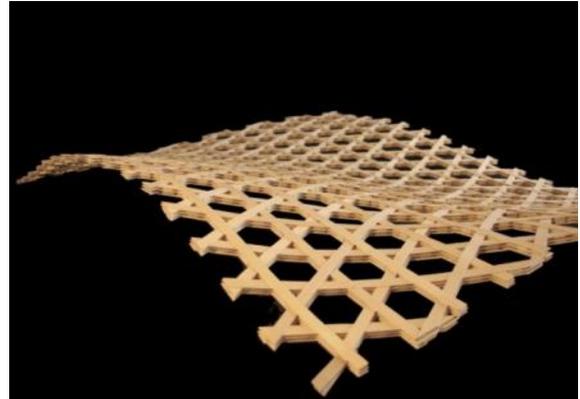


Abbildung 5 & 6: Konzeptstudien Stütze und Konstruktion im Wettbewerb 2003 ©CA2M / Shigeru Ban

Weiterentwicklung im Rahmen der Ausschreibung

Einerseits wurde vom Wettbewerbsteam die Geometrie weiterentwickelt und dreidimensional erfasst und andererseits wurde aber auch die Konstruktion weiterentwickelt.

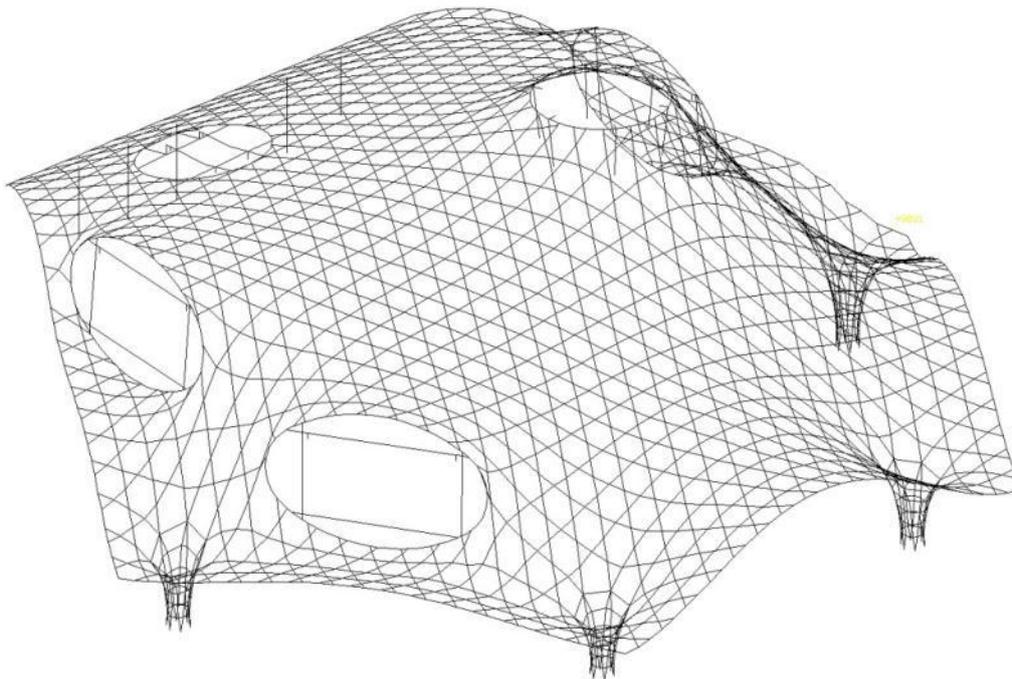


Abbildung 7: Basisgeometrie der Ausschreibung©CA2M / Shigeru Ban

Die Ingenieure vom Wettbewerbsteam entwickelten das ursprüngliche Detailkonzept mit dem gebogenen FSH weiter zu gekrümmtem Brett-schicht-holz und statt der 3x3 zu 3x2 Lagen. Die Knoten werden dabei mit durchgehenden Gewindestangen M24 der Länge 1.25m zusammengeschraubt, während die Stahlprofile für die Aufnahme der Membran individuell entlang der Träger gekrümmt werden müssen.

Die Problemstellungen der ausgeschriebenen Variante waren vielfältig:

- Die Struktur muss fertig aufgerichtet sein, damit die Knoten fixiert werden können
- Um den Schlupf zu kontrollieren, können die Bohrungen nur vor Ort ausgeführt werden
→ Vorhaltezeit des Gerüsts
- Alle Träger müssen zweisinnig gekrümmt geleimt werden. Toleranzen aus den Abweichungen können dabei nicht aufgenommen werden

Ideenentwicklung fürs Angebot

Die Struktur musste nun grundlegend überarbeitet werden, da die ausgeschriebene Variante so nicht umgesetzt werden konnte. Als Kernpunkte stellten sich folgende Fragen heraus:

- Die Erscheinung der Wettbewerbsvariante muss beibehalten werden.
- Die Struktur muss besser mathematisch fassbar sein (Schlupf im Knoten)
- Die Montage muss sichergestellt sein
- Die Montagedauer muss optimiert werden
- Die Toleranzen müssen kontrollierbar werden

Als übergeordnetes Ziel sollten die Eigenspannungen eliminiert werden und eine Montage Lage für Lage angestrebt werden. Die Ideenentwicklung fokussierte sich somit auf eine mehrteilige Ausführung der Kreuzungspunkte, während bezüglich der Gurten eine Fertigung aus gekrümmtem und überfrästem Brettschichtholz in der Endgeometrie im Vordergrund stand.

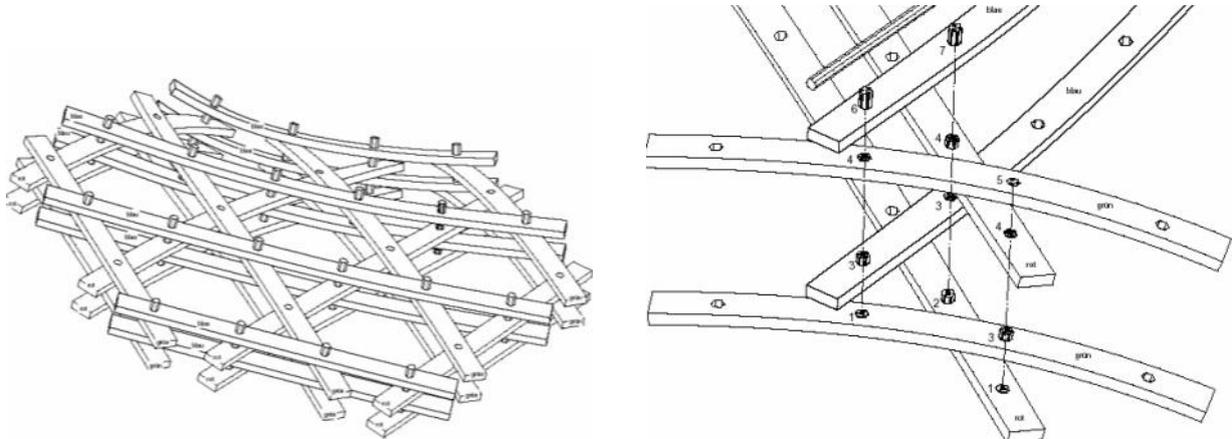


Abbildung 8 & 9: Funktionsweise und Montagekonzept der Holzstruktur

Für die Kalkulation des Angebots hat sich Holzbau Amann entschieden, einen Dachausschnitt im Massstab 1/1 zu fertigen, um alle Abläufe besser fassen zu können.



Abbildung 10: Musterelement 1/1 für Angebot ©Holzbau Amann GmbH

Die Geometrie

In Metz sind die Schneelasten mit ca. 50kg/m^2 sehr gering. Aufgrund der Membran ist auch die Auflast gering und so spielt dabei das Eigengewicht der Konstruktion eine wichtige Rolle.

Voruntersuchungen ergaben, dass Unstetigkeiten in der von den Architekten erstellten Geometrie zu enormen Biegemomenten in den Gurten führen. Dies führte zu einem relativ grossen Querschnitt und somit zu einem Anstieg des Eigengewichts, da die Dimension für das ganze Dach identisch zu wählen war. Diese Erhöhung des Eigengewichts führte wieder zu einer Erhöhung der Normalkräfte und der Biegemomente im Bereich der Unstetigkeiten.

Die Homogenisierung der Hauptfläche stellte somit ein enormes Optimierungspotential dar und wurde voll ausgeschöpft. Im Weiteren konnte die Form näher an die Stützform herangeführt werden. Diese Arbeiten hatten eine beträchtliche Reduktion des Holzeinsatzes zur Folge. Gleichzeitig war dies eines der komplexesten Aufgaben im Entwicklungsprozess.

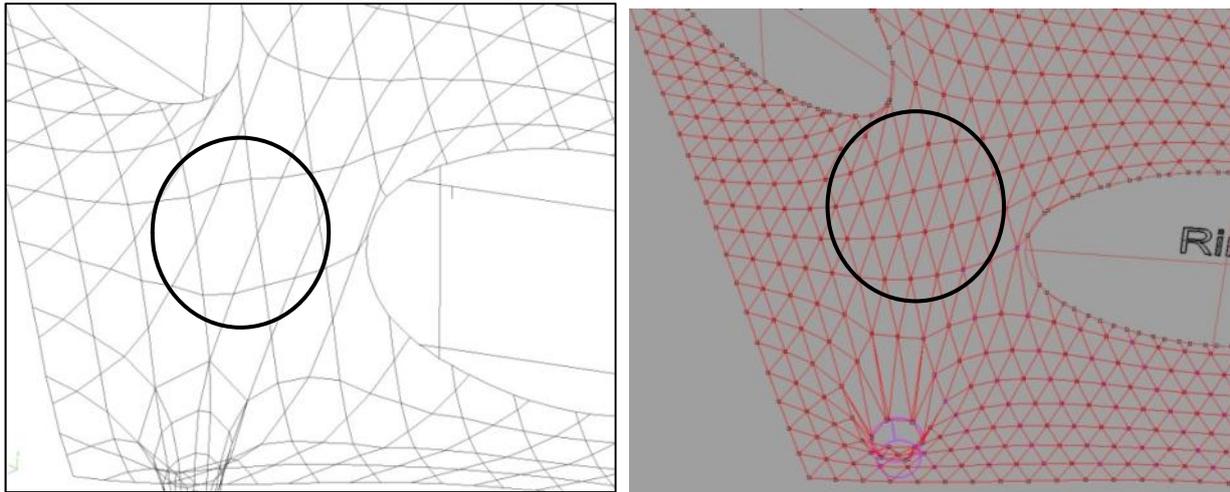
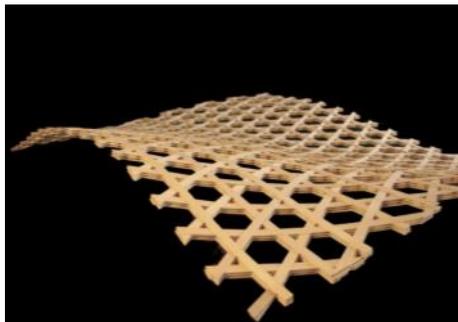


Abbildung 11 & 12: Geometriausschnitt Ausschreibung und optimierte Variante für Ausführung ©Holzbau Amann GmbH

Entwicklung der Verbindungen - Beispiel Knoten

Für die Bemessung des Tragwerks musste bei den Verbindungen ein Weg gefunden werden, damit das Tragwerk auch mit genügender Genauigkeit erfasst werden kann. In der Entwicklung wurde deshalb auf folgende Punkte grossen Wert gelegt:

- Hohe Präzision in der Vorfertigung
- Schlupffreie Verbindungen
- Zwängungsfreie, lagenweise Montage
- Lineares Tragverhalten im Gebrauchsbereich
- Duktiles Bruchverhalten (Robustheit)
- Kleiner Einfluss aus Schwinden und Quellen



Version A

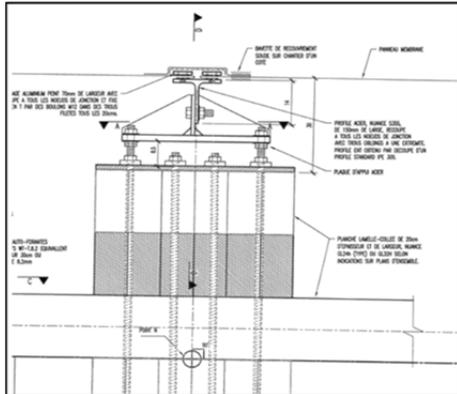
Prinzip

Kerststreifen auf einem Lehrgerüst gekrümmt und in ihrer Lage fixiert / verbunden

Projektphase

Wettbewerb 2003

Abbildung 13: Modellstudie Wettbewerb ©CA2M / Shigeru Ban



Version B

Prinzip

BSH zweisinnig gekrümmt geleimt

Mit 16 Gewindestangen M24-8.8 verbunden

Projektphase

Ausschreibung 2005



Version C

Prinzip

Dollen in Buchensperrholz mit Nocken zur Führung

BSH rundum gefräst

Projektphase

Machbarkeit / Angebot 2006



Version D

Prinzip

Dollen in Buchensperrholz mit innenliegenden Gewin-

destangen und Stahlteil zur Querkraftübertragung

Projektphase

Ausführungsprojekt 2007

Abbildung 14-16: Dollen B Ausschreibung – C Angebot – D Basis



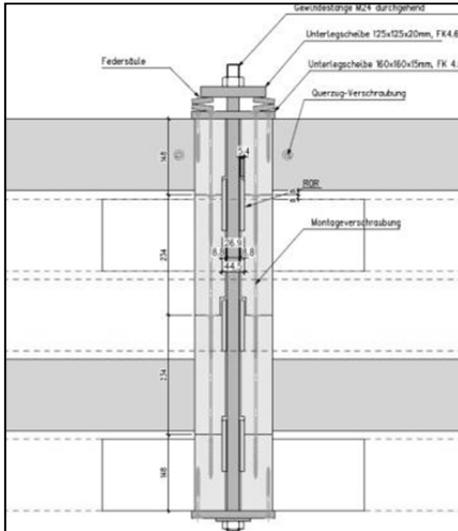
Version E - Ausführung

Prinzip

Dollen in Buchensperrholz mit innenliegenden Gewindestangen und Querkraftübertragung mittels Reibung

Projektphase

Ausführung 2009



Diese Dollen wurden aus speziell hergestelltem Buchensperrholz gefertigt und in den Gurten vormontiert. Eine Stahlhülse stellte die Führung und Ausrichtung der Kreuzungen sicher. Die statische Kraftübertragung in den Fugen wird über Reibung sichergestellt, da die gesamte Dollengruppe mittels Gewindestangen und Tellerfedern vorgespannt wird.

Abbildung 17-18: Dollen E Ausführung

Versuche

Die Prüfungen für das CPM wurden an der BFH in Biel durchgeführt. Grundsätzlich wurden zu jedem Bauteil Vorbemessungen geführt um die kritischen Punkte zu ermitteln. Im Weiteren erstellten wir zu jedem Punkt Bemessungsmodelle. Die effektiven Versuchsarbeiten können in fünf Bereiche unterteilt werden:

- A** Vorversuche an der Einzelverbindung zur Überprüfung der Bemessungsmodelle, Kontrolle der Versagens-Mechanismen und Steifigkeitswerte (Einzelbauteilversuch in kleiner Zahl)



Abbildung 19-21: Einzelversuche

- B** Versuche zur Überprüfung des Zusammenwirkens der Verbindungen, Kontrolle der Versagens-Mechanismen und Gesamtsteifigkeit (Grossversuch)

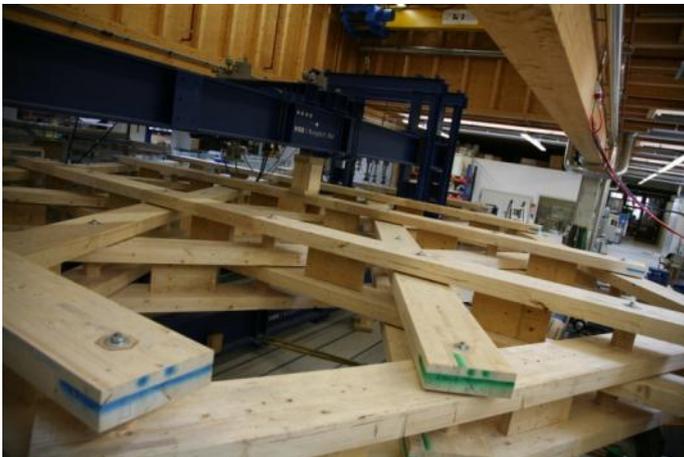


Abbildung 22: Grossversuch

- C** Optimierung der Bauteile aufgrund A und B sowie anderer gewonnener Erkenntnisse im Projektverlauf
(Einzelbauteilversuch in kleiner Zahl)



Abbildung 23: Einzelversuch Optimierung

- D** Ermittlung von Widerstandswerten für die Bemessung bei ausgewählten Bauteilen der Ausführung
(Einzelbauteilversuch nach EN 14358, z.B. Biegesteifigkeit Vorspannung)



Abbildung 24: Scherversuch Dollen

- E** Ermittlung von einzelnen Materialwiderstandswerte für die Bemessung von ausgewählten Materialkennwerten
(Kleinversuche nach EN 14358, z.B. Reibbeiwerte; Druckwerte)



Abbildung 25: Druckversuch Sperrholz

Versuchsgestützte Auswertung

Insgesamt wurden nur die Resultate der Versuche Typ D und E effektiv in der Bemessung eingesetzt.

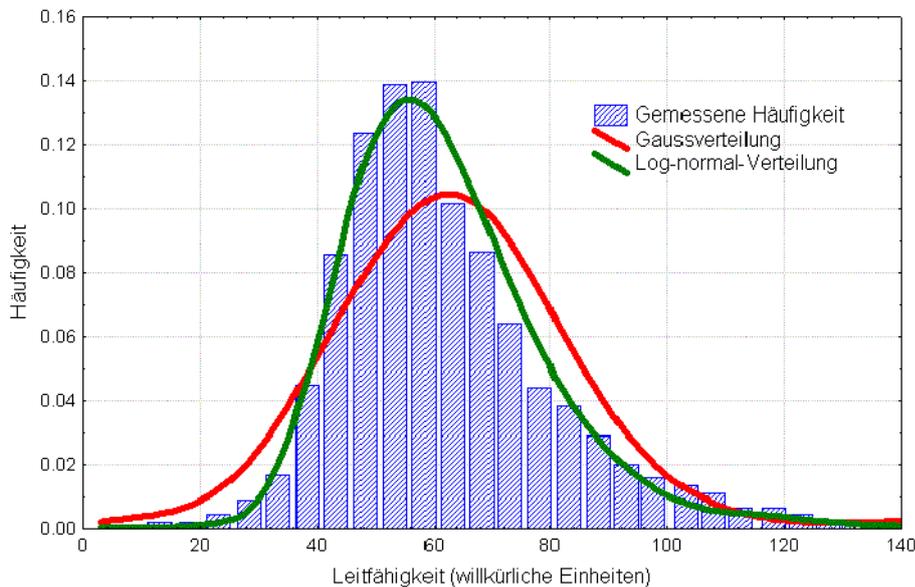


Abbildung 26: Verteilungen: Normalverteilung: kleineres Maximum; Log-Normal: asymmetrisch

In der Statistik gibt es vor allem zwei unterschiedliche Annahmen für die Auswertung von Materialfestigkeitswerten: Die Normalverteilung (Gauss) und die Log-Normalverteilung. Die Normalverteilung geht von einer streng symmetrischen Stichprobenverteilung aus, während die Log-Normalverteilung im unteren Festigkeitsbereich eine kleinere Streuung voraussetzt als im Bereich über dem Mittelwert.

Für Stahl wird aufgrund der isotropen Eigenschaft die Normalverteilung zu Grunde gelegt. Bei Festigkeitswerten, welche auf dem Werkstoff Holz basieren, wird hingegen die Log-Normalverteilung vorausgesetzt (vgl. SIA 265/1-10).

Wir haben Verbindungen eingesetzt, bei welchen sowohl das Holz wie auch der Stahl eine massgebliche Rolle spielt. Um auf der sicheren Seite zu liegen, empfiehlt es sich, nach beiden Grundsätzen auszuwerten und den entsprechend ungünstigeren Wert in der Bemessung einzuführen. Ein besonderes Augenmerk gilt hier der Normung. Hierbei gibt es widersprüchliche Vorgaben zwischen EN 14358-SIA 265.175 und SIA 265/1 zu analysieren (z.B. Vertrauensniveau und Stichprobengrösse).

Statische Modellierung und Bemessung

Das statische Modell musste dahingehend angepasst werden, dass die Unterkonstruktion in Stahl und Stahlbeton komplett mit einem ‚vereinfachten‘ System berücksichtigt wird. Dies erfolgte, um die Auswirkungen aus den gegenseitigen Abhängigkeiten genügend genau zu erfassen.

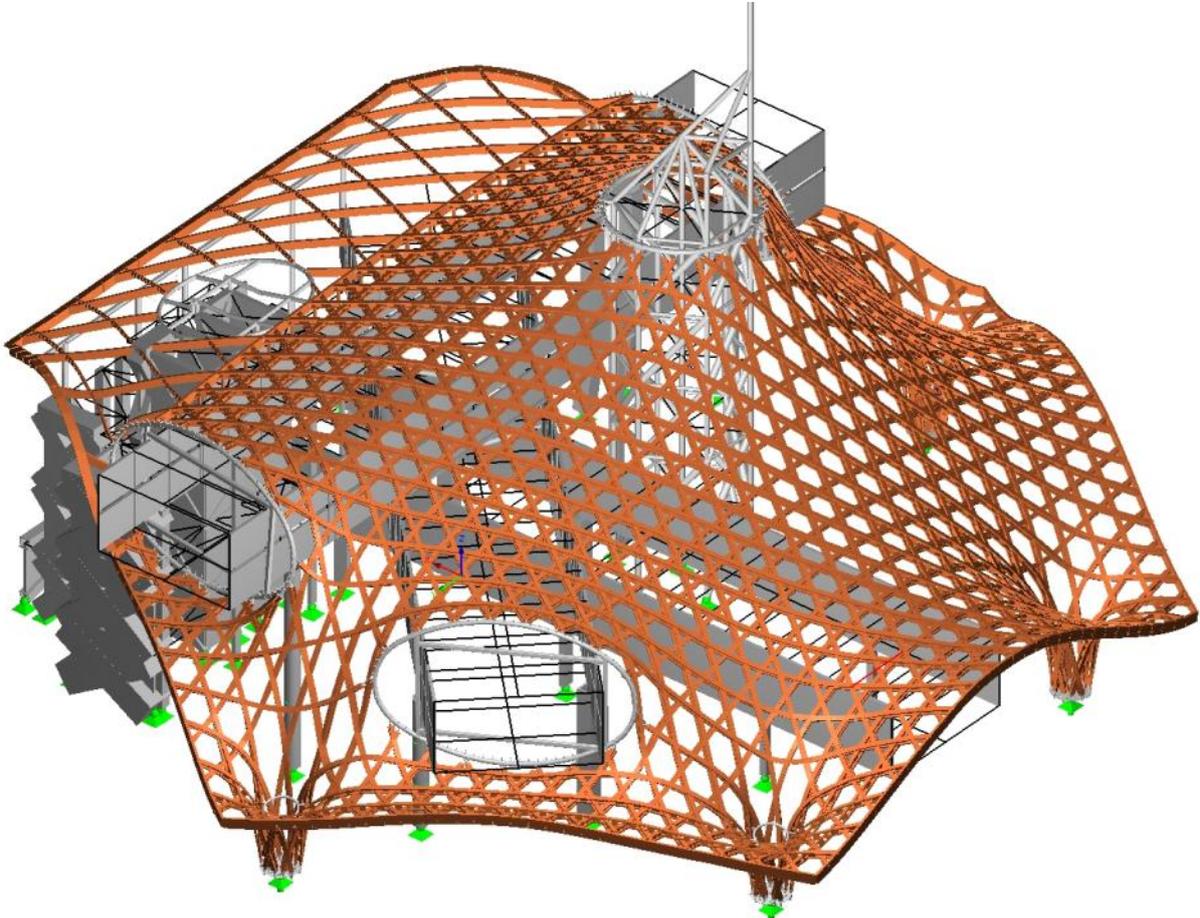


Abbildung 27: Stabtragwerkmodell gerendert

Um die Schnittkräfte in den Verbindungen und Bauteilen zu berechnen, musste jeder Gurt, jedes Schub Brett und die Dollenabschnitte mit ihrer entsprechenden Ausrichtung im Raum modelliert werden.

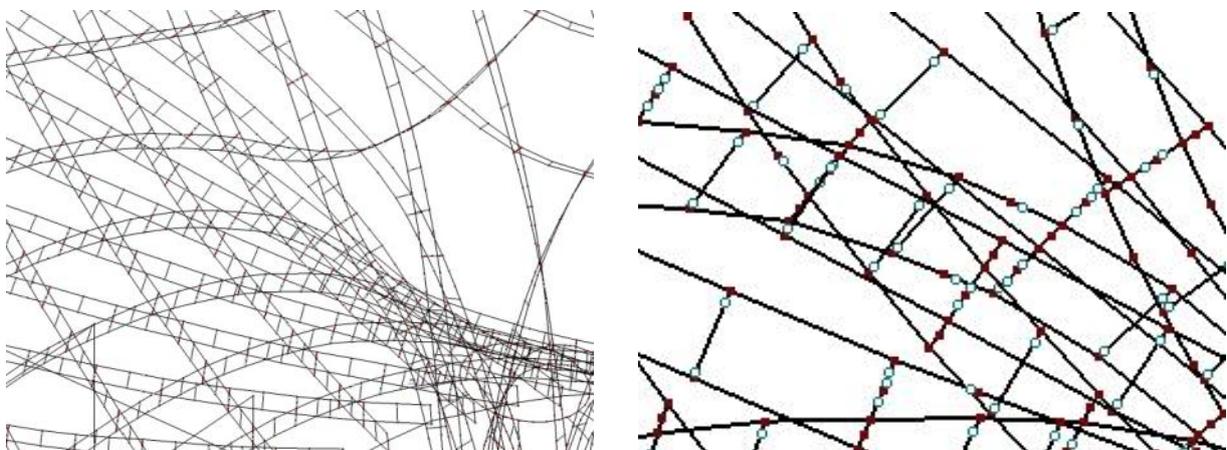


Abbildung 28 & 29: Ausschnitte des Stabtragwerkmodells

Geometrie und Produktion

Um die angestrebte hohe Präzision zu erreichen wurde die gesamte Konstruktion in einem Freiformmodellierprogramm erfasst und sämtliche Flächen mit NC-Technologie gefräst. Da ausser der Stirnfläche keine Fläche der Gurte planar ist und so keine herkömmliche Planung durchgeführt werden konnte. Es musste so gewährleistet sein, dass alle Informationen von den Belastungsannahmen über die Bemessung und Produktion bis hin zur Montage digital vorhanden sind. Diese mussten automatisch im Prozess mitlaufen, obwohl die Schnittstellen unter den verschiedenen beteiligten EDV-Programmen nicht werkseitig eingebaut sind.

Die Ursprungsgeometrie wies zudem Unstetigkeiten auf. Hierzu wurde die sogenannte Masterfläche in mehreren Rechenläufen optimiert und lokale Unstetigkeiten geglättet. Zudem konnte innerhalb enger Vorgaben der Bauherrschaft die Form dahingehend angepasst werden, dass ein Teil der Biegemomente in der Holzkonstruktion reduziert und in Normalkräfte umgewandelt wurden (Stützformoptimierung).

Einer der entscheidenden Kostenfaktoren stellte dabei die Optimierung der Rohlinge, aus welchem die Gurte gefräst werden. Es wurde ein Optimierungsprogramm entwickelt, welches vor allem folgende Parameter berücksichtigte:

- Einkauf der Rohlinge (Dimensionen; gerade, einsinnig gekrümmt, zweisinnig gekrümmt)
- Abspannungsvolumen (Maschinenstunden)
- Faserneigungswinkel (Statische Leistungsfähigkeit)
- Kosten für die Längsstösse

Dieses Programm bestimmte die abschliessende Geometrie der Gurte, welche im Rhino-Freiformmodellierer definiert und für die Maschine aufbereitet wurde.

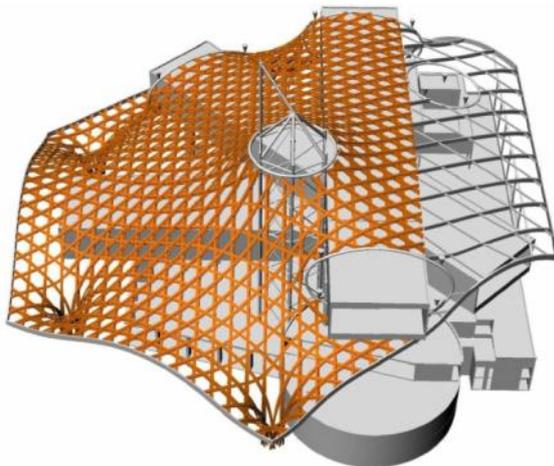


Abbildung 32 & 33: Ausführungsmodell NURBS / Gurtausschnitte ©Holzbau Amann GmbH



Abbildung 34: Gurt zur Hälfte gefräst ©Holzbau Amann GmbH

Montage

Die Montage erfolgte auf rechtwinklig zur untersten Lage verlaufenden Unterzugsachsen. Diese wurden unter Beihilfe eines Geometers exakt ausgerichtet und anschliessend wurde Lage für Lage montiert. Das Gerüst wurde mit Standard-Gerüsttürmen und oben liegenden Plattformen realisiert. Die Konstruktion wurde zonenweise fertig montiert, die Gerüsttürme entfernt und in einer anderen Zone wieder aufgestellt. Dies erforderte eine minutiöse Montageplanung inklusive der Bemessung aller relevanten Zwischenstände.

Realisierung 2008-2010



Abbildung 35: Baustellenfoto 2009



Abbildung 36: Eröffnung 2010

Holzbau Holzbau Amann GmbH, D-Weilheim
www.holzbau-amann.de
 Tobias Döbele

Holztragwerk SJB.Kempter.Fitze AG, Eschenbach SG
www.sjb.ch
 Franz Tschümperlin / Christoph Meier

Création Holz GmbH
www.creation-holz.ch
 Hermann Blumer

Geometrieentwicklung Design to production, Erlenbach ZH
www.designtoproduction.com
 Fabian Scheurer

