ETH zürich

ETH Library

Bending-Active Formwork Systems for Concrete Shells and Vaulted Floors

Doctoral Thesis

Author(s):
Scheder-Bieschin, Lotte Luise

Publication date:
2025

Permanent link:
https://doi.org/https://doi.org/10.3929/ethz-c-000789060

This page was generated automatically upon download from the ETH Zurich Research Collection.
For more information, please consult the Terms of use.

Diss. ETH No. 31491

Bending-Active Formwork Systems for Concrete Shells and Vaulted Floors

A thesis submitted to attain the degree of
Doctor of Sciences
(Dr. sc. ETH Zurich)

presented by
Lotte Luise Scheder-Bieschin
born on 13. August 1991

Accepted on the recommendation of
Prof. Dr. Philippe Block
Prof. Dr. Jan Knippers
Dr. Tom Van Mele

2025

Abstract

The construction industry faces increasing pressure to reduce embodied carbon, with reinforced concrete structures, particularly floor systems, responsible for a major share of global material use and emissions. While funicular shells offer structurally efficient alternatives, their adoption is often limited by the complexity, cost, waste, and reliance on high-tech fabrication associated with bespoke formwork. This dissertation investigates how bending-active formwork systems can be designed, engineered, and fabricated to enable the in-situ construction of efficient concrete shells and vaulted floors using material-efficient methods and readily accessible technologies.

The research addresses key challenges related to active bending, including geometric control, structural robustness, and fabrication efficiency at architectural scale. Two novel complementary systems are developed: (1) a double-layered spline gridshell that combines falsework as integrated reinforcement, and (2) a reusable, corrugated plate formwork based on a curved-crease unfolding (CCU) mechanism. Both strategies use structural geometry with the double layer and curved-crease folds as a core design driver to enable geometric control for the precise shaping of funicular structures, embed stiffness to support the wet concrete, and propagate structural articulation into the resulting concrete shells.

This research follows an integrative co-design methodology supported by a computational design-to-fabrication workflow, which enables form-finding, sensitivity analysis, and fabrication-aware modelling to be interwoven throughout the development process. A catalogue of opportunities frames the design space for bending-active formwork systems. The curved-crease unfolding (CCU) method is introduced as a novel approach, evolving from curved-crease folding for compact-to-spatial accordion-like or fan-like deployment. Its formulation is grounded in discrete differential geometry and expressed through design rules that enable exploration of the design space. System-specific form-finding procedures demonstrate geometric control, while finite element simulations assess stiffening strategies and scalability. Materialisation is addressed through a mono-material approach for the spline gridshell and textile-based hinges for the CCU system. Both systems are validated through full- and half-scale prototypes, evaluated for shaping accuracy, logistical efficiency, material use, cost, and construction time.

The spline gridshell with textile shuttering enables ribbed skeleton shells with integrated reinforcement, while the reusable CCU system enables unreinforced fan-vaulted floors. Both rely on straightforward prefabrication, flat-packed transport, and

rapid in-situ assembly or unfolding. Their applicability ranges across various spans and parallel vaults, synclastic, anticlastic, and fan-like geometries. Expressive tectonics emerge through structural articulation shaped by the constraints of structure and fabrication. By employing structural geometry for both formwork and the resulting shell floor, these systems significantly reduce formwork waste, material use, cost, concrete and steel mass, and reliance on bespoke digital fabrication. They thereby aim to make structurally efficient non-standard geometries viable beyond elite applications and contribute to more sustainable construction.

Zusammenfassung

Die Bauindustrie steht unter wachsendem Druck, den Anteil an verkörpertem Kohlenstoff zu reduzieren, da insbesondere Stahlbetonkonstruktionen – und hier vor allem Betondecken – einen wesentlichen Anteil am globalen Materialverbrauch und an den Emissionen verursachen. Funikuläre Schalen bieten zwar strukturell effiziente Alternativen, ihre Verbreitung wird jedoch durch Komplexität, Kosten, Abfall und Abhängigkeit von hochtechnologischer Fertigung massgeschneiderter Schalungen eingeschränkt. Diese Dissertation untersucht, wie biegeaktive Schalungssysteme entworfen, konstruiert und gefertigt werden können, um die Herstellung effizienter Schalentragwerke und Gewölbedecken aus Ortbeton mit materialeffizienten Methoden und breit verfügbaren Technologien zu ermöglichen.

Im Mittelpunkt stehen drei zentrale Herausforderungen: geometrische Kontrolle, statische Robustheit und Fertigungseffizienz im architektonischen Massstab. Dafür werden zwei neuartige Systeme entwickelt: (1) eine doppellagige biegeaktive Gitterschale, die Schalung und integrierte Bewehrung vereint, sowie (2) eine wiederverwendbare, gerippte Schalung aus biegeaktiven Platten basierend auf einem Entfaltungsmechanismus mit gekrümmten Faltlinien (Curved-Crease Unfolding, CCU). Beide Strategien nutzen die tragwerksbestimmte Geometrie – in Form der Doppelschicht beziehungsweise der gekrümmten Faltlinien – als zentrales Entwurfsprinzip, um funikuläre Strukturen präzise zu formen, die notwendige Steifigkeit für die Last des Frischbetons sicherzustellen und eine profilierte Rippenversteifung in die Betonschalentragwerke zu übertragen.

Methodisch folgt die Arbeit einem integrativen Entwurfsansatz, unterstützt durch einen rechnergestützten, prozessübergreifenden Planungs- und Fertigungsprozess, der Formfindung, Sensitivitätsanalysen und fertigungsorientiertes Modellieren verzahnt. Eine Systematisierung der Möglichkeiten rahmt den Gestaltungsraum für biegeaktive Schalungssysteme. Die Curved-Crease-Unfolding-Methode (CCU) wird als neuer Ansatz eingeführt, der sich aus der Curved-Crease-Folding-Technik zu einem akkordeon- oder fächerartigen, kompakten-zu-räumlichen Entfaltungsmechanismus weiterentwickelt. Ihre Formulierung basiert auf diskreter Differentialgeometrie und wird durch Entwurfsregeln ausgedrückt, die eine Untersuchung des Gestaltungsraums ermöglichen. Formfindungsverfahren demonstrieren die geometrische Kontrolle, während Finite-Elemente-Analysen die Versteifungsstrategien und Skalierbarkeit bewerten. Die Materialisierung erfolgt durch einen Monomaterial-Ansatz beim Gittersystem und textile Scharniere im CCU-System. Beide Systeme werden anhand von Prototypen in

architektonischem Massstab validiert und auf Formgenauigkeit, Effizienz, Materialeinsatz, Kosten und Bauzeit geprüft.

Das Gittersystem mit textiler Schalung ermöglicht gerippte Skelettschalen mit integrierter Bewehrung, während das wiederverwendbare CCU-System unbewehrte Fächergewölbedecken ermöglicht. Beide beruhen auf einfacher Vorfertigung, kompaktem Transport sowie schneller Montage beziehungsweise Entfaltung vor Ort. Ihre Anwendbarkeit erstreckt sich über unterschiedliche Spannweiten und parallele und fächerartige Gewölbe sowie synklastische und antiklastische Geometrien. Ausdrucksstarke Tektonik entsteht durch statische Artikulation, die durch die Logik von Tragwerk und Fertigung geprägt ist. Durch den Einsatz von tragwerksbestimmter Geometrie sowohl für die Schalungen als auch für die resultierenden Schalenkonstruktionen reduzieren diese Systeme Schalungsabfall, Materialverbrauch, Kosten, Beton und Stahl sowie die Abhängigkeit von massgeschneiderter digitaler Fertigung erheblich. Damit soll die Anwendbarkeit statisch effizienter, nicht-standardisierter Geometrien über elitäre Anwendungen hinaus ermöglicht und ein Beitrag zu einer nachhaltigeren Bauweise geleistet werden.