

Diss. ETH No. 23307

Funicular Shell Design

Geometric approaches to form finding and fabrication of
discrete funicular structures

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

presented by
Matthias Rippmann
Dipl.-Ing.

supervised by
Prof. Dr. Philippe Block
(ETH Zurich)

co-supervised by
Prof. Dr. Dr. E.h. Dr. h.c. Werner Sobek
(University of Stuttgart)
2016

Abstract

Addressing both architects and engineers, this dissertation presents a new framework for the form finding and design of fabrication geometry of discrete, funicular structures in the early design phase. Motivated by ongoing debates about digital architecture and funicular shell form finding, it introduces a new methodology for structurally-informed design of curved surface architecture through the use of geometrical rather than analytical or numerical representations of the relation between form, forces and fabrication. Based on Thrust Network Analysis (TNA), new algorithms are presented that enable an interactive exploration of novel funicular shapes, enriching the known formal vocabulary of shell architecture. Using TNA, the framework adopts the same advantages of techniques like graphic statics, providing an intuitive and educational approach to structural design that ranges from simple explorations to geometry-based optimisation techniques. Complementary to this structurally-informed design process, the work reflects on the latest building technologies while also revisiting historic construction techniques for stereotomic stone masonry and prefabricated concrete shells to develop efficient fabrication design strategies for discrete funicular structures. Based on architectural, structural and fabrication requirements, several tessellation approaches for given thrust surfaces are developed for the design of informed discretisation layouts of any funicular shape. The flexibility and feasibility of the form-finding framework is demonstrated in several case studies employing the new structural design tool *RhinoVAULT*, which implements the developed form-finding methods. The use of fabrication design strategies is discussed in a comprehensive case study that shows project-specific tessellation design variations and first fabrication results for a complex stone masonry shell.

Zusammenfassung

Die vorliegende Dissertation stellt neue Methoden und Techniken zur Formfindung und Herstellung segmentierter, druckbeanspruchter Schalenträgerwerke vor. Sie wendet sich dabei sowohl an Architekten als auch an Ingenieure und legt einen besonderen Fokus auf die frühe Entwurfsphase, insbesondere auf die geometrische Wechselseitigkeit zwischen Form, wirkender Kräfte und der Herstellung von Freiformträgerstrukturen. Auf Grundlage der Stützlinien-Netzwerk-Analyse (Thrust Network Analysis, TNA) werden neuartige algorithmische Verfahren präsentiert, welche das interaktive Entwerfen von innovativen, sich im Kräftegleichgewicht befindlichen Trägerwerksformen ermöglichen. Neben reinen druck- oder zugbeanspruchten Strukturen können ebenso Schalenträgerwerke mit kombinierter Druck- und Zugbeanspruchung entworfen werden. Auf diese Weise erweitert die vorgestellte Formfindungsmethode das Spektrum bekannter Schalenformen massgeblich und verfügt über die gleichen Vorteile wie Verfahren der graphischen Statik. Ermöglicht werden intuitive und lernorientierte Entwurfsprozesse für formaktive Trägerstrukturen – angefangen von einfachen Schalenformen bis hin zu geometriebasierten Optimierungsverfahren. Dazu komplementär diskutiert die Arbeit effiziente Umsetzungsstrategien für die Segmentierung und Fabrikation von diskreten Schalenträgerwerken, wonach einerseits neueste digitale Fertigungsverfahren zur Anwendung kommen und andererseits auf wichtige historische stereotomische Konstruktionstechniken für Steingewölbe und die Vorfertigung von Betonschalen zurückgegriffen wird. Für die Segmentierung werden unterschiedliche architektonische, tragstrukturelle und herstellungsbedingte Anforderungen berücksichtigt. Realmasstäblich realisierte Fallstudien und Prototypen zeigen die Vielseitigkeit der entwickelten Methoden und Techniken zur Formfindung und Segmentierung von Schalenträgerwerken auf und validieren deren baulichen Potenziale und Praxistauglichkeit. Hierzu wurde ein eigenes digitales Entwurfswerkzeug – *Rhino VAULT* – entwickelt, welches die vorgestellten Formfindungsmethoden als Computerprogramm innerhalb einer konventionellen CAD-Umgebung zugänglich macht. Entspre-

chende Umsetzungsstrategien werden in einem abschliessenden Fallbeispiel zur Realisierung eines geometrisch-komplexen Steingewölbes anhand spezifischer Tesselierungsgeometrien und Fertigungsprozesse aufgezeigt.