

DISS. ETH Nr. 21565

**STRUKTUROPTIMIERUNG VON STABFÖRMIGEN FLÄCHENTRAGWERKEN
MITTELS REZIPROKER ANALYSE**

A B H A N D L U N G
zur Erlangung des Titels

DOKTOR DER WISSENSCHAFTEN

der

ETH ZÜRICH

vorgelegt von

THOMAS KOHLHAMMER

Dipl.-Ing. (Architektur), Universität Stuttgart
Dipl.-Ing. (Bauingenieurwesen), Universität Stuttgart

geboren am 26.02.1974

von Deutschland

Angenommen auf Antrag von

Prof. Dr. Joseph Schwartz
Prof. Dr. Yves Weinand

2013

Kurzfassung

Die vorliegende Arbeit ist motiviert durch die Feststellung, dass Tragwerke mit doppelt gekrümmter Formgebung, welche in der zeitgenössischen Architektur angewendet werden, häufig nur mit erheblichem Konstruktions- und Materialaufwand baulich realisierbar erscheinen.

Es besteht diesbezüglich die Überzeugung des Vorhandenseins von Optimierungspotential, da die doppelte Krümmung der Oberfläche eine massgebliche Eigenschaft von Schalen und Membranen ist, also genau von solchen Tragwerken, bei deren Entwicklung von jeher das Ziel eines möglichst geringen Konstruktions- und Materialaufwands im Vordergrund steht. Bei dieser Art von Tragwerken ist die Formfindung massgeblich vom Ziel geprägt, zentrisch im Querschnitt der Tragelemente verlaufende innere Kräfte zu erzeugen, sodass eine überwiegende Beanspruchung durch Normalkräfte entsteht. Durch die Vermeidung von Biegebeanspruchung resultiert ein geringer Material- und Konstruktionsaufwand.

Viele doppelt gekrümmte Tragwerke entstanden in der gegenwärtigen Architektur durch eine andere Art der Formfindung, welche oftmals eine grössere Biegebeanspruchung im Tragwerk nach sich zieht. Dabei bleibt die Frage offen, ob das Potential der doppelten Krümmung zur Aufnahme der inneren Kräfte nicht weitaus besser ausgenutzt werden könnte. Daraus resultiert das übergeordnete Ziel der vorliegenden Arbeit, nämlich die Entwicklung eines Modells, mit welchem beliebig geformte Flächentragwerke dahingehend optimiert werden können, dass eine Verteilung der Normalkräfte und Biegemomente im Tragwerk entsteht, die ein Minimum an Aufwand für Konstruktion und Material bedeutet.

Zur Verfolgung dieses angestrebten Ziels wird ein Optimierungsmodell vorgeschlagen, sowie als wesentlicher Bestandteil dessen ein passendes Tragsystem und eine dafür geeignete Analyseverfahren entwickelt. Das Tragsystem besteht aus diskreten stabförmigen Elementen, deren Art und Weise der Fügung die Ausbildung einer biegesteifen Tragstruktur mit einfachen konstruktiven Verbindungstechniken ermöglicht. Des Weiteren sind die Verbindungen des Systems so konzipiert, dass durch Dispositionsänderungen der Stäbe die Biegebeanspruchbarkeit der Tragstruktur lokal anpassbar ist. Die für das Optimierungsmodell entwickelte Analyseverfahren zur Bestimmung der inneren Kräfte des Tragsystems basiert auf dem statischen Grenzwertsatz der Plastizitätstheorie. Dessen Anwendung ermöglicht bei statisch unbestimmten Tragwerken die Festlegung so vieler Grössen, dass das System mit den Gleichgewichtsbedingungen allein lösbar wird. Das Verhalten der Tragstruktur kann durch diese Annahmen innerhalb eines gewissen Spektrums gesteuert werden. Die festgelegten Grössen bilden bei der Analyseverfahren zusammen mit den geometrischen Parametern der Stabdispositionen die Variablen einer Funktion der für das Tragwerk erforderlichen Materialmenge. Ziel des Optimierungsmodells ist es, diejenigen Werte der Variablen zu ermitteln, für welche die Funktion einen Minimalwert annimmt.

Abstract

This study is motivated by the identification that structures with double curved shapes, which are used in contemporary architecture, often only seem to be realizable with considerable constructional effort and material expense.

Concerning this, there is the conviction of the existence of a certain potential to optimize, as the double curving of the surface is a decisive feature of shells and membranes, i.e. exactly of those structures in which the aim of the least possible constructional effort and material expense has always been important for the development. With those types of structures, the curved shape results from inner forces acting concentrically in the cross-section of the structural elements so that they are mostly stressed by normal forces. By avoiding stresses from bending, a little material expense and structural effort can be achieved.

Many of the structures with double curved shapes in contemporary architecture were developed in a different way of form finding, whereby the outcome is often a higher stress from bending in the structure. However, the question is whether the potential of the double curving in order to absorb the inner forces can be utilized more efficiently. Here from results the general intention of this study, which is the development of a model with which any shapes of surface structures can be optimized to the effect that, within the structure, there results a spread of stress caused by normal forces and bending moments, which means a minimum of constructional effort and material expense.

In order to achieve the aim, an optimizing model is suggested and also – as an essential part of it – a suitable structural system and an appropriate analyzing method are developed. The structural system consists of discrete bar-shaped elements, whose manner of connection enables the development of a rigid structure by the use of simple constructional joining techniques. Furthermore, the connections in the system are designed in a way that the flexural rigidity of the structure can be locally adjusted through a change of the disposition of the bars. The analyzing method to determine the inner forces of the structural system developed for the optimizing model is based on the lower bound theorem of the theory of plasticity. The use of it provides the assumption of as many factors as needed to solve statically undetermined structural systems using only the conditions of equilibrium. Thus the behavior of the structure can be controlled within a certain spectrum. Within the analyzing method, the assumed factors, together with the geometrical parameters of the bar dispositions, represent the variables of a function of material quantity for the structure. The aim of the optimizing model is to find out those values of variables for which the function reaches a minimum value.