

Konstruieren

Origami: Faltstrukturen aus Holzwerkstoffen

Hani Buri

Lehrstuhl für Holzkonstruktionen
IBOIS ENAC, EPFL Lausanne

Ziel der vorgestellten Arbeit ist es, Faltwerke aus Holzwerkstoffplatten herzustellen. Durch geeignete Verbindungen soll es möglich werden, die Platten im Raum beliebig anzuordnen. Origami, die japanische Kunst des Papierfaltens, ist die Inspirationsquelle dieser Strukturen. Die Bezeichnung Origami stammt aus den Begriffen *ori* (falten) und *kami* (Papier). In einem Wort verbunden wandeln sich diese Begriffe zu *origami*.

Falten verleiht einem Blatt Papier Steifigkeit und ermöglicht es, neue räumliche Gebilde zu entwickeln. Die im Grunde sehr einfache Technik des Origami führt zu einer erstaunlichen Formenvielfalt und Komplexität, die gestalterischen Möglichkeiten scheinen unbegrenzt. Aus einfachen Prinzipien entstehen komplexe Geometrien. Auch die Natur bedient sich des Prinzips des Faltens, um leichte Strukturen zu bilden. Entfaltete Pflanzenblätter und Insektenflügel erzeugen bei minimalem Materialaufwand grosse, stabile Flächen. Einfachheit, Materialhomogenität, Biegsamkeit und Formenvielfalt sowie ökonomischer Materialaufwand sind die herausragenden Eigenschaften von Origami.

Dieses Projekt wird durch Holz 21, dem Förderprogramm des Bundesamts für Umwelt BAFU, unterstützt.

Am Lehrstuhl für Holzkonstruktionen IBOIS der EPF Lausanne ist eine Arbeit im Gange, welche die Eigenschaften des Origami auf die Konstruktion mit Holzwerkstoffen übertragen will. Grossformatige Holzplatten und computergesteuerte Abbundanlagen ermöglichen den Bau von Faltwerken mit anspruchsvollen Formen. In interdisziplinärer Zusammenarbeit von Architekten, Informatikern und Ingenieuren entwickelt die Studie neue Strukturen, Modelle zu deren geometrische Beschreibung, konstruktive Verbindungen und Berechnungsmodelle.

Arbeitsmethode

Falten von Papier verbindet auf einfache und direkte Weise intuitive Wahrnehmung mit Verständnis von Geometrie und Festigkeit. Gefalzt erhält das Papier eine neue Gestalt und Steifigkeit. Falten erfordert sowohl handwerkliches Geschick als auch geometrisches Vorstellungsvermögen. Das zweidimensionale Blatt wird durch präzises Unterteilen zur räumlichen Struktur. Die gefaltete Form ist jedoch nicht starr und kann sich je nach Öffnungswinkel der Faltungen stark verändern. Auch geometrische Variationen innerhalb eines Faltmusters beeinflussen die gefaltete Form. Die Gestalt der Faltung lässt sich durch Modifikation einzelner Parameter des Grundmusters stark verändern.

Formen

Im spielerischen Umgang mit den genannten Prinzipien sollen die Möglichkeiten der Formgestaltung durch das Falten ausgelotet werden. Dies basiert auf einem intuitiven Ansatz, der auf unmittelbarer Erfahrung aufbaut. Zwischen Papier, Hand und Auge findet ein direkter Dialog statt: ertasten, ausprobieren, beobachten, variieren, verändern. Eine erste Phase erfasst das Falten und gefaltete Formen empirisch, lässt aber die praktische Anwendbarkeit vorerst ausser Acht.

Einordnen und Auswählen

Die Analyse der Faltungen nach geometrischen Grundmustern ist das Ziel der zweiten Phase. Zwei bis drei Faltmuster stehen zur Wahl, um sie genauer zu untersuchen und weiterzuentwickeln. Die Auswahl ist subjektiv; die persönliche Faszination für einige der Muster ist ein wichtiges Auswahlkriterium. Entscheidend ist zudem, ob sich das Faltwerk mit plattenförmigen Holzwerkstoffen ausführen lässt.

Geometrie

Ein wichtiger Schritt der Studie ist es, die räumliche Geometrie der ausgewählten Faltwerktypen zu erfassen. Zunächst bilden wir einfache Faltwerke in einem 3D-CAD-Programm ab und überprüfen die Richtigkeit der Darstellung im Modell. Das Verständnis der Geometrie eines Grundmusters wird gemeinsam mit einem Mathematiker erarbeitet und soll zu einem dynamischen Modell führen. Damit lässt sich die Form direkt über die Steuerung der Einflussgrössen am Rechner generieren und verändern.

Prototypen

Einige ausgewählte Faltwerke werden als Prototypen realisiert, getestet und auf Machbarkeit überprüft. Dabei kommen Fragen auf, die eine enge Zusammenarbeit mit einem Bauingenieur erfordern.

- Wie lässt sich die Materialstärke auf die aus zweidimensionalen Flächen bestehende Geometrie übertragen?
- Welches sind Form und Art der Verbindungen zwischen den Platten?
- Wie lassen sich die Faltwerke einfach und rationell montieren?
- Wie lassen sich die Faltwerke statisch berechnen und modellieren?
- Wie verhält sich das Faltwerk unter Belastung, und wie verhält sich die reale Belastung im Vergleich zur Berechnung?

Origami

Origami ist heute ein sehr weit reichendes Gebiet mit einer Vielzahl von Faltechniken und einer schier unbegrenzten Anzahl von Faltmustern. Grundsätzlich sind drei Gattungen von Origami zu unterscheiden, nämlich klassisches, modulares und Mosaik-Origami.

Das *klassische Origami* beschäftigt sich hauptsächlich mit figürlichen Darstellungen von Tieren, Menschen, Pflanzen und Objekten. Die Figuren sind oft stark vereinfacht und fast immer zweidimensional. Ausgehend von einem quadratischen Blatt Papier werden sie ohne Schere und Leim allein durch Falten erzeugt. Es existiert eine Auswahl von Grundmustern, auf denen die verschiedenen Figuren aufbauen [2]. Die Kunstfertigkeit liegt darin, mit wenigen Faltungen eine vereinfachte und suggestive Form zu skizzieren.

Modulares Origami beschäftigt sich im Gegensatz zum figürlichen Origami ausschliesslich mit geometrischen Körpern; mit Polyedern, räumlichen Gitterstrukturen oder Darstellungen von Molekülen. Die geometrischen Figuren setzen sich aus einzelnen «Bausteinen» zusammen – durch Ineinanderstecken oder Leimen.

Mosaik-Origami ist ebenfalls rein geometrisch. Ausgangspunkt sind zweidimensionale geometrische Muster, so genannte Parkettierungen, welche auf das Papier aufgezeichnet sind und gefaltet werden. Das Muster verändert sich durch diese Faltungen. Einige Parkettierungen bleiben auch nach dem Falten zweidimensional, andere werden räumlich und verleihen dem Papierblatt Stabilität und erhöhte Festigkeit. Die Formenvielfalt ist sehr gross, doch sind einige der Grundmuster in ihrer räumlichen Entfaltung besonders interessant.

Faltwerke aus Holzwerkstoffplatten

Für den Entwurf von Faltwerken aus Holzwerkstoffplatten sind nur Faltmuster interessant, welche eine räumliche und eine tragende Wirkung aufweisen. In der vorliegenden Arbeit konzentrieren wir uns deshalb auf Faltmuster aus modularen Origami und vor allem auf Mosaik-Origami. Viele dieser Faltungen haben wir intuitiv durch Ausprobieren gefunden und später festgestellt, dass sie bereits in ähnlicher Form existieren. Insbesondere im Vorkurs am Bauhaus (Josef Albers) [1] wurden räumlich und formal interessante Faltwerke aus Papier entwickelt.

Die ausgewählten Faltmuster werden analysiert und beschrieben. *Akkorde-*

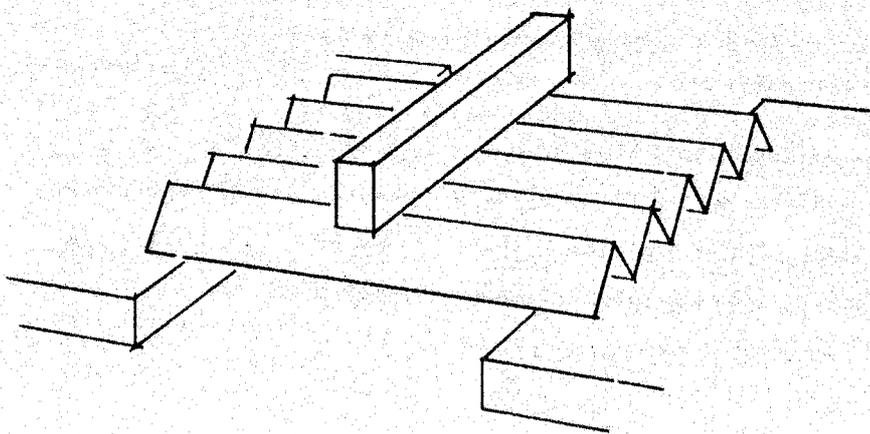
onfaltung und *Umkehrfaltung* bilden das Grundvokabular, auf dem die anderen Faltungen aufbauen. *Rautenfaltung*, *Fischgrätenfaltung* und *Diagonalfaltung* sind drei Faltmuster, die uns besonders interessant und für Faltwerke aus Holzwerkstoffplatten geeignet erscheinen.

Akkordeonfaltung

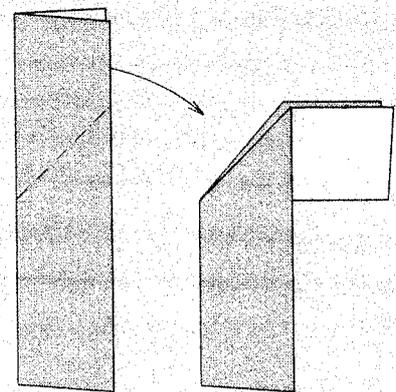
Die einfachste räumliche Faltung ist die Akkordeonfaltung. Sie wird oft zur Illustration der Effizienz der Tragwirkung von Faltwerken herangezogen [5] und besteht aus einer Reihe von parallelen Berg- und Talfalten. Bereits diese einfache Faltung lässt sich durch Variieren des Grundmusters in ihrer Gestalt verändern; so etwa durch zwischen die parallelen Bergfalten gelegte zickzackförmige Talfalten. Damit bilden sich alternierende Wellenmuster. Weitere Veränderungen lassen sich durch radiales Falten erreichen, was zu einer fächerförmigen Faltung führt.

Umkehrfaltung

Die Umkehrfaltung ist eine der Grundtechniken im Origami [2]. Eine einfache gerade Faltung kann auf diese Weise die Richtung wechseln. Ausgehend von der Akkordeonfaltung wird ein Papierstreifen durch eine Mittelfalte in Längsrichtung halbiert und in einem beliebigen



Akkordeonfaltung: Das statische Prinzip der Falte nach Siegel.



Das Prinzip der Umkehrfaltung.

spitzen Winkel quer zur Längsachse gefaltet. Geöffnet zeigen sich zwei schräge Seitenschenkel, welche die Mittelfalte an ihrem Scheitelpunkt zweiteilen. Die Mittelfalte wird nun so gefaltet, dass die eine Hälfte eine Bergfalte und die andere Hälfte eine Talfalte bildet. Die Faltrichtung der Mittelfalte dreht sich am Scheitelpunkt der Schenkel um und diese werden dabei zu Bergfalten. Der Papierstreifen bildet nun V-förmig ineinander geschobene Berg- und Talfalten.

Zwei interessante Faltmuster basieren auf dieser Umkehrfaltung: Rautenfaltung und Fischgrätenfaltung.

Rautenfaltung

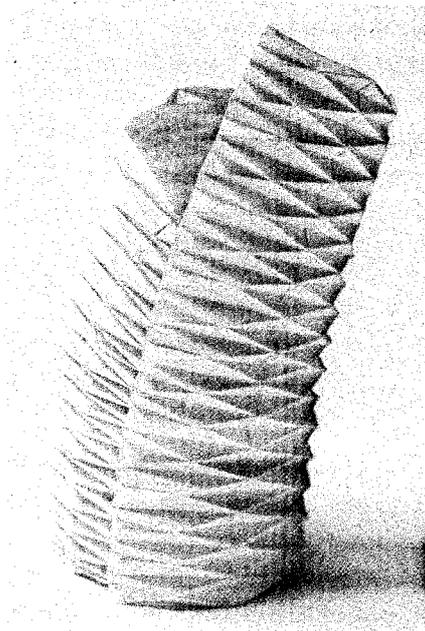
Grundlage dieses Faltmusters ist die in der Diagonale gefaltete Raute. In einem gleichmässigen Rautenmuster bilden die Diagonalen parallele Linien. Werden diese zu Talfalten und die Seiten der Rauten zu Bergfalten gefaltet, so erhält das Blatt eine regelmässige zylindrische Krümmung. Die Rautenfaltung lässt sich aus der Umkehrfalte ableiten. Wird eine Umkehrfalte an der Basis der beiden Seitenschenkel gespiegelt, entsteht eine Rautenfalte.

Die Biegung der Faltung hängt von der Geometrie der Rauten ab: Je spitzer die Rauten, desto schwächer ist die Krümmung des gefalteten Papierstreifens. Gleichförmige Rauten erzeugen eine Annäherung an ein Kreissegment. Sind die Rauten zu unterschiedlich grossen Drachenvierecken verzogen, ändert sich der Kurvenradius, was Annäherungen an eine beliebige stetige Kurve möglich macht. Werden die Papierstreifen aneinander gereiht, entsteht eine einfach gekrümmte Schale, welche im Querschnitt verschiedene Formen annimmt: Kreissegment, Katenoide, Zykloide und andere mehr.

Die Rautenfaltung besteht nur aus dreieckigen und damit ebenen Flächen. Dies ist ein grosser Vorteil in Bezug auf die Konstruktion mit Holzwerkstoffplatten. Das Rautenmuster erscheint nicht allein aufgrund der grossen Formenvielfalt und Flexibilität interessant, sondern auch aus Sicht der Statik [6].

Fischgrätenmuster

Auch dieses Muster geht von der Umkehrfaltung aus, diesmal nicht gespiegelt, sondern versetzt kopiert, wobei die Mittelfalte parallel zur ursprünglichen Richtung zurückgeknickt wird. Sie beschreibt so eine zweifach geknickte Zickzacklinie. Das erste und das dritte Segment der Mittelfalte liegen parallel und schräg verschoben (Bergfalten). Das mittlere Segment (Talfalte) verbindet die beiden äusseren Segmente. Entsprechend zur Mittelfalte wechseln die Schenkel der zweiten Umkehrfalte ihre Faltrichtung von der Berg- zur Talfalte. In der Wiederholung ergibt sich in der Aufsicht ein Fischgrätenmuster aus zwei Reihen gespiegelter Trapeze. In der seitlichen Ansicht entsteht ein schräges Treppennmuster. Seitlich aneinander gereiht entsteht eine Faltung mit zickzackförmiger Riffelung. Da diese Faltung sowohl in Längsrichtung als auch in Querrichtung zickzackförmig ist, zieht sie sich beim Schliessen der Falten in beide Richtungen zusammen und wird dadurch sehr kompakt.



Regelmässige Rautenfaltung: Durch auseinanderziehen und zusammendrücken der Ränder verformt sich die Faltung.

Das Fischgrätenmuster wird auch *Mura-Ori* genannt [4], nach dem japanischen Forscher Mura, der diese Faltung erstmals wissenschaftlich beschrieben hat. Ihn interessierte vor allem, dass sich die Faltung aus einem sehr kompakten Zustand in eine grosse Fläche verwandeln kann. Er entwickelte ausklappbare Sonnensegel für Satelliten, die auf diesem Prinzip beruhen. Mura faltete auf diese Weise auch Landkarten, die sich in einer Bewegung ganz auseinander ziehen lassen. Auch die Blätter der Buche entfalten sich nach demselben Prinzip aus der kompakten Knospe zur Fläche [7].

Diagonalfaltung

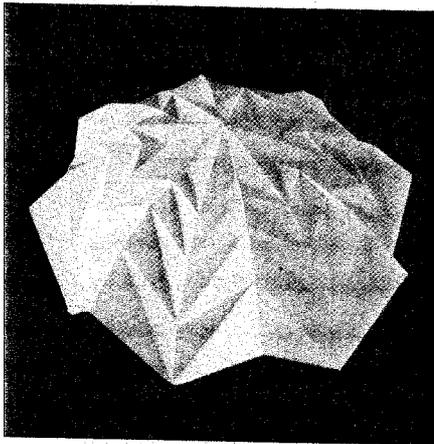
Basis dieser Faltung ist ein in der Diagonale gefaltetes Rechteck, Parallelogramm oder Trapez. Dabei werden die Aussenkanten aus einer parallelen Position diagonal nach oben gedreht. Mehrere derart gefaltete Rechtecke aneinander gehängt, verwenden sie sich schraubenförmig [3] [9]. Diese Faltung ist deshalb interessant, weil sich auf einfache Art doppelt gekrümmte Flächen ergeben. Weitere Studien sollen zeigen, wie sich die Diagonalfaltung architektonisch und konstruktiv nutzen lässt.

Prototyp

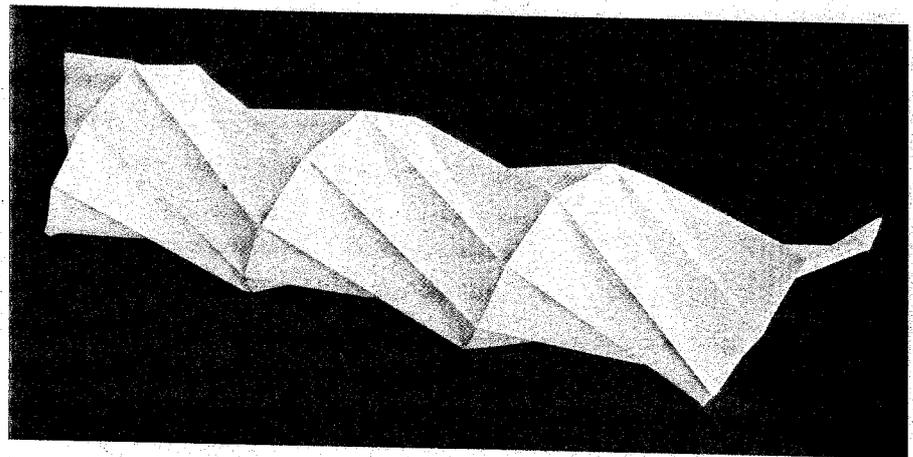
Der Bau eines ersten Prototyps verfolgte drei Ziele. Erstens war die Geometrie einer Faltung mit einem Zeichenprogramm darzustellen und deren Richtigkeit anhand eines Modells zu überprüfen. Zweitens war die Verformung des Prototyps unter Belastung mit Modellierungen aus verschiedenen Finite-Elemente-Programmen zu vergleichen. Drittens sollten erste Erfahrungen mit einer Verbindungstechnik und der Montage der Elemente gesammelt werden.

Konstruktion

Die als Prototyp gewählte Faltstruktur basiert auf einem Fischgrätenmuster und hat eine regelmässige Krümmung. Die Paneele sind auf einer Kreissäge zugeschnitten, die Form muss möglichst einfach sein: ein Trapez und dessen Spiege-



Radiale Fischgrätenfaltung.



Diagonalfaltung: Die Faltung kann zu einer spiralförmigen Röhre geschlossen werden.

lung. Die Trapeze sind 130 cm lang und 28 cm breit, wobei die parallelen Seiten 96 cm resp. 53 cm lang sind. Die Schenkelwinkel betragen 20° und 40° . Die Spannweite des Faltrwerks beläuft sich auf 6,7 m, dies bei einer lichten Weite von 2,6 m und einer Breite von 2,8 m. Die Konstruktion besteht aus sechs parallelen, gefalteten Bögen mit insgesamt 144 Trapezen. Als Material wird 21 mm starkes Fichtensperrholz gewählt.

Die Trapeze lassen sich in wenigen Schnitten ohne Restabschnitte zuschneiden. Ein Gehrungsschnitt erzeugt automatisch das jeweils gespiegelte Gegenstück. Zwei symmetrische Trapeze fügen sich entlang den parallelen Seiten zu einem V-förmigen Teil zusammen. Diese Verbindung ergibt an der langen Seite ein spitzes Teil mit einem stumpfen Schwalbenschwanz, an der kurzen Seite wird die Spitze stumpf und der Schwalbenschwanz ist tief eingeschnitten. Zwölf dieser Basisteile lassen sich so ineinander stecken, dass sie einen Bogen formen. Unsicherheitsfaktoren beim Bau des Faltrwerks war jeweils die Genauigkeit des Zuschnitts und der Montage. Doch die Elemente sind präzise genug und zudem verhältnismäßig weich, so dass die Montage ohne Probleme möglich ist.

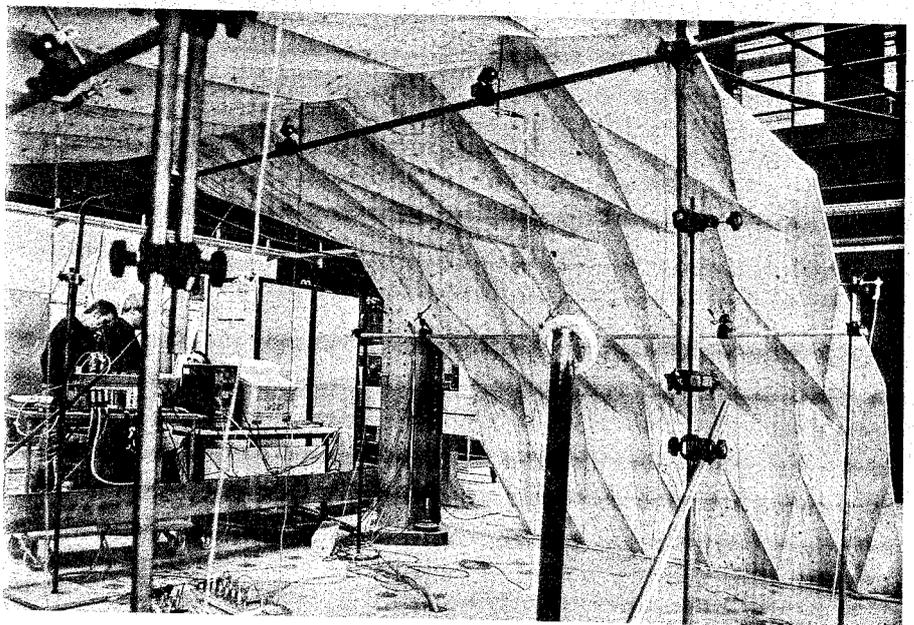
Die Paneele sind in versetzter Anordnung alle 50 mm mit 5,0/80 mm Schrauben (Assy Zebra, Würth) verschraubt. Eine solche Verbindung ist nicht

normgerecht, schien aber für diesen Versuch geeignet, da dank der selbstbohrenden Spitze keine Risse zwischen den Hohlschichten entstehen und die Montage sehr einfach ist. Vier Vorversuche zeigten die relative Steifigkeit einer solchen Verbindung.

Berechnungen

Parallel zum Bau des Faltrwerks wurde die Struktur auf drei verschiedenen Finite-Elemente-Programmen berechnet (SAP, RFEM, ANSYS) [8]. Beim Vergleich

der Berechnungen dieser verschiedenen Programme zeigen sich sehr unterschiedlich Resultate. Die Modellierung der Rotationsfreiheit der Verbindungen beeinflusst die Resultate erheblich. Bleiben die Rotationsbewegungen zwischen den Platten blockiert, berechnen SAP und RFEM ähnliche Verformungen. Sind Rotationen erlaubt, weichen die Resultate stark voneinander ab. Für die geplanten Faltrwerke können wir aber nicht von einer steifen Verbindung ausgehen, und eine gewisse Rotationsfreiheit muss in die Berechnung



Prototyp der Versuchsanordnung.

einfließen. Nicht alle Programme erlauben eine Rotationsfreiheit um die Achse der Verbindung.

Auch der Vergleich der Berechnungen mit den realen Verformungen der faltstruktur im Versuch zeigt grosse Unterschiede. Selbst wenn die experimentell ermittelte Steifigkeit der Verbindung berücksichtigt bleibt, sind die Verformungen des gebauten faltwerks wesentlich grösser als die berechneten. Ziel weiterer Untersuchungen ist nun, die Berechnung von faltstrukturen mit finiten Elementen besser zu verstehen und sie den speziellen geometrischen Bedingungen anzupassen.

Belastungstest

Eine erste Testserie mass die Verformungen der faltstruktur bei drei verschiedenen lastfällen, um sie mit den berechneten Verformungen zu vergleichen. Die ermittelten Verformungen des Prototyps sind grösser als die berechneten. Ein Bruchtest mit einer symmetrischen Belastung in zwei Punkten zeigt, dass die faltstruktur eine maximale Last von 27 kN trägt. Höhere Lasten lassen die Verbindungen aufreissen. Der Schwachpunkt dieser

Verbindung ist der ungenügende Randabstand der Schraube zur faltkante. Die Entwicklung einer effizienten Verbindung, welche gleichzeitig eine einfache Montage erlaubt, ist Ziel weiterer Arbeiten.

Fazit

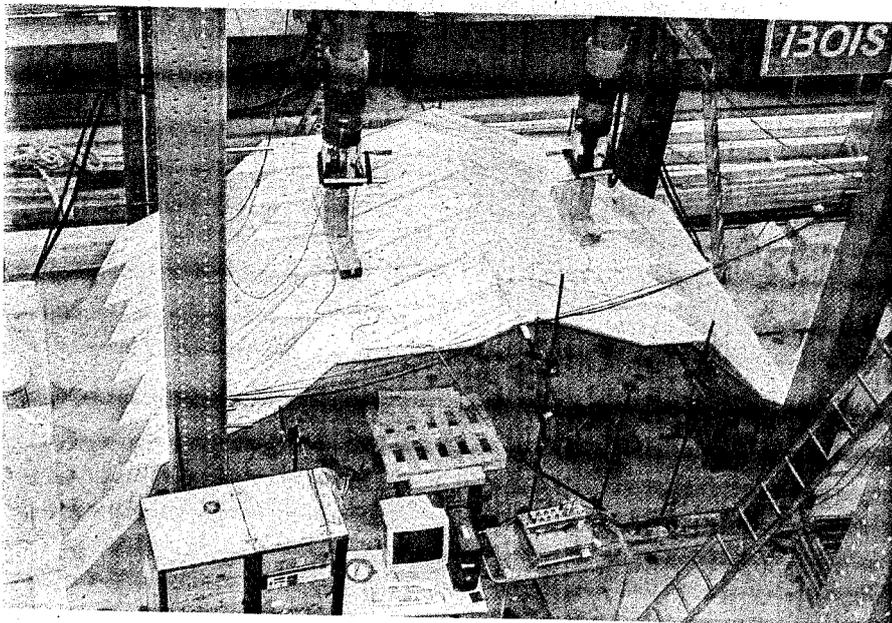
Mit den bisherigen Untersuchungen sind drei faltmuster identifiziert, welche viel versprechende Formen erzeugen und grundsätzlich für den Bau von faltwerken mit Holzwerkstoffplatten geeignet sind. Weitere Analysen sollen das Verständnis dieser Geometrien vertiefen, damit sie in einem CAD-Programm generiert und parametrisch gesteuert werden können.

Der konstruierte Prototyp zeigt, dass auf den entwickelten Geometrien beruhende faltwerke realisierbar sind. Sie weisen interessante Festigkeitswerte auf. Weitere Forschungsschwerpunkte bilden die Entwicklung geeigneter Verbindungen und die Berechnung mit Finite-Elemente-Modellen.

Komplexe faltwerke mit Holzwerkstoffplatten sind machbar und für Architekten sowie für Tragwerksplaner gleichermaßen attraktiv.

Literatur

- [1] Albers J., Concerning fundamental design, in Bauhaus 1919–1928 / ed. by Bayer H, Gropius W, Gropius I, Boston: Branford, 1952, pp 114–121
- [2] Engel P., Folding the Universe: Origami from Angelfish to Zen, Vintage Books, New York, 1989
- [3] Hunt GW., Airo I., Twist buckling and the foldable cylinder: an exercise in origami, International Journal of Non-Linear Mechanics, 2005, vol 40, pp 833–843
- [4] Muira K., Proposition of Pseudo-Cylindrical concave polyhedral shells, IASS symposium of folded plate and prismatic structures, 1970
- [5] Siegel, C., Strukturformen der modernen Architektur, Calwey, München, 1960
- [6] Stewart, I., Origami tessellations, Scientific American 1999, fev, v 280, pp 100–101
- [7] Vincent JFV., Deployable structures in nature: potential for biomimicking, Proceedings of the Institution of mechanical engineers part c-journal, 2000, v 214, pp 1–10
- [8] Wienand Y., Natterer J., Pirazzi C., Analyse comparative d'une structure Origami, IBOIS EPFL, Mai 2006.
- [9] Zeier F., Papier, Versuche zwischen Geometrie und Spiel, Haupt, Bern 1993



Prototyp: Belastungsversuch.