

---

Kurzbericht zum Forschungsprojekt:

# Entwicklung von planaren Ziegelfertigteilen für die Herstellung von weitspannenden Schalen- tragwerken

Aktenzeichen: SWD-10.08.18.7-16.50

---

Technische Universität Darmstadt  
Fachbereich Bau- und Umweltingenieurwissenschaften  
Institut für Konstruktives Gestalten und Baukonstruktion  
Prof. Dipl.-Ing. Architekt Stefan Schäfer  
Dipl.-Ing. Architekt Alexander Pick



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DARMSTADT



Der vorliegende Forschungsbericht wurde mit Mitteln der Forschungsinitiative  
Zukunft Bau des Bundesinstitutes für Bau-, Stadt- und Raumforschung gefördert.  
Die Verantwortung für den Inhalt des Forschungsberichtes liegt bei den Autoren.

---

---

Mitwirkende des Projektes

### **Projektleitung**

Technische Universität Darmstadt  
Fachbereich Bau- und Umweltingenieurwissenschaften  
Institut für Konstruktives Gestalten und Baukonstruktion  
Prof. Dipl.-Ing. Architekt Stefan Schäfer  
Franziska-Braun-Straße 3  
64287 Darmstadt  
info@kgbauko.tu-darmstadt.de

### **Wissenschaftliche Bearbeitung**

Dipl.-Ing. Architekt BDA Alexander Pick

### **Wissenschaftliche Mitarbeit**

Dipl.-Ing. Jakob Reising; M.Sc. Johannes Koch

### **Fachliche Betreuung**

M.Sc. Fabian Brodbeck  
Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau (IRB)  
Nobelstraße 12  
70569 Stuttgart

### **Mittelgeber**

Forschungsinitiative Zukunft Bau des Bundesinstitutes für Bau-, Stadt- und Raumforschung im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung  
Deichmanns Aue 31 – 37  
53179 Bonn

Deppe Backstein-Keramik GmbH  
Neuenhauser Straße 82  
49843 Uelsen-Lemke

Steenfelder Betonwerk Johann Meinders GmbH  
Fertigteile für den Industrie- und Wohnungsbau  
Steenfelder Dorfstraße 8  
26810 Westoverledingen

Ripkens Wiesenkämper Beratende Ingenieure  
PartGmbH  
Zweigertstraße 14  
45130 Essen

---

## 1. Ausgangslage

---

Schalentragwerke besitzen unter baukulturellen, tragkonstruktiven und ästhetischen Gesichtspunkten hohe Potentiale für das Bauwesen. Obwohl sie zahlreiche Vorteile gegenüber anderen Konstruktionen aufweisen, kommen sie in der heutigen Architektur aufgrund hoher Kosten nur noch selten zur Anwendung. Exemplarisch belegen die Bauten Felix Candelas, Eladio Diestes oder Heinz Islers auf eindrucksvolle Weise die Leistungsfähigkeit dieser Konstruktionsweise.

---

## 2. Gegenstand des Forschungsprojektes

---

Die Relevanz des Forschungsthemas wird deutlich an dem geringen Anteil von Schalentragwerken an der Anzahl neuer Bauprojekte. Dies ist auf den hohen Ressourceneinsatz an Personal, Schalung und Unterkonstruktionen, wie z.B. Lehrgerüsten zurückzuführen. Um dieser Problematik entgegenzuwirken gilt es, den Anteil an Personal und Schalung zu reduzieren, Lehrgerüste zu vereinfachen und den Planungs-, Produktions- und Bauprozess zu vereinfachen.

Unser Forschungsansatz sieht eine Methodik zur wirtschaftlichen Herstellung von mehrfach gekrümmten Ziegelschalen durch einfache, planare Bauteile vor. Ziel ist es, komplexe Bauwerke wie Schalentragwerke durch einen erhöhten Vorfertigungsgrad konkurrenzfähiger zu machen und damit die Diversität des Spektrums an Bauwerken dieser Art (vgl. Abbildung 1 bis 4) wieder zur erhöhen. Durch die Verlagerung eines Großteils der Arbeiten von der Baustelle in die Vorfertigung lässt sich diesem Problem entgegenwirken.



Abbildung 1: Aussenansicht - Depositas Montevideo, A1

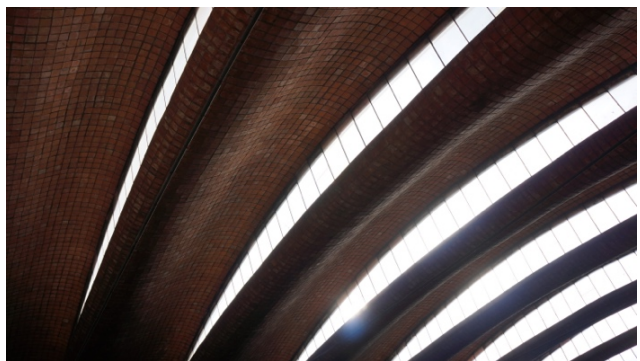


Abbildung 2: Dachtragwerk - Depositas Montevideo, A2



Abbildung 3: Diestes Ziegelschalen, A2



Abbildung 4: Diestes Ziegelschalen, A2

In einem Formfindungsprozess wurde eine exemplarische Schengeometrie mit den Abmessungen von 15 x 5 m entwickelt, die in einem darauffolgenden Optimierungsprozess in planare Elemente unterteilt wird.

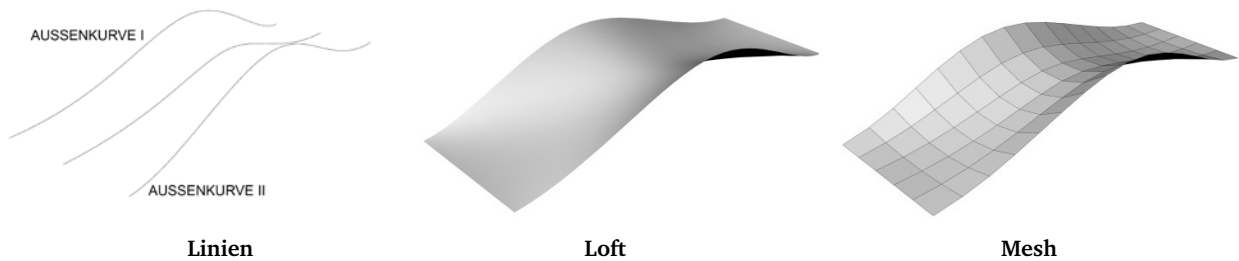


Abbildung 5: Formgenerierung, A2

In dem Prozess der Optimierung werden verschiedene Randbedingungen anhand von Anforderungen an die Modulgeometrie definiert, die sich als Gleichgewicht einstellen und sich im iterativen Prozess unterschiedlich gewichten lassen. Mit Hilfe eines parametrischen Modells werden im nächsten Schritt die Ziegel auf planare Fertigteile verteilt (vgl. Abbildung 6).

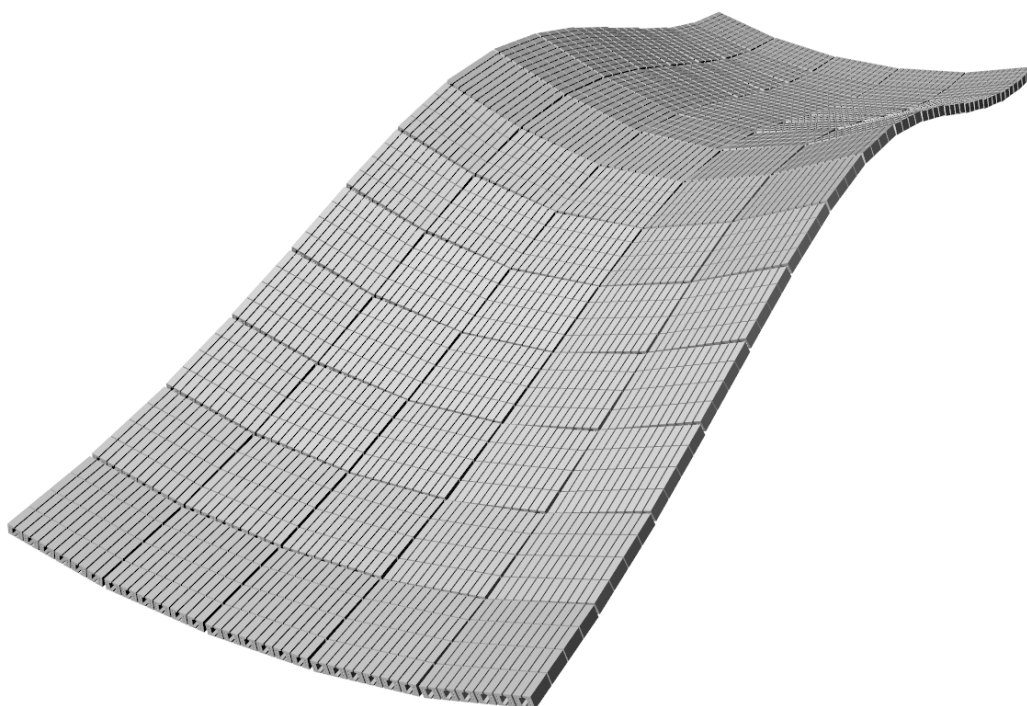


Abbildung 6: Parametrisches Modell der Ziegelfertigteile und der Ziegel, A2

Die einzelnen Fertigteile der Schale werden als 2D-Abwicklung ausgegeben, die dann in den weiteren Schritten baukonstruktiv untersucht werden. Dabei werden Anschlüsse entwickelt, die eine Übertragung der Membrankräfte von Fertigteil zu Fertigteil gewährleisten. Anhand der Ergebnisse aus dem baukonstruktiven Teil des Forschungsvorhabens werden dann unterschiedliche Standardziegel untersucht und zur Optimierung ausgewählt. Innerhalb von 4 Versuchsreihen werden verschiedene Ziegel entwickelt, die in Hinblick auf die Fügungen und zur Aufnahme von Bewehrung optimiert werden.



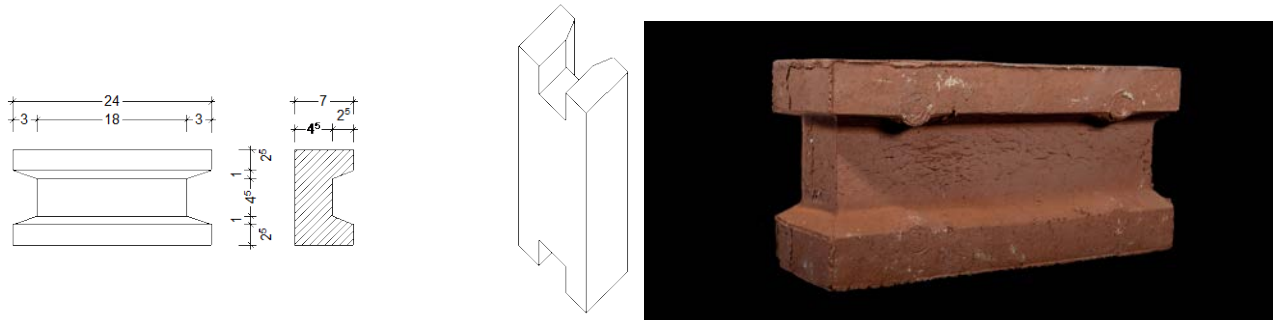


Abbildung 7: Versuchsreihe 3 – Aussparungen in den Kopfbereichen des Ziegels, A2

Im Anschluss erfolgt die Analyse zur Realisierbarkeit im Fertigteilwerk. Dabei werden die einzelnen Fertigteile aus den optimierten Ziegeln innerhalb der 4 Versuchsreihen zu Segmenten zusammengesetzt. Damit lassen sich die Anschlüsse und der Aufbau zu den unterschiedlichen Ziegeln sowie die Fügemechanismen prüfen und analysieren.



Abbildung 8: Versuchsreihe 2:  
Lehrgerüst mit individuellen Köpfen, A2



Abbildung 9: Versuchsreihe 2:  
Lehrgerüst - Auflagerung Fertigteil, A2

Die Rückführung der Erkenntnisse aus den vorherigen Schritten wird dann zur Entwicklung der finalen Ziegel und des Fügemechanismus genutzt. Dabei werden die aus den statischen Berechnungen sowie der Optimierung der Ziegel, Ziegelfertigteile und des Lehrgerüsts gewonnenen Erkenntnisse in das digitale Modell zurückgeführt und optimiert (vgl. Abbildung 10).

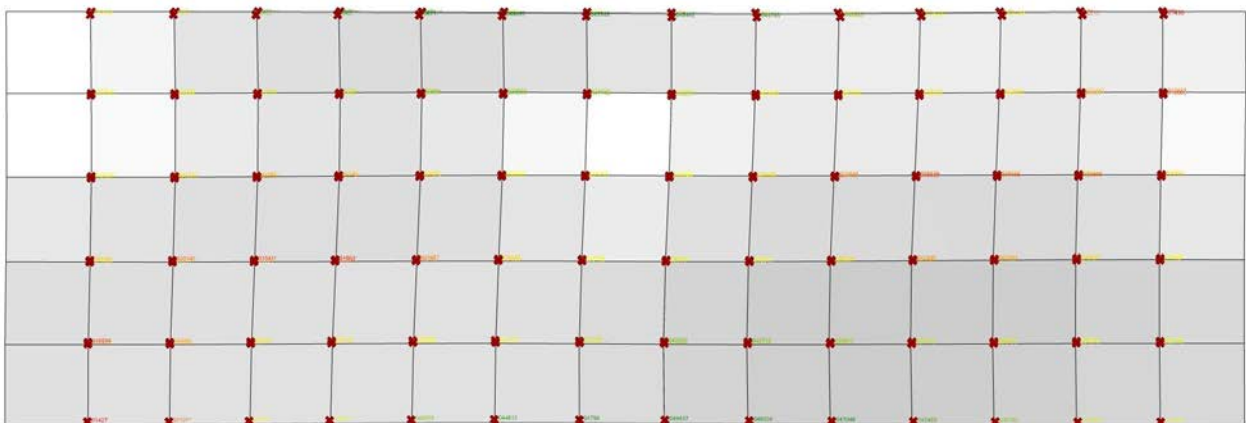


Abbildung 10: Exemplarischer Teil der Optimierung: Farbliche Darstellung der Abstände der Fertigteile, A2

---

Zum Ende des Forschungsprojektes wird eine 5x15 m große Schale als Versuchsbauwerk erstellt. Dabei wird zunächst ein aus dem digitalen Modell entwickeltes und in die Fertigung (CAM<sup>1</sup>) überführtes Lehrgerüst aufgebaut (vgl. Abbildung 11).



Abbildung 11: Aufgebautes Lehrgerüst ohne Queraussteifung, A2

Im Anschluss wird die Schale um die getroffenen, konstruktiven Annahmen zu verifizieren, in mehreren Schritten zur Feststellung von Deformationen vermessungstechnisch untersucht.



Abbildung 12: Zielmarken Ecke und Randbereich, A2

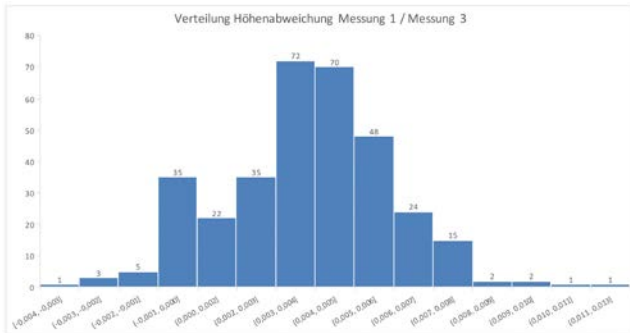


Abbildung 13: Zielmarke und Prisma, A2

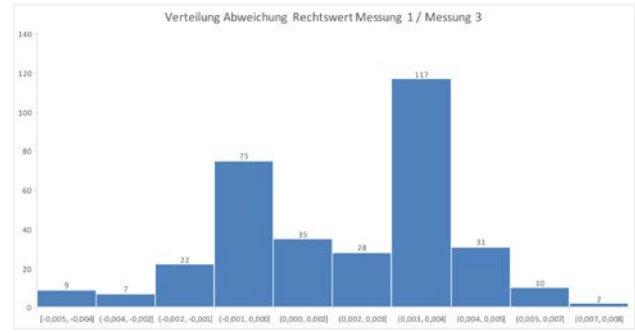
---

<sup>1</sup> CAM Computer-aided Manufacturing – rechnerunterstützte Fertigung





Höhenlage - Nullmessung / Belastung, A2



Hochwert - Nullmessung / Entlastet, A2

Abbildung 14: Exemplarische Diagrammausschnitte, A2

Die zu erwartenden Verformungen waren nach Entlastung größtenteils rückläufig, wobei ein Anteil der Verformungen nicht wieder in den Nullzustand zurückgegangen ist. Bei ca. 15 m Länge sind in geringem Maß Höhenabweichungen unter Belastung von maximal 19 mm eingetreten, wobei ein Großteil im Bereich von 9-11 mm lag (vgl. Abbildung 14).

### 3. Fazit

Zusammenfassend ist festzustellen, dass die Ergebnisse die Annahmen bestätigen und sich Ziegelschalen durch planare Elemente abbilden lassen. Dass sich die im digitalen Modell erzeugten und überprüften Annahmen in der Realität 1:1 - trotz hoher Toleranzen im Hochbau - umsetzen ließen zeigt, wie gut sich digitale Entwurfs- und Fertigungstechniken mit konventionellen Bauweisen ergänzen lassen.

Abschließend festzustellen ist zudem, dass das Forschungsprojekt unsere Erwartungen übertroffen hat.



Abbildung 15: Seitliche Perspektive mit Darstellung der Krümmung, A3

---

#### 4. Eckdaten

---

Kurztitel:	Schalentragwerke aus Ziegelfertigteilen
Gesamtkosten:	375.275,47 €
Bundeszuschuss:	235.070,84 €
Projektlaufzeit:	32 Monate, 10.10.2016 bis 30.06.2019

---

#### 5. Abbildungen

---

A1 - **Anderson, Stanford** (Hrsg.): Eladio Dieste, Innovation in Structural Art, Princeton Architectural Press New York, 2004.

A2 – Eigene Abbildung

A3 – virtua ethic, Düsseldorf