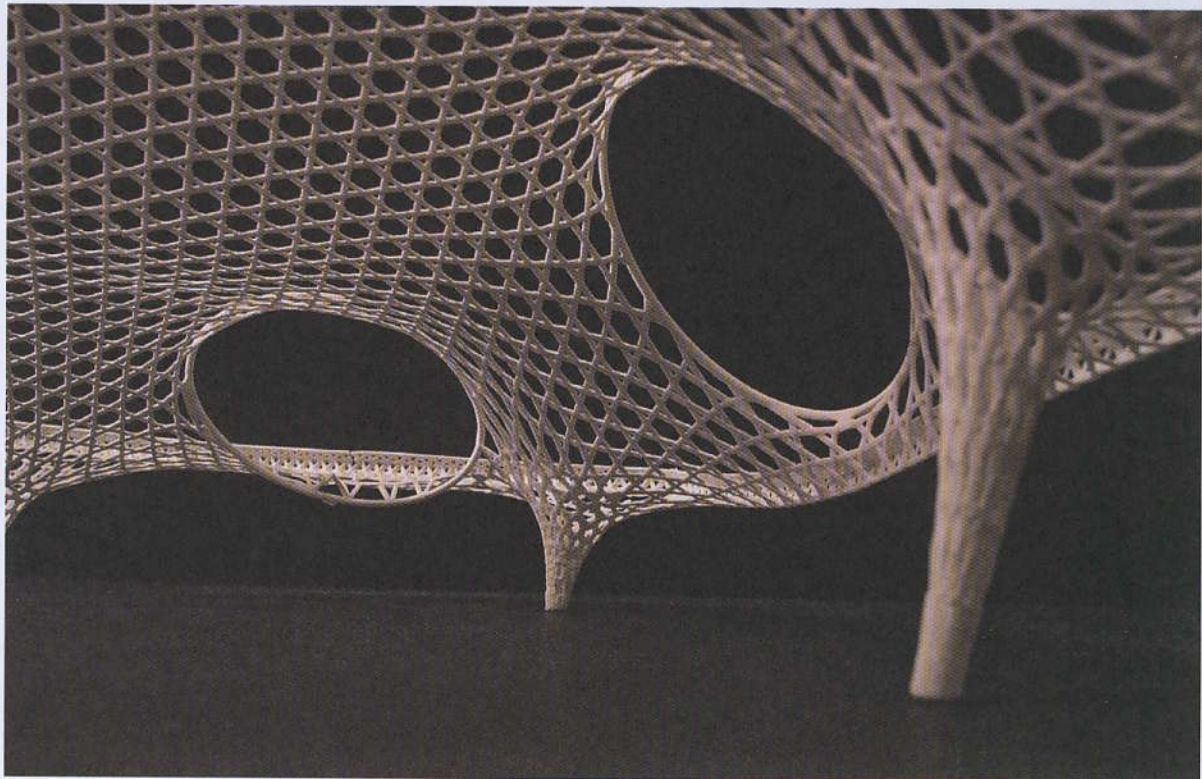


Zur Kommunikation zwischen Zimmermeistern und CNC-Fräsen

Anne Kockelkorn



Modellfoto der Tragstruktur

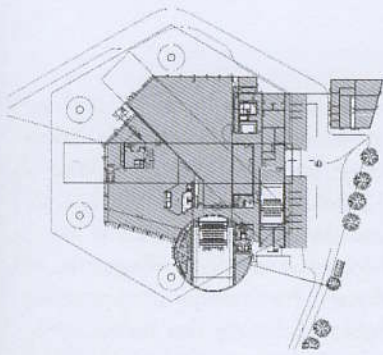
Projekt: Centre Pompidou
Ort: Metz, Frankreich
Auftraggeber: Stadt Metz
Status: Erste Konzeptphase 2004.
Fertigstellung vorgesehen für 2009
Programm: Ausstellungsräume, Ateliers, Konferenzräume und Büros
Fläche: 12.500 m²
Struktur: gewobenes Flechtwerk aus sechs Trägerlagen
Architekten: Shigeru Ban, Jean de Gastines and Philip Gumuchdjian
Dachkonzept: AGU – Cecil Balmond, Francis Archer, Martin Self
Arup Team: Paul Nuttall, Ben Lewis, Sophie La Bourva, Emmanuelle Danisi

Komplexe geometrische Holztragwerke wie das Centre Pompidou in Metz stellen den Zimmermann vor neue Aufgaben: Er braucht nicht nur ein überdurchschnittliches räumliches Vorstellungsvermögen und die Fähigkeit, systematisch Optimierungskriterien zu bestimmen, um Zeit und Geld zu sparen. Er muss auch das 3D-Modell bis ins Detail aufbauen, um daraus die richtigen und notwendigen Informationen sowohl an die CNC-Maschine als auch an die ausführenden Handwerker übermitteln zu können. Daraus leiten sich neue Softwareaufgaben ab, die nur in enger Kooperation von Geometrie-Spezialisten, Programmierern und Handwerkern zu lösen sind. Durch die Teamarbeit dringen die Fachleute gemeinsam in das ureigenste Aufgabengebiet des Architekten ein: in die zeichnerische Ausführung der Geometrie einer Konstruktion und ihrer Wirkung auf den Raum.

Konstruktion ist auch für Handwerker eine virtuelle Angelegenheit. Selbst bei traditioneller Bauweise kennt der Zimmermeister die Form und die Konstruktionsweise eines Dachstuhls auswendig. Er hat bei herkömmlicher Arbeitsmethoden jedoch analoge Darstellungsmittel wie Grundriss und Schnitt zur Verfügung, die seinem Gedächtnis und räumlichen Vorstellungsvermögen auf die Sprünge helfen. Was passiert jedoch, wenn anstelle des Dachstuhls eine amorph verformte Dachgeometrie gebaut werden soll, wie dies beim derzeit im Bau befindlichen Centre Pompidou von Shigeru Ban in Metz der Fall ist? Das frei undulierende Flechtwerk der Dachkonstruktion besteht aus 1.790 individuell zugeschnittenen Einzelträgern und ca. 7.000 Verbindungsstücken, welche in drei Varianten zusammengeschraubt werden können. Was zunächst nach einer Aufgabe für einen zahlenbegabten Autisten klingt, ist letzten Endes vor allem eine

Kommunikationsfrage: zwischen der NURBS-Flächengeometrie, den Tabellensystemen von Holzbau-Programmen und der CNC-Maschine – und natürlich zwischen Programmierer, Zimmermann und dem Montagetrupp auf der Baustelle. An allen Kontaktstellen müssen die korrekten und notwendigen Informationen reibungsfrei übermittelt werden, ohne Datensalat und ohne Informationsüberschuss.

Die Arbeitsgrundlage für die ausführende Holzbaufirma Amann im Südschwarzwald war eine von Shigeru Ban gelieferte dxf-Datei. Die Form war als 3D-Gitternetz modelliert, Grundriss, Ansichten und die Gipfelpunkte des Tragwerks festgelegt; aber es lag in der Verantwortung der Firma, aus diesem Gitternetzrost ein funktionstüchtiges 3D-Modell in Rhino zu entwickeln. Doch Bauwerke sind auch am Rechner nicht ohne weiteres skalierbar, genauso wenig wie man aus einer Konzeptskizze sofort die Detailzeichnung ab-

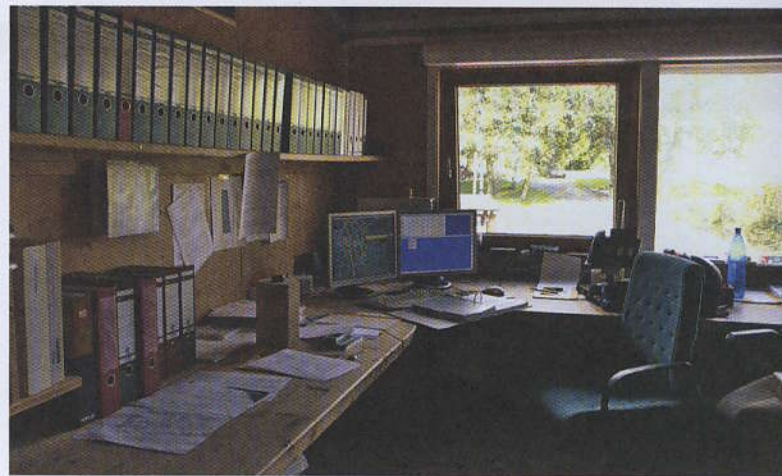


Grundriss des Erdgeschosses

Die Ausstellungsräume sind im Centre Pompidou in Metz in rechteckigen Boxen untergebracht, die unter der durchgehenden Dachhaut liegen. Diese war zunächst als Membran konzipiert. Später entwickelte Cecil Balmond dafür eine Konstruktion mit vier Auflagerpunkten, die bis zum Boden reichen. Anders als eine Schalen- oder Membrankonstruktion kann dieses Dachgeflecht auch Biegemomente aufnehmen.



leiten kann. Mit den dxf-Dateien stand Zimmerermeister Martin Pfundt von Amann also vor mehreren Problemen: 1.) Aus dem Gitternetz des Architekten konnte man keine kontinuierlichen Referenzlinien für die spätere Konstruktion der Träger herausnehmen, da die Architektenzeichnung aus Geraden aufgebaut war und manche Trägerlinien deshalb entweder Zick-Zack-Stellen hatten oder manche Abschnitte einfach fehlten. Um die Träger als kontinuierlich geschwungene Kurve zu zeichnen, brauchte man eine verbindliche „Referenzfläche“ der Dachhaut, an der jeder Punkt mathematisch eindeutig festgelegt war. 2.) Die Fertigungsplanung des Tragwerks musste rationalisiert werden, da man die 102 Doppelträger und deren 1.790 Segmente nur mit enormem Zeitaufwand einzeln zeichnen kann. 3.) Die Masse an ähnlichen, aber dennoch singulären Bauteile des Tragwerks musste geordnet, optimiert und einfach kommuniziert werden. Martin Pfundt war klar, dass er all diese Schritte nicht ohne Programmierungshilfen bewäl-



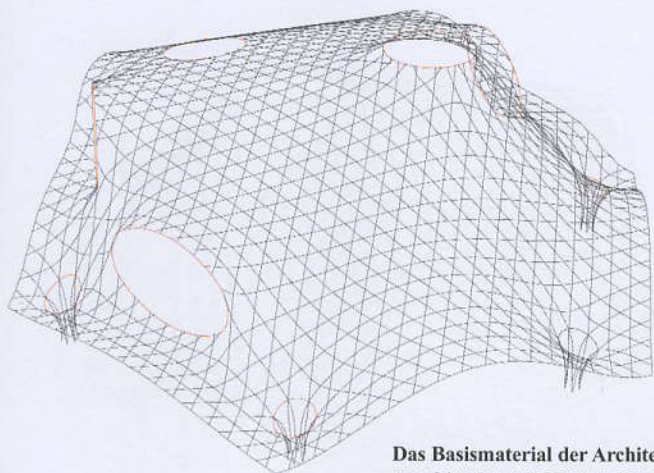
Der Arbeitsplatz von Martin Pfundt in Weilheim

tigen würde, also machte er sich auf die Suche nach einem Softwaredienstleister. Die Züricher Firma Designtopproduction akquirierte im gleichen Zeitraum Aufträge im Holzbau. Beide trafen sich beim googeln und ab dem Sommer 2007 bauten Martin Pfundt und Fabian Scheurer von Designtopproduction gemeinsam mehrere Monate lang das 3D-Modell bis zur realitätsnahen Detaillierung auf.

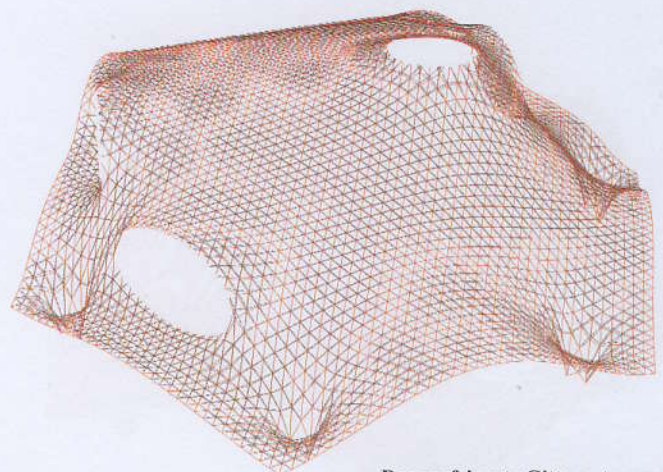
Doch bis zu dem Punkt, wo die Datei mit dem virtuellen Träger fast so greifbar ist wie der Brettschichtholzrohling, den sich die CNC-Maschine auf den Werkstisch holt, mussten einige Hürden der virtuellen Konstruktionswelt überwunden werden. Allein der Aufbau der Referenzfläche für die Dachform erwies sich als so komplex, dass dafür eine weitere Softwarefirma hinzu gezogen werden musste. Zuvor hatte Fabian Scheurer versucht, das Gitternetz von Shigeru Ban zu verfeinern und die Flächengeometrie als „entspanntes Netz“ aufzubauen. Dabei bringt sich die Fläche selbst wie eine Seifenhaut in einen Gleichgewichtszustand und nimmt eine kontinuierlich gekrümmte Geo-

metrie an. Das funktionierte zwar als rechnerischer Prozess, entsprach aber nicht mehr den formalen Anforderungen des Daches, denn jetzt hingen einige Stellen der Dachfläche zu tief. Nach erneuter Internetrecherche beauftragte Amann schließlich die Züricher Firma iCapp mit der Berechnung der Referenzfläche. Zwar hatte auch dieser Spezialbetrieb für Flächenrückführung aus dem Automobilbau Schwierigkeiten, die extremen Krümmungswechsel an den vier Füßen der Konstruktion vollkommen glatt zu rechnen, aber das Ergebnis war in Bezug auf die Linienführung gut.

Als nächstes galt es, aus den Netzlinien in der Dachreferenzfläche das Volumen der Träger aufzubauen. Wie zeichnet man einen 50 bis 70 Meter langen Träger, dessen Form dynamischen Richtungswechseln folgt? Normalerweise baut man im Programm Rhino jedes Bauteil in einzelnen Menü-Operationen mit mehreren Mausklicken auf. Dieses Vorgehen wäre hier einerseits zu umständlich gewesen, andererseits benötigte man als Zeichengrundlage überhaupt ers-



Das Basismaterial der Architekten bestand in einer dxf-Datei, die die Konstruktion als Gitternetz abbildet. Für die Zeichnung kontinuierlich geschwungener Trägerachsen war dies nicht ausreichend.



Das verfeinerte Gitternetz von Designtopproduction als „entspanntes Netz“. In dieser Variante hingen manche Dacheinflächen zu niedrig.

Generatives Entwerfen: Script, Geometrie

einmal mathematisch exakt konstruierte Leitflächen. Diese kann man sich als eine Art „virtuellen Gartenzaun“ vorstellen, der als schmale Schnittfläche immer senkrecht zur Dachreferenzfläche verläuft und all ihren Krümmungen und Biegungen folgt; er dient nur als geometrisches Gerüst, welches später im Bauwerk selbst nicht mehr existiert. Mit diesen Leitflächen ist die Geometrie der sechs Trägerlagen festgelegt: Ihre obere Kante definiert den Verlauf (die Mittelachse des Trägers), die untere Kante legt die Ausrichtung des Querschnitts fest (die Torsion um die Achse).

Die Gartenzaunkonstruktion wurde noch gemeinsam von iCapp und Designtoproduction aufgebaut. Den nächsten Schritt konnte Martin Pfundt selbst übernehmen: das Zeichnen der sechs Trägerschichten im 3D-Modell. Zu diesem Zweck hatte Fabian Scheurer das Rhino-Plug-In „Create Girder Volume“ geschrieben, das die Funktion des Trägeraufbaus aus den Leitflächen automatisiert. Dies war sowohl für die Züricher Programmierfirma als auch für die Holzbauer ein ungewöhnlicher Vorgang. Designtoproduction liefert sonst keine Zeichenwerkzeuge an die Kunden, sondern fertige Dateien; die Zimmermänner hingegen „lieben eher das praktische“ und sind nicht für solche hochspezialisierten 3D-Darstellungstechniken ausgebildet.

Die nächste Hürde bestand in der sinnvollen Unterteilung in Einzelträger. Bei einer traditionellen Dachkonstruktion, deren Geometrie sich in Schnitt- und Grundrisszeichnungen

vollständig abbilden lässt, kann man ein Tragwerk mit dem Taschenrechner arithmetisch in gleich große Stücke unterteilen. Bei einem in mehrfache Richtungen gekrümmten Tragwerk gibt es bei diesem Prozess ein n-faches an Optimierungskriterien zu berücksichtigen, an denen wahlweise der Mensch oder die Maschine scheitert, je nachdem ob man für die Entscheidung die intuitive Erfahrung des Holzbauers oder kombinatorische Rechenleistung braucht.

Die optimale Unterteilung für ein solches Tragwerk hängt von so vielen Faktoren ab, dass man ein halbes Jahr Programmierung und ebenso viel Rechenleistung dafür benötigen würde, wenn man dies alles nur digital bewältigen wollte. Manche Entscheidungen lassen sich immer noch schneller und besser aufgrund von Erfahrung und Intuition fällen: Optimierung bedeutet in diesem Fall auch die pragmatische Einschränkung des Programmieraufwandes. Dieser wird dann durch die gesparte Arbeitszeit und Kostenoptimierung bei der Rohlingsauswahl und die schiere Zahl der 1.800 Träger kompensiert: pro fünf Minuten Zeitersparnis am Einzelteil fällt für die Holzbaufirma fast ein Mannmonat Arbeit weg.

Die sinnvolle Auswahl der Optimierungskriterien war eine der komplexesten Aufgaben und das Schreiben des Tools einer der aufwendigsten Arbeitsschritte für Designtoproduction. Am Ende wählten Martin Pfundt und Fabian Scheurer 17 Optimierungskriterien aus: darunter die drei verschiedenen Rohlingsarten (gerade, einsinnig und

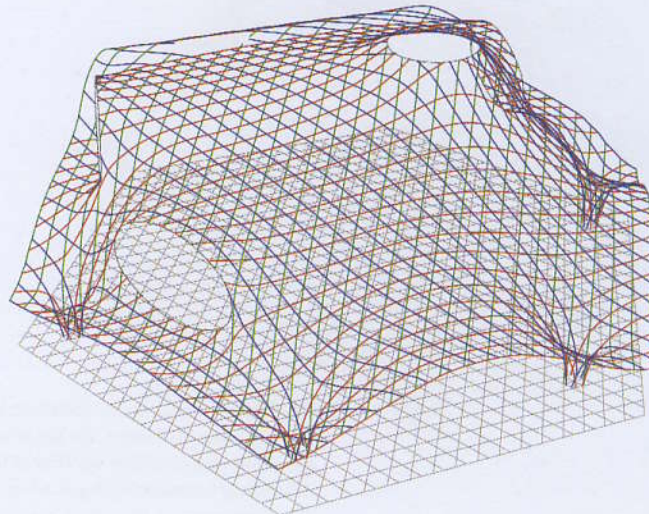
zweisinnig gekrümmt) zu drei verschiedenen Preisklassen; die Trägerlänge, (möglichst lang, aber kürzer als 13 Meter); der Faserschnittwinkel ($\leq 5^\circ$) und der maximale Verschnitt in Abhängigkeit von der Rohlingssorte. Mit diesen Parametern programmierte Fabian Scheurer das halbautomatische Optimierungstool, mit dem Martin Pfundt verschiedene Möglichkeiten durchspielen und sich schnell für die beste Variante entscheiden konnte.

Im letzten Schritt der digitalen Baustellenvorbereitung galt es, neue Plug-Ins für den Dateien-Export zu schreiben: die Länge, Form und Krümmung jedes Trägers sowie alle anschließenden und einzubauenden Einzelteile müssen automatisch zusammengesucht und für den Export vorbereitet werden. Der Computer rechnet über Nacht und schickt dann die entsprechenden Daten als volumetrische Darstellung zum Holzbau-System Cadwork und von dort zur CNC-Maschine; oder zur Buchhaltung bzw. an den Drucker mit einem A4-Blatt der Trägeraxonometrie.

Der Aufbau des 3D-Detailmodells für das neue Centre Pompidou wäre ohne die ständige Kooperation zwischen Zimmerermeister und Programmierer wesentlich aufwendiger bzw. gar nicht möglich gewesen. Beide Fachleute ergänzten in dieser Zusammenarbeit ihr Wissen um Programmierung, Holzbau und die höhere Mathematik der darstellenden Geometrie – und erst durch ihre Detaillierung im 3D-Modell bestimmen sie gemeinsam die geometrische „Gestalt“ der Konstruktion.

links: Die Referenzfläche nach der Berechnung von iCapp. Die gesamte Fläche setzt sich aus mehreren Teilflächen zusammen.

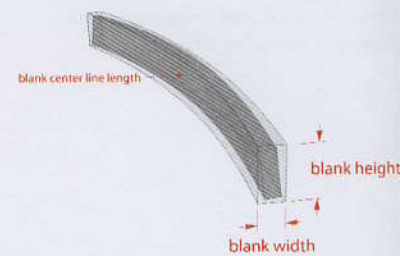
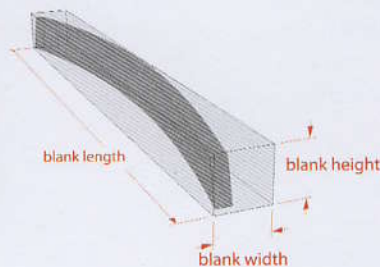
rechts: Im Grundriss besteht das Dachtragwerk als einfaches Sechseck mit geraden Trägerlinien im 60° Raster. Projiziert man diese von der Bodenfläche hoch, entstehen die kontinuierlichen Trägerachsen in der doppelt gekrümmten Dachfläche.



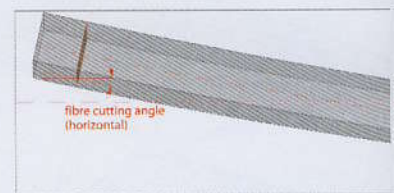
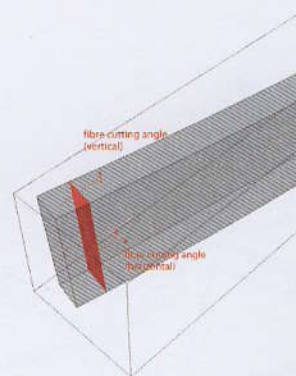
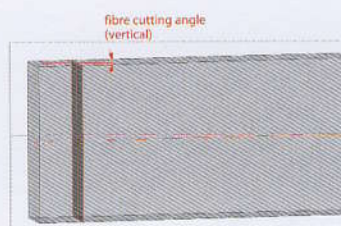


Links: Die 3.600 Knotenpunkte des Tragwerks werden mit so genannten „Dollen“ verbunden, die aus einem sechseckigen Hartholzblock mit mittig platziertem Stahlring bestehen.

Verschnitt, Trägerform und Dauer der Bearbeitungszeit bestimmen die Kosten pro Träger.



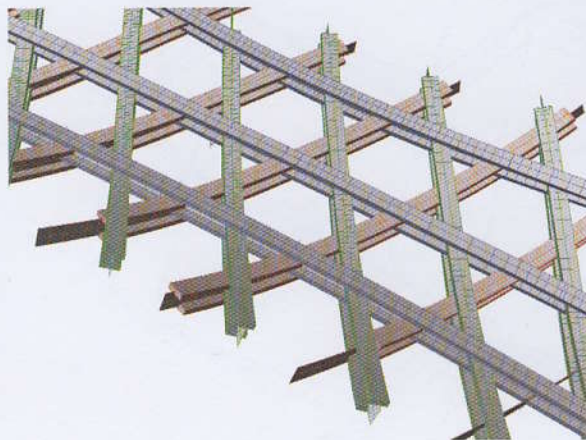
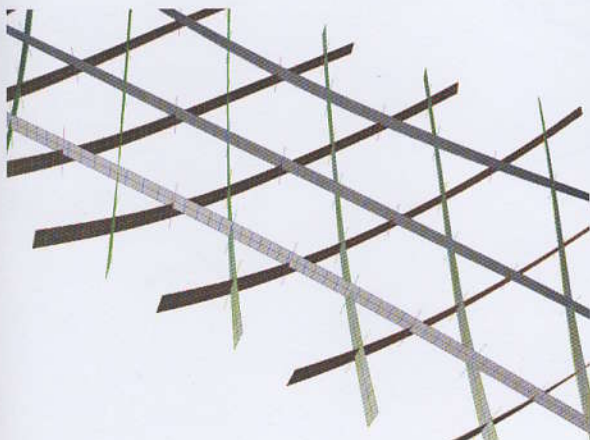
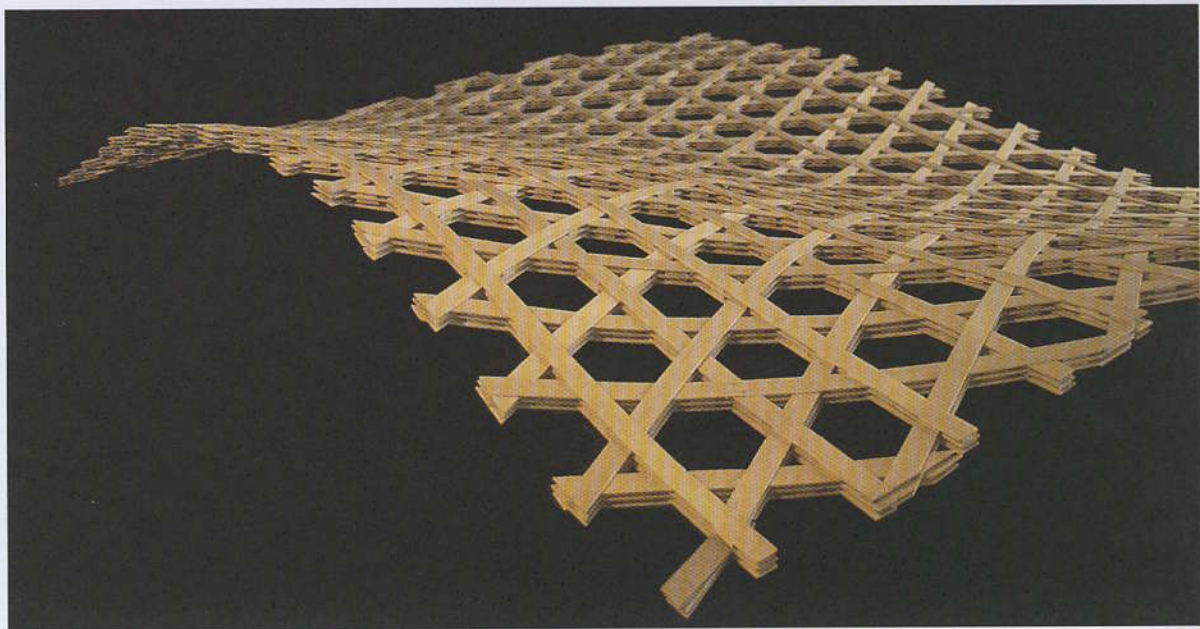
Aber es gibt auch einen bemerkenswerten Aspekt im Sprachgebrauch der Handwerker: Bei einer Holzbaufirma wie Amann wird Abund und Konstruktion von derselben Person koordiniert, da sonst die Informationsverluste zwischen dem Aufbau der 3D-Detaillierung und der Baustelle zu groß wären. Innerhalb der Firma ist dann derjenige der „Konstrukteur“ des Bauwerks, der die Detailplanung in 3D realisiert hat. Das heißt, nicht nur für Architekt und Ingenieur, sondern auch für den Handwerker erfolgt die „Konstruktion“ vor dem Zuschnitt. Zweidimensionale Detailpläne für den Einbau fallen bei diesem Projekt weg. Pro Träger gibt es nur die A4-Zeichnung mit Axonometrie und den Einbauanweisungen auf 1.790 A4-Blättern, das sind ungefähr zwei Telefonbücher.



Die Auswahl des Trägerrohrlings hängt v.a. vom statisch wichtigen Faserschnittwinkel ab, der die Belastbarkeit des Trägers bei Biegebelastungen beeinflusst.

Der vorliegende Beitrag basiert auf einem Gespräch mit Martin Pfundt und Fabian Scheurer am 21. August 2008 in Weilheim (Baden) und einer Textgrundlage von Fabian Scheurer.

Modell des Holztragwerks



Links: In jeder der drei Trägerrichtungen (Rot, Grün, Blau) verlaufen zwei Träger. Deren Achsen definieren die obere und untere Kante der „Leitfläche“, die an jedem Punkt immer senkrecht zur Dachreferenzfläche steht.