

# Molding Sand Formwork System (Area I Multi-Physics Modelling)

„Originalität besteht darin zum Ursprung zurückzukehren. Originalität bedeutet also, durch die eigenen Ressourcen zur Einfachheit der frühen Lösungen zurückzukehren.“ (Antonio Gaudi)

**Abstract** Die Forschungsinitiative “ **Molding Sand Formwork System** “ entstand im Rahmen eines Promotionsvorhabens und befasst sich mit dem Aufbau eines Formgebungs- und Schalungsverfahrens zur Entwicklung und Herstellung von geometrisch komplexen und freigeformten Betonbauteilen.

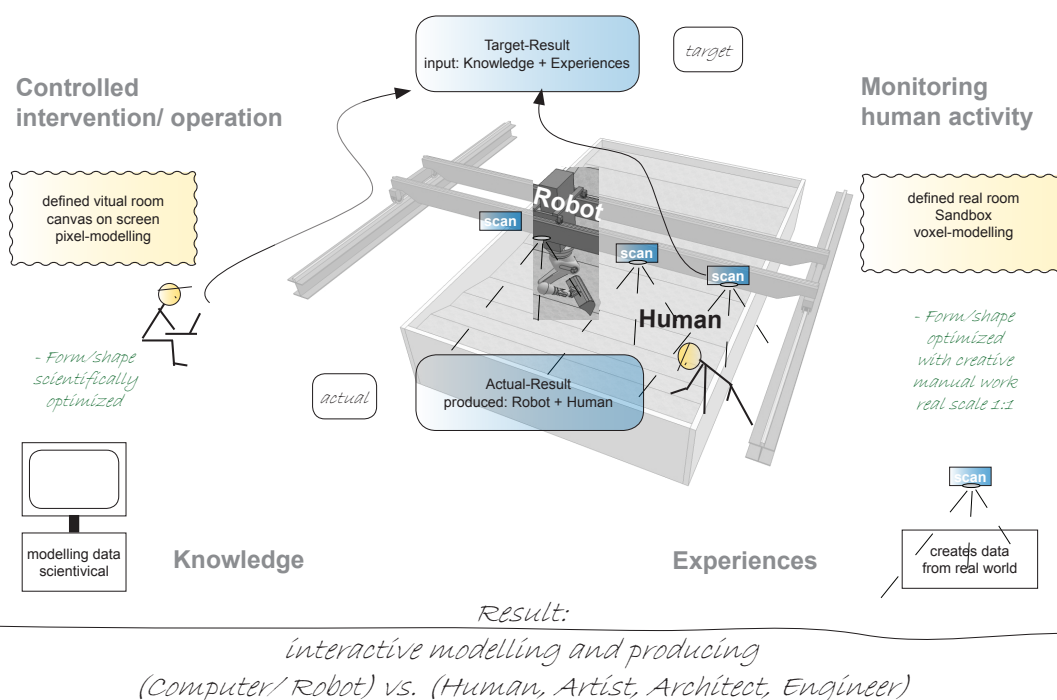
Ziel dabei ist es, aus ganz unterschiedlichen Anwendungsbereichen Formungsverfahren, sowie bestehende Anlagen-, Roboter- und Meßtechnik zu adaptieren und in einen digitalgesteuerten teilautomatisierten Produktionsprozess der Betonfertigteilterstellung zu überführen.

Neben der maschinellen Bearbeitung, soll auch eine manuelle Bearbeitung möglich sein, so dass einerseits andere konventionelle Schalungs- und Verbindungskomponenten in die Sandschalung integriert werden können, wie auch eine kreative und handwerkliche Gestaltung der Sandschalung oder Interaktion von maschineller und manueller Bearbeitung, umgesetzt werden kann.

Medium dieses Produktionsprozesses ist ein natürlicher tongebundener Formsand, ohne synthetische Bindemittel, der als Schalungsmaterial zum Einsatz kommt und innerhalb eines Kreislaufsystems wiederverwendet werden kann und somit eine nahezu abfallfreie Herstellung und Produktion von Betonschalung ermöglicht. Weil das Material sowohl subtraktiv wie auch additiv bearbeitet werden kann und in seiner Konsistenz und Rezeptur variabel einstellbar ist, sind auch auf relativ einfachem Weg Iterationsprozesse zur Lösungsfindung in der Formgebung möglich.

Bei dem Verfahren soll der Prozessgedanke im Vordergrund stehen, wo neben der fachbereichsübergreifenden Kombination bewährter technischer Komponenten, die Möglichkeit des manuellen Bearbeitens, Gestaltens und Interagierens, ebenso als bedeutende Komponente des gesamten Prozesses gesehen wird.

Die Möglichkeit einer erweiterten heuristische Herangehensweise bei der praxisorientierten Entwicklung und Produktion von Betonbauteilen, soll damit gefördert werden. Das Verfahren repräsentiert somit einen ganzheitlichen Ansatz, um eine schnellere, wirtschaftlichere und effizientere Projektierung der heute komplexen Bauteilentwicklungen zu ermöglichen und den gestiegenen Anforderungen an Funktion, Gestaltung und Umweltverträglichkeit gerecht zu werden. Mit diesem ganzheitlichen Ansatz, kann das Verfahren auch progressives Beispiel sein, für den Einsatz digitaler Technik und teilautomatisierter Produktionsprozesse im Bauwesen allgemein bei der Herstellung und Entwicklung von Bauteilen.



**Fig. 1** Sketch: teilautomatisierte Produktion mit Möglichkeiten der manuellen Bearbeitung und des interaktiven Modellierens

## 1 Einführung

Anstoss für die Forschungsinitiative war die immer wiederkehrende Schalungsproblematik, welche bei der Herstellung und Entwicklung von geometrisch komplexen und/oder freigeformten Betonbauteilen auftritt und die in den geführten Diskussionen vieler Forschungsprojekte, welche im Rahmen eines DFG-Schwerpunktprogrammen stattfanden, oftmals thematisiert wurde.

Das DFG-Schwerpunktprogramme SPP 1542: „Leicht Bauen mit Beton - Grundlagen für das Bauen der Zukunft mit bionischen und mathematischen Entwurfsprinzipien“) [1] welches in den Jahren 2012-2016 stattfand, stand für einen angestrebten Paradigmenwechsel im Betonbau und verstand sich als „bauteilspezifische Grundlagenforschung für effiziente Tragstrukturen, wobei auch die Frage der Herstellung bei jedem Bauteil bedacht werden muss und somit den weiteren Schwerpunkt: „Entwicklung von Schalungssystemen und Bautechnologien für frei geformte Betonbauteile“ begründete.

Nachwievor besteht heute eine anhaltend hohe Erwartungshaltung, die digitale Prozesssteuerung auch für die Fertigung im Bauwesen zu erschließen und nutzen zu können. Ebenso ist das Bestreben, den erhöhten Gestaltungsanforderungen an Form, Funktion und Konstruktion, im Sinne einer individuellen, materialeffizienten und industriellen Massanfertigung, gerecht zu werden und hierfür die bestehenden Materialentwicklungen (Hochleistungsbeton + Textilbewehrung) nutzen zu können, uneingeschränkt vorhanden und von großer Bedeutung.

Während die Einbindung digitalen Planungsergebnisse - aus CAD Modellierung, FEM-Simulationen und parametrischer Topologieoptimierung - in den Produktionsprozess in vielen Industrie- und Wirtschaftsbereichen zum Stand der Technik (Forward Engineering) gehört, können gerade im Betonbau die aus der Planung gewonnenen digitalen Daten noch nicht in dem Umfang und der Tiefe für die Fertigung bzw. Herstellung der Bauteile und Bauwerke genutzt werden, wie es in den anderen produzierenden Wirtschaftsbereichen bereits längst üblich ist.

Nach wie vor mangelt es an wirtschaftlichen und effizienten Schalungsmethoden, die eine Herstellung geometrisch komplexer Bauteile ermöglichen, da diese mit den üblichen Systemschalungen nicht hergestellt werden können.

## 2 Blick auf den Stand der Technik

Im Betonbau bestehen grundsätzlich verschiedene Schalungsmethoden und Verfahren nebeneinander, die jeweils für verschiedene Bauaufgaben mit entsprechenden Anforderungen geeignet sind und verwendet werden [3-7].

Freigeformte und mehrsinnig gekrümmte Bauteile können mit den klassischen Systemschalungen jedoch nicht hergestellt werden. Hier sind nachwievor manuelle Einzelanfertigungen im Schalungsbau erforderlich. Eine heute immer noch angewandte Methode ist die Brettschalung auf Holzgerüsten (Trägerroste mit gekrümmten Paneelen) und einer zusätzlichen Beplankung aus oberflächenbeschichteten Schalungsplatten [3-7]. Darüber hinaus kommt oftmals auch das Fräsen von segmentierten Schalungselementen aus Holz- und Kunststoffstoffen zum Einsatz, die nach dem Fräsvorgang noch eine entsprechende Oberflächenbehandlung (Schleifen, Beschichten und Lackieren) benötigen [2]. Diese Methoden sind sehr planungs-, zeit- und kostenintensiv. Eigene Umfragen bei Schalungsherstellern und Planungsbüros haben ergeben, dass hier mit dem drei bis zehnfachen der üblichen Schalungskosten je m<sup>2</sup> zu rechnen ist. Der übliche Anteil der Schalungskosten an den Rohbaukosten im Betonbau beträgt ca. 30-40% [8]. Für Freiformschalungen steigen die Kosten exponentiell und können schon mal mit einem Anteil von 80-90% der Hauptkostenfaktor eines Betonrohbaus werden.

Darüberhinaus produzieren diese Methoden, sowohl während ihrer Herstellung, als auch auf Grund ihrer nur einmaligen Verwendbarkeit, in der Anwendung große Mengen Abfall, der entsorgt oder wieder aufwendig aufbereitet werden muss.

Im Verlauf der letzten Jahre wurden verschiedenste Forschungsansätze entwickelt, um die erweiterten digitalen Planungsmöglichkeiten für den Herstellungsprozess von Betonbauteilen zu nutzen. Viele der entwickelten Systeme, sind bisher jedoch ohne Anwendung in der Praxis und bleiben diesbezüglich wohl auch mit geringer Perspektive.

Es würde den vorliegenden Rahmen überschreiten, alle erfolgten Entwicklungsansätze hier vollständig darstellen zu wollen, deshalb werden hier, mit den adaptiven Schalungssystemen, nur die präsentesten genannt [9-12]: Wesentlicher Entwicklungsgegenstand dieser untersuchten „adaptiven“ Methoden war/ist die maschinelle Steuerung der Verformung einer flexiblen Schalungsfläche über verstellbare Aktuatoren, die auf der Unterseite einer Fläche in einem Raster angeordnet sind. Diese Systeme sind, im Verhältnis zu ihrer geringen Vielseitigkeit, als Schalungsform konstruktiv sehr aufwendig und in ihrer Größe, je nach System, beschränkt. Profile in der Fläche und am Rand können ebenfalls nicht ausgebildet werden. Auch sind die Krümmungsradien, auf Grund der geometrischen Restriktionen der Mechanik, sehr begrenzt.

### **3 Ganzheitlicher Blick**

Die Herstellung von Betonbauteilen ist kein Material bearbeitender Prozess, sondern eine formgebende Produktion, bei der eine ebenso formgebende Schalung benötigt wird. Auch handelt es sich in der Regel im Betonbau um eine Verbundbauweise, wo der Einbau einer Bewehrung erforderlich ist, da der Beton keine nennenswerten Zugfestigkeiten aufweist. Dimension, Anzahl und Lage der Bewehrung sind hier - nach wie vor - ein wichtiges Gestaltungsinstrument, um die erforderliche Tragfähigkeit und letzten Endes auch die formale Gestalt der Betonbauteile auszubilden. Darüber hinaus sind weitere wichtige Aspekte zu berücksichtigen, wie eine Mindestbetonüberdeckung, Rissbreitenbeschränkung und Dehn- und Arbeitsfugen. Weiterhin ist der Beton in seiner Rezeptur und Konsistenz variabel und kann auf die jeweiligen Anforderungen von Dauerhaftigkeit und Festigkeit eingestellt werden. Die angestrebten Eigenschaften können jedoch nur durch einen qualitätskontrollierenden Einbau und entsprechender Verdichtung gewährleistet werden. Gleiches gilt für die Oberflächenqualität, die in ihrer Erscheinung dann schlussendlich einen negativ Abdruck der eingesetzten Schalungsoberfläche wiederspiegelt.

Alles in allem, stellt also die Herstellung von Betonbauteilen einen sehr komplexen Prozess dar, bei dem nicht nur die Qualität der Bauteile, sondern auch ihre weiteren Entwicklungsmöglichkeiten eng mit den Herstellungspotentialen und - im Besonderen - mit den möglichen Schalungsmethoden verknüpft sind.

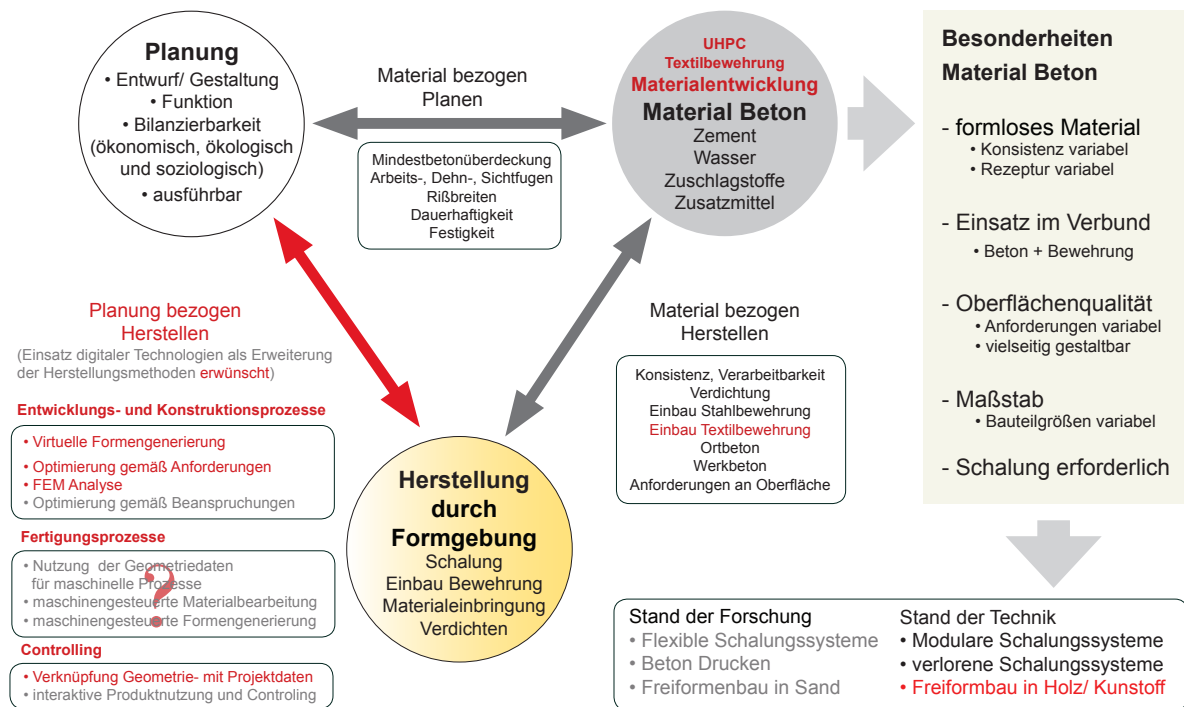
Hier liegt dann letzten Endes auch das große Hemmnis freigeformte Bauteile oder materialeffiziente und kraftflußoptimierte Konstruktionselemente oder funktional komplexe Verbundstrukturen zu entwickeln, obwohl die digitalen Planungswerkzeuge für die Konzeption solcher Bauteile längst vorhanden sind und die Materialentwicklungen im Betonbau dieses auch schon ermöglichen würden.

Dieses im wesentlichen konstruktive Problem der Betonbautechnik ist zwar durchaus bekannt und bspw. auch in dem DFG-Schwerpunktprogramm SP1542 als Forschungsschwerpunkt benannt, aber bisher noch nicht befriedigend gelöst.

#### **3.1 komplexe Problemstellungen**

Eine bilanzierende ganzheitliche Betrachtung der bisherigen Ergebnisse wirft, neben der beschriebenen Komplexität in der Herstellung von Betonbauteilen, noch andere Fragestellungen auf, die die Aufgabenstellung für das Finden von erweiterten Lösungsansätzen in der Schalungstechnik für geometrisch freigeformte Betonbauteile eher noch komplexer erscheinen lassen:

- *Richtige Einschätzung und ganzheitliche Lösungsansätze erforderlich*: Lange konnte man sich auf Systemschalungen verlassen und das konstruktive Problem der Bauteilherstellung als ein untergeordnetes Problem von Bauteilentwicklungen betrachten, welches an andere Gewerke oder Fachplanern delegiert werden konnte. Vor dem Hintergrund der heutigen Automatisierungstendenzen in der Bauteilproduktion, sind die konstruktiven Lösungen bzgl. der Umsetzungen zu einem sehr bedeutenden Teil der Entwicklungsansätze in der Bautechnologie geworden und es bedarf hier ganzheitlicher fächerübergreifender Lösungsansätze, die die Informatik und Produktions-, und Robotertechnik gleich zu Beginn in den Entwicklungsprozess mit einbeziehen.



**Fig 2.** Interdependenzen bei der Realisierung von Baukonstruktionen im Betonbau durch Formgebung

- *Fehlende methodische Herangehensweisen:* Es sind bisher nicht wirklich Strategien erkennbar, die das Problem der Schalungstechnik, auch in übergeordneten Masstäben, versuchen mit methodischen Vorgehensweisen zu lösen oder einzugrenzen, wie dieses bspw. in der Konstruktionslehre im Metallbau und in der Maschinen- und Elektrotechnik geschieht, um Lösungsansätze für komplexe Prozesse und Verfahren zu entwickeln. Hier scheint die bauteilspezifische Konzentration auf Einzellösungen noch zu sehr im Vordergrund zu stehen.

- *Relativierung erforderlich:* Die Zielsetzung, materialeffiziente und kraftflussoptimierte und somit geometrisch komplexe Bauteilstrukturen mit vollautomatisierter Formengenerierung herzustellen, erscheint oftmals zu allgemein formuliert und/oder eindimensional gedacht. Die Verfügbarkeit an digitalen Informationen, Daten und Kommunikationsmöglichkeiten, in der Planung, können im Bauwesen schon aufgrund der Größen und Dimensionen nicht so einfach auf die Produktionstechnik realer Bauteile übertragen werden und damit die Betonbauweisen allgemein und grundsätzlich in Frage gestellt werden. Es wird immer verschiedene Schalungsmethoden nebeneinander geben, die passend für den jeweiligen Anwendungsfall sind und sich nicht gegenseitig ausschließen. Hier wäre vielleicht eine Fokussierung auf die Frage, was denn für Bauteile und/oder Bauteilprinzipien entwickelt werden sollen, hilfreicher, um gezielter zu praxisorientierten Lösungsansätzen zu gelangen.

- *Entwicklungsprozesse beanspruchen zuviel Zeit:* Aus Sicht der heute festzustellenden Tempi in der Evolution technischer Produkte, dauert der bisherige Prozess der Bauteilentwicklungen im Bauwesen, der überwiegend noch in wissenschaftsorientierten Institutionen, im Rahmen von Forschungsprogrammen und -projekten erfolgt, die in ihrer Zielsetzung und Projektkapazität teilweise auch begrenzt sind, oftmals als sehr lang, bzw. zeigt sich als sehr träger Prozess. Viele Planungsbüros verfügen bereits heute über sehr elaborierte Planungstools und sind hochmotiviert progressiv die Konzipierung von neuen Bauteilen und ihren Verbindungen in Angriff zu nehmen und mit Hilfe heuristischer Herangehensweisen, bspw. nach dem Prinzip „Try and Error“, mit anschließender Einzelzulassung, zur Anwendungsreife zu bringen und in die Realisierung ihrer Entwürfe miteinfließen zu lassen.

- *Erhöhte Anforderungen:* Schlussendlich sind hier noch die heute bestehenden erhöhten Anforderungen, aus ökonomischer und ökologischer Sicht zu nennen, wie sie bereits an anderer Stelle schon ausgeführt wurden.



## 4 Methoden und Ansätze

Für den Aufbau eines Formgebungs- und Schalungsverfahrens zur Entwicklung und Herstellung von geometrisch komplexen und freigeformten Betonbauteilen, greift die Forschungsinitiative die oben beschriebenen Aufgabenstellungen und Anforderungen auf. Es wird dabei, neben der eigentlichen Entwicklung von Schalungsmethoden, ebenso der Entwicklungsauftrag gesehen, Lösungsansätze für die offensichtlich vorhandene Komplexität in der angestrebten automatisierten Bauteilproduktion im Betonbau, besonders für freigeformte Bauteile, zu finden.

Ziel der Forschungsinitiative ist es somit auch, neben der Entwicklung eines Schalungsverfahrens für freigeformte Betonbauteile, die Notwendigkeit und den Nutzen einer ganzheitlichen Herangehensweise aufzuzeigen, diese exemplarisch in einem konkreten Prozessverfahren zu erproben und die Machbarkeit mit wissenschaftlicher Datengrundlage unter Beweis zu stellen.

Dabei sind die Anforderungen nach einer hohen Prozessgeschwindigkeit, Belastbarkeit und Flexibilität in der Anwendung und die wirtschaftliche Umsetzbarkeit auf bestehender Anlagentechnik von Betonfertigteilwerken von besonderer Bedeutung. Die Lösungsansätze stellen sich wie folgt dar:

- a) Anwendung heuristisch bewährter Planungs- und Vorgehensmethoden, so wie es in der Konstruktionslehre in den Disziplinen der Metall- und Maschinentechnik, Elektrotechnik und Informatik praktiziert wird.
- b) Implementierung von Möglichkeiten manueller Bearbeitung in den Produktionsprozess, um gestalterisch, experimentelle und iterative Bearbeitung bei der Entwicklung geeigneter Schalungsformen zu ermöglichen. Damit soll weiteres heuristisches Herangehenspotential in den Entwicklungsprozess eingebracht werden, um praktisch umsetzbare Lösungsansätze auf kürzerem Wege zu entwickeln.
- c) Anwendung eines konstruktivistischen Ansatzes, in dem auf bestehenden Techniken, Methoden und Komponenten der Betontechnologie und der Produktionstechnik zurückgegriffen wird oder auch zurückgeschaut wird, wie die Probleme früher gelöst worden sind (Beispiel: „Prinzip der verlorenen Schalung“, v. Piero Luigi Nervi angewendet und weiterentwickelt)
- d) Verfolgung eines ganzheitlichen Ansatzes, der den Prozessgedanken in den Vordergrund stellt und von vornherein fächerübergreifend alle beteiligten Disziplinen und Gewerke mit einbezieht, um Lösungsansätze zu finden.
- e) Der Anspruch der All(gem)eingültigkeit wird nicht erhoben, da es immer die verschiedenen Schalungsmethoden nebeneinander geben wird. Es ergibt sich somit eine relativierende Beantwortung der Frage: Welche Bauteile sollen/können den gebaut werden, in welchen Bauteilstrukturen und Prinzipien kann/ sollte gedacht werden.

Angestrebt ist ein Produktionsprozess, der aus ganz unterschiedlichen Anwendungsbereichen Formungsverfahren, sowie bestehende Anlagen-, Roboter- und Meßtechnik adaptiert und in einen digitalgesteuerten teilautomatisierten Produktionsprozess der Betonfertigteilherstellung überführt.

Medium dieses Produktionsprozesses ist ein natürlicher tongebundener Formsand, ohne synthetische Bindemittel, der als Schalungsmaterial zum Einsatz kommt und innerhalb eines Kreislaufsystems wiederverwendet werden kann und somit eine nahezu abfallfreie Herstellung und Produktion von Betonschalung ermöglicht.

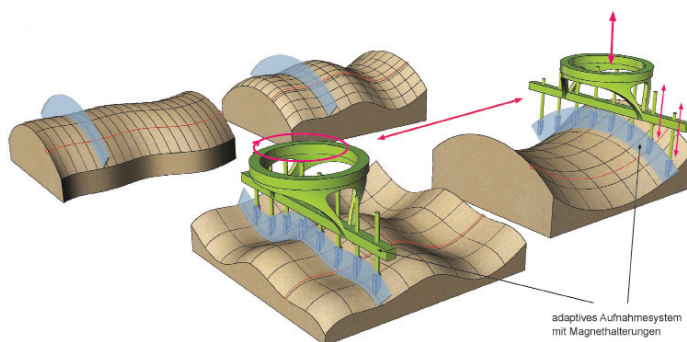
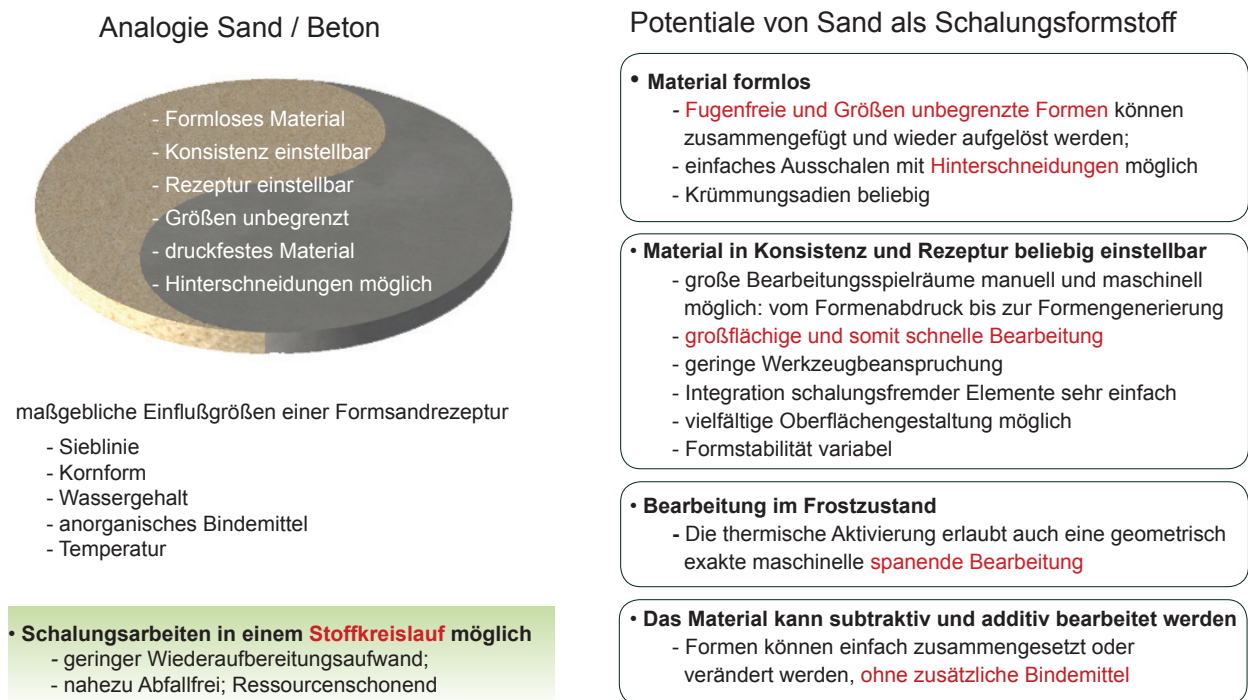


Fig. 3 Studie automatisiertes Modellieren mit Schablonen



Fig. 4 Studien Sandmodellierung

Mit der Verwendung von Formsanden als Schalungsmaterial, steht ein vielseitiges und wiederverwendbares Material zur Verfügung, welches geometrische Restriktionen und die „formgebenden“ Grenzen für die Entwicklung freigeformter Betonleichtbaustrukturen überwindet und darüber hinaus eine wirtschaftliche und nachhaltige Schalungsmethode verspricht. Die Formsandrezepturen lassen sich mit den natürlichen Materialanteilen von Quarzsanden, Tonkomponenten und Wasser, relativ einfach auf die jeweiligen Anforderungen einstellen. Das Material kann sowohl subtraktiv, wie auch additiv bearbeitet werden. Hinterschneidungen sind ebenfalls möglich, wie auch die Kombination mit anderen Schalungssystemen und -komponenten. Die geometrische Formbarkeit ist nahezu unbegrenzt.



**Fig. 5** Übersicht Potentiale von Sand als Formstoff für die Produktion von geometrisch komplexen Betonbauteilen

Die Metallindustrie nutzt Formsande seit hundert Jahren und die Gießereiindustrie hat die zum Einsatz kommenden „Sand-Formstoffe“ und die Modellformverfahren und Schabloniertechniken weit entwickelt [13-20].

Für die Betonbauteile, bspw. im Hochbau, gelten jedoch andere Massstäbe, denn der Beton als „Gussmaterial“ stellt hier an den Sand - als Formstoff - ganz andere Anforderungen, als die weit über 1000 Grad Celsius heißen Metalllegierungen, welche in der Metallindustrie vergossen werden. Die Anwendung von Formsand als Schalungsmaterial, für das Material Beton, wurde bisher noch nicht wissenschaftlich untersucht. Die Wiederverwendung von tongebundenem Formsand im Kreislaufsystem stellt ebenso einen neuen Ansatz dar [19].

Darüber hinaus sind im Betonbau direkte Formherstellungsverfahren erforderlich, da die im Metallbau üblichen Modellformverfahren, auf Grund der Bauteilgröße, nicht verwendet werden können. In der Gießereitechnik kommen manuelle Schablonierverfahren zur Direktausformung nur bei großen Bauteilen (Schiffsschrauben, Zahnkränzen, Abdeckhauben, etc.) zum Einsatz und sind hier immer noch zeitintensive und sehr anspruchsvolle Handwerksmethoden.

Hier wird ein sinnvoller Einsatz von Robotertechnik gesehen, um für den Betonbau auch eine automatisierte Direktausformung zu ermöglichen.

## 5 Projektbearbeitung

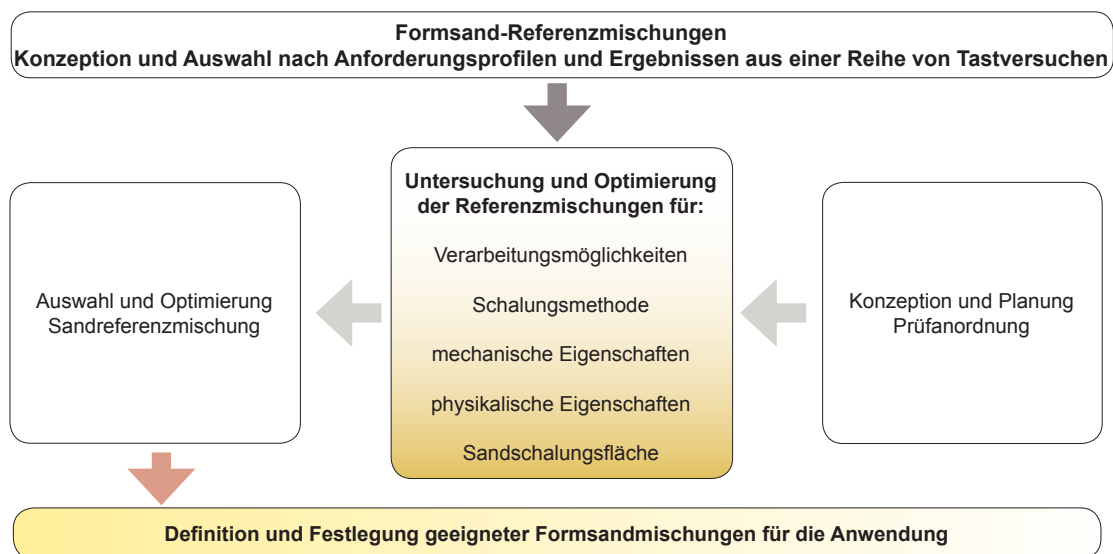
Um den Nachweis über die technische Machbarkeit einer Direktausformung von Formsandgeometrien als geeignete Betonschalung zu erbringen, ging es in den ersten Schritten darum, in experimentellen Machbarkeitsstudien, geeignete Sande, bzw. Sandrezepturen zu finden und die Bearbeitungsmöglichkeiten dieser Formsande zu erkunden.

Weiterhin wurden prinzipielle Vorgehensweisen und Einsatzmöglichkeiten bei der Ausgestaltung von Sandrohlingen als Betonschalung untersucht, um anschließend ein jeweils mögliches Verfahren für eine (teil)automatisierten Produktionsprozess konzipieren zu können.

Die Studien wurden im eigenen Labor und an der Universität, entweder von dem Autor selbst, oder in Workshops mit Studierenden, bspw. im Rahmen von Studienarbeiten, durchgeführt.

Die auf den folgenden Seiten dargestellten Abbildungen zeigen einen Teilausschnitt dieser experimentellen Untersuchungen und ihre Verwendung zum Finden von prozessualen Lösungsansätzen für die Herstellung von geometrisch freigeformten Betonbauteilen.

Gegenstand eines weiteren - sich aktuell in der Bearbeitung befindlichen - Arbeitspaketes, ist die Untersuchung und Ermittlung aller relevanten Prozessparameter von Formsandrezepturen, die für eine automatisierte Herstellung einer Formsandschalung aus tongebundenem Formsand und der Beanspruchung des Formsandes als Schalungsoberfläche für das Material Beton erforderlich sind. Aus der Gießereitechnik ist bekannt, dass bei der Formgebung bildsamer „Formstoffe“ Teilchenverschiebungen, Risse und Brüche auftreten können [38,39]. Die komplexen Materialeigenschaften von Sand-Formstoffen und die Vielzahl von veränderlichen Einflussgrößen erfordern deshalb eine eingehende Untersuchung geeigneter Formsandrezepturen. Abschließend sollen die relevanten Parameter mit maßgeblichem Einfluss: auf die Prozesssicherheit, die Maßhaltigkeit und Oberflächengüte, die erreichbare Festigkeits- und Verdichtungscharakteristik, die auftretenden Prozesskräfte und auf die Prozessgeschwindigkeit, ausreichend beschrieben und bestimmt werden.



**Fig. 6** Übersicht der Iterationstestreihen zur Bestimmung relevanter Einflussgrößen und geeigneter Formsandrezepte



**Fig. 7** Untersuchung der Oberflächenqualität der Sandoberfläche, die aus verschiedenen Sandrezepturen hergestellt wurden





Verwendung hochwertiger Gießereisande

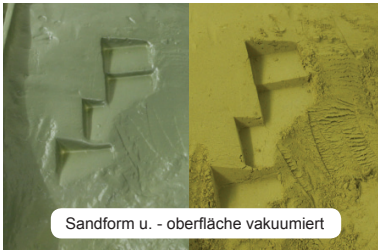
Die Erforschung und Untersuchung der Verarbeitungsmöglichkeiten von Formsand war ein erster wichtiger Schritt, um das Material kennenzulernen und einen Eindruck von möglichen Handhabungswerkzeugen zu gewinnen.



Handwerkzeuge zum Glätten und Verreiben



mechanisches Verdichten, Glätten und Formen



Sandform u. - oberfläche vakuumiert

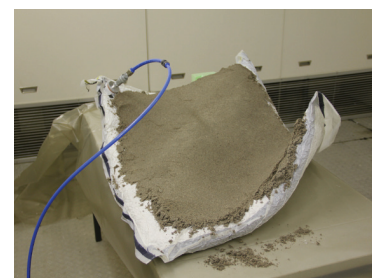
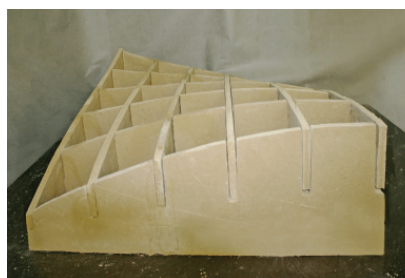


abgezogenes Schalensegment



Illustration Feinheitsgrad

**Fig. 8** Impressionen von den ersten Erkundungen und Untersuchungen der Verarbeitungsmöglichkeiten von Formsand

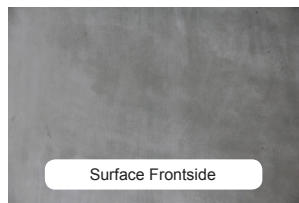


**Fig. 9** Versuche mit gefrorenem Sand, der später z.B. mit Fräsmaschinen bearbeitet werden kann.

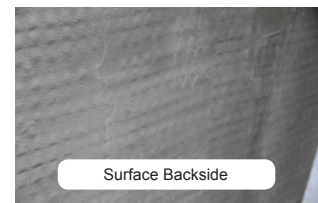
### Herstellung einer freiformgeformten Platte aus textilverstärktem UHPC-Beton



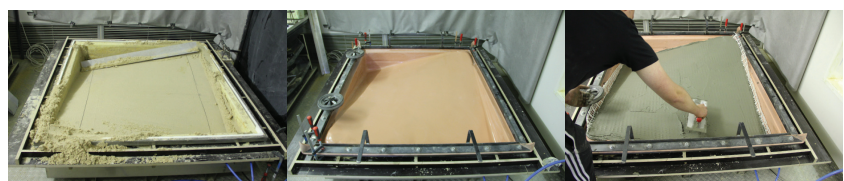
Ausgangspunkt für die Herstellung von flachen Bauteilen ist die Freiformfläche, die dann entweder als Endkontur der Schalungsfläche oder als Formrohling dient, der dann weiter profiliert oder mit Elementen versehen wird. Dieses Beispiel wurde in weniger als zwei Stunden und völlig ohne Abfall produziert.



Surface Frontside



Surface Backside



**Fig. 10** Erste Experimente mit einer frei geformten, abgezogenen Oberfläche, mit vakuumierter Silikon schalungsfläche



Spielerische Experimente mit dem Werkstoff Sand und seinen vielfältigen Einsatzmöglichkeiten eröffnen ungeahnte Perspektiven für mögliche Schalungs- und Prozessbetriebe neuer Bauteilstrukturen. Das in Abb. 11 und Abb. 12 dargestellte Experiment zeigt, wie aus einem einfachen „Sandgeflecht“ eine Sandwichstruktur hergestellt werden konnte, die nicht nur funktional, sondern auch architektonisch von hoher Qualität ist. Würde man hier mit recycelbaren Folienschläuchen arbeiten, wäre dies eine vollständig abfallfreie Verwendung von Sand als Schalungsmaterial.



Fig. 11 Spielerische Experimente mit Sand und seiner Verwendung als Schalungsmaterial

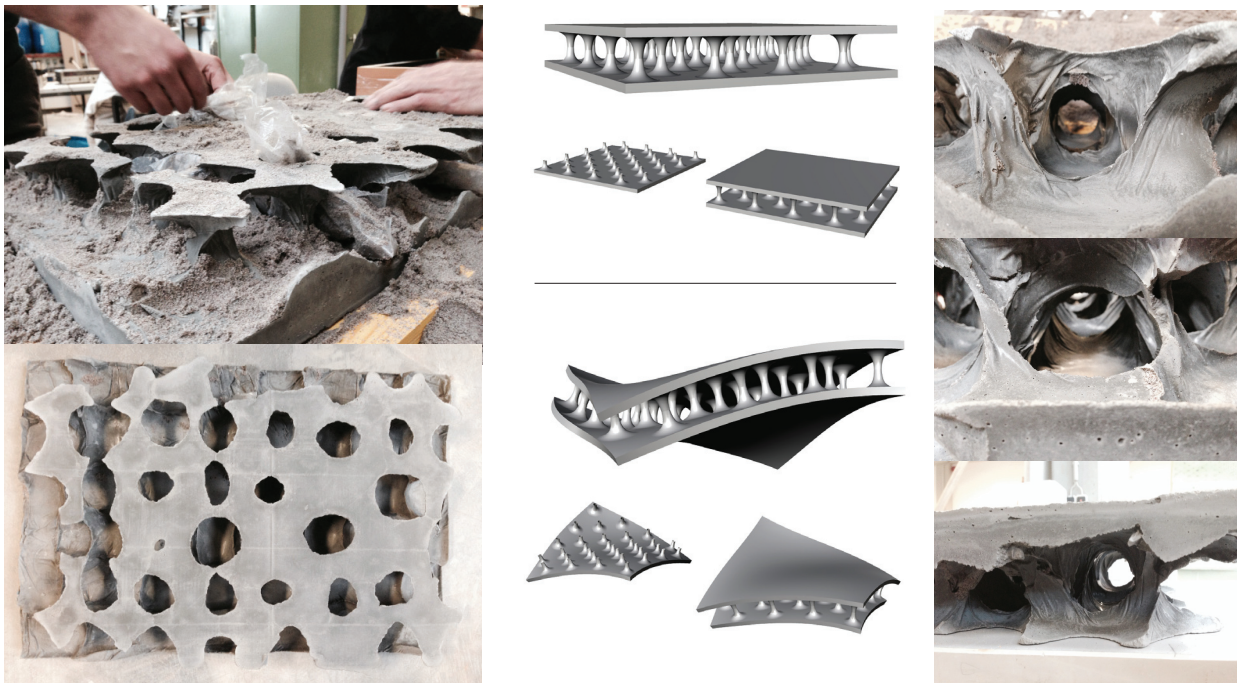


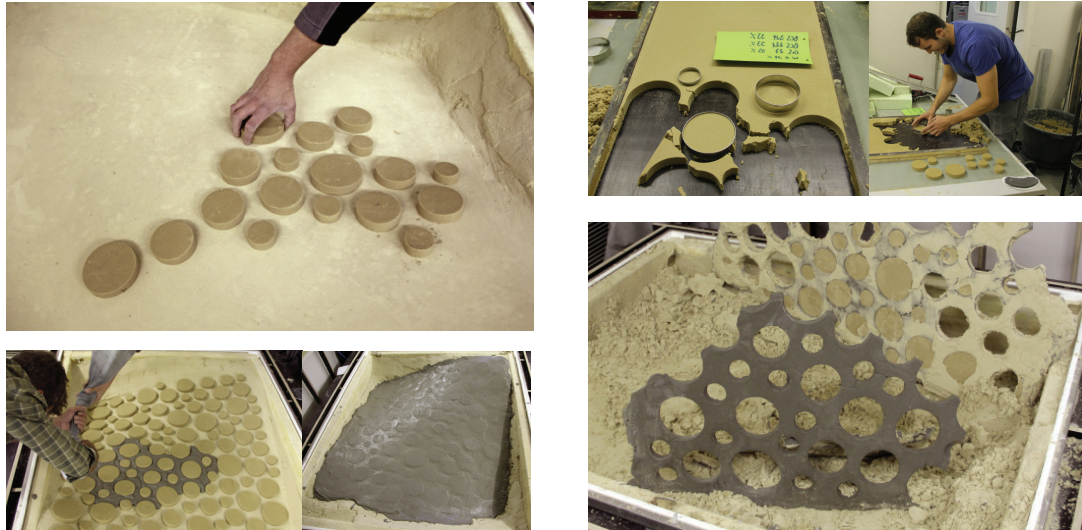
Fig. 12 Experimente für mögliche Schalungs- und Prozessabläufe. Die mittleren Abbildungen zeigen die anschließende idealisierende 3D-Modellierung der experimentell gefundenen Form.



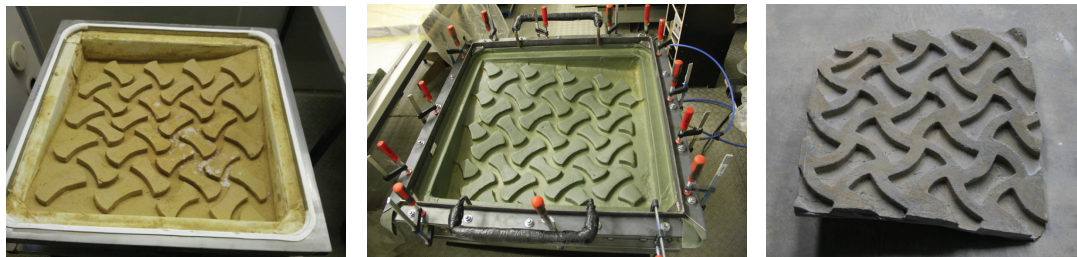
Fig. 13 Entwicklung eines möglichen teilautomatisierten Schalungsherstellungsprozesses.



Der additive Einsatz von Formelementen eröffnet, sowohl konstruktiv, wie auch gestalterisch eine große Vielfalt und Potentiale in der Anwendung.

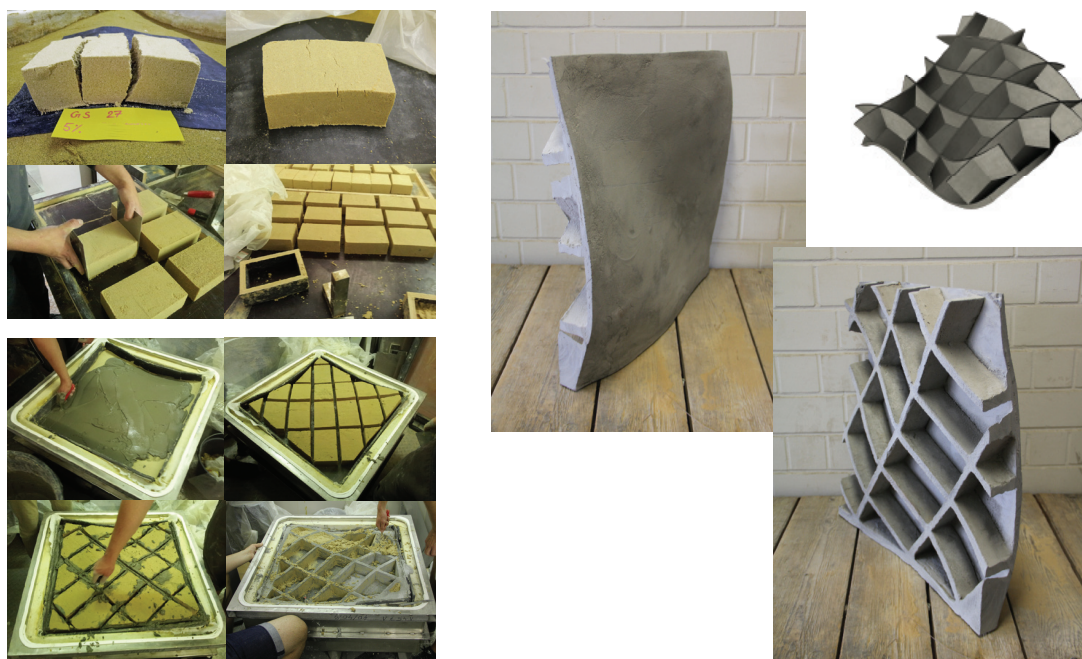


**Fig.14** Aus einfachen Sandelementen -produziert mit relativ leicht herzustellenden Blechformen, zum Ausstechen - lassen sich sehr einfach Netzstrukturen erzeugen.



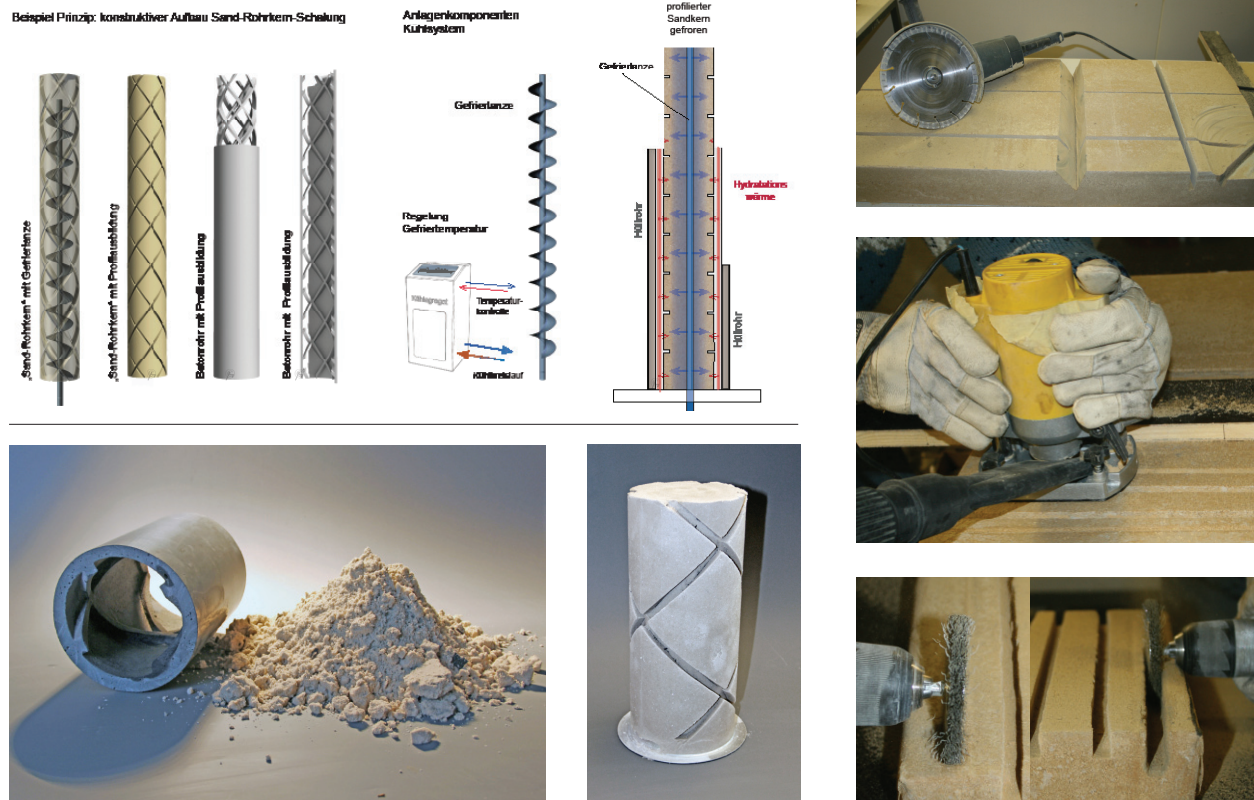
**Fig.15** Anwendung einer generierten Netzstruktur für die Produktion von eines ausgesteiften Plattenelementes

Je nach Anwendung und Anforderungen können die Rezepturen des Formsandes geändert werden. Im folgenden Beispiel war es das Ziel, flexible, verformbare Formsteine herzustellen, die keine großen Risse aufweisen und nicht auseinander fallen.



**Fig. 16** Die Abbildung zeigt die Untersuchung der Eignung verschiedener Formsandrezepturen und die erfolgreiche Herstellung einer freien, gerippten Oberfläche.

Aus gefrorenem Sand lassen sich profilierte Formrohlinge herstellen, die als Schalungskern zur Herstellung von innenprofilierten Rohren verwendet werden können. Die Gefriertechnik aus dem Grundbau wurde für die Gestaltung einer möglichen automatisierten Verarbeitung angepasst. Nach dem Positionieren des Formsandkerns in der Rohrschalung und dem anschließenden Betonieren kann die Temperatur im Sandkern - über die Gefrierlanze - wieder nach oben geregelt werden, damit der Beton beim Aushärten seine gewünschte Festigkeit erreichen kann.



**Fig. 17** Beispiel Produktion eines mit gefrorener Sandform hergestellten Profilrohres und weitere konzipierte Produktion mit möglichen Entwicklungskomponenten. Auf der rechten Seite sind die Verarbeitungsmöglichkeiten von gefrorenem Sand (Schneiden, Fräsen und Bürsten) dargestellt.

## 6 Ergebnisse und weitere Entwicklungen

Die experimentellen Studien haben gezeigt, dass hier eine grundsätzliche Machbarkeit mit einem großen Anwendungsbereich bei der Verwendung von Sand als Schalungsmaterial gegeben ist. Der Sand eignet sich als Schalungsfläche, auch ohne Latex oder Silikonfolie. Er weist je nach Rezeptur eine relativ hohe Dimensionsstabilität auf, mit der auch scharfe Kanten ausgebildet werden können. Das Vakuumieren oder Gefrieren erhöht die Dimensionsstabilität. Im gefrorenen Zustand ist auch eine spanabhebende Bearbeitung möglich.

Aufgrund der Anwendungsvielfalt können Experimente durchgeführt werden, um grundlegende Verfahren und Einsatzmöglichkeiten bei der Konstruktion von Sandrohlingen als Betonschalung zu untersuchen, um anschließend einen möglichen Prozess für einen (teil-)automatisierten Produktionsprozess zu entwerfen.

- Einzelanfertigung freigeformter flächiger und stabförmiger Bauteile  
Bauelemente, Fassaden, Möblierung, Treppen, Skulpturen
- Prototypenbau im Freiformbau  
Bauelemente, Fassaden, Möblierung, Treppen, Skulpturen
- freigeformte u. profilierte Bauteile mit geringfügigen Geometrieabweichungen  
Fassaden-, Wand-, Deckenelemente
- Bauteile mit Hinterschneidungen  
innenprofilierte Rohre, Stab- und Fassadenelemente
- Großflächige Bauteile mit großen Krümmungsradien  
Rohrelemente, Bauelemente für Nutzbauten: Silobau, etc.
- Schalensegmente als verlorene Schalung

**Fig. 18** Übersicht über die Einsatzmöglichkeiten bei der Herstellung und Konzeption von Betonbauteilen



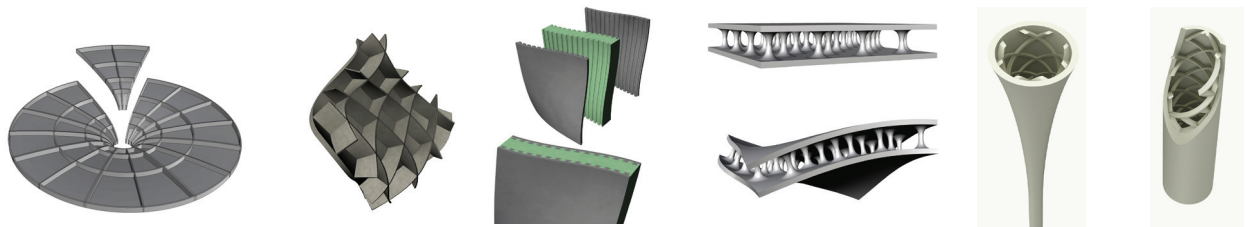


Fig.19 Übersicht über die Einsatzmöglichkeiten bei der Herstellung und Konstruktion von Betonbauteilen

Ein weiterer Machbarkeitstest wurde im Rahmen eines Kunstprojekts mit dem Titel „egocentric system“ durchgeführt. Für eine künstlerische Performance wurde eine segmentierte und parabolisch gekrümmte Betonschale mit einem Durchmesser von 5 Metern als großer Demonstrator in Sandwichkonstruktion realisiert. Das Projekt wurde ohne professionelle technische Einrichtungen, in einer Halle - ohne festen Boden - und von einem motivierten Team von Kunst- und Architekturstudenten durchgeführt und zeigte, dass mit sehr geringem Schalungsaufwand, geringen Kosten und kaum Abfall, eine hochkomplexe und passgenaue Form hergestellt werden konnte.



Fig. 20 Die Abbildung zeigt einen Überblick über die Herstellung einer parabolischen Betonschale in Sandwichbauweise.

## 6.1 Weitere Entwicklungen

Die experimentellen Ergebnisse wurden auch potenziellen Projektpartnern aus dem Anlagenbau für Betonfertigteile und der Vermessungstechnik, sowie Kooperationspartnern aus der Informatik und Robotik vorgestellt und hinsichtlich der Entwicklungsmöglichkeiten einer wirtschaftlichen, nachhaltigen und vielseitigen Schalungsmethode für den großflächigen Freiformbetonbau, im Hinblick auf die zukünftige teilautomatisierte Produktion und Integration in bestehende Anlagentechnik für Betonfertigteilerhersteller, positiv bewertet.



In einer gemeinsamen Diskussion wurde ein teilautomatisierter Produktionsprozess, basierend auf der Anlagentechnik eines Betonfertigteilherstellers, als zukünftiges Forschungsprojekt konzipiert und projektiert.

Neben der Entwicklung geeigneter Formsandrezepturen, liegt der Schwerpunkt dieses Forschungsprojektes auf der Entwicklung einer mit Schablonenwerkzeugen ausgestatteten Roboterereinheit, die auf einem Portal integriert ist.

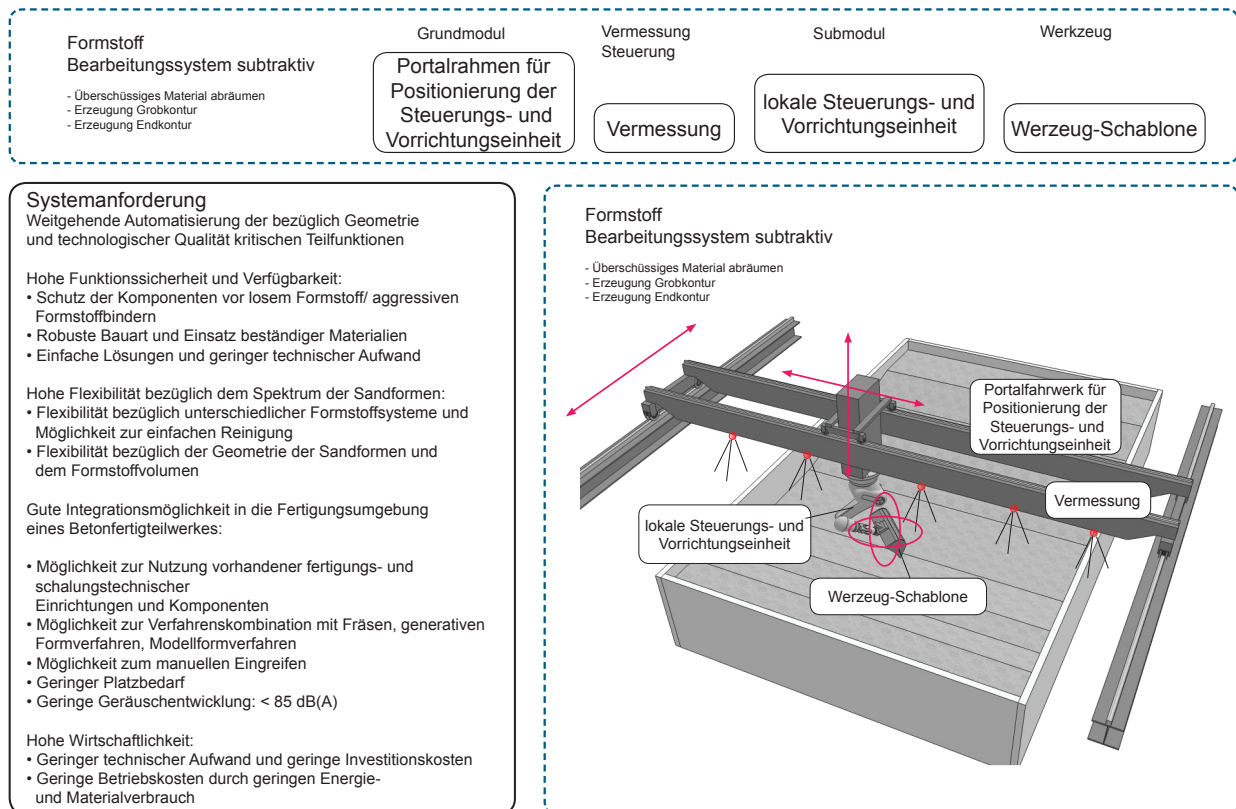
Anhand von Messdaten kann die Roboterereinheit unabhängig von der Topologie der Schalung gesteuert werden, um die Endkontur der Schalung zu formen. Zu diesem Zweck sind auch der Aufbau eines geeigneten Messsensordsystems, das die Topologie des Sandrohrlings in Echtzeit erfasst, und die Entwicklung einer Software, die die Messdaten sowohl für die visuelle Darstellung, als auch für die Generierung der Steuerbefehle der Roboterereinheit aufbereitet, von großer Bedeutung.

Die eingesetzte Lasermesstechnik soll die Entwicklung der Form unterstützen, sowohl bei der manuellen Herstellung des Formsandrohrlings als auch bei der automatisierten Herstellung der Endform.

Für die manuelle Verarbeitung wird eine visuelle Darstellung der Messdaten in einem Soll-Ist-Vergleich und für die automatisierte Verarbeitung ein entsprechendes Softwareverfahren bereitgestellt, das - ebenfalls aus einem Soll-Ist-Vergleich - aus den Messdaten Trajektorien erzeugt und als Steuerbefehle an die Roboterereinheit übermittelt.

Manuelle Eingriffe sollten auch in den entwickelten automatisierten Formungsprozess möglich sein. Gerade im Betonbau kommt es häufig vor, dass bauteilspezifische Verankerungs-, Bewehrungs- und Stützelemente im Vorfeld in das Bauteil und damit auch in die Schalung integriert werden müssen.

Dies kann in vielen Fällen effizienter manuell durchgeführt werden als die Entwicklung komplexer Prozesswerkzeuge oder -verfahren. Die messtechnische Unterstützung bei der Positionierung ist hier bereits ausreichend und wäre auch mit der vorgesehenen Messtechnik möglich.



**Fig. 21** Erste Konzeption der Systemkomponenten: Automatisierte Modellierung von großflächigen Sandformen

## 7 Resume und Ansätze für die Zukunft

Bei der hier vorgestellten Forschungsarbeit geht es nicht nur um die Entwicklung eines teilautomatisierten Herstellungsprozesses im Betonbau, der es ermöglicht, die in der Planung generierten Daten, über topologieoptimierte freigeformte Bauteil(e)strukturen, auch in einen wirtschaftlichen und effizienten Produktionsprozess zu überführen und der darüber hinaus auch eine umweltverträgliche Lösung für die Schalungsherstellung sein kann.

Mit dieser Forschungsarbeit soll auch Position bezogen werden, in der Herangehensweise, bei der weiteren Entwicklung der Produktionstechnik in Bereichen des Bauwesens. Die dabei zu berücksichtigenden Aspekte wurden unter Punkt 3 und 4 dieses Abstracts kurz im Detail angesprochen und in einer kleinen Zusammenfassung benannt.

Der wohl wichtigste Aspekt dabei ist, neben dem methodischen Vorgehen, die Implementierung heuristischer Ansätze in den Prozess der Entwicklung und der Produktion von Bauteilen, so wie es in vielen anderen Wissensgebieten und Wissenschaftsbereichen ebenso erfolgreich praktiziert wird, auch im Bauwesen einzuführen.

In dem vorliegenden Fall heißt das auch, die manuellen Bearbeitungsmöglichkeiten in einen teilautomatisierten Produktionsprozess zu integrieren, um so Iteration, Implementierung von Prozessexternen Elementen, Experiment, handwerkliche und kreative Arbeit und Gestaltung, bei der Entwicklung und Produktion komplexgeformter Betonbauteile, zu ermöglichen.

So kann kreatives Denken, mit einfallsbetonter Ideenfindung beim „Konzipieren und Entwerfen“, sich mit einem systematischen Vorgehen zu einer Einheit verbinden und es finden sich eher Möglichkeiten, die immer weiter heranwachsenden Komplexitäten im Planungswesen zu bewältigen.

Wir verfügen heute über faszinierende und ausgezeichnete Planungstools, um technische Konstruktionen und gebaute Umwelt nicht nur zu entwerfen und zu visualisieren, sondern auch zu produzieren. Die Ideen und Fantasien, die wir dazu benötigen, speisen sich jedoch aus den Energien unserer sinnlichen Erfahrungen im Experiment, im praktischem Machen und Tun, in Beruf und Alltag, und im Miteinander mit unserer Umwelt. Es kommt also darauf an, in welchem Erzählrahmen wir diese Ergebnisse interpretieren und bewerten. Dabei können wir uns -besonders im Bauwesen - auch fragen, ob wir den technischen Fortschritt an sich oder nicht eigentlich auch den sinnvollen Umgang damit und die Interaktion der Technik mit dem Menschen und ihre Auswirkung auf die Umwelt in den Vordergrund stellen.

### References

#### **webpages „Textilbewehrter Hochleistungsbeton“ (UHPC)**

[1] Homepage des SPP 1542: <http://spp1542.tu-dresden.de/>.

#### **webpages Schalungssysteme (formwork-systems)**

[2] Dokumentation Spencer.Dock.Bridge: <http://www.nedcam.com/spencer-dock-bridge-dublin.htm> (02.01.2015)

#### **Schalungssysteme (Formworksystem)**

[3] Hofstadler, C.: Schalarbeiten. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2008.

[4] Kowalski, R.-D.: Schaltechnik im Betonbau. Düsseldorf: Werner Verlag, 1984.

[5] Rathfelder, M.: Moderne Schalungstechnik. München: Mi-Wirtschaftsbuch, 1992.

[6] Grupp, P.: Schalungsatlas, Verlag Bau und Technik, 2009

[7] Hoffmann, F. H.: Schalungstechnik mit System. Berlin: Bauverlag, 1999.

[8] Hoffmann, F.; Motzko, C.; Corsten, B.: Aufwand und Kosten zeitgemäßer Schalverfahren. 3. Aufl., Neu-Isenburg: Zeittechnik Verlag, 2012.

[9] Knaak, U.; Michel M.: Grundlagen zur Entwicklung adaptiver Schalungssysteme für frei geformte Betonschalen und Wände, Veröffentlichung im DFG-Schwerpunktprogramm SPP 1542

[10] Schipper, R.; Grünewald, S.; Raghunath, P.: Rheological parameters used for deliberate deformation on a flexible mould after casting. In: Roussel, N.; Bessaies-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.

[11] Schipper, R.; Janssen, B.: Manufacturing Double Curved Precast Concrete Panels. CPI – Concrete Plant International (2011), Heft 4, S. 32–38.

[12] 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 International PhD Symposium in Civil Engineering, Karlsruhe Institute of Technology (KIT), 22.–25.07.2012, Karlsruhe, Germany. KIT Scientific Publishing, Karlsruhe, 2012, S. 281–289.

### **Formsande (moulding Sand)**

- [13] Boenisch, Dietmar: Einfluss der Zusammensetzung und Verdichtung von Naßgusssanden auf die Druck- und Zugfestigkeit von Prüfkörpern und Sandformen. Teil 1. In: Giesserei 53 (1966) Nr. 18, S. 565-574
- [14] Boenisch, Dietmar: Einfluss der Zusammensetzung und Verdichtung von Naßgusssanden auf die Druck- und Zugfestigkeit von Prüfkörpern und Sandformen. Teil 2. In: Giesserei 53 (1966) Nr. 21, S. 706-715
- [15] Boenisch, Dietmar: Einfluss der Zusammensetzung und Verdichtung von Naßgusssanden auf die Druck- und Zugfestigkeit von Prüfkörpern und Sandformen. Teil 3. In: Giesserei 53 (1966) Nr. 22, S. 748-752
- [16] Egen, Hans Walter; Döpp, Reinhard; Flemming, Eckart: Bewertung der Verdichtung tongebundener Formsande durch relative Festigkeitsmerkmale der Form. In: Giesserei 85 (1998) Nr. 7, S. 61-66
- [17] Flemming, Eckart; Tilch, Werner: Formstoffe und Formverfahren. 1. Aufl. Leipzig, Stuttgart: Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, 1993
- [18] Kudaschov, Vitali: Modellierung, Softwareentwicklung und Simulation der Verdichtungs Vorgänge bei der Formherstellung mit tongebundenen Formstoffen. Freiberg, Technische Universität Bergakademie, Diss., 2000
- [19] Tilch, W.; Grefhorst, C.; Kleinmann, W.: Bentonite als Formstoffbinder – eine praxisnahe Bewertung der Eigenschaften. Teil 2. In: Gießerei-Praxis (2003) Nr. 2, S. 61-69
- [20] Tilch, W.; Polzin, H.: Formstoffe, Formverfahren und Maschinen zur Form- und Kernherstellung, Formstoffaufbereitung und Regenerierung. In: Gießerei-Praxis (2003) Nr. 9, S. 361-377