

Origamifaltwerke – Neue Anwendung für Brettsperrholzplatten

Marcel Haasis, Diplomingenieur
Institut für Holzkonstruktion IBOIS, EPF Lausanne

Yves Weinand, Prof. Dr., Dipl.-Ing., Architekt
Institut für Holzkonstruktion IBOIS, EPF Lausanne

1 CHARAKTERISTIK VON FALTWERKEN

Die Tatsache ebene Strukturen aufzufalten, um deren Tragfähigkeit erheblich zu erhöhen, ist aus vielen Bereichen bekannt. So zum Beispiel ist die Wellpappe ein weitverbreitetes und alltägliches Produkt. Im Bauwesen sind Sheddachstrukturen eine geläufige Anwendung dieses Prinzips. Der Grundgedanke ist, ebene Flächen mehr durch Normalkräfte in ihrer Ebene als durch Momente aus ihrer Ebene heraus zu beanspruchen. Diese Art von Lastabtragung ist weit wirtschaftlicher und effektiver als die aufwändige Abtragung durch Biegung.

In einem zweiten Schritt gilt das Hauptaugenmerk der Fügung der einzelnen Bauteile. Die Frage, die sich stellt, ist deren Ausführung als gelenkig oder steif. In der praktischen Anwendung stellt sich die Frage allerdings anders, da sich weder perfekt gelenkig noch perfekt steif in der Mehrzahl aller Fälle realisieren lässt.

2 KONZEPT DER ARBEIT

Ziel der dargestellten Arbeit ist es, die komplexen Falwerke der Origamistrukturen statisch zu erfassen und Vorschläge für die Realisierung bereitzustellen. Dies beinhaltet insbesondere die Art der Verbindung der einzelnen Bauteile, die Ausführung der Holzverbindungen und die Dimensionierung der Massivholzplatten. In einem weiteren Schritt wird untersucht, inwieweit die vom Architekten vorgeschlagenen Strukturen optimiert werden können, um wirtschaftlichere Lösungen anbieten zu können. In diesem Zusammenhang werden auch die Massivholzplatten kritisch betrachtet. Jedes Material hat Anwendungsgebiete, in denen es wirtschaftlicher als in anderen eingesetzt werden kann. Aus diesem Grund werden die Eigenschaften und Leistungen der verschiedenen Produkte analysiert und mit den Anforderungen der Falwerke verglichen. Hieraus ergeben sich Vorschläge, inwieweit die Produkte modifiziert werden können, um sie besser an die Eigenheiten der Strukturen anzupassen.

Des weiteren gilt es, eine Verbindung zu konzipieren, die einerseits elastisch genug ist, um die Schnittgrößen aufzunehmen und zum anderen steif genug ist, um die Verformungen nicht zu gross werden zu lassen.

3 STATISCHE BERECHNUNG

3.1 Einführung

Die statische Berechnung von Falwerken bedarf eines grossen computergestützten Aufwands, um die Verformungen und Schnittgrößen möglichst treffend vorausbestimmen zu können. Im Vergleich zu anderen Anwendungen von Massivholzplatten ist die Anzahl der Bauteile wesentlich höher und deren

Interaktion erheblich komplexer, insbesondere an den Schnittstellen der einzelnen Flächen. Der stark inhomogene Aufbau der Platten kombiniert mit dem orthotropen Materialgesetz erhöht die Komplexität jeglicher Art von statischer Berechnung. Dies gilt bereits ohne die bekannten weiteren Randbedingungen wie die dem Holz zueigenen relativ hohen Streuungen der Materialkennwerte und der Eigenschaften der Holzverbindungen. Ein Vergleich zwischen Rechnung und Realität muss stets vor diesem Hintergrund betrachtet werden.

Aufgrund der geometrischen Vielfalt der oben erwähnten Eigenheiten des Materials, sowie der mechanischen Komplexität der Verbindungen und zuletzt deren Zusammenwirken, ist der Ansatz zur statischen Berechnung die Methode der finiten Elemente, die eine numerische Lösung der Aufgabe liefern. Aktuelle Software ist in der Lage, das orthotrope Materialgesetz und den geschichteten Aufbau zu simulieren.

3.2 Bisheriger Stand

Zu Beginn der Arbeit wurde die Machbarkeit eines Origamibauwerks durch die Erstellung eines Modells mit den Abmessungen (6.20m/2.88m/2.30m) gezeigt. Dieser Prototyp diente gleichzeitig dazu, die parallel durchgeführte Modellierung durch mehrere Softwarepakete einzustufen. Abb. 3.1 und Abb. 3.2 zeigen verschiedene Ansichten des fertiggestellten Prototyps.

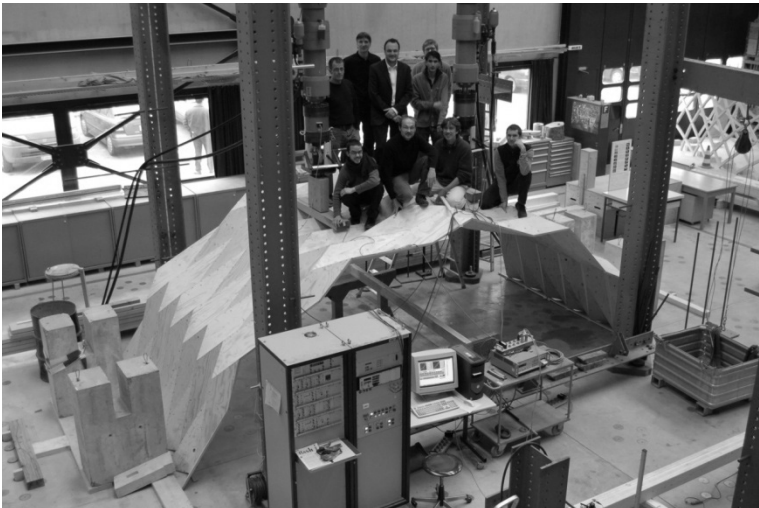


Abb. 3.1: Prototyp

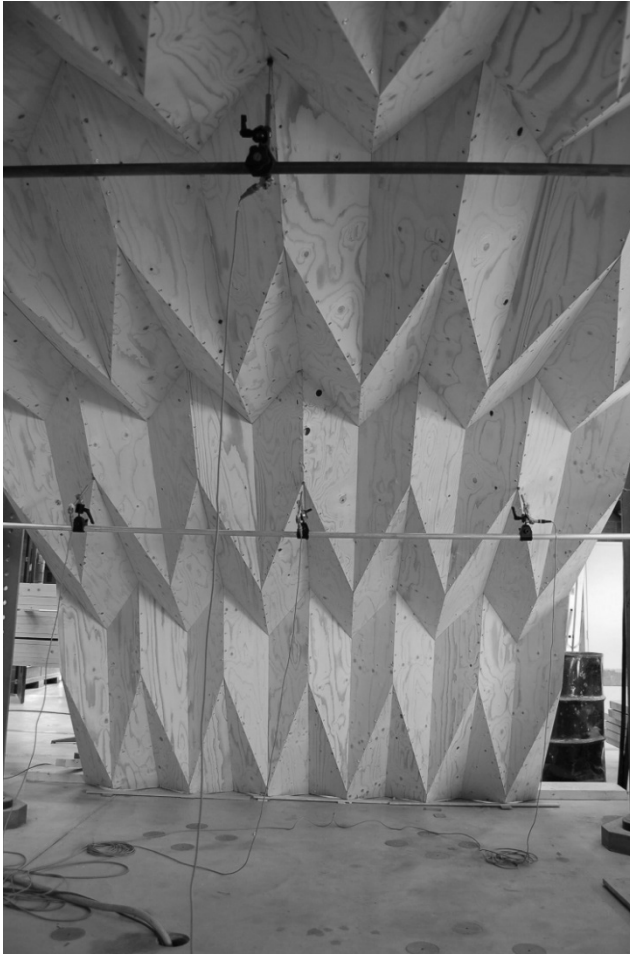


Abb. 3.2: Innenansicht der Faltstruktur

In einem weiteren Schritt wird die Struktur einer möglichen Tennishalle (45.20m / 41.50m / 11.80m) ausschliesslich am Rechner modelliert. Dieses Modell dient dazu, geometrische und material-spezifische Parameter zu variieren und deren mechanische Auswirkungen zu untersuchen. Desweiteren wurden die aus den in vier beschriebenen Versuchen gewonnenen Steifigkeitswerte in die Analyse integriert. In Abb. 3.3 dargestellt ist die Bildschirmausgabe der Ausgangskonstruktion der Halle.

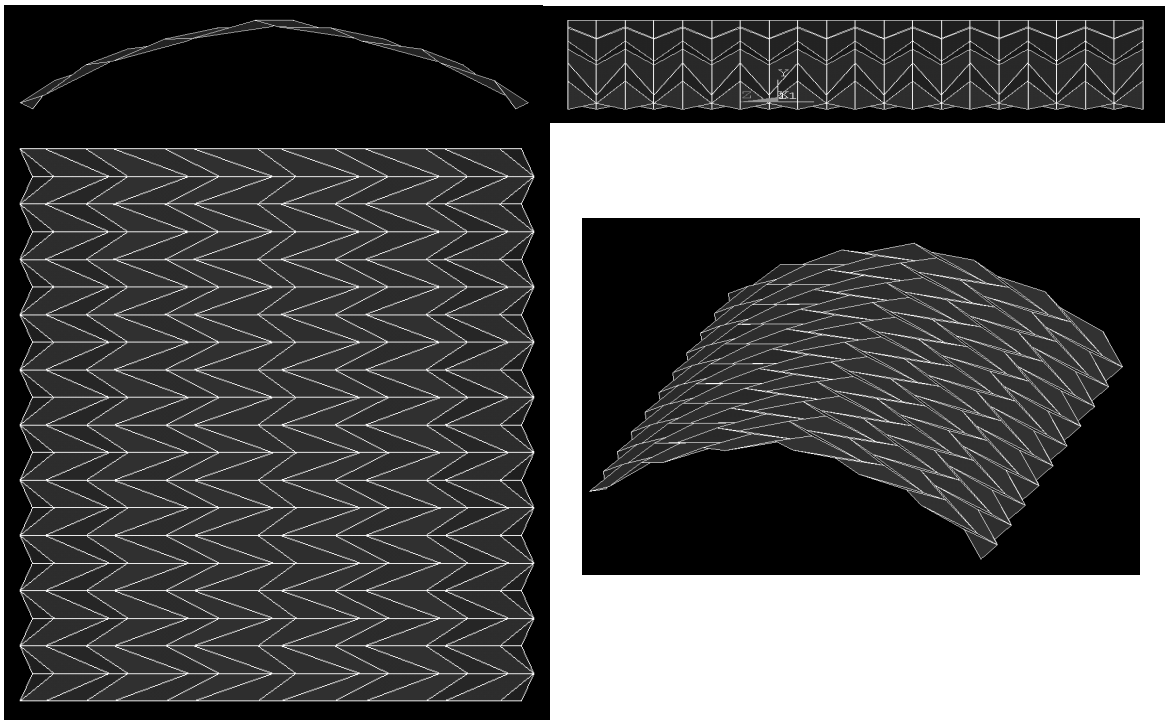


Abb. 3.3: Numerisches Modell einer Tennishalle

Die verwendeten Softwareprogramme wurden gestaffelt nach Leistungsfähigkeit ausgesucht. Hierdurch soll festgestellt werden, wie gross der Rechen- und Kostenaufwand sein muss, um befriedigende Ergebnisse zu erhalten. In der Auswahl der Programme ist zunächst eine Lösung, die im alltäglichen Gebrauch in einer Vielzahl von Ingenieurbüros zur Anwendung kommt (RFEM), anschliessend ein Softwarepaket, das aus der Wissenschaft stammt und inzwischen als kommerzielle Version zur Anwendung kommt (SAP 2000). Desweiteren gibt es ein leistungsfähiges Finite-Element-Programm, das den geschichteten Aufbau der Platten und komplexe Gelenkdefinitionen beherrscht (Ansys 11). Zuletzt kommt das Finite-Elemente-Paket der Firma Samtech, mit der eine Entwicklungskooperation geplant ist, zum Einsatz.

Es gilt eine hohe Übereinstimmung der verschiedenen verwendeten Codes zu erzielen. Zu diesem Zweck wurden mit jedem Programm jeweils die Linienverbindungen gelenkig und steif berechnet. Diese Arbeit kann als gute Aufgabe angesehen werden, die verwendeten Softwarepakete bis ins Detail kennenzulernen und sie voneinander unterscheiden und einstufen zu können. Die am Prototyp gemessenen Verformungen befinden sich allesamt zwischen den in den Modellierungen vorbestimmten Extremfällen gelenkig und steif.

3.3 Zusammenfassung der Ergebnisse und Anwendungen

Die Bedeutung der Gelenkausbildung ist je nach Bereich der Struktur unterschiedlich. Geht man von einer Bogenkonstruktion mit Ausdehnung in Längsrichtung aus, wie es der Fall für den Prototyp und die Konstruktion im realen Massstab ist, muss man zwischen den Bereichen „ungestörter Mittelbereich“ und „freier Giebelbereich mit Randeinflüssen“ unterscheiden (siehe Abb. 3.4). Speziell im Randbereich nehmen die Verformung und Schnittgrössen, wie dies aus der Schalentheorie bekannt ist, erheblich zu.

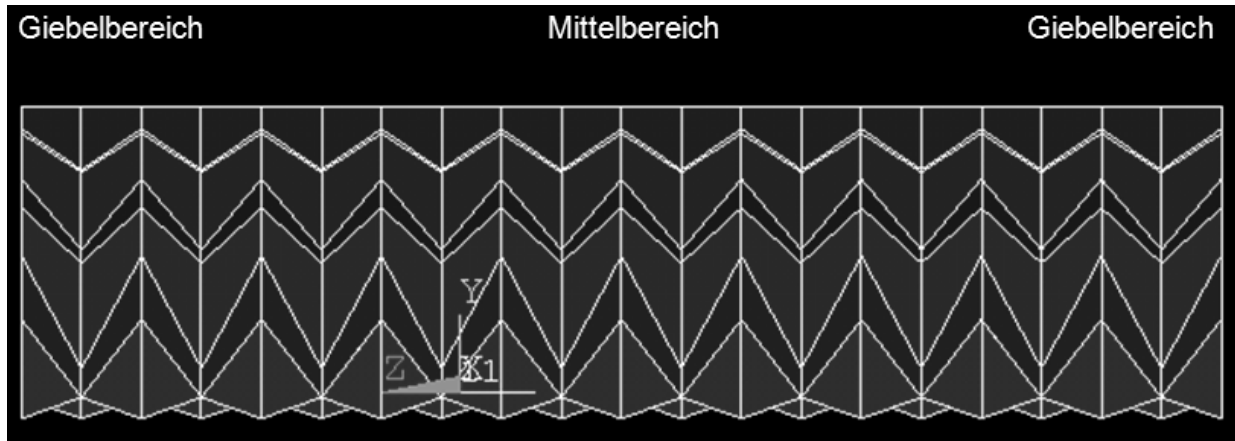


Abb. 3.4: Unterscheidung von Mittel- und Randbereich

Um diesem Phänomen zu begegnen, gibt es mehrere Ansatzpunkte.

- Externe Unterstützung des Giebels
- Geometrische Modifikation der Struktur
- Anpassung der Verbindungssteifigkeit

Die beiden letzteren sind diejenigen, die im Rahmen der Arbeit weiter untersucht werden.

3.3.1 Geometrische Modifikation der Struktur

Das Prinzip, auf das sich Falterwerke im Allgemeinen stützen, ist der Gewinn an Steifigkeit durch die Umlagerung von Biegung auf Normalkräfte, also in Ebene der Platte wirkende Kräfte. Stark vereinfachend kann man sich den Sachverhalt durch die Regel „je steiler, desto steifer“ vorstellen. Mit zunehmender Verdichtung der Faltung wird die Steifigkeit rechtwinklig zur Ausgangslage der Fläche höher. Gleichzeitig allerdings nimmt sie in Richtung der ursprünglichen Fläche ab. Dieser Sachverhalt lässt sich eindrücklich anhand der im Folgenden beschriebenen Modifikation der Geometrie verdeutlichen.

Das gleiche Origamifaltprinzip wie im Mittelbereich wird im Randbereich enger gestaffelt mit der Absicht die vertikale Steifigkeit zu erhöhen und somit die vertikalen Verformungen zu verringern. Abb. 3.5 zeigt die Umsetzung im numerischen Modell. Als Ergebnis lässt sich beobachten, dass die vertikale Verformung abnimmt, die horizontale hingegen zu. Angesichts dieser Tatsache und der möglichen Spannungen mit dem architektonischen Entwurf gilt es, weitere Alternativen zur Optimierung bereitzustellen.

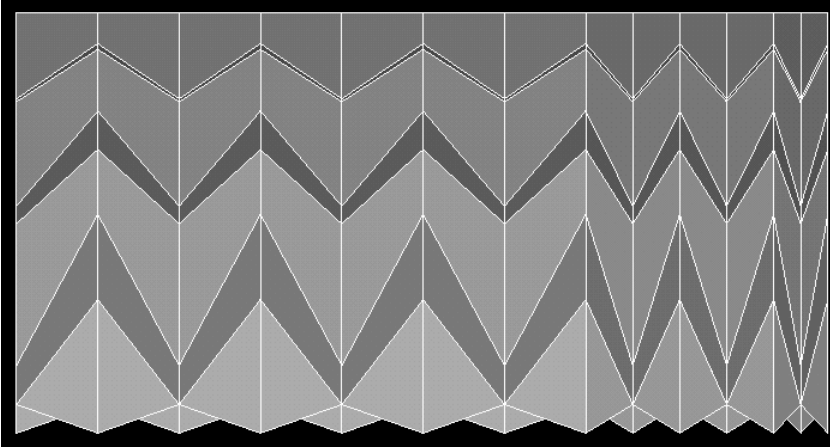


Abb. 3.5: Engere Faltung zum rechten Rand

3.3.2 Steifigkeit der Linienverbindung

Die Simulationen am Modell in Originalgrösse haben gezeigt, dass die Anforderungen im ungestörten Mittelbereich weitaus geringer sind, als im Randbereich. Aus diesem Grund besteht die Notwendigkeit, die Verbindungen an die im Randbereich anzutreffenden Anforderungen anzupassen. Hier gilt es ein Gleichgewicht zu finden zwischen den durch die erhöhten Steifigkeiten grösseren Schnittgrössen und den dazu erforderlichen höheren Festigkeiten der Verbindung.

4 VERBINDUNGEN

Nach einer Reihe von Vorüberlegungen wurden die im Anschluss dargestellten Verbindungen aufgrund von Ansprüchen und Anforderungen von seiten der Architektur und der Ingenieurie festgelegt. Ziel der Versuche war es, die Biegesteifigkeit und Querkraftfestigkeit der Verbindungen zu erfassen. Als Ausgangsmaterial wurden Schilliger Grossformatplatten der Stärke 110 mm verwendet. Als Verbindungsmittel kamen ausschliesslich selbstbohrende Vollgewindeschrauben und –stabdübel der Firma SFSintec zum Einsatz. Die gefalzten Bleche wurden von einer lokalen Schlosserei gefertigt.

In der Zwischenzeit haben die Erkenntnisse aus den Versuchen und weitere Überlegungen dazu geführt, dass die hier dargestellten Verbindungen modifiziert und weiterentwickelt werden können.

Es wurden vier Typen mit drei zu variierenden Parametern untersucht. Alle Verbindungen sind rein mechanisch und ohne Klebstoff realisiert.

Die vier Verbindungstypen lassen sich folgendermassen untergliedern:

1. Einzelne Lage mit Vollgewindeschraube
2. Zwei Lagen mit Vollgewindeschraube
3. Zwei Lagen mit gefalztem Blech und selbstbohrenden Stabdübeln
4. Zwei Lagen mit Vollgewindeschraube und gefalztem Blech

Beispielhaft ist in Abb. 4.1 eine Verbindung vom Typ 4 eingebaut im Versuchsstand dargestellt.

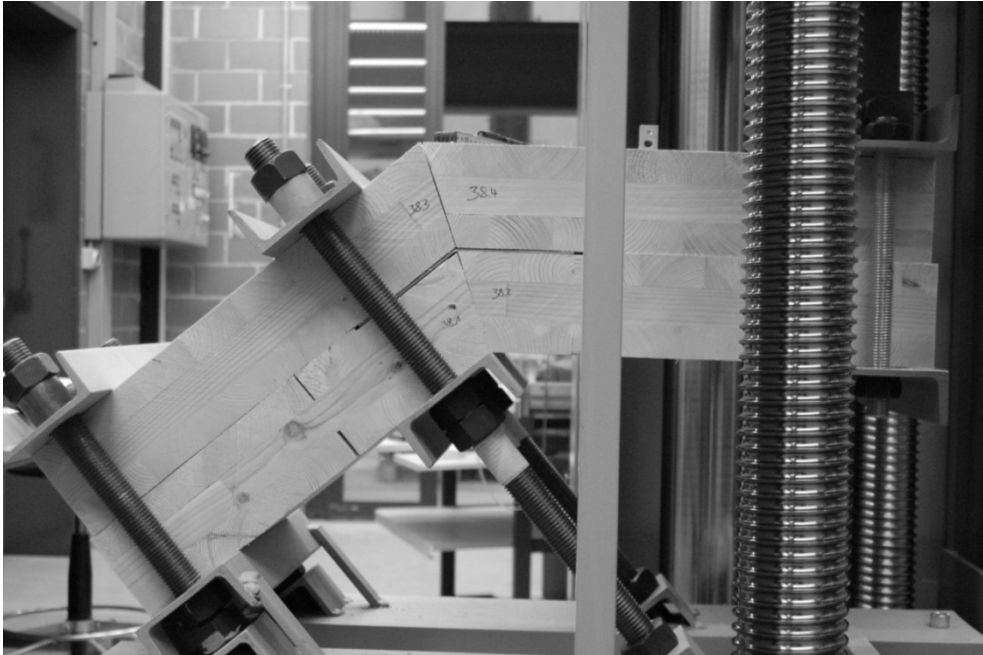


Abb. 4.1: Versuchskörper des Typs 4 im eingebauten Zustand

Bei jeder dieser vier Verbindungstypen galt es, drei unabhängige und das Ergebnis beeinflussende Parameter zu variieren. Diese sind die folgenden:

1. Winkel der Verbindung
2. Abstand der Verbindungsmittel
3. Dicke des Eisenblechs bei den entsprechenden Typen

Die Zusammenstellung der Versuche wurde nach dem Prinzip der statistischen Versuchsplanung ausgeführt. Durch die gleichzeitige Veränderung verschiedener Parameter und die logische Auswertung der Ergebnisse ist somit die maximale Ausbeute an Information aus einer minimalen Anzahl von Versuchen sichergestellt.

Aufgrund der Tatsache, dass die Ergebnisse als Zwischenstand angesehen werden können und sich im Verlauf der weiteren Arbeit noch ändern werden, wird an dieser Stelle davon abgesehen, weiter auf deren Auswertung einzugehen.

5 AUSBLICK

Im Anschluss an die bisherige Arbeit gilt es zwei Wege weiter zu beschreiten. Zum einen ist dies die Automatisierung der statischen Berechnungen. Hierin inbegriffen sind eine Schnittstelle, die die geometrische Aufbereitung der von der CAD-Software gelieferten Daten vereinfacht. Die verwendete Software ist einerseits in der Lage komplexe Strukturen zu berechnen, allerdings nicht ausgesprochen anwenderfreundlich. Zum anderen wird die Arbeit an den Verbindungen fort- und umgesetzt. Erkenntnisse aus der Simulation helfen, deren Gestaltung zu vereinfachen und zu verbessern.

