

# Analyse dünnwandiger Betonschalen am Beispiel von Los Manantiales

## Motivation und Zielsetzung

Schalen gelten als die effizientesten Tragwerke. Viele Schalentragwerke wurden weit vor einer computergestützten Berechnung realisiert. Félix Candela hat sich dabei auf geometrische Formen spezialisiert, deren Lastabtrag er über Annahmen und Theorien mathematisch erklären konnte. Anhand der Theorie zu Schalen und einem Finite-Elemente-Modell wird das Tragverhalten von *Los Manantiales* analysiert.



## Schalentheorie

### Membrantheorie

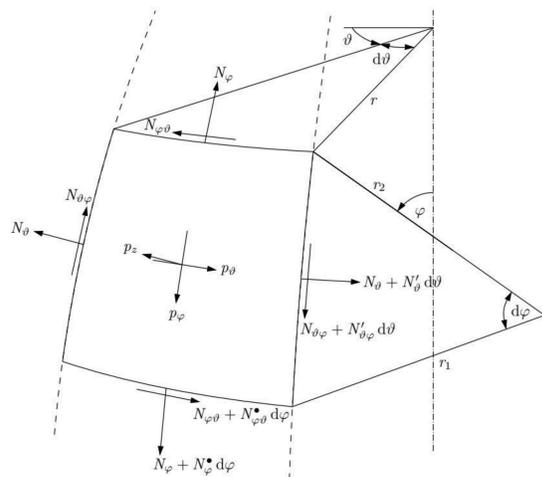
Mithilfe bestimmter Annahmen kann das wesentliche Tragverhalten von Schalen beschrieben und auf ein statisch bestimmtes Problem reduziert werden. Somit können die Membrankräfte, also die Kräfte, welche in der Ebene wirken, allein mit den Gleichgewichtsbedingungen berechnet werden.

Gleichgewichtsbedingungen am infinitesimalen Rotationsschalenelement:

$$\frac{\partial}{\partial \varphi} (n_{\varphi} \cdot r) + \frac{\partial}{\partial \vartheta} n_{\vartheta \varphi} r_1 - n_{\vartheta} r_1 \cos \varphi + p_{\varphi} r_1 r = 0$$

$$\frac{\partial}{\partial \vartheta} n_{\vartheta} r_1 + \frac{\partial}{\partial \varphi} (n_{\varphi \vartheta} \cdot r) + n_{\vartheta \varphi} r_1 \cos \varphi + p_{\vartheta} r_1 r = 0$$

$$n_{\varphi} r_2 + n_{\vartheta} r_1 - p_z r_1 r_2 = 0$$



Membrankräfte am infinitesimalen Flächenelement nach Flügge, *Statik und Dynamik der Schalen*, 1962

### Biegetheorie

Störungen, die durch nicht-membrangerechte Randbedingungen hervorgerufen werden, lassen sich nur durch die allgemeine Biegetheorie beschreiben.

Diese sogenannten Randstörungen weisen ein Abklingverhalten vom Einleitungspunkt auf.

Zum Lösen des statisch unbestimmten Problems müssen Werkstoff- und Kinematik-Gleichungen mit einbezogen werden.

**Betreuer:** Jan Gade, M.Sc.

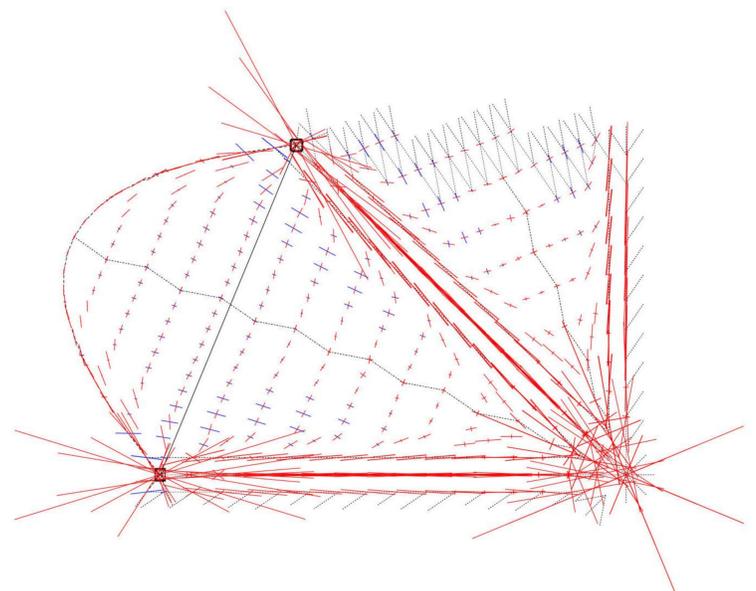
## Los Manantiales

Das Tragwerk Los Manantiales wurde 1958 von Félix Candela in Mexico erbaut. Es besteht aus vier identischen ineinandergeschobenen hyperbolischen Paraboloiden und spannt über 42 Meter.

Erstmals gelang es Félix Candela bei diesem Tragwerk, freie Ränder zu realisieren, weshalb es auch als Höhepunkt seines Schaffens angesehen wird.

Die Ergebnisse der Modellanalyse werden durch Verändern verschiedener Parameter mit der Theorie abgeglichen.

Der flächige Lastabtrag hauptsächlich über Membrankräfte von den Blättern hin zu den Graten und deren Bogenwirkung kann mithilfe des Modells anschaulich dargestellt werden.



Hauptmembrankräfte n-I und n-II, Ergebnis aus der Berechnung mit SOFISIK Structural Desktop 2020

## Literatur

- Bischoff U.A.: Schalen - Ergänzendes Material zur Vorlesung, 2018
- Flügge: Statik und Dynamik der Schalen, 1962
- Faber: Candela und seine Schalen, 1965