



**TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DRESDEN**

Institut für Massivbau <http://massivbau.tu-dresden.de>

SILKE SCHEERER, MANFRED CURBACH (HRSG.)

LEICHT BAUEN MIT BETON

**FORSCHUNG IM
SCHWERPUNKTPROGRAMM 1542
FÖRDERPHASE 1**

Entwurf und Herstellung von faltwerken durch Faltung

Jan Dirk
van der Woerd
Rostislav Chudoba
Josef Hegger

Lehrstuhl und
Institut für Massiv-
bau der RWTH
Aachen University

Anlehnend an die japanische Papierfaltkunst Origami wurde ein Konzept für den Entwurf und die Herstellung von gefalteten Tragstrukturen aus zementbasierten Verbundwerkstoffen entwickelt. Die räumlichen Tragstrukturen werden durch Faltung von ebenen Elementen mit vorgegebenen Faltnlinien hergestellt. Durch Modifikation der Faltmuster ist eine große Vielfalt an Formen erzielbar und lassen sich die Steifigkeitsverhältnisse gezielt beeinflussen.

Wegen der hohen Variabilität und der großen Anzahl von Freiheitsgraden der Faltstrukturen wurde eine numerische Simulationsplattform zur Unterstützung aller Phasen des Entwurfs und der Herstellung erstellt. Mit Modellen aus Textilbeton wurde eine Herstellmethodik entwickelt. Anhand des Entwurfs einer gefalteten Kuppel wird das Entwurfs- und Herstellkonzept demonstriert.

1 Motivation und Zielsetzung

Der in den Ingenieurwissenschaften zunehmend populäre Einsatz der Origami-Technik eröffnet neue Möglichkeiten zur Herstellung von effizienten Tragkonstruktionen [1, 2, 3, 4, 5]. In Verbindung mit leistungsfähigen, zementbasierten Verbundwerkstoffen bietet die Origami-Technik einen innovativen Ansatz für Entwurf und Realisierung von leichten tragenden Strukturen nach dem Prinzip *form follows force* des SPP 1542. Durch Parametrisierung und Modularisierung von gefalteten Elementen kann sowohl eine wirtschaftliche Fertigung als auch eine hohe Variabilität der erzielbaren Formen erreicht werden.

Aktuelle Entwicklungen im Bereich der zementbasierten Verbundwerkstoffe, wie z. B. textilbewehrte Tragstrukturen, ermöglichen erst die Umsetzung des Faltens im Massivbau. Durch den Einsatz von nicht-korrodierenden textilen Bewehrungsmaterialien aus alkaliresistentem Glas (AR-Glas) oder Carbon können extrem dünnwandige und schlanke Betonstrukturen hergestellt werden, da diese keine hohen Betondeckungen aus Dauerhaftigkeitsanforderungen benötigen [6, 7]. Neben den hohen charakteristischen Festigkeiten der verwendeten Bewehrungsmaterialien besitzen die flächigen Textilien die Eigenschaft, leicht biegsam zu sein, so dass diese die Funktion eines Liniengelenkes zwischen den starren Betonfacetten übernehmen können. Die grundsätzliche Wirkungsweise dieses Mechanismus ist in Bild 1 dargestellt.

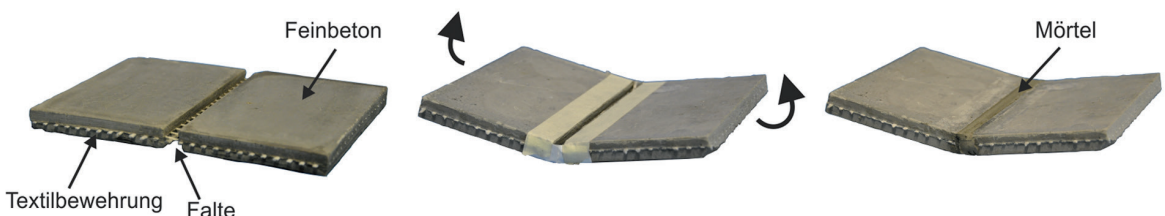


Bild 1: Grundprinzip des Faltens von Beton [7]

Ober- und unterhalb der durchgängigen Bewehrung ist der Beton innerhalb einer Kante ausgespart und ermöglicht so eine Rotation. Nach dem Erreichen des gewünschten Winkels wird die Aussparung mit einem Mörtel verfüllt. Die Struktur ist nach dem Erhärten in der gefalteten Form fixiert. Mehrere dieser Faltkanten lassen sich zu Faltmustern kombinieren. Der Werkstoff Textilbeton führt somit nicht nur zu filigranen und leistungsfähigen Bauteilen, sondern ermöglicht auch neue Ansätze der Herstellung.

Durch die Zusammenführung der Origami-Technik und dem Falten von Beton entstand ein neuer Ansatz für den Tragwerksentwurf und die -herstellung. Ziel des Projekts ist die Bereitstellung einer Entwurfs- und Herstellmethodik, bei der räumliche Betonstrukturen durch das Falten von ebenen, mit einem Faltmuster versehenen dünnwandigen Elementen entstehen. Die Elemente werden mit einer einfachen, flachen Schalung erstellt und durch das Falten in eine komplexe, räumliche Struktur überführt. In Anlehnung an den japanischen Begriff Origami (ori = Falten, gami = Papier) wurde der im Projekt konzipierten Entwurfs- und Herstellmethodik zum Falten von Beton (concrete) der Name *Oricrete* gegeben [8].

2 Entwurfs- und Herstellmethodik

2.1 Oricrete-Toolkit

Der Zusammenhang zwischen dem Faltmuster und der entstehenden Form ist nur für einfache Fälle offensichtlich und erfordert eine gezielte Formfindungsanalyse. Ebenso sind für eine effiziente Herstellung Hebe- und Faltmaschinen zu entwerfen, welche eine exakte Steuerung des Faltvorgangs ermöglichen. Aus diesem Grund wurde eine computergestützte Simulationsplattform entwickelt, welche folgende Anwendungsaufgaben umfasst:

- Formfindung mit Hilfe von Optimierungsansätzen,
- Modellierung der Formgebung mittels eines Herstellungsapparates,
- Simulation des Tragverhaltens der gefalteten Struktur in ihrer Endkonfiguration.

Für die mit der Programmiersprache PYTHON implementierte Simulationsplattform wurde analog zur Bezeichnung der Entwurfs- und Herstellmethodik von zementbasierten Faltwerken der Name *Oricrete* gewählt. Nähere Details zur mathematischen Formulierung und Implementierung des numerischen Modells können [9, 10] entnommen werden. Die Funktionalität umfasst den gesamten Prozess des Tragwerksentwurfs und der Herstellung. Der Quelltext des Oricrete-Toolkits ist öffentlich zugänglich auf der Open-Source-Management-Plattform www.github.com [11]. Eine Online-Dokumentation mit Beispielen der Simulationsergebnisse und Animationen der simulierten Faltprozesse ist unter www.oricrete.com [12] verfügbar.

2.2 Gestaltungsmöglichkeiten von Faltwerken

Mit den bereitgestellten Formfindungsanwendungen des Oricrete-Toolkits wurde eine Klassifizierung der möglichen Formgebungsprinzipien von gefalteten Strukturen für frei geformte Schalen durchgeführt [8]. Die Studien dokumentieren, dass die Form der gefalteten Schale durch drei Maßnahmen gezielt beeinflusst werden kann:

- Verteilung der Faltwinkel in der Endkonfiguration (Bild 2 oben und Mitte),
- eine Anpassung des Faltmusters unter Einhaltung bestimmter winkel- und längenbasierter Bedingungen (Bild 2 unten),
- eine Modularisierung der globalen Geometrie und Montage des Gesamttragwerks aus separat gefertigten Einzelsegmenten (Bild 7).

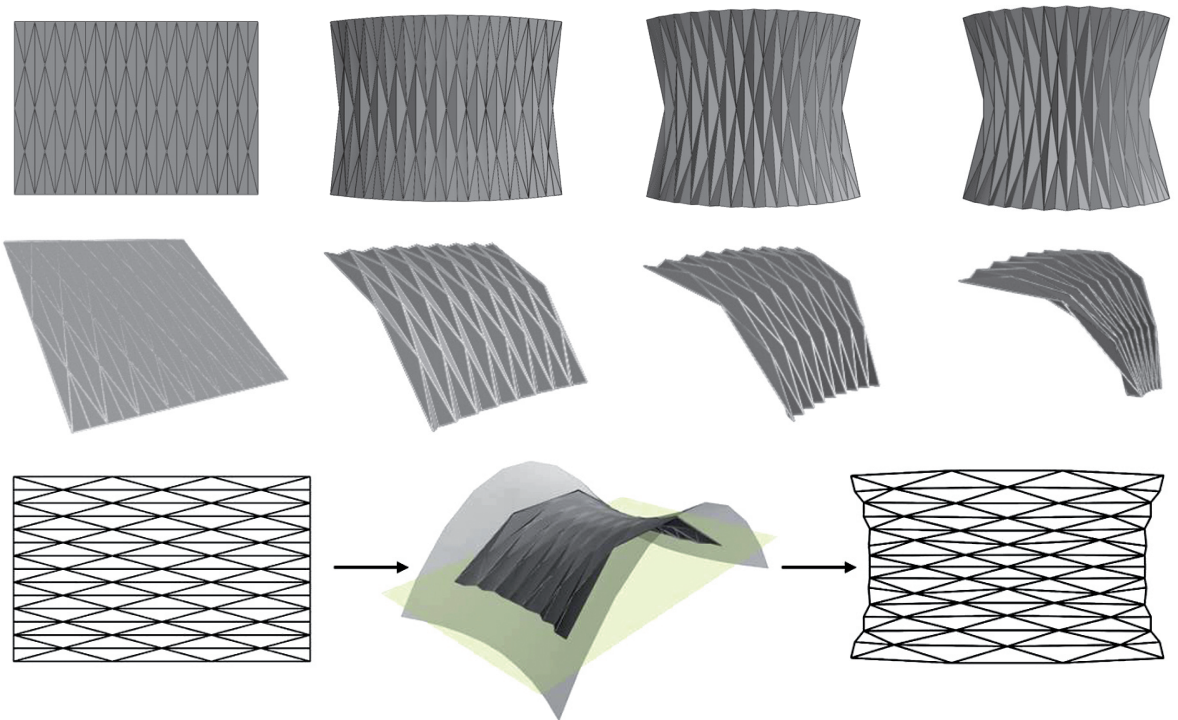


Bild 2: Ungleichmäßige Faltung eines gleichmäßigen Faltmusters: Faltung zu einer doppelt gekrümmten symmetrischen Fläche [8] (oben);
 Ungleichmäßige Faltung eines gleichmäßigen Faltmusters: Faltung zu einer schief doppelt gekrümmten Fläche [13] (Mitte);
 Beispiel der Faltmusteroptimierung für eine vorgegebene doppelt gekrümmte Zielfläche [13] (unten)

Durch die Kombination dieser Gestaltungsprinzipien lassen sich freie Formen und Strukturen durch Variation der Faltmuster und durch Steuerung des Faltprozesses auf unterschiedliche Art und Weise realisieren.

2.3 Maschinelle Durchführung der Faltung

In der ebenen Form entspricht das Halbzeug einem kinematischen Mechanismus, der durch Bewegung in vertikaler Richtung vielfältige Formen annehmen kann.

Die Anzahl der Freiheitsgrade (engl.: degrees of freedom = DOF) einer ebenen Platte mit vorgegebenen Faltlinien (im Folgenden als Oricrete-Platte bezeichnet) bestimmt sich zu

$$n_{DOF} = 3k - l$$

mit k = Anzahl der Knoten, l = Summe der Kanten und Falten.

Für eine gezielte maschinelle Umsetzung des Faltprozesses in die geplante Form wurden drei mögliche Ansätze identifiziert und untersucht:

- (1) Programmgesteuertes gleichzeitiges Anheben mehrerer Punkte des Faltmuster-Halbzeugs durch pneumatisch oder hydraulisch einzeln ansteuerbare Aktuatoren.

- (2) Mittiges Anheben des Halbzeugs über einen Kran mit einem kinematischen Adapter, der die vertikale Bewegung des Schwerpunktes in definierten Anteilen auf mehrere Punkte verteilt, so dass sich die richtige Faltform automatisch ergibt (Bild 3).
- (3) Anhebung des Halbzeugs am Rande entsprechend dem Hanging-cloth-reversed-Konzept (Formfindung unter Verwendung der Schwerkraft) [14] unter Verwendung von Seilen, die von unten durch die Faltkanten geführt und individuell gespannt werden können (Bild 4).

Die Kenntnis der genauen Lage der angesteuerten Punkte des Faltmusters während des Faltprozesses ist unabdingbar. Zur effizienten Planung und Umsetzung der maschinellen Faltung wurden die notwendigen Erweiterungen im Oricrete-Toolkit implementiert.

Für die Variante (1) mit individuell ansteuerbaren Aktuatoren kann das entwickelte Modell die notwendigen Positionsdaten liefern. Diese Variante wurde jedoch nicht weiter verfolgt, da die Investitionskosten sehr hoch gewesen wären und sich die Varianten (2) und (3) bei entsprechender theoretischer Grundlage und modellbasierter Unterstützung mit einfacheren Mitteln realisieren lassen.

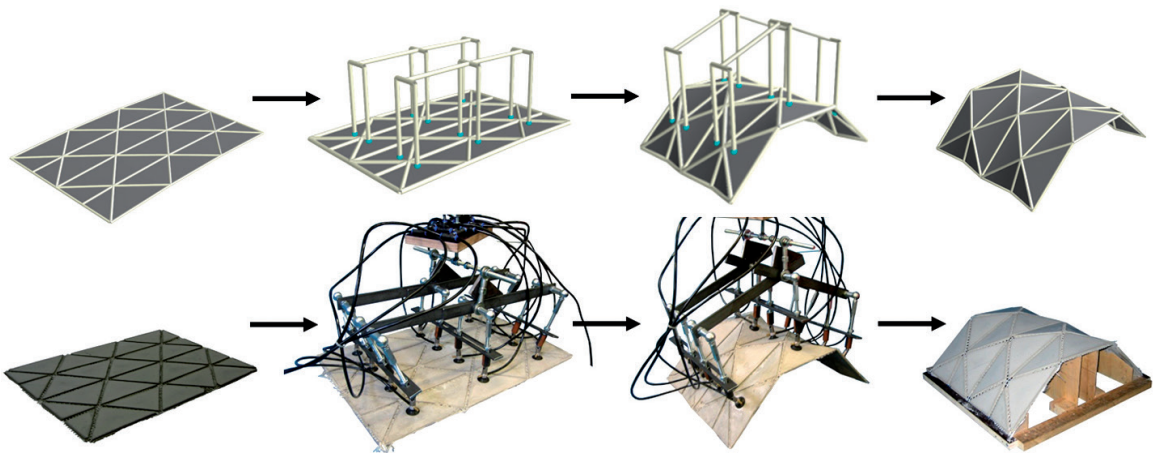


Bild 3: Studie zur maschinellen Faltung mit einem kinematischen Kranadapter (Variante 2): Oben: Simulation des Faltprozesses; unten: konstruktive Umsetzung mit pneumatischen Saugknöpfen

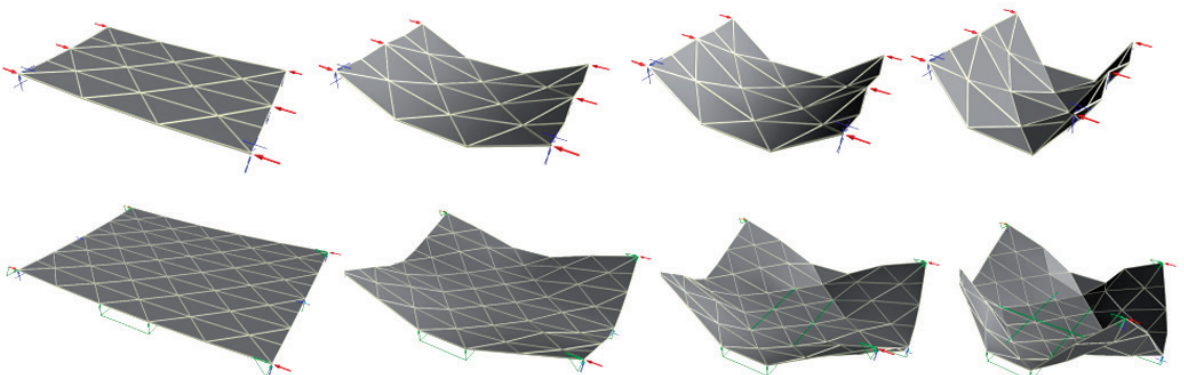


Bild 4: Hanging-cloth-Simulation (Variante 3): oben: Anhebung und Verschiebung der Kanten nach innen; unten: Anhebung und Verschiebung der Eckknoten nach innen [9]

Für die Variante (2) eines Kranadapters wurden mithilfe der Simulationsplattform mehrere Varianten der kinematischen Konstruktion untersucht und ausgewertet. Basierend auf den numerischen Untersuchungen wurde ein kinematischer Kranadapter mit pneumatischen Saugnäpfen konstruiert und zur Faltung einer ebenen Textilbetonplatte mit Yoshimura-Faltmuster in eine Bogenform verwendet (Bild 3) [15].

Für die Variante (3), das Anheben und Verschieben der Kanten bzw. Eckpunkte, wurde die im Oricrete-Toolkit verfügbare Bedingung der starren Faltung mit der Zielfunktion der minimalen potenziellen Energie kombiniert. Bild 4 zeigt zwei Beispiele der Simulation des graduell auf den gegenüberliegenden Außenkanten bzw. in den Eckknoten abgehängten Faltmusters. Die Steuerung des Faltprozesses erfolgt alleine durch die Ausnutzung des Eigengewichts des betonierten Halbzeugs.

Die Untersuchungen zeigen, dass die Kombination der Varianten (2) und (3) eine einfach realisierbare Methodik zur Herstellung von gefalteten Strukturen im größeren Maßstab ohne aufwändiges Equipment darstellt. Dieser Ansatz soll in der zweiten Projektphase weiter verfolgt werden.

2.4 Verguss der Fugen

Im gefalteten Zustand wird die Faltwerksform durch das Vergießen der Faltfugen fixiert (Bild 1). Zur Identifizierung von geeigneten Vergussmaterialien wurde ein Screening der verfügbaren Produkte durchgeführt. Mit den identifizierten Materialkomponenten wurden verschiedene kleinmaßstäbliche Elemente und mehrere Tragstrukturen hergestellt und untersucht.

2.5 Analyse des Tragverhaltens

Zur Analyse des Tragverhaltens gefalteter Tragstrukturen können die mit der Simulation ermittelten Geometriedaten der Endkonfiguration (z. B. Bild 2) als Eingabe für eine FE-Simulation genutzt werden. Die bestehende Kopplung des Oricrete-Toolkits mit einer FE-Software (Abaqus und Infograph) liefert wichtige Hinweise für ein tieferes Verständnis der Zusammenhänge zwischen den Parametern des Faltmusters und seiner Tragwirkung.

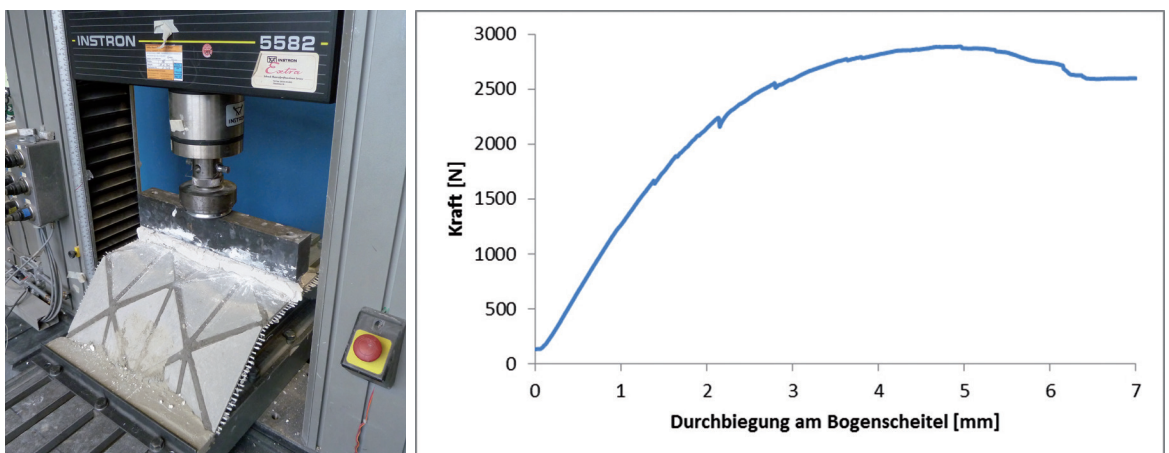
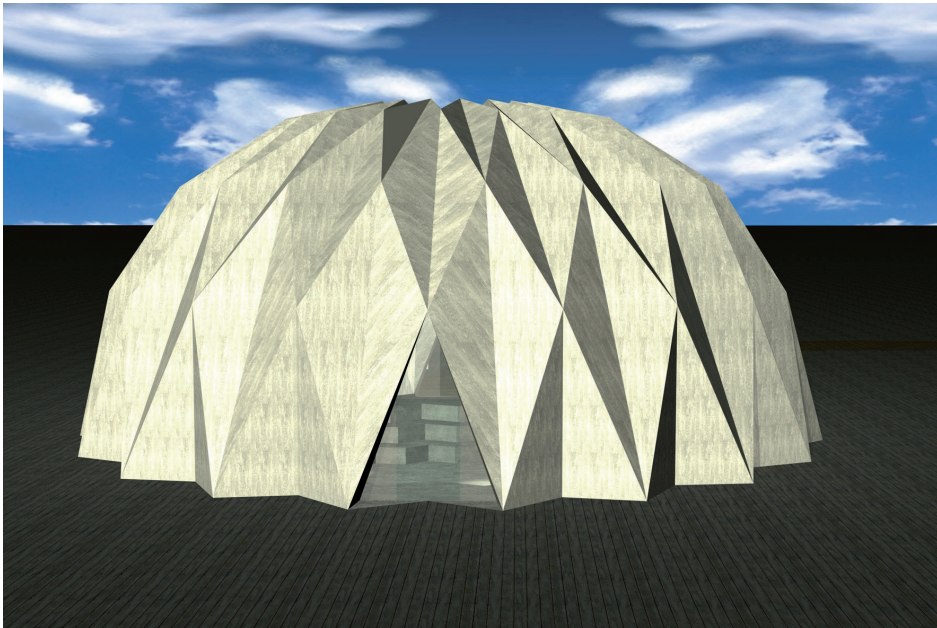


Bild 5: Experimentelle Untersuchung des Tragverhaltens eines einfach gekrümmten Bogens: Versuchsaufbau und Kraft-Verformungskurve des Versuchs [Foto: Jan Dirk van der Woerd]



*Bild 6:
Entwurf Ori-
dome – Ansicht
außen [17]*

Auch experimentelle Untersuchungen an einfach gekrümmten Bögen mit unterschiedlichen Facettierungen und Faltungshöhen wurden durchgeführt. Der in Bild 5 gezeigte Bogen überspannt eine Länge von 51 cm und hat eine Dicke von 8 mm. Er versagte bei einer Last von 2880 N.

3 Anwendungsbeispiel Oridome: Konzept für eine gefaltete Kuppel

3.1 Einleitung

Die in den vorherigen Abschnitten dargestellte Entwurfs- und Herstellmethodik wurde für die Realisierung einer gefalteten Kuppel im Modellmaßstab verwendet [16, 17]. Mit dem Einsatz der Oricrete-Methodik bei der Realisierung des Oridome bezieht sich der Begriff des Faltens nicht ausschließlich auf die endgültige Form des Tragwerks als Faltwerk, sondern integriert die Faltung in den Herstellprozess. Die resultierende Struktur erhält damit zu Recht die Bezeichnung „Faltwerk“.

3.2 Tragwerkskonzept und Herstellung

Mit dem Oridome wird der Entwurf einer leichten und filigranen Faltwerk-kuppel vorgestellt, die bezüglich der Nutzung vielfältig und bezüglich der Form vielfältig ist (Bild 6 und Bild 11). Als Material für die Umsetzung wird Textilbeton gewählt.

Bei der Konstruktion des Oridome ist die Struktur gleichzeitig Gebäudehülle und Tragwerk. Das Tragwerk zeichnet sich aufgrund der globalen Form durch einen sehr günstigen Lastabtrag vorwiegend über Membrankräfte aus. Durch die Faltungen ist die Kuppel deutlich steifer und unempfindlicher gegenüber Momentenbeanspruchungen, die durch unsymmetrische Lasten hervorgerufen werden.

Die Geometrie der Kuppel soll aus zwanzig gleichartigen Segmenten zusammengesetzt werden. Die Segmentierung ermöglicht eine Serienproduktion im Fertigteilwerk.

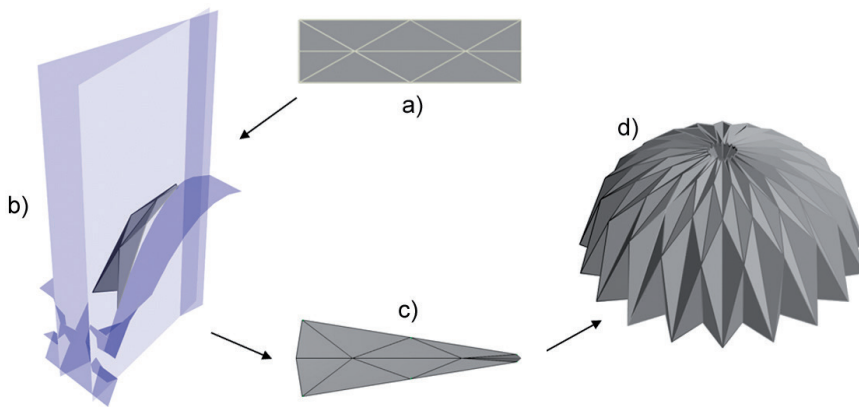


Bild 7: Entwurf des Faltmusters für die Herstellung des Oridome:
 a) Ausgangsmuster; b) Formfindungsprozess; c) angepasstes Faltmuster;
 d) Kuppel gefügt aus 20 Segmenten [17].

Als Ausgangsfaltmuster wurde das Yoshimura-Muster gewählt und verändert. In einer innerhalb des Projektes entstandenen Arbeit bearbeiteten die Studenten CHRISTIANE BONGARDT und MICHAEL KOLODZIE den architektonischen Entwurf der Kuppel, beschrieben den Herstellansatz und stellten ihn bildlich dar. Die Arbeit wurde mit dem Architekturpreis des TUDALIT e.V. 2013 ausgezeichnet [18].

3.3 Planung des Oridome unter Verwendung der Oricrete-Simulationsplattform

3.3.1 Formfindung

Mit der Hilfe der *Oricrete*-Simulationsplattform wird das Faltmuster für ein einzelnes Segment aus einem rechteckigen Yoshimura-Faltmuster mit 2 x 1 Elementen ermittelt (Bild 7). Als erster Schritt wird die doppelt gekrümmte Zielfläche definiert, die als dunkel lilafarbene Fläche in Bild 7 b dargestellt ist. Eine zweite doppelt gekrümmte Zielfläche (nicht angezeigt) wird parallel zu der ersten Fläche mit einem bestimmten Abstand, welche der gewünschten Falthöhe entspricht definiert. Die Knotenpunkte des Faltmusters werden entweder an die untere oder die obere Fläche angeheftet. Um den kontinuierlichen Anschluss der Einzelsegmente untereinander ohne klaffende Fugen zu gewährleisten, werden seitlich zwei vertikale Begrenzungsflächen, dargestellt als helllilafarbene Flächen in Bild 7 b, definiert. Nach der Definition der Zielflächen und der Kompatibilitätsbedingungen passt sich das gewählte Grundmuster im Optimierungsprozess der Zielfläche an, was ebenfalls in Bild 7 b zu sehen ist. Im Bild 7 c ist das aus dem Optimierungsprozess resultierende Faltmuster im abgewinkelten Zustand dargestellt. Aus ebenen Oricrete-Platten mit dem so ermittelten Faltmuster können die Einzelsegmente starr gefaltet und zur Gesamtstruktur gefügt werden, wie Bild 7 d zeigt.

3.3.2 Analyse des Tragverhaltens

Um die Trageigenschaften des Oridome zu untersuchen wurde über die Schnittstelle der Oricrete-Simulationsplattform die Geometrie in ein FE-Programm übertragen. Als Beispiel wird eine Parameterstudie der gefalteten und segmentierten Kuppel in Bild 8 mit einem Vergleich der Hauptmomente für 20, 40 und 60 Segmente gezeigt. Weiter wurden die maximalen Verformungen unter einer vertikalen Last berechnet um die Steifigkeitsverteilung der drei betrachteten Segmentationen zu vergleichen. Wie erwartet nimmt die Steifigkeit der Struktur bei einer steigenden Anzahl von Segmenten zu und nehmen die Biegemomente ab.

3.3.3 Bau des Oridome im Modellmaßstab

Der Entwurf des Oridome wurde im verkleinerten Maßstab umgesetzt. Für die Herstellung der ebenen Oricrete-Platten, wurde auf Basis des Simulationsergebnisses

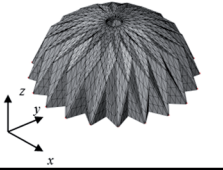


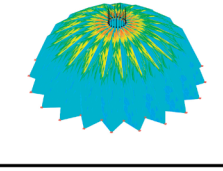
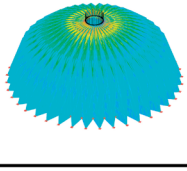
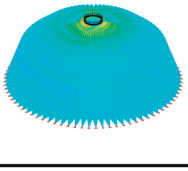

Anzahl der Segmente	$n = 20$	$n = 40$	$n = 60$	
Finite-Element-Modell				
Verteilung der Hauptmomente m_1				
max m_1	2,43 kNm/m	1,75 kNm/m	1,00 kNm/m	
Maximale vertikale Verformung u_z	2,1 mm	1,8 mm	1,3 mm	

Bild 8: Untersuchung Steifigkeitsverhältnisse des Oridome: Parameterstudie [9]

eine wiederverwendbare Schalung gebaut. Sie besteht aus mehreren Ebenen; für die Aussparungsleisten wurden Metallprofile verwendet. Aufgrund der geringen Plattendicken erhärtete der Feinbeton sehr schnell und die Produktion von zwei Platten täglich war möglich. Eine fertige Platte ist links in Bild 9 dargestellt.

Als nächster Schritt muss die Oricrete-Platte gefaltet werden. Aufgrund der relativ kleinen Abmessungen von $64,5\text{ cm} \times 22\text{ cm}$ konnten die Platten des Oridomes manuell mit Hilfe der in der Mitte von Bild 9 gezeigten Unterstützungskonstruktion in Form gebracht werden. Die Unterstützungskonstruktion besteht aus einzelnen Spanten, welche die endgültige Form des Segmentes wiedergeben. Ihre Geometrie wurde mit Hilfe der Simulationsplattform ermittelt. Nach dem Erhärten des Verfugungsmörtels ist das Segment fertig für die Montage (Bild 9, rechts). Die aus 20 Segmenten fertiggestellte Kuppel hat eine Höhe von 40 cm und einen Durchmesser von 120 cm (Bild 10).

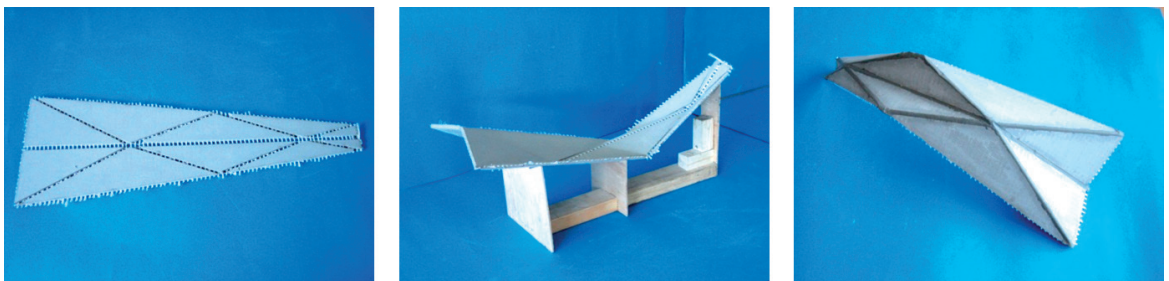


Bild 9: Herstellung des Oridome im Modellmaßstab: Platte mit Faltmuster (links); manuelle Faltung mit Hilfe einer Unterstützungskonstruktion (Mitte); fertiges Segment nach der Verfugung der Faltkanten (rechts) [16]

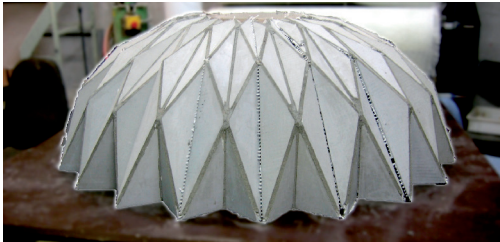


Bild 10: Oridome, gefügt aus 20 Segmenten im Modellmaßstab [16]

4 Zusammenfassung und Ausblick

Inspiriert von der japanischen Papierfaltkunst Origami wurde eine Methodik für den Entwurf und die Herstellung von Tragstrukturen durch Faltung entwickelt. In Kombination mit flächig bewehrten zementbasierten Verbundwerkstoffen wie Textilbeton ermöglicht das Faltkonzept die Realisierung von dünnwandigen, frei

geformten dreidimensionalen Faltwerken, die trotz komplexer Geometrie wirtschaftlich hergestellt werden können. Für den Entwurf und die Herstellung wurde eine Simulationsplattform entwickelt, die den Faltprozess als mathematische Optimierungsaufgabe erfasst. Mit dem Beispiel des Konzeptes für eine gefaltete Kuppel wurde eine mögliche Anwendung aufgezeigt. Die entstehenden Strukturen können nicht nur als eigenständige Tragwerke, sondern z.B. auch als verlorene Schalung oder bei der Gestaltung von Fassaden- und Hüllsystemen eingesetzt werden.

Danksagung

Die Autoren danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft für die finanzielle Unterstützung des Projektes CH 276/3-1 im Rahmen des Schwerpunktprogramms 1542 *Leicht Bauen mit Beton*.

Literatur

- [1] TARNAI, T.: Origami in structural engineering. In: KUNIEDA, H. (Hrsg.): Proceedings of the International Symposium on Theory, Design and Realization of Shell and Spatial Structures, 09.–13.10.2001 in Nagoya, Japan, S. 298–299.
- [2] SORGUC, A.; HAGIWARA, I.; SELCUK, S.: Origamics in architecture: a medium of inquiry for design in architecture. METU Journal of the faculty of architecture 26 (2009), Heft 2, S. 235–247.
- [3] TRAUTZ, M.; AYOUBI, M.: Das Prinzip des Faltens in Architektur und Ingenieurbau. Bautechnik 88 (2011), Heft 2, S. 76–79.
- [4] HERKRATH, R.; TRAUTZ, M.: Starre Faltungen als Leichtbauprinzip im Bauwesen. Bautechnik 88 (2011), Heft 2, S. 80–85.
- [5] BURI, H.: Origami-Faltkunst für Tragwerke. Detail (2010), Heft 10, S. 1066–1069.
- [6] SCHOLZEN, A.; CHUDOBA, R.; HEGGER, J.: Dünnwandiges Schalentragsystem aus textilbewehrtem Beton. Beton- und Stahlbetonbau 107 (2012), Heft 11, S. 767–776.
- [7] EHLIG, D.; SCHLADITZ, F.; FRENZEL, M.; CURBACH, M.: Textilbeton – Ausgeführte Projekte im Überblick. Beton- und Stahlbetonbau 107 (2012), Heft 11, S. 777–785.
- [8] VAN DER WOERD, J. D.; CHUDOBA, R.; SCHOLZEN, A.; HEGGER, J.: Oricrete – Eine Entwurfs- und Herstellmethodik für dünnwandige Faltwerke aus zementbasierten Verbundwerkstoffen. Beton- und Stahlbetonbau 108 (2013), Heft 11, S. 774–782.

- [9] CHUDOBA, R.; VAN DER WOERD, J. D.; HEGGER, J.: Numerical modeling support for form-finding and manufacturing of folded plate structures made of cementitious composites using origami principles. In: Proceedings of Euro-C 2014 – Computational Modelling of Concrete and Concrete Structures, 24.–27.03.2014 in St. Anton am Arlberg, Österreich.
- [10] CHUDOBA, R.; VAN DER WOERD, J. D.; SCHMERL, M.; HEGGER, J.: ORICRETE: Modeling support for design and manufacturing of folded concrete structures. Advances in Engineering Software 72 (2013), Heft 6, S. 119–127.
- [11] oricrete simulation platform: <http://github.com/simvisage/oricrete> (18.08.2014).
- [12] oricrete documentation: www.oricrete.com (18.08.2014).
- [13] VAN DER WOERD, J. D.; CHUDOBA, R.: Gestaltung von dünnwandigen faltwerken aus zementbasierten Verbundwerkstoffen nach der Oricrete-Methodik. In: BREITENBÜCHER, R.; MARK, P. (Hrsg.): Beiträge zur 1. DAfStb-Jahrestagung mit 54. Forschungskolloquium in Bochum, 07.–08.11.2013, Ruhr-Universität Bochum, 2013, S. 77–82.
- [14] CHILTON, J.: HEINZ ISLER'S Infinite Spectrum: Form-Finding in Design. Archit Design 80 (2010), Heft 4, S. 64–71.
- [15] VAN DER WOERD, J. D.; CHUDOBA, R.; HEGGER, J.: Singly-curved shell structure made of textile-reinforced concrete plate using a folding technique. In: OBREBSKI, J.; TARCZEWSKI, R. (Hrsg.): Beyond the limits of man – Proceedings of the IASS Symposium 2013, 23.–27.09.2013 in Breslau, Polen, S. 342 (Kurzfassung), Langfassung auf CD-ROM.
- [16] VAN DER WOERD, J. D.; BONGARDT, CH.; KOLODZIE, M.; CHUDOBA, R.; HEGGER, J.: Oridome – Das Prinzip der Vielfältigkeit: Konzept für eine gefaltete Kuppel aus Textilbeton. BWI BetonWerk International (2014), Heft 1, S. 30–38.
- [17] VAN DER WOERD, J. D.; CHUDOBA, R.; HEGGER, J.: Oridome: Construction of a dome by folding. In: BRASIL, R.; PAULETTI, R. (Hrsg.): Shells, Membranes and Spatial Structures: Footprints – Proceedings of the IASS-SLTE 2014 Symposium, 15.–19.09.2014 in Brasilia, Brasilien (zur Veröffentlichung angenommen).
- [18] OFFERMANN, P.: Oridome – das Prinzip der Vielfältigkeit ; Zwei Studenten aus Aachen Sieger beim 5. Architekturwettbewerb. TUDALIT-Magazin (2013), Nr. 9, S. 4.

Dünnwandige faltwerke aus zementbasierten Verbundwerkstoffen

Projektleiter

Dr.-Ing. Rostislav Chudoba
Prof. Dr.-Ing. Josef Hegger

Projektbearbeiter

Dipl.-Ing. Jan Dirk van der Woerd

Projektlaufzeit

07/2011 – 06/2014

Web

<http://www.imb.rwth-aachen.de>