



*Dipl. Ing. Michael Flach,
Dozent an der Ecole
d'Architecture de Lyon,
La Vacourie F*

Rippenschale in Torusform, und Mautstellenüberdachung als Verbundkonstruktion

Zwei aktuelle Holzbauwerke in Frankreich

Julius Natterer feiert in diesen Tagen nicht nur seinen sechzigsten Geburtstag, vor genau 10 Jahren gründeten wir zusammen ein Büro für Holzkonstruktionen in Frankreich. Seitdem tragen über 100 ausgeführte Projekte in Frankreich seine Handschrift. Die beiden vorgestellten Beispiele gehören zu den neuesten Projekten und veranschaulichen den aktuellen Stand im französischen Holzbau.

Bereits in den Siebziger Jahren widmete sich Julius Natterer der Entwicklung von **Rippenschalen**, als er an der Technischen Hochschule in München Modelle unterschiedlichster Form studierte.

Der eigentliche Durchbruch der sogenannten „Nattererschen Brettstapelkuppel“ erfolgte 20 Jahre später, als Julius Natterer an der EPFL von seinem Bürofenster aus den Bau der ersten Kuppel in Brettstapelbauweise verfolgen konnte. Der sogenannte Polydom bezeugte nicht nur ein neues Konstruktionsprinzip, er erlaubte es auch wertvolle Erfahrungen für die weitere Entwicklung der Brettstapelbauweise zu sammeln. Zahlreiche Projekte wurden anschliessend nach dem gleichen Prinzip in der Schweiz, Deutschland und Frankreich ausgeführt.

Die ersten Brettstapelkuppeln in Frankreich wurden als horizontale Zylinderschalen erstellt (Chaumont, St. Florence), etwas später folgte eine spherische Kuppelkalotte mit blütenförmiger Rippenführung (Holzbauschool in Nantes). Die verschiedenen Beispiele zeigten, dass man mit gekreuzten übereinandergestapelten Brettlagen Schalen in grosser Formenvielfalt erstellen konnte. Wie komplexe solche Formen sein können und wo die Grenzen des Handlungsspielraums liegen, zeigt das folgende Beispiel einer Rippenschale, die für eine Schwimmanlage in **St. Quentin en Yvelines** bei Paris errichtet wurde. Die Planung begann 1996, die Konstruktion erfolgte 1997.

Im Vergleich zu allen bisherigen Rippenschalen, handelte es sich zum ersten Mal um eine Schale in Torusform. Trotz der regelmässigen Geometrie mit einem punktsymmetrischem Zentrum, war es ein unsymmetrisches Tragwerk, da es im Grundriss nur einen Kreisabschnitt von 225° Grad überdeckte (Abb. 1). Die Überdachung überspannt etwa 1600 m² mit einem Aussendurchmesser von 54 m.

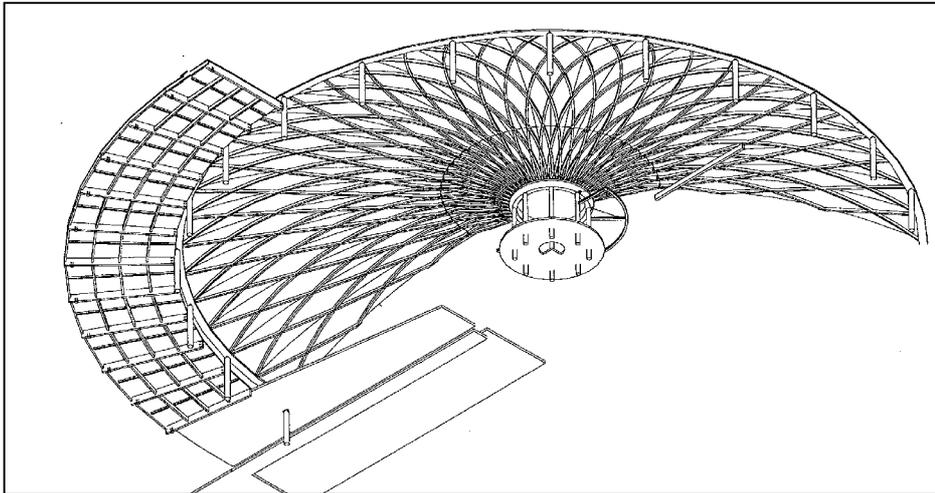


Abbildung 1 - Computeraxonomie von unten gesehen

Der äussere Ringträger, in Brettschichtholz ausgeführt, lagert auf 16 Betonstützen, im Zentrum stützte sich die Schale auf einen monopterosartigen Tempel mit 3 m Durchmesser. Von aussen gesehen gleicht das Dach einer sphärischen Kuppel. Sie senkt sich zur Mitte hin ab, so dass im inneren ein Ringtunnel entsteht. Statisch gesehen wirkt das Tragwerk wie eine Schale, wobei die Rippen wie Druckbögen zwischen dem Randträger und dem Mittelaufleger beansprucht sind. Am Rand des ausgeschnittenen Kreissegments entstehen in Folge der fehlenden Kontinuität Störbereiche, in denen Kräftekonzentrationen auftreten, die zu einer Verstärkung der Rippen in diesem Bereich führte. Bei einer symmetrischen Form mit einem geschlossenen Randträger würden diese nachteiligen Wirkungen nicht auftreten.

In der ersten Entwurfsphase wurde die Oberfläche der Schale so festgelegt, dass sie geometrisch entwickelbar war. Um anschliessend die genauen Trajekturen der Rippen zu erfassen, waren sowohl geometrische als auch fertigungstechnische Überlegungen notwendig. Damit die gekreuzten Bretter fugendicht aufeinander gelegt werden konnten, mussten die unterschiedlichen Brettlagen in den Kreuzungspunkten in der gleichen Ebene liegen. Ausserdem konnten die Bretter nur einfach gekrümmt werden, da eine Krümmung in Brettelebene angesichts der grossen Quersteifigkeit eines Brettes ausgeschlossen war. Eine Verdrillung der Bretter war hingegen wiederum möglich, vorausgesetzt dass gewisse Grenzen der Drillsteifigkeit eingehalten wurden.

Es mussten deshalb einfach gekrümmte Trajekturen, das heisst geodädische Linien, entwickelt werden, die eine gewisse Verwindung nicht überschreiten durften. Die genaue Geometrie der Rippentrajektorien wurde mit einem Computerprogramm entwickelt, das speziell für dieses Projekt geschrieben wurde. Versuche an einem Holzmodell gestatteten es die theoretisch berechneten Werte zu überprüfen.

Die endgültige Geometrie wurde von einem räumlichen Berechnungsmodell übernommen, um die Schale als Stabsystem nach zweiter Ordnung zu berechnen. Die Rippen wurden dabei als zusammengesetzter Querschnitt mit nachgiebigen Verbund gerechnet, um dem Steifigkeitsverlust durch den Schlupf zwischen den Brettlagen Rechnung zu tragen. Im Allgemeinen wird die Verminderung der Steifigkeit der Querschnitte in Folge von Schlupf in Kauf genommen, da sich die Knotenausbildung bei abwechselnd durchlaufenden Rippen wesentlich vereinfacht. Im Fall dieser Kuppel war es jedoch vorteilhaft auf eine Brettstapelung im Randbereich zu verzichten, da die Rippen im Endfeld kreuzungsfrei über 8 m bis zum Knoten durchlaufen. Die Vorfertigung der Rippen in Brettschichtholz erlaubte es zudem auf ein Gerüst im Randbereich zu verzichten, das heisst etwa 50 % der Rüstung einzusparen. Die Verwendung eines verleimten Querschnitts im besonders beanspruchten Randfeld gestattete es die Rippe dem Kräftefluss anzupassen ohne ihre Höhe zu vergrössern.

Die vorgefertigten Rippen wurden im Bereich des Kreuzungspunkts so ausgeführt, dass die wechselseitig auskragenden Bretter im Knoten miteinander verzahnt und in Brettstapelbauweise weitergeführt werden konnten. Im zentralen Bereich wurde die Rippen wie üblich gekreuzt gestapelt, um das Zusammenlaufen der Rippen zur Mitte hin mit zunehmend engeren Kreuzungspunkte problemlos zu ermöglichen. Da in diesem Bereich die Querschnittskräfte abnehmen, spielt die Verringerung der Trägheitsmomente durch Schlupf auch keine Rolle.

Die Schalung spielt bei Rippenschalen eine wichtige statische Rolle, da sie das rautenförmige Rippenmuster so vervollständigt, dass dreieckige Facetten entstehen, die der Schale die eigentliche Steifigkeit verleihen. Die Schalung trägt ausserdem den Dachaufbau und wirkt als Biegeträger. Sie ist an der Unterseite sichtbar und verleiht dem Innenraum seine Atmosphäre. Die Orientierung der Fasern und die Profilierung der Unterseite ist massgebend für die Unteransicht und die statische Effizienz und muss deshalb sorgfältig geplant werden.

Bei allen bisher ausgeführten Kuppeln wurde die Schalung mit liegenden auf Lücke verlegten Brettern erstellt. Auf Grund der kreisförmigen Geometrie und der statischen Anforderungen war es sinnvoll die Schalung ringförmig auszubilden. Eine weitere Anwendung der Nattererschen Brettstapeldecke lag deshalb auf der Hand.

Das Verlegen der Schalung erfolgte vom äusseren Rand her (Abb. 2). Jedes Brett wurde einzeln von zwei Zimmerleuten eingepasst, an das vorgehende Brett durch Biegen angeschmiegt und festgenagelt.



Abbildung 2 - Aufbringen der Schalung

Da die Bretter stehend verlegt wurden, mussten sie an den Kanten gefräst werden, um das Treppenrelief, das sich in Folge des Steigung bildete, abzurunden.

Die Höhe der stehenden Bretter veränderte sich je nach Rippenanstand und folgte den statischen Anforderungen. Die Dicke der Bretter, und somit ihre Flexibilität, wurde dem Krümmungsradius angepasst. Sowohl die Dicke als auch die Höhe der Bretter, nimmt zur Mitte her ab. Vor dem Verlegen des Dachhaut wurde die Oberseite noch einmal grob gehobelt.

Der ringförmige Randträger lagert auf den Betonstützen und wurde in Brettstichholz ausgeführt. Er wurden aus Transportgründen in mehreren Segmenten vorgefertigt und auf die Baustelle gestossen. Die Verbindung erfolgte über BVD-Verbundanker, die grosse Zugkräfte aufnehmen. Die Verbundanker wurden mit einem Kunstharzmörtel vergossen.

Der Anschluss der Rippen an den Randträger erfolgte über eingelassene Stahlteile. Der Stahlanteil war jedoch bei dieser Konstruktion im Vergleich zur Holzmasse verschwindend gering. Die wenigen Stahlteile konnten als Standardverbindungen mit geringem Planungs- und Fertigungsaufwand erstellt werden.



Abbildung 3 - Innenansicht

Die gesamte Konstruktion konnte für französische Verhältnisse zu einem sehr kostengünstigen Preis hergestellt werden (ca. 300 DM / m²). Angesichts der komplexen Form und der qualitativvollen Unteransicht (Abb. 3) war diese Ausführung technisch und wirtschaftlich gesehen nur in Holz denkbar. Die Planung verlangte spezielle geometrische und statische Kenntnisse. Die Montage stellte hohe Anforderungen an die handwerklichen Fähigkeiten der Zimmerleute. Der Aufwand für das Einrücken, der im allgemeinen bei der Brettstapelbauweise relativ hoch ist, konnte durch Vorfertigung erheblich verringert werden. Volkswirtschaftlich gesehen handelt es sich um ein arbeitsintensives Bauwerk, das Arbeitsplätze schafft. Es begünstigt ebenfalls eine wirkungsvolle Nutzung der Waldreserven, da alle Holzqualitäten sinnvoll zum Einsatz kommen: ausgewähltes Qualitätsholz in geringem Umfang für die hochbeanspruchten BSH-Rippen, Holz unterschiedlichster Qualität in grosser Menge für die Schalung.

Im Gegensatz zu Brettstapelkonstruktionen, die als raumabschliessende Elemente wie Decken und Schalen wirken, sind feingliedrige transparente Fachwerkkonstruktionen sinnvoll wenn es sich um ein offenes Tragwerk handelt wie bei dieser **Mautstellenüberdachung in der Nähe von Oyonnax**.

Transparenz war das Leitmotiv für den Entwurf, da es wichtig war die Windangriffsflächen so klein wie möglich zu halten. Der visuelle Impact dieser Dachkonstruktion, die frei über den Auflagern zu schweben scheint, wird noch durch ein Glasdach verringert, das einen fließenden Übergang zum Himmel zu schafft.

Das Hauptproblem offener Konstruktionen besteht im Gegensatz zu geschlossenen Bauwerken darin, dass Wind- und Schneelasten **Wechselkräfte** hervorrufen, die zur Umkehrung der Normalkräfte im Fachwerk führen. Jedes Bauteil muss deshalb sowohl für Druck-, als auch für Zugkräfte bemessen werden, wobei die Grössenordnung in beiden Fällen ähnlich ist.

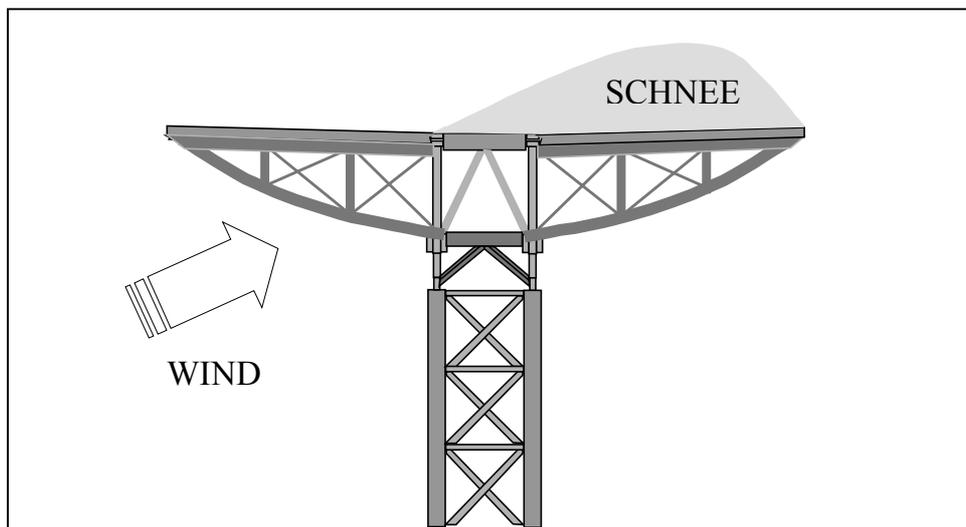


Abbildung 4 - einseitige Belastung

Bei dieser Dachkonstruktion führen einseitige Schneebelastungen, kombiniert mit Auf- oder Abwindlasten zu unsymmetrischen Belastungen, die den Kastenquerschnitt des Hauptträgers auf Torsion beanspruchen (Abb.4). Die Fachwerkträger, die auf vier Seiten den Kastenträger bilden, werden je nach Windrichtung auf positive, bzw. negative Biegung beansprucht.

Im modernen Holzbau werden zunehmend **Verbundkonstruktionen** verwendet, um die jeweiligen Baustoffe technisch und wirtschaftlich unter günstigsten Bedingungen einzusetzen. So hat sich bei Holzverbundkonstruktionen der Stahl als Zugstab, und das Holz als Druck-, bzw. als Biegedruckstab häufig durchgesetzt. Eine intelligente Aufteilung der Kräfte zwischen Holz und Stahl war bei diesem Bauwerk von vorne herein nicht offensichtlich, da alle Bauteile Wechselkräften ausgesetzt waren. Andere Kriterien, wie zum Beispiel Prioritäten bei der Transparenz, der harmonischen Abstimmung der Baustoffe untereinander, und die Knotenanschlussprobleme waren bei der Wahl der Baustoffe für dieses Projekt massgebend. Die Glasabdeckung mit temperierten und graviertem Verbundglas wurde zum ersten Mal in dieser Technik durchgeführt und musste speziell für dieses Projekt versuchsmässig getestet werden. Verformungen und insbesondere die Wärmedehnung der Unterkonstruktion sollten

so gering wie möglich gehalten werden. Aus diesem Grund wurden die Pfetten in Brettschichtholz ausgeführt. Die Lamellen wurden stehend verleimt, um im Randbereich gebogen zu verlaufen.

Die Ausführung der seitlichen Kragträger erfolgte in Brettschichtholz, da die Gurte wirtschaftlich günstig in bogenförmiger Form hergestellt werden konnten. Für die Ausfachung wurden gekreuzten Stahlseile bevorzugt, um die Transparenz zwischen den Gurte zu bewahren (Abb. 5).



Abbildung 5 - Kastenträger mit seitlichen Auskragungen

Die Streben, die die Auskragungen im gekrümmten Bereich unterstützen, wurden in Rundholz ausgeführt (Abb.7), da sie eine symmetrische Knicksteifigkeit aufweisen und sich räumlich leichter anschliessen lassen.

Der 2.5 m breite Kastenträger beinhaltet eine technische Gangway und überspannt 36 m als Einfeldträger mit Auskragung. Die Durchbiegung ist wegen der Glasbedeckung in beiden Richtungen auf $L/500$ beschränkt. Der räumliche Kastenträger musste besonders torsionssteif ausgebildet sein, um die Verdrehung bei unsymmetrischen Wind- und Schneelasten zu begrenzen. Die Anschlüsse der Fachwerkstäbe waren so ausgebildet, dass durch hohe Passgenauigkeit und steife Verbindungen die Nachgiebigkeit der Anschlüsse vernachlässigt werden konnten. Zudem mussten die Knotenkräfte 100-prozentig gelenkig zug- und druckfest angeschlossen werden. Jegliche gewollte oder ungewollte Einspannung oder Ausmittigkeit im Anschlussknoten hätte unweigerlich Biegemomente in den Stäben hervorgerufen, und somit zu Querschnittsvergrößerungen geführt.

Hätte man das allgemeine Prinzip für Fachwerkträger angewendet, Zugstäbe in Stahl, und Druckstäbe in Holz auszuführen, wäre der Fachwerkträger infolge der Wechselbeanspruchungen als reiner Stahlträger ausgeführt worden. Die Materialwahl der Stäbe erfolgte jedoch von Anschlussproblemen abgesehen unter folgenden Gesichtspunkten : Stark beanspruchte Diagonale wurden mit Stahlrohrkreuzen ausgeführt, um die Diagonalkräfte in Druck- und Zugkräfte aufzulösen. Schwach beanspruchte lange Diagonale wurden mit gekreuzten Stahlseilen ausgeführt, wobei jeweils nur eine der beiden Diagonale auf Zug arbeitet. Kurze schwach beanspruchte Diagonale wurden in Holz ausgeführt. Die Obergurte wurden als Zange in Brettschichtholz ausgebildet, um direkt die Dachhaut zu tragen. Die Untergurte gleichen den Obergurten, wurden aber infolge der grösseren Zugkräfte zwischen den Zangen mit Stahlprofilen verstärkt.



Abbildung 6 - Gesamtansicht der Mautstelle

Dank der Verbindung von unterschiedlichen Querschnitten und Baustoffen gleicht der Fachwerkträger einem elegantem Leichttragwerk bei dem das Holz dominiert. Die Ausfachung in Stahl erscheint fast unsichtbar. Die Dachhaut, die dank der grossen Steifigkeit des Tragwerks in Glas ist, verstärkt die gesamte Transparenz.

Die geeignete Wahl der Stabquerschnitte gestattete es die Kräfte in den Diagonalen so zu verteilen, dass sie in den Knotenpunkten problemlos angeschlossen werden konnten. Die Gelenkverbindungen zwischen Gurten und Diagonalen wurden mit Nagelplatten und einer hochfesten Stahlachse im Kreuzungspunkt der Stabachsen ausgebildet.

Eine hohe Passgenauigkeit konnte dank der Computertechnik erzielt werden. Alle Abbundpläne wurden mit einem dreidimensionalen CAD-Programm erstellt. Das gleiche Programm steuerte die automatische Abbundanlage, wodurch die Massabweichungen auf einen Millimeter beschränkt werden konnten.

Als grösste Schwierigkeit erwies sich die Formveränderung der Stahlteile unter der Hitzeentwicklung bei der Galvanisierung. Der Aufwand für das anschliessende Geraderichten der Stahlträger wurde so hoch, dass man sich für eine Brennlackierung entschied. Die Holzkonstruktion wurde in Douglasie der französischen Holzschutzklasse 3 ausgeführt, damit das Bauwerk langfristig wartungsfrei bleibt.



Abbildung 7 - Unteransicht der verglasten Dachkonstruktion

Schlussfolgerung :

Zwei hochtechnische Holztragwerke mit sehr unterschiedlichen Konzepten zeigen neue Wege im modernen Holzbau. In beiden Fällen ist der Einsatz von ingenieurmässigem Wissen, und modernste Computersoftware unerlässlich. Holz alleine oder in Verbindung mit anderen Baustoffen ist eine unerschöpfliche Quelle, um hochleistungsfähige Tragwerke mit Ideenreichtum zu schaffen. Julius Natterer hat auf diesem Gebiet richtungsweisend gearbeitet, wie man an diesen Projekten sehen konnte, die beide direkt oder indirekt von seinen Ideen inspiriert sind.

Bibliographie :

- (1) „Une coque nervurée en planches de bois clouées“, Les Cahiers Techniques du Bâtiment, N° 186 janvier-février 1998, Seite 20/21
- (2) „Gare de péage en verre et bois“, Séquences Bois, Grands Ouvrages et Equipements, CNDB, Paris, juillet 1998, Seite 6/7
- (3) „Space and shell structures in timber“ Julius Natterer, Proceedings der 5th World Conference on Timber Engineering, August 17-20, 1998, Titelseite und Seite 384,
- (4) „Grands structures novatrices en France“ Michael Flach et Caroline Frenette, IAS, bulletin technique de la Suisse romande 17/18 août 1998, Seite 275/276/277/278
- (5) „Grands structures novatrices en France“ Michael Flach et Caroline Frenette, L'industriel du bois, Lausanne, novembre 1998
- (6) „Coques, voiles et voûtes“ Michael Flach, Dominique Gauzin-Müller, Construire avec le Bois, Edition Le Moniteur, novembre 1998