



**TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DRESDEN**

Institut für Massivbau <http://massivbau.tu-dresden.de>

SILKE SCHEERER, MANFRED CURBACH (HRSG.)

LEICHT BAUEN MIT BETON

**FORSCHUNG IM
SCHWERPUNKTPROGRAMM 1542
FÖRDERPHASE 1**

Grundlagen zur Entwicklung adaptiver Schalungssysteme für frei geformte Betonbauteile

Matthias Michel
Ulrich Knaack

Fachbereich 1,
Hochschule
Ostwestfalen-Lippe

Bei gekrümmten Bauformen aus Beton bestimmt die Schalung den Aufwand maßgeblich. Formaktive frei geformte Betonstrukturen sind effiziente Tragwerke, werden aber durch hohe Schalungskosten oft unwirtschaftlich. Eine wandelbare Schalung für Ortbetonstrukturen, die mehrmals einsetzbar und computergestützt immer wieder in andere Formen zu bringen ist, wird positive Auswirkungen auf die Umsetzung solcher Tragwerke haben. Dieser Aufsatz fasst die grundlegenden Erkenntnisse der Forschung zu diesen Schalungssystemen zusammen. Beschrieben werden die gefundenen Typologien der Aktuator-Schalhaut-Systeme, ihre verschiedenen Funktionsweisen, Anforderungen und geometrische Gesetzmäßigkeiten. Anhand der Entwicklung eines Materialgefüges wird der Umgang mit dem systemimmanenten Widerspruch behandelt, dass ein adaptives Schalmaterial großen Frischbetondrücken widerstehen muss, gleichzeitig aber zur Umformung ‚weich‘ zu sein hat.

1 Einführung

Beton ist per se das ideale Material für freie Formen. Es gibt in der Tat kein anderes Material, das als hoch performantes Strukturmaterial und als Raumabschluss gleichermaßen eingesetzt werden kann und dabei eine scheinbar grenzenlose formale Freiheit bietet. Zudem sind Schalenträgerwerke aus Beton in Verbindung mit den neuzeitlichen Formfindungsmethoden leichte und materialeffiziente Tragwerke. In Bezug auf die Materialisierung freier Formen werden im aktuellen Baugeschehen jedoch tendenziell Stahl- oder Holzträgerwerke bevorzugt. Man kann hier ohne Schalung arbeiten, die einen Großteil des baulichen Aufwands erfordert. Die Beispiele für das Ausweichen auf andere Materialien aus diesen Gründen sind nahezu so alt wie das Material selbst.

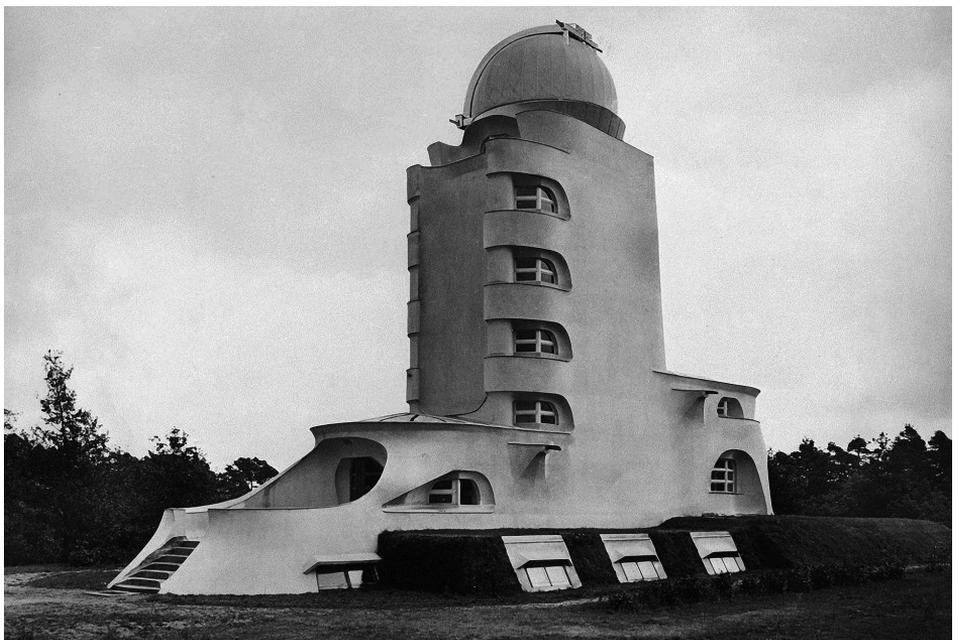
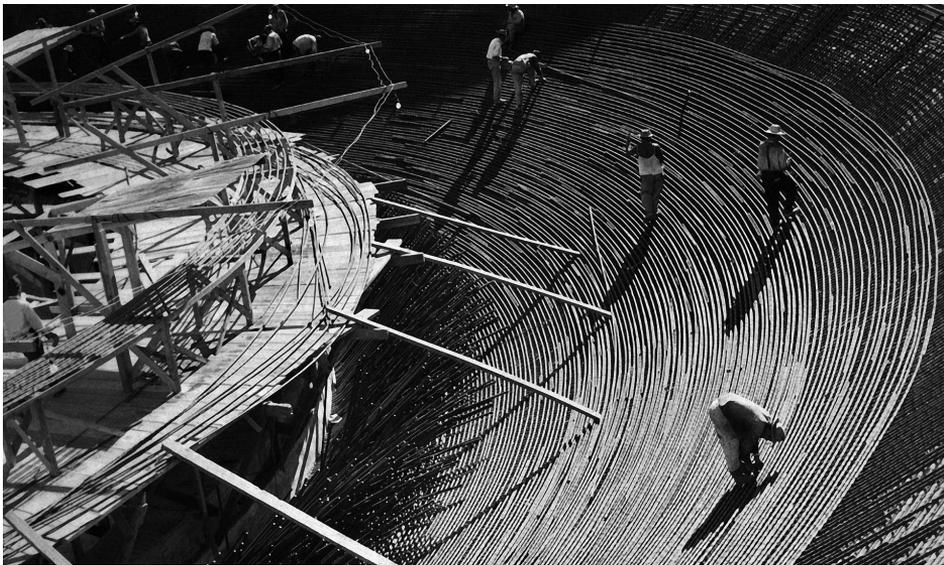


Bild 1:
EINSTEIN-Turm von
ERICH MENDELSON,
fertiggestellt 1922
[Foto: Camiel
Coenen, CC BY-SA
3.0]



*Bild 2: Herstellung der Schale für das Gebäude des Nationalkongresses in Brasilia
[Foto: Marcel Gautherot]*

Der 1917 entstandene expressionistische Entwurf des Einsteinturms von ERICH MENDELSON war motiviert durch die vergleichsweise junge Einsicht, dass das Material Beton dem Entwerfenden keine formal limitierenden Regeln aus seiner Materialität heraus auferlegt. Während freie Formen der Ingenieurtragwerke mathematisiert wurden, um beispielsweise aus geraden Brettern geschalt werden zu können, folgten Mendelsohns Flächen keinem von einer Produktionstechnik abgeleiteten Prinzip. Dass das Gebäude einige Jahre später aus Ziegelmauerwerk errichtet wurde, ist Folge dieser Tatsache, denn eine passende Schalungstechnologie existierte nicht und seinerzeit waren leichter hochqualifizierte Maurer zu finden als Zimmerleute oder etwa Bootsbauer [1]. So waren auch die Flächen der späteren frei geformten Entwürfe von FÉLIX CANDELA, der vorwiegend in Mexiko gewirkt hat, oder des brasilianischen Architekten OSCAR NIEMEYER nie ‚willkürlich‘ geformt, sondern integrierten Belange des Lastabtrags und der Schalungstechnik gleichermaßen [2]. Die per Regierungsdekret steigenden Mindestlöhne in Mexiko Mitte der 1960er Jahre führten zum abrupten Ende der Ära frei geformter Stahlbetonstrukturen wie denen von FÉLIX CANDELA [3].

Die digitale Befreiung in der Architektur der Gegenwart bringt frei geformte Architektur-elemente aus Stahlbeton zurück. Schalungen werden aktuell computergestützt zum Beispiel in Holzbauweise mit einer Rippen- und Spanten-Technik aufgebaut, wie etwa das Schalentragwerk des EPFL Learning Center in Lausanne [4]. Bei der Realisierung verschiedener Entwürfe des kalifornischen Architekten FRANK O. GEHRY wie am Neuen Zollhof in Düsseldorf wurde die Schalung aus gefrästen Hartschaumblocken meist für die Produktion von Stahlbeton-Fertigteilen hergestellt [5]. Wie schon deren Vorgänger sind solche Schalungssysteme aufwändige Einweglösungen, die nach Nutzung zerstört und entsorgt werden müssen.

Man kann erkennen, dass auch heute noch der enorme Aufwand an Material und an Arbeitskraft die Entstehung bestimmter baulicher Formen bis zu deren Inexistenz erschwert. Eine Analyse von HICKERT zeigt, dass freigeformte, lang gestreckte, schwach bis moderat gekrümmte Ortbetonwände fast nicht aufzufinden sind [6]. Grund hierfür ist der überaus hohe Schalungsaufwand.



Bild 3: Links: Einsinnig gekrümmte Ortbetonwand beim LAUFEN Forum, dem Besucher- und Präsentationszentrum der Keramik Laufen AG in Laufen [Foto: Nissen & Wentzlaff]; Rechts: Automobildesign als Vorreiter der Architektur. Ästhetik zweisinnig flach gekrümmter Flächen: Gina Design [Foto: Thomas von Salomon, BMW Group]

Es ist vorhersehbar, dass eine Schalung, die variable Geometrien annehmen und mehrfach verwendet werden kann, für die Errichtung von Schalenträgwerken und den genannten frei geformten Architekturelementen einen großen Einfluss haben wird. Besonders relevant wird diese Technik bei frei geformten Ortbetonbauteilen sein, wie sie bei formaktiven Tragwerken vorkommen.

2 Stand der Forschung

Aktuell bestehen verschiedene Patente und auch Realisierungen von adaptiven Schaltschen, also von Systemen für die liegende Herstellung, die alle bislang nicht zur Erstellung tragender Betonbauteile verwendet werden konnten. Einen vielversprechenden Ansatz liefert das Dänische Startup-Unternehmen Adapa SpA, deren System für das Gießen von Hartschaumblocken verwendet wird, die im Nachgang als Schalung für Faserbeton-Fassadenpaneele dienen [7].

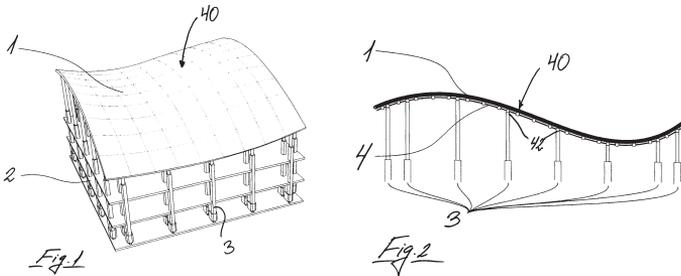


Bild 4: oben: Patent-Skizzen von Adapa ApS. (Patent US 20130299084 A1); unten: Forschung von SCHIPPER (TU Delft) an Betontechnologie für adaptive Formtische [Fotos: Roel Schipper]

Forschung an diesen liegenden Systemen wurde und wird an der TU Delft durch VOLLERS & RIETBERGEN [8] und SCHIPPER ET AL. [9], [10] geleistet. Letzterer fokussiert auf die Beschaffenheit von Faserbeton-Halbzeugen für die Umformung auf variablen Formwerkzeugen.

Im vorliegenden Forschungsvorhaben im Rahmen des DFG-geförderten SPP 1542 wird auf die Grundlagen adaptiver wiederverwendbarer Schalungen für geneigte und aufrechte Ortbeton-Tragwerke fokussiert, die eine zweihäuptige

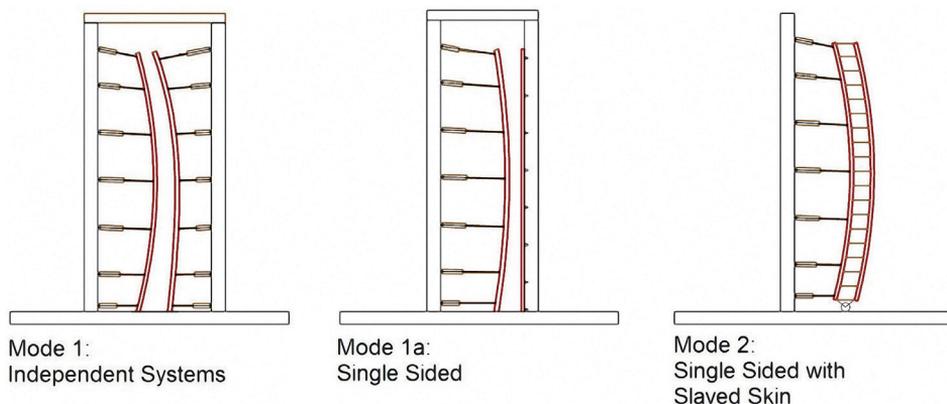


Bild 5: Verschiedene Wirkungsprinzipien wandelbarer aufrechter Betonschalungen: links: beidseitige unabhängige Schälfläche; Mitte: einseitige Nutzung der Adaptivität; rechts: gekoppeltes System mit dichter Durchankerung

Schalung erfordern. Neben dem großen ökonomischen Potenzial dieser Technik wird in der Ortbetonbauweise eine deutlich größere Relevanz für die Erstellung von formaktiven Flächentragwerken, wie Betonschalen, erkannt. Schließlich stellt ein hoher Frischbetondruck in Verbindung mit der Zweischaligkeit besondere Anforderungen an die Schalungssteifigkeit dar, die ein eigenständiges Gebiet der Forschung in diesem Bereich umreißen. Grundlegende Ergebnisse lassen sich dennoch auch auf liegende Systeme übertragen.

3 Funktionsweise der aufrechten Systeme

Ein adaptives Schalungssystem basiert auf einem oder mehreren Rastern eng nebeneinander angeordneter hydraulischer oder elektromechanischer Aktuatoren, deren Hubglieder computergesteuert ein- und ausfahren können und somit eine definierte Form in ein elastisch umformbares Schalmaterial einprägen. Diese formgebenden Schälflächen stehen aufrecht innerhalb eines stützenden Gerüsts und werden von den Aktuatoren geführt und gehalten. Für die Ausbildung des formgebenden Systemteils sind verschiedene Konzepte evaluiert worden. Für einen einseitigen Aufbau einer adaptiven Schälfläche sind Materialkonzepte erforderlich, die dem vollen Frischbetondruck widerstehen können. Hinsichtlich dieser für die Materialkonfiguration maßgeblichen Last wird parallel ein dicht durchankertes System evaluiert, das aus einer durch Aktuatoren umformbaren Fläche besteht, an die eine weitere Fläche dicht verankert gekoppelt ist. Hier werden keine Lasten aus dem Betondruck auf die Aktuatoren abgegeben, da die dichte Verankerung diese Kräfte kurzschließt.

Die Funktionsweise der Umformung folgt den Prinzipien, die vor der Einführung digitaler Techniken zur Generierung von Interpolationsformen genutzt wurden. Frei geformte Flächen können als eine Abfolge von Spline-Kurven verstanden werden, die eine Fläche ergeben. Der Begriff Spline ist heute fest mit Funktionen des CAD

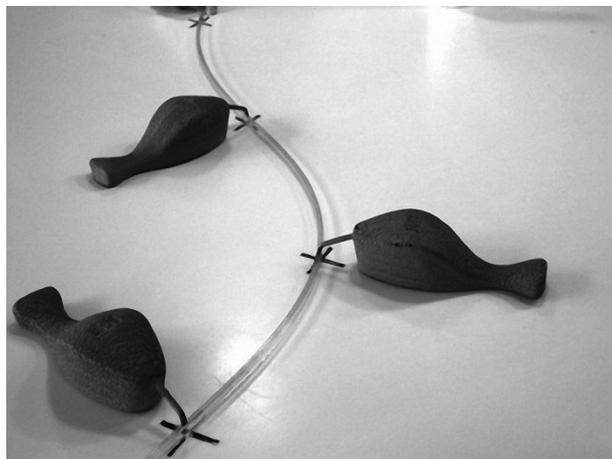


Bild 6: Sogenannte Spline Ruler mit Spline Weights
[Foto: Carl de Boor]

assoziiert und dient als Sammelbegriff für Freiformkurven höheren Grades. Im Schiffsbau und später auch im Flugzeug- und Karosseriebau wurde früher als Spline ein dünnes biegsames Lineal bezeichnet, das, an definierten Punkten durch Gewichte (sogenannte Spline Weights) fixiert, einen weichen und stetigen Kurvenverlauf im Zustand minimaler Biegeenergie und Krümmungsstärke annahm.

In Bezug auf unsere Schalfläche kann die physische Spline als Faser dieser Fläche verstanden werden, während die Aktuatoren Festpunkte ähnlich der Spline Weights darstellen, die die lokale Translation vorgeben. Während die digitale Spline ein breites Spektrum an Krümmungsabfolgen annehmen kann, ist das physische Vorbild durch seine mechanischen Eigenschaften limitiert. Um sich einer gegebenen Geometrie durch elastische Umformung von Stäben oder Flächen anzunähern, sind sowohl Steifigkeit und Elastizitätsgrenze als auch der Abstand der Festpunkte von Bedeutung.

Für die Konfiguration einer wandelbaren Schalung, die auf elastischer Umformung basiert, wurden daher folgende Punkte als fundamentale Parameter identifiziert, die in gegenseitiger Abhängigkeit stehen:

- Aktuator-Abstand,
- Krümmung,
- Steifigkeit und Elastizitätsgrenze des Materials,
- Einwirkende Last (z. B. aus Frischbeton).

Die genannten Punkte bestimmen die Konfiguration des Systems und die zu erwartende Leistungsfähigkeit bei der Annäherung an gegebene Geometrie. Im Rahmen der Forschung an diesen Systemen ist daher das Herleiten von Konfigurationsregeln aus genannten Parametern ein zentraler Inhalt.

4 Aktuatorsysteme

Das Verhalten des Gesamtsystems erreicht durch die Interaktion zwischen Schalfläche und Aktuatoren einen zunächst unerwarteten Komplexitätsgrad: Liegende wandelbare Formtische, wie sie Gegenstand der Forschung z. B. bei SCHIPPER sind, sehen keine feste Verbindung zwischen Schalfläche und Aktuatoren vor. Wenn eine Krümmung eingepreßt wird, gleitet die Schalfläche auf den Aktuatorspitzen. Die Aktuatoren selbst sind vertikal stehend eingespannt und bilden eine strikt vertikale Bewegungsrichtung ab. Dieses Modell ist analytisch gut zu erfassen und ähnelt gut dem Spline-Prinzip. Von den Anforderungen der im Projekt betrachteten aufrecht stehenden Systeme weicht dieses Prinzip jedoch ab.

Bei aufrechten Systemen kommt den Aktuatoren auch eine stabilisierende Funktion für die Schalhaut zu. Sie müssen fest mit dieser verbunden sein. Sobald aber die Aktuatoren mit ihren Spitzen unverschieblich an der Schalungsfläche angebracht sind, werden sie sich neigen, wenn eine Krümmung eingestellt wird, da die Sehne der gekrümmten Schalfläche sich verkürzt [11]. Bei liegenden Schaltischen können beide Varianten, also lose Aktuatoren und fest angeschlossene, realisiert werden, wenn die Auflast aus dem Werkstück groß genug ist, auftretende Zugkräfte zu überdrücken.

Der vermeintlich kleine Unterschied bringt für die analytische oder numerische Abbildung der Systeme weitreichende Konsequenzen. Der Prozess, bei dem sich neigende Aktuatoren eine elastische Fläche an eine gegebene Geometrie heranführen, kann nicht in einem Schritt berechnet werden, wie es beim einfacheren System der starren Aktuatoren der Fall ist. Um das System besser kennenzulernen, wurde im Rahmen des



Bild 7: Das aus dem Forschungsvorhaben VOLLERS & RIETBERGEN der TU Delft [10] hervorgegangene Funktionsmodell, das links zu sehen ist, wird umgebaut und als Versuchsträger genutzt. Es wurden Arme zur Spannweitenverkürzung nachgerüstet und es erfolgte ein Umbau hin zu schwenkbar gelagerten Aktuatoren. [Fotos: Ulrich Knaack]

Forschungsvorhabens eine Simulationsumgebung programmiert und ein bestehendes Funktionsmodell so modifiziert, dass es eine Entsprechung zum digitalen Modell darstellt. Das digitale Modell bildet die Schalfläche in ihren mechanischen Eigenschaften näherungsweise ab, und minimiert iterativ die Abweichung der Schalfläche zur Sollgeometrie durch Berechnung des hierzu nötigen Aktuator-Hubs.

Skizzenhaft zusammengefasst werden folgende Schritte abgearbeitet, die zur Annäherung der Schalfläche an eine vorgegebene zweisinnig gekrümmte Form führen: Auf den Flächenabschnitt wird ein Raster projiziert und der initiale Aktuator-Hub wird berechnet. Das Einprägen der Krümmung aus der Aktuator-Bewegung wird numerisch am Stabmodell simuliert. Durch Verkürzen der Sehne der nun gewölbten Schalfläche werden die Aktuatoren in Schiefstellung gebracht. Durch diese Schiefstellung verändert sich die Oberflächenkrümmung der Schalfläche. Eine Kompensation durch Nachführen des Aktuator-Hubs wird erforderlich, wodurch sich wiederum die Aktuator-Neigung ändert, was wiederum den eingestellten Hub zu Annäherung an die Fläche beeinflusst. Dieser Prozess wird wiederholt, bis eine Konvergenz erreicht ist.

Danach generiert die Simulationsumgebung die Steuerungsdaten für die jeweiligen Aktuatoren, indem für jeden Aktuator adressierte Kommandos generiert werden. Zunächst werden alle Aktuatoren in Mittelstellung gebracht, von welcher aus das Erreichen der Extremlpositionen in kürzester Zeit möglich ist. Die Geschwindigkeit der jeweiligen Aktuatoren wird in Abhängigkeit zu deren Wegstrecke so angepasst, dass alle Aktuatoren ihre Position in der gleichen Zeit erreichen. Fehler im Timing führen zu Verspannungen im System. Die Steuerungsdaten werden direkt über eine Schnittstelle an die Aktuatoren gesendet, die an einem seriellen Bus angeschlossen sind.

Die dezentrale Logik der Aktuatoren setzt die Befehle selbständig um. Hierzu steuert ein Embedded System, also ein eigenständiger Prozessor, der Kommunikation, Wegstreckenmessung und deren Berechnung, Endabschaltung und letztlich auch die Motorsteuerung des Aktuators übernimmt, jeden Aktuator individuell. Für die Aktuatorsteuerung des Funktionsmodells wurde auf die Arduino-Plattform zurückgegriffen.

5 Adaptive Schalfläche

Es liegt in der Natur jedes flächigen steifen Materialgefüges, der zweisinnig gekrümmten Umformung zu widerstehen. Das Materialverhalten ähnelt in der Regel dem eines Blattes Papier, das man über einen runden Gegenstand wie einen Ball oder das eigene angewinkelte Knie ausbreiten möchte. Die Ränder neigen dazu, eine wellige Form anzunehmen, während die Mitte – unter Zugkräften gespannt – bald einen Riss durch

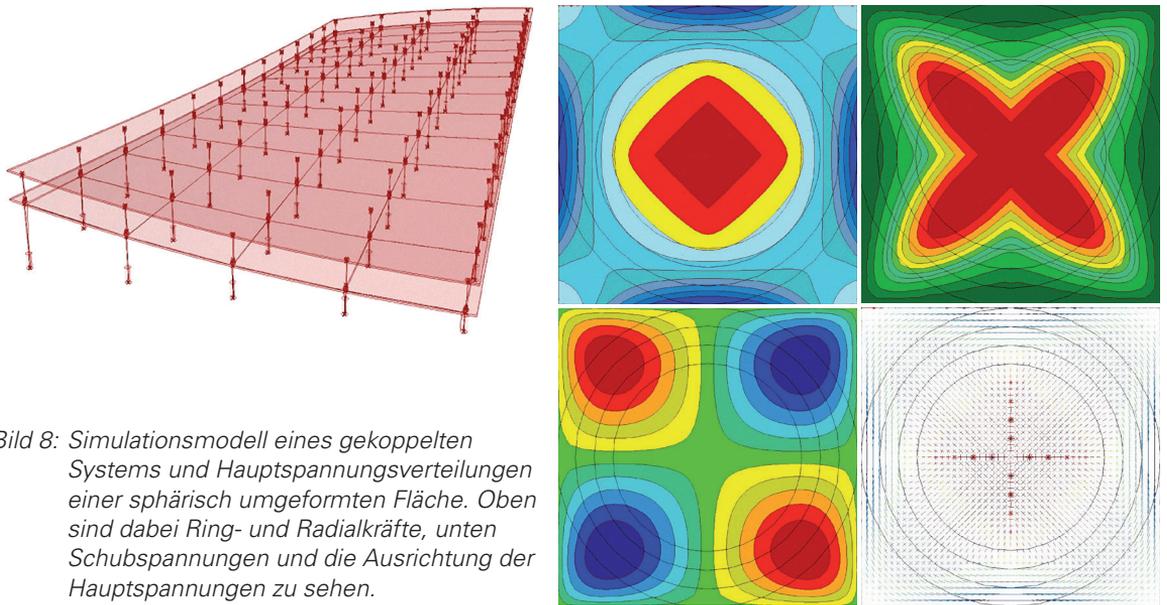


Bild 8: Simulationsmodell eines gekoppelten Systems und Hauptspannungsverteilungen einer sphärisch umgeformten Fläche. Oben sind dabei Ring- und Radialkräfte, unten Schubspannungen und die Ausrichtung der Hauptspannungen zu sehen.

den Wölbungsscheitel erfährt. Nimmt man ein gewebtes Textil, erkennt man zusätzlich, dass sich die Ecken rhombisch verzerren. Man kann also leicht ableiten, dass ein flaches Material unter solcher erzwungener Umformung entlang der Ränder Druckkräften unterliegt, im Zentrum radiale Zugkräfte wirken und an den Ecken eine Schubverzerrung besteht.

Ein ideal umformbares Material würde sich axial leicht drücken, ziehen und verzerren lassen. Auf der anderen Seite erwarten wir von diesem idealen Material, dass es der Last aus dem Frischbeton zwischen den Aktuatoren durch Biegewirkung widersteht – widersprüchliche Anforderungen, für die nur in einer Kompromissfindung Lösungen zu erwarten sind.

Im handwerklichen Formenbau sind gestanzte Blechhalbzeuge verbreitet, die man auf Grund ihrer Lochung gut an zweisinnig gekrümmte Körper anpassen kann. Ein Produkt namens Formetal® lieferte die entscheidende Inspiration, das Potenzial von Perforati-

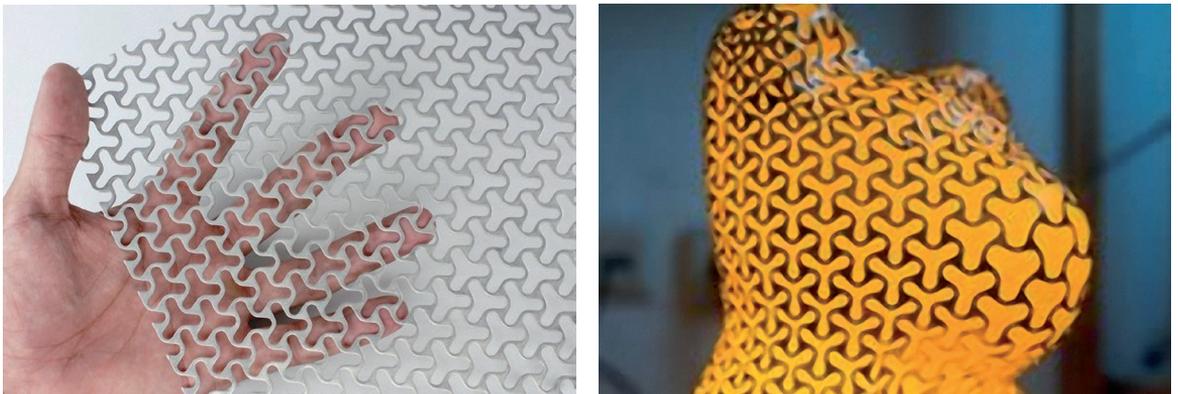


Bild 9: Drapierbares Lochblech, hier: Produkt Formetal® [Fotos: DINOSAURIER-Werkzeuge Trading GmbH]

onen für ein adaptives Schalmaterial auszuloten. Seine Y-förmigen Lochungen lassen ein Netz aus dreieckigen Knotenflächen zurück, die mit geschweiften Armen verbunden sind. Die versetzte Anordnung der Knoten bewirkt eine häufige Lastumleitung im Gefüge, die jeweils Biegung in die geschweiften Verbindungarme induziert. Zusätzlich sind die geschweiften Arme exzentrisch um den Mittelpunkt der Knoten angesetzt, so dass die induzierte Biegung eine Verdrehung des Knotens um seine Hochachse bewirkt. Diese Mechanismen machen die gute Umformbarkeit der Perforation aus, da sie große axiale Längenänderungen durch Plastifizieren erlauben.

Für den eigenen Ansatz wurde sich diesem Prinzip in abgewandelter Form angenähert. Der Einsatz einer ‚durchlöchernten‘ Schallfläche bedingt freilich, dass diese mit einer weiteren hochelastischen Membran abgedeckt wird, um eine dichte Schalung zu erhalten. Auch ist von dieser Konfiguration zu erwarten, dass sich die abgedeckte Perforation dennoch leicht im Beton abzeichnen wird. Dieses wird zunächst in Kauf genommen.

Um die Verzerrung unter Schub zu erleichtern, wird für den eigenen Ansatz eine rectangulare Anordnung der Knoten gewählt. Die geschweiften Verbindungen resultieren aus dem Wunsch, jeweils exzentrisch an die Knoten anzuschließen. Die Verdrehung der Knoten gegenüber der achsenparallelen Ausrichtung kann diese Exzentrizität steigern oder abmindern und damit die Umformeigenschaften beeinflussen.

Die Geometrie wurde in der parametrischen Entwicklungsumgebung Grasshopper des NURBS-Modellers Rhinoceros® parametrisiert. Es ist möglich, bestimmte Perforationsparameter wie die Größe und Drehung der Knoten oder den Verschweifungsgrad der Verbindungen inkrementell zu verändern. Aus der so parametrisierten Geometrie der Perforation werden automatisiert Simulationsmodelle aufgebaut, die, entsprechend gelagert und moderat belastet, einem angekoppelten Solver zugeführt und nach Theorie I. Ordnung unmittelbar nach dem Einsteuern der Parameter berechnet werden. Hierdurch können Parameter inkrementell verändert werden und die Auswirkungen auf axiale Umformbarkeit bzw. Biegesteifigkeit aufgezeichnet und als Verlauf evaluiert werden.

Als maßgebliche Parameter wurden für das exemplarisch gewählte Perforationsmuster Größe und Drehwinkel der Knoten (im Diagramm mit ‚Core‘ bezeichnet) identifiziert. Für mehrere Größenstufen der Knoten wurden jeweils Serien berechnet, bei der der Drehwinkel der Knoten (im Diagramm ‚Twist‘ benannt) variabel

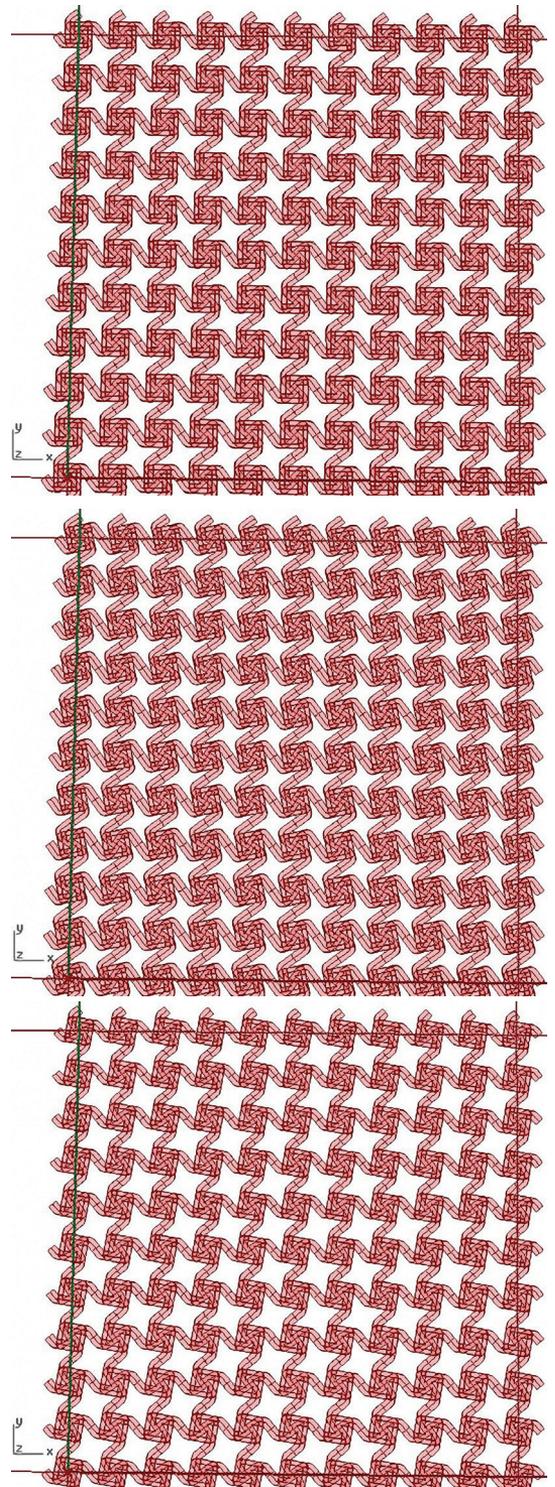


Bild 10: Verschiedene Instanzen eines Perforationsprinzips: je stärker die Knoten-Elemente verdreht werden, desto ‚weicher‘ wird das Gefüge

war. Für jede dieser Serien wurde die Umformarbeit für axiale Normalkräfte und für Schubkräfte sowie die Umformarbeit bei Biegung gegen die Materialebene aufgezeichnet. Die Fragestellung der Untersuchung war, inwieweit die Biegesteifigkeit erhalten und gleichzeitig die Axialsteifigkeit reduziert werden kann. Indem ein heterogenes Materialgefüge wie nachfolgend beschrieben gewählt wurde, konnte der ‚Spread‘ zwischen Axial- und Biegesteifigkeit positiv beeinflusst werden, so dass bei einem Verdrehwinkel von etwa 25° gegenüber einem neunzigprozentigem Abfall der axialen Steifigkeit die Biegesteifigkeit nur um 60 % verringert wird.

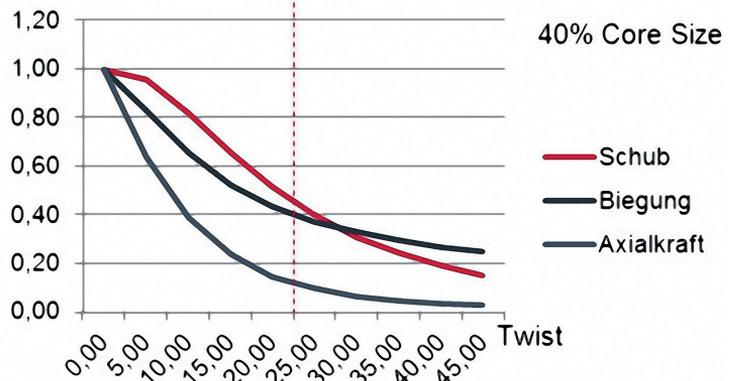
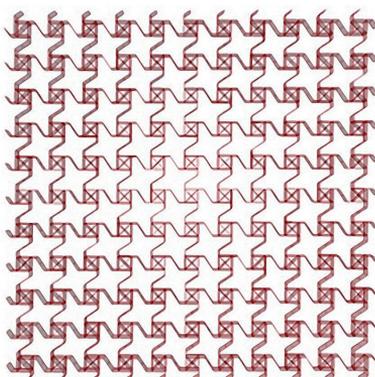
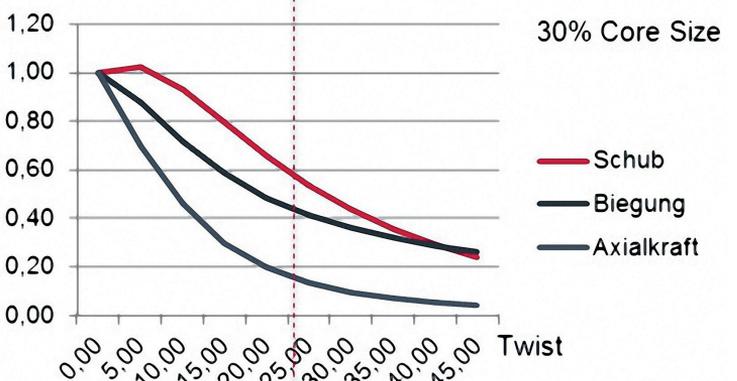
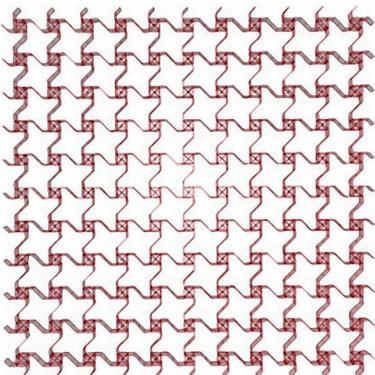
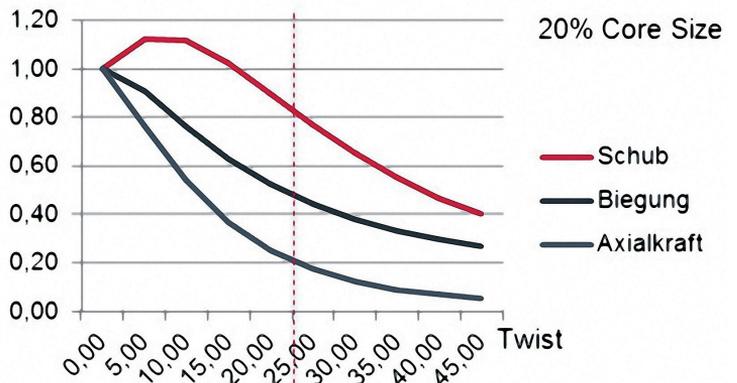
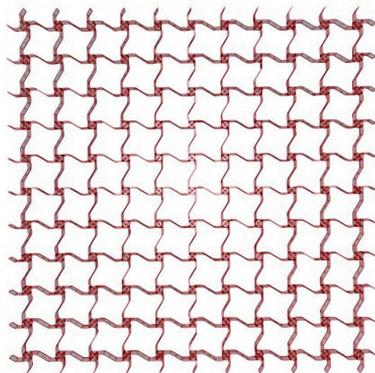


Bild 11: Analyse der Perforationen unter variablen Drehwinkeln der Knoten. Die axiale Steifigkeit fällt bei zunehmender Verdrehung der Knoten stärker ab als die Biegesteifigkeit.

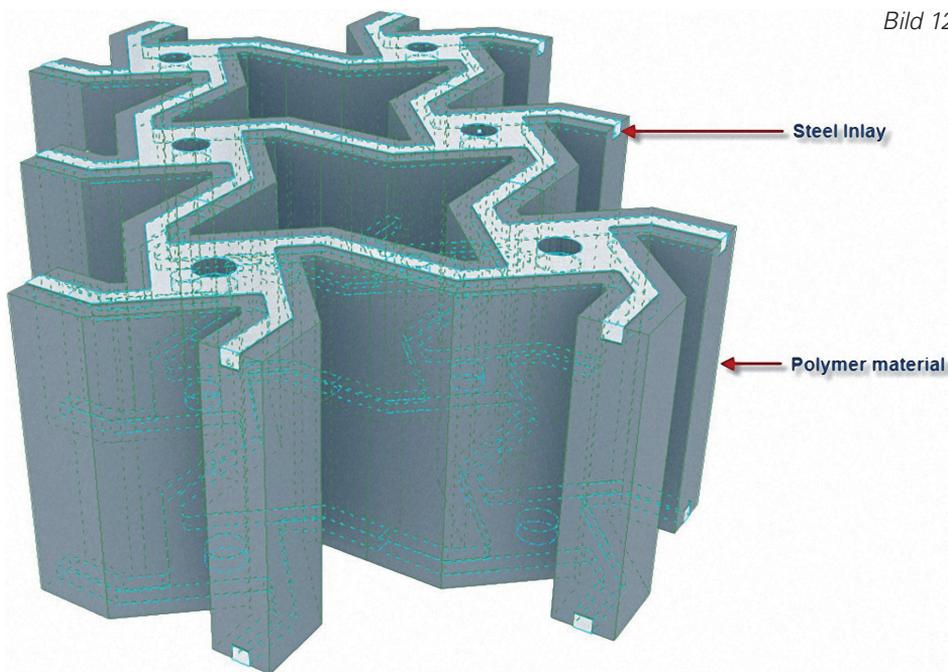


Bild 12. Maßstäbliche Visualisierung der etwa 100 mm starken Schalfäche

Die Umformung des Gefüges durch axiale Kräfte wird durch Querbiegung in den geschweiften Verbindungen ermöglicht. Diese werden also – geht man von großen Dicken des Grundmaterials aus – um ihre ‚schwache‘ Achse verbogen, wenn sich das Gefüge stauchen oder ausdehnen soll. Unter Biegung aus Betondruck, also aus Lasten entgegen der Flächenebene, bewirkt die Biegung ebenfalls axiale, wenn auch entgegengesetzte Kräfte in dem Gefüge, denen zunächst im gleichen Modus widerstanden wird wie dem erstgenannten. Da sie sich zu den Oberflächen des perforierten Materials hin konzentrieren, liegt die Idee nahe, diesen zusätzliche Steifigkeit durch eine Verstärkung zu verleihen.

Um am konkreten Fall einer Wandschalung eine Konfiguration zu entwickeln und zu evaluieren, wurden Dimensionen für ein verfügbares Material ermittelt und eine Belastung in Form eines Frischbetondrucks von 25 kN/m^2 vorgegeben. Als günstiges Materialgefüge hat sich für einen Aktuator-Abstand von 50 cm und eine mit Auslegern halbierte Stützweite ein 100 mm starkes Polyethylen LD als perforierte Schalfäche erwiesen. Als Verstärkung werden als ‚Intarsie‘ dünne Stege aus $5 \times 5 \text{ mm}$ Stahl vorgesehen. Diese haben als Verstärkung gegen orthogonal wirkende Lasten einen großen Hebelarm, liegen hinsichtlich der Biegung aus axialer Umformung aber in der Nulllinie der Stege. Gleichzeitig bietet die Stahleinlage eine konstruktiv günstige Ergänzung für die Verortung von Lasteinleitungen.

6 Schlussfolgerung

CNC-gefertigte Schalungen für den einmaligen Gebrauch stellen einen erheblichen Ressourcen- und Kostenfaktor bei der Herstellung frei geformter Betonschalen und Wände dar. Eine wiederverwendbare Schalung mit der Möglichkeit, sich verschiedenen Formen anzunähern, hat das Potenzial, den ökologischen und ökonomischen Impact bei der Herstellung der genannten Bauformen zu reduzieren. Die Umsetzung bislang selten realisierter Bauformen, wie Tragwerke, denen Formfindungsverfahren wie beispielsweise nach bionischen Prinzipien zu Grunde liegen, kann gefördert wer-

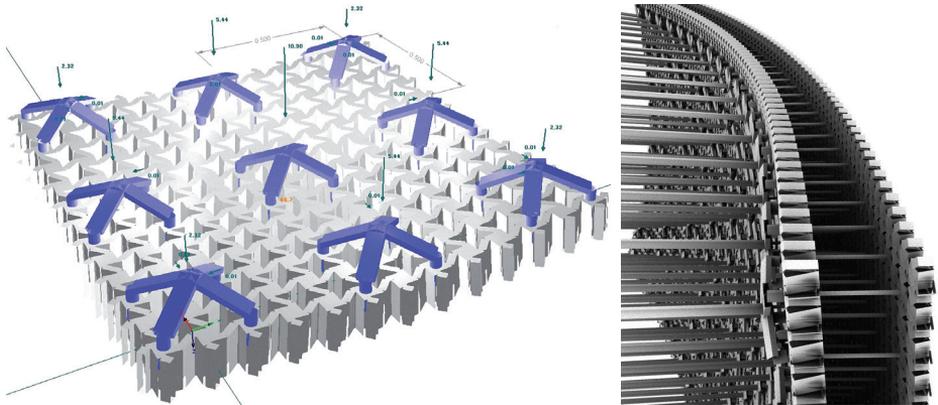


Bild 13: Proof of Concept: links zu sehen ist das Analysemodell einer einhäutigen Schalfläche, bemessen, um 25 kN/m^2 Frischbetondruck zu widerstehen. Es besteht aus 10 cm Polyethylen LD bei 500 mm Aktuatorabstand. Rechts wird das verformte Strukturmodell vom gekoppelten System in der Simulationsumgebung gezeigt. Die dicht angekoppelte Schalfläche kann hierbei dünner sein als die ‚Master‘-Fläche.

den. Zudem ließe sich der Einsatz unangemessen aufwändig herzustellender Schalung für die einmalige Nutzung reduzieren.

An der im Forschungsprojekt entwickelten Simulationsumgebung können die komplexe Interaktion zwischen Aktuatoren und Schalhaut erforscht und Konfigurationsregeln erarbeitet und evaluiert werden. Das physische Funktionsmodell bietet die Möglichkeit der Kalibrierung des simulierten Modells und bietet Erkenntnisse zu den technischen Anforderungen von Hard- und Software der Aktuatoren. In weiterer Folge dient es als Versuchsträger für Schalhautmodelle. Perforierte monolithische Platten aus Kunststoffen sind grundsätzlich geeignet, als adaptive Schalflächen Verwendung zu finden und rechnerisch gewonnene Resultate zeigen für die weitere wissenschaftliche Arbeit günstige Vorzeichen.

Literatur

- [1] POSENER, J.: ERICH MENDELSON. In: Arch+ 48 (1979): Vorlesungen zur Geschichte der neuen Architektur, S. 8–13.
- [2] SCHLAICH, M.: Von den dünnen Betonschalen FÉLIX CANDELAS zu den leichten Flächen-tragwerken von heute. VDI-Bautechnik Jahresausgabe (2011/2012, 2011, S. 122–131.
- [3] CUETO RUIZ-FUNES, I.: The Shells of FELIX CANDELA. Voices of Mexico No. 50. (2000). S. 36–39.
- [4] RODERICK H.: Ein Wellenboden für den Geist. Interview mit FABIAN SCHEURER. Hoch-parterre 21 (2008), Heft 10, S. 30–33
- [5] SEIDEL, H. W.; GRUNEWALD, C.; HOLZMANN, P.: Herstellung frei geformter Stahlbetonfer-tigteile am Beispiel „Der neue Zollhof“ in Düsseldorf. Schriftenreihe – Lehrstuhl und Institut für Massivbau -IMB-, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen; 12. aus: Vom Baukasten zum intelligenten System. Individuelles Bauen durch Vorfer-tigung. Tagungsband RWTH Aachen (2000). Hrsg.: RWTH Aachen, Lehrstuhl und Institut für Massivbau – IMB-Selbstverlag 2000, S.169–177.
- [6] HICKERT, S.: Evaluation von Fertigungsverfahren für Freiform-Beton-Sonderschalungen in Bezug auf deren Weiterentwicklungspotenziale. Master Thesis, Hochschule Ost-westfalen Lippe, Faculty of Architecture, 2013.
- [7] RAUN, CH.; KRISTENSEN, M.; KIRKEGAARD, P. H.: Dynamic Double Curved Mould System. In: GENGNAGEL, C. et al. (Hrsg.): Computational Design Modelling – Proceedings of Design Modelling Symposium, 10/2013 in Berlin, 2011.
- [8] VOLLERS, J.; RIETBERGEN, D.: Werk-wijze en inrichting voor het vormen van een dubbelge-kromd paneel uit een vlak paneel. Patent number 2000699, NL Octrooicentrum, 2008.
- [9] SCHIPPER, R.; GRÜNEWALD, S.; RAGHUNATH, P.: Rheological parameters used for deliberate deformation on a flexible mould after casting. In: ROUSSEL, N.; BESSAIRES-BEY, H. (Hrsg.): Proceedings of RILEM2013 – Rheology and processing of Construction Materials – 7th RILEM International Conference on Self-Compacting Concrete and 1st RILEM International Conference on Rheology and Processing of Construction Materials, 2013 in Paris (France), 8 S., published on additional DVD with proceedings.
- [10] SCHIPPER, R.; JANSSEN, B.: Manufacturing Double Curved Precast Concrete Panels. CPI – Concrete Plant International (2011), Heft 4, S. 32–38.
- [11] MICHEL, M.: Electronic controlled adaptive formwork for freeform concrete walls and shells. In: MÜLLER, H. S.; HAIST, M.; ACOSTA, F. (Eds.): Proceedings of the 9th fib Inter-national PhD Symposium in Civil Engineering, Karlsruhe Institute of Technology (KIT), 22.–25.07.2012, Karlsruhe, Germany. KIT Scientific Publishing, Karlsruhe, 2012, S. 281–289.

Grundlagen zur Entwicklung adaptiver Schalungs-systeme für frei geformte Betonbauteile

Projektleiter

Prof. Dr.-Ing. Ulrich Knaack

Projektbearbeiter

Dipl.-Ing. Matthias Michel
Sascha Hickert M.A.

Projektlaufzeit

09/2011 – 08/2014

Partner

TU Darmstadt – Institut für Massivbau,
Prof. Dr.-Ing. Carl-Alexander Graubner

Web

<http://www.hs-owl.de/fb1/studium/lehrgebiete-e-g/entwerfen-konstruieren.html>