



**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**

Automatisierte Herstellung funktional gradierter Betonbauteile

Mark Wörner
Oliver Sawodny

Institut für System-
dynamik (ISYS),
Universität Stuttgart

Die Gradierung von Beton ermöglicht eine funktionale Adaption der inneren Struktur respektive der Eigenschaften eines Bauteils an das vorherrschende statische und bauphysikalische Belastungsprofil. In diesem Kontext stellt die Automatisierung der Herstellungsverfahren insbesondere zur reproduzierbaren Herstellung von gradierten Betonbauteilen einen zentralen Aspekt dar. Dabei muss der gesamte Prozess, vom Entwurf des Bauteils über die Übernahme des CAD-Modells, der anforderungsabhängigen Mischung, Dosierung und Förderung des Betons bis hin zum Materialauftrag in eine Prozesssteuerung und Regelung integriert werden. Die Konzeption, Auslegung und anschließende Umsetzung der automatisierten Prozesskette in einem Prototypen der Herstellungsplattform sowie die Entwicklung des Steuerungs- und Regelungskonzeptes bilden die Eckpunkte des ISYS im Rahmen des Kooperations-Forschungsvorhabens *Optimalstrukturen aus funktional gradierten Betonbauteilen – Entwurf, Berechnung und automatisierte Herstellung*.

1 Grundlagen der Gradiententechnologie

Bei Bauteilen aus funktional gradierten Werkstoffen werden die Materialeigenschaften im Bauteilinneren in bis zu drei Raumrichtungen kontinuierlich geändert (gradiert) und dadurch optimal an die lokalen Anforderungen angepasst [1]. Dieses Konzept der Gradierung von Materialien hat zahlreiche Vorbilder in der Natur. Ein vielzitiertes Beispiel ist der innere Aufbau von Knochen (Spongiosa), bei dem durch die beanspruchungsgemäße Ausrichtung der Knochenbälkchen (Trabekel) gradierte Strukturen gebildet werden, vergleiche unter anderem [2]. Die Morphologie der Strukturen ist dabei das Resultat biologischer Wachstumsprinzipien in Reaktion auf äußere Einflüsse während der Wachstumsphase [3].

Die systematische Übertragung dieses bionischen Optimierungskonzeptes begann 1972 mit der Erforschung gradierter Materialstrukturen am Massachusetts Institute of Technology (MIT) mit der Beschreibung der gradierten Variation von Fasergehalt und -ausrichtung in Polymermatrices [4]. Der Transfer des Forschungsbereichs der Gradientenwerkstoffe auf Anwendungen in der Architektur und der Bautechnik und damit auf eine neue Maßstabebene wurde mit der Formulierung der Idee der Gradientenbetone durch Professor SOBEK vorgenommen. Die Weiterentwicklung erfolgte am Institut für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren der Universität Stuttgart im Rahmen mehrerer Forschungsvorhaben [5], [6] und [7].

Einen wichtigen Aspekt bei der Erforschung der Gradientenbetontechnologie stellt dabei die Entwicklung von Herstellungsmethoden für eine zielgenaue sowie reproduzierbare Steuerung der Eigenschaftsverläufe innerhalb der Bauteile dar. Im Rahmen der Forschungsvorhaben haben sich zur manuellen Herstellung der Gradierung insbesondere generative Fertigungstechniken sowie Sprühtechniken als zielführend herausgestellt [7].

Angesichts der Komplexität und der Vielzahl an zu steuernden respektive zu regelnden Prozessgrößen, wie beispielsweise Applikationsabstand der Ausbringvorrichtung, Wasserzufuhr, Förderdruck oder auch die Applikationsbewegung der angestrebten



Bild 1: Prototyp der Herstellungsplattform für gradierte Betonbauteile

[Foto: Mark Wörner]

Realisierung, ist die Entwicklung von automatisierten Herstellungsmethoden zwingend notwendig. Daher erfolgt aktuell die Weiterentwicklung der Forschungsarbeit im Rahmen des Forschungsvorhabens *Optimalstrukturen aus funktional gradierten Betonbauteilen – Entwurf, Berechnung und automatisierte Herstellung* in einer interdisziplinären Kooperation der Institute für Leichtbau, Entwerfen und Konstruieren (ILEK), für Werkstoffe im Bauwesen (IWB) und für Systemdynamik (ISYS) der Universität Stuttgart. Primäre Forschungsziele des ISYS sind dabei die Zusammenführung der Einzelaspekte der interdisziplinären Forschergruppe in einer automatisierten Prozesskette respektive Regelung sowie der Aufbau eines Prototyps der Herstellungsplattform, der in Bild 1 zu sehen ist.

2 Automatisierung der Betonapplikation

Für die Entwicklung effizienter Methoden zur Eigenschaftsgradierung ist die Automatisierung der Prozesskette zur reproduzierbaren Herstellung von Bauteilen von zentraler Bedeutung. Dabei muss der gesamte Prozess vom Entwurf, der anforderungsabhängigen Materialzufuhr der Betonkomponenten, der Förderung, Dosierung und Mischung bis zur Applikation des Betons in eine Prozessregelung integriert werden. Hierbei stellen die Verfahren des Nass- und insbesondere des Trockenspritzens zur gradierten Herstellung von Betonbauteilen erhebliche Anforderungen an die Materialtechnologie, die Betonspritztechnik und an das Applikationssystem, siehe [7].

Aufgrund des hohen Potentials und der vielfältigen Einsatzmöglichkeiten von Betonspritzverfahren wurden in der Praxis und Forschung eine Vielzahl von (teil-)automatisierten Systemen entwickelt, siehe unter anderem [8], [9] und [10]. Des Weiteren

wird an diversen Forschungseinrichtungen (z. B. an der ETH Zürich oder der Loughborough University) an der Vollautomatisierung der Spritzbetonapplikation gearbeitet. Eine Vollautomatisierung ermöglicht hohe Verarbeitungsmengen bei gleichbleibender Qualität und Bauteilstärke [10], [11]. Dabei werden neben ersten Ansätzen zur Modellierung des Spritzvorganges [10] auch das Drucken von Beton analysiert [12], wobei zur Automatisierung des Applikationssystems hauptsächlich 3-Achs-Kinematiken zum Einsatz kommen. Die Automatisierung bietet die Möglichkeit der reproduzierbaren und wirtschaftlichen Herstellung komplexer Geometrien. Diese Systeme ermöglichen es, definierte Schichtstärken einer Betonrezeptur mit konstanter Qualität und hoher Effizienz zu applizieren. Mit diesen Verfahren können jedoch ausschließlich Bauteile mit homogener Materialbelegung hergestellt werden. Um eine zielgerichtete Manipulation der Materialeigenschaften zu ermöglichen und somit den spezifischen Anforderungen des gradierten Materialauftrags gerecht zu werden, besteht die Notwendigkeit, diese Systeme sowohl hinsichtlich der Applikationssystematik als auch bezüglich der Betonspritztechnik weiterzuentwickeln.

Hierzu wurde auf Basis der Vorarbeiten sowie experimenteller Untersuchungen im Rahmen des Forschungsprojektes eine Prozesskette zur teilautomatisierten Herstellung von funktional gradierten Betonbauteilen konzipiert, ausgelegt und umgesetzt. Zentrale Elemente hierbei sind das Verfahren zur Applikation des Betons inklusive der Druckluftanlage, das Applikationssystem respektive der Manipulator sowie die Prozesssteuerung und -regelung.

3 Manipulator

Systematische Analysen der Düsenführung bei Betonspritzverfahren und deren Einfluss auf den Spritzbeton wurden von GUTHOFF [13] und DIECKEN [14] durchgeführt, siehe auch [7]. Diese ergaben, dass die Applikationstechnik prinzipiell in eine Düsenführungsbewegung und eine Düseneigenbewegung aufgeteilt werden kann. Die Düsenführungsbewegung wird durch die Form der Bewegung, die Bewegungsgeschwindigkeit, den Düsenabstand sowie den Düsenwinkel zur Auftragsfläche bestimmt. Die Düseneigenbewegung wiederum kann durch die Form der Eigenbewegung, die Größe (Radius/Amplitude) und die Geschwindigkeit (Frequenz) spezifiziert werden. Diese prozessdeterminierenden Parameter besitzen dabei entscheidenden Einfluss auf die Spritzbetonqualität, das Rückprallverhalten und die Staubentwicklung des Prozesses. Beispielsweise besteht die Möglichkeit, durch eine kreisförmige Eigenbewegung der Düse im Vergleich zu einer starren Düsenführung die Gleichmäßigkeit des Schichtauftrags drastisch zu erhöhen sowie den Rückprall als auch die Feinstaubkonzentration zu minimieren [14]. Dies ist auf eine bessere Durchmischung der Komponenten der Betonrezeptur und somit eine Verbesserung der Homogenität zurückzuführen. Dieser Effekt kann durch Vergrößerung der Radien und durch Erhöhung der Frequenz der Düseneigenbewegung verstärkt werden [13].

Um diesen Einflüssen auf den Spritzbeton Rechnung zu tragen, wurde am ISYS ein Manipulator entwickelt und realisiert, siehe Bild 2. Dieser erlaubt die systematische Einstellung und Untersuchung der prozessdeterminierenden Variablen des Applikationssystems. Die Düsenführungsbewegung wird dabei mittels eines Schwerlast-Portalsystems ausgeführt, welches drei Freiheitsgrade und einen quaderförmigen Arbeitsraum besitzt (Länge 3 Meter, Breite 3 Meter, Höhe 1,5 Meter). Zur dreidimensionalen Orientierung der Ausbringvorrichtung respektive Düse und zur Realisierung von unterschiedlichen Düseneigenbewegungen ist am Portal eine sogenannte STEWART-GOUGH-Plattform mit sechs Freiheitsgraden montiert [15]. Dieser parallele Mechanismus erlaubt es, unter anderem aufgrund des günstigen Verhältnisses von Eigengewicht zur Nutzlast, hochdynamische Bewegungen auszuführen und dabei sowohl große Prozesskräfte zu



übertragen als auch eine hohe Positioniergenauigkeit zu erreichen. Insgesamt besitzt der entwickelte Manipulator neun Freiheitsgrade, wobei durch die Redundanz einzelner Freiheitsgrade eine energieeffiziente und zeitoptimale Applikation des Spritzbetons realisiert werden kann.

4 Betontechnologie

Neben dem Applikationssystem besitzt die Gesamtmaschinenkonzeption der Betontechnologie einen entscheidenden Einfluss auf die Herstellung funktional gradierter Betonbauteile. Im Rahmen der Arbeit der interdisziplinären Forschergruppe, siehe auch [7], stellte sich dabei zur Gradierung insbesondere das Trockenspritzverfahren als zielführend heraus. Die prozessdeterminierenden Parameter dieses Verfahrens können dabei in vier Bereiche eingeteilt werden [16]: Maschinentyp, Art der Energiezufuhr, Förderleitung (Durchmesser und Länge) sowie Art und Ort der Wasserzugabe. Insbesondere die eingebrachte Luftmenge sowie die Art und der Ort der Wasserzugabe haben beim Trockenspritzverfahren zentralen Einfluss auf die Spritzbetonqualität, das Rückprallverhalten und die Staubentwicklung. Detaillierte Untersuchungen können unter anderem [13] und [14] entnommen werden. Beispielsweise ist es möglich, durch eine Vorbenetzung und eine Optimierung der Benetzungsstrecke die Feinstaubkonzentration und den Rückprall zu minimieren [14].

Zur Herstellung der funktionalen Gradierung werden aktuell zwei unterschiedliche Methoden verfolgt. Zum einen wird die Gradierung mit Hilfe einer Zwei-Düsentechnologie hergestellt, vergleiche [14]. Bei diesem Verfahren werden zwei konträre Betonrezepturen beim Materialauftrag respektive durch Überlagerung der Sprühstrahlen funktional gradiert. Aufgrund der Förderung der Ausgangsmaterialien mittels eines Luftvolumenstroms ergeben sich durch die Überlagerung der Sprühstrahlen Strömungsturbulenzen beim Materialauftrag. Diese Turbulenzen können durch Variation des Abstandes der Düsen sowie der entsprechenden Düsenwinkel reduziert, jedoch nicht vermieden werden. Um dieser Problematik entgegenzuwirken, wurde am ISYS eine alternative Methode zur Herstellung entwickelt, siehe Bild 3. Hierbei werden zwei Betonsilos mit zwei unterschiedlichen Betonrezepturen mittels eines Zwangsmischers gefüllt, vergleiche [7]. Über ein Förderband mit Wiegeeinrichtung werden anschließend, in Abhängigkeit der gewünschten Gradierung des Betonbauteils, diese Betonmischungen jeweils einer Rotortrockenspritzmaschine zugeführt, welche mit einem definierten Luftdruck und Volumenstrom den trockenen Beton fördert. Die Herstellung der Gradierung wird durch eine Zusammenführung der Betonmischungen mittels eines Y-Rohrstückes mit Strömungskörper erreicht. Der Strömungskörper induziert dabei gezielt Turbulenzen, wodurch eine vollständige Durchmischung der Betonkomponenten entsprechend den

*Bild 2:
Portalsystem zur
Realisierung der
Düsenführungs-
bewegung und
STEWART-GOUGH-
Plattform zur
Realisierung der
Düseneigenbewe-
gung und Düsenori-
entierung [Foto:
Gabriela Metzger]*

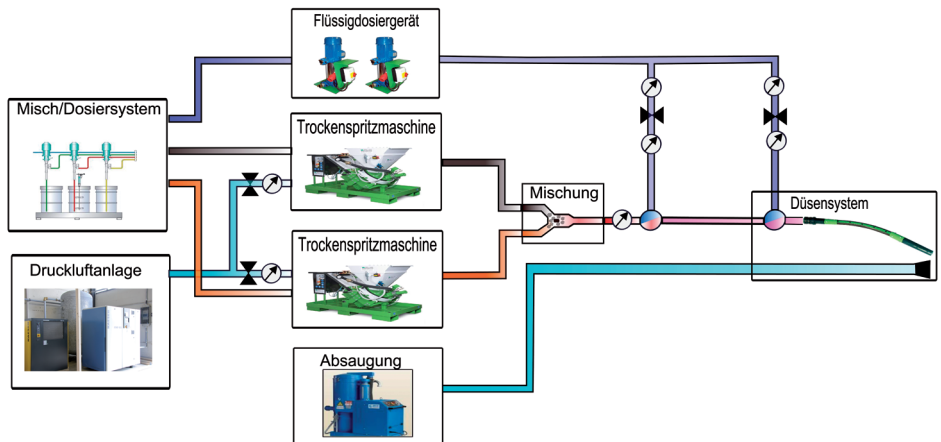


Bild 3: Schematischer Aufbau der verfahrenstechnischen Komponenten der Betontechnologie zur Herstellung funktional gradierter Betonbauteile.

Anforderungen an die Eigenschaften des Betonbauteils erzielt wird. Mittels eines Flüssigdosiergeräts wird vor sowie in der Düse die Benetzung des Betons durchgeführt. Die Reduktion des unerwünschten Einbaus des Rückpralls der Spritzbetonkonglomerate wird durch eine Absaugung sichergestellt.

Die Umsetzung dieser Methoden im Rahmen des Prototyps der Herstellungsplattform erfordert dabei neben der Automatisierung der verfahrenstechnischen Komponenten der Betontechnologie und der mechanischen Integration in den Herstellungsprozess die dynamische Modellierung des Applikationsprozesses. Neben den Mischungsanlagen stellen hierbei die Förderung des Materials sowie der Materialauftrag zentrale Elemente dar. Insbesondere die Spritzbetonabscheidung respektive die Ausbildung des Sprühstrahles ist hierbei entscheidend für die Planung der Trajektorien der Ausbringvorrichtung, vergleiche Abschnitt 5.

Daher werden zur Modellierung zwei unterschiedliche Methoden verfolgt. Zum einen die experimentelle Modellierung, bei welcher beispielsweise die Modellierung der Spritzbetonabscheidung mittels charakteristischer Spritzstreifen in Abhängigkeit der Prozessparameter durchgeführt wird, siehe auch [8], [10].

Zum anderen wird zur Analyse des Einflusses der Prozessparameter ein Ansatz zur analytischen Modellierung auf Basis der Bilanz der Massenströme und der Grund-

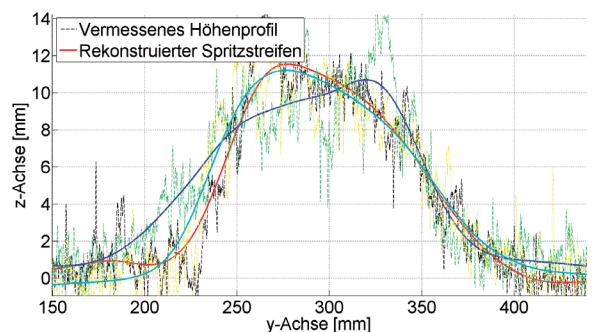


Bild 4: Spritzbetonapplikation und experimentell ermittelte Spritzstreifen

[Foto: Stefan Neuhäuser]

gleichungen der Strömungsmechanik in Abhängigkeit der Prozessparameter verfolgt. Partikel-/Strömungsinteraktionen werden qualitativ mittels der Open-Source-Software CFDEM analysiert, siehe [17], [18]. Bild 4 zeigt die Herstellungsplattform in Betrieb respektive den Materialauftrag sowie für spezifische Prozessparameter experimentell ermittelte Spritzstreifen. Auf Basis der vermessenen Profile der Spritzbetonabscheidung ist es möglich für die jeweiligen Prozessparameter sogenannte charakteristische Spritzstreifen abzuleiten.

5 Prozessführung, Steuerung und Regelung

Der Sprühvorgang im Gradientenbeton-Verfahren erfordert eine hohe dynamische Positioniergenauigkeit der Düse und eine Synchronisation mit den gesprühten Mischungen, um definierte Gradientenübergänge zu erreichen. Für die automatisierte Umsetzung dreidimensionaler gradierter Betonbauteile müssen Ablaufsteuerung, Trajektoriengenerierung, Regelung und Prozessführung in einem Gesamtkonzept integriert werden und auf die Problemstellung angepasst sein. Hierzu ist es insbesondere zur reproduzierbaren Herstellung funktional gradierter Betonbauteile erforderlich, die Einzelaspekte der interdisziplinären Forschergruppe zusammenzuführen. Ziel der Prozessregelung ist es, dass Bauteil Schicht für Schicht aufzubauen.

Der schematische Aufbau der automatisierten Prozesskette inklusive Steuerung und Regelung kann Bild 5 entnommen werden. Der Prozessregelung werden dabei nach dem Entwurf neben den geometrischen Abmessungen die gewünschten Eigenschaftsverläufe des Bauteils, beispielsweise der Porosität, übergeben. Um die innere Struktur entsprechend des Anforderungsprofils zu gradieren und um frei definierbare Schichtdicken zu ermöglichen, werden anschließend Trajektorien für den Manipulator erzeugt, die die Dynamik des Applikationsprozesses unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Spritzbetonkonglomerate und die erfassten charakteristischen Spritzstreifen berücksichtigen, vergleiche Abschnitt 4. Entsprechend dieser Solltrajektorien werden die Materialzufuhr sowie die Ventile, beispielsweise der Wasser- und Luftzufuhr, geregelt. Die Düsenführungs- und Düseneigenbewegung wird dabei mittels des Manipulators realisiert. Nach der Applikation einer Schicht wird diese mittels eines Laserdistanzsensors vermessen und die Trajektorien entsprechend des Materialauftrages in der Prozessregelung adaptiert. In diesem Prozessschritt wird gleichzeitig der Rückprall der Spritzbetonkonglomerate mittels der Absaugung entfernt.

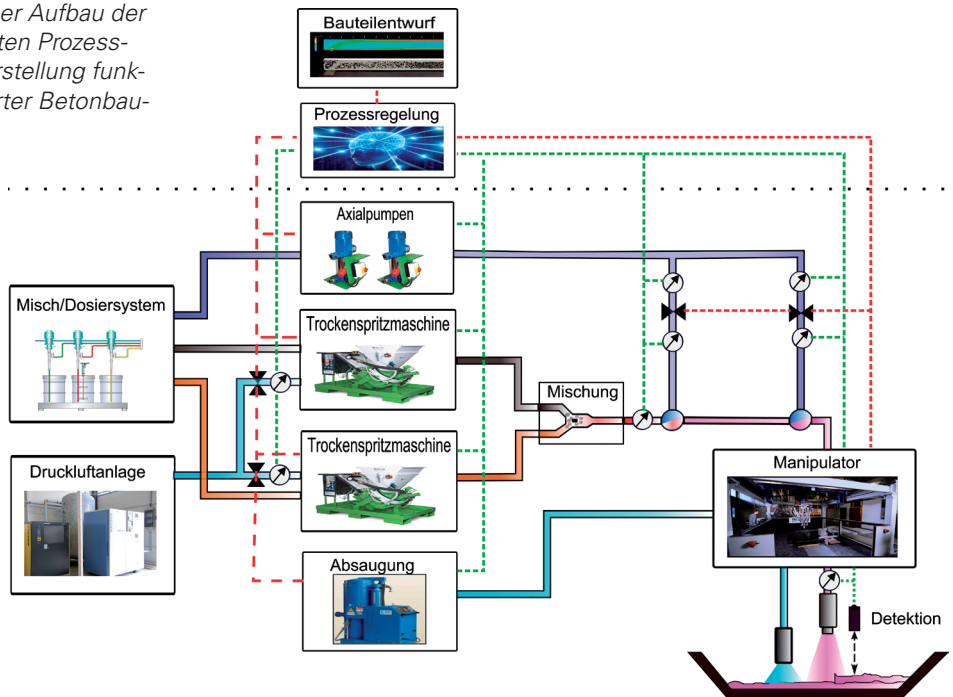
6 Zusammenfassung und Ausblick

Nach dem jetzigen Stand der Forschungsarbeiten im Rahmen des Projektes *Optimalstrukturen aus funktional gradiertem Beton* lässt sich zusammenfassend festhalten, dass das Ziel der Umsetzung einer automatisierten Prozesskette in einem Prototyp der Herstellungsplattform erreicht wurde. Dies beinhaltet die Zusammenführung der Einzelaspekte der interdisziplinären Forschergruppe in einer Prozesssteuerung und -regelung.

In der letzten Phase des aktuellen Forschungsprojektes werden die Prozesssteuerung und Regelung sowie die zu Grunde liegenden dynamischen Modelle am realen System verifiziert. Basierend auf diesen Ergebnissen werden die Parameter der Modelle optimiert sowie die Prozesssteuerung und -regelung an die Erfordernisse des automatisierten Betriebs angepasst.

Die vielversprechenden Ergebnisse im Rahmen des Forschungsprojektes motivieren zu einer Weiterverfolgung der Thematik. Bei ersten Versuchsreihen konnte dabei die grundsätzliche Machbarkeit sowie die Notwendigkeit und Vorteilhaftigkeit der Automa-

Bild 5: Schematischer Aufbau der automatisierten Prozesskette zur Herstellung funktional gradierter Betonbauteile



tisierung des Prozesses für exemplarische Anwendungsbereiche gezeigt werden, siehe dazu die Beiträge der Projektpartner ILEK und IWB in der hier vorliegenden Monografie.

Die experimentellen Untersuchungen zeigen jedoch auch, dass durch die aktuelle Prozesskette das Eigenschaftsspektrum der Betonmischungen eingeschränkt ist. Um dieser Problematik entgegenzuwirken, muss im Hinblick auf die Realisierung multifunktionaler gradierter Betonbauteile zum einen die automatisierte Prozesskette weiterentwickelt werden, beispielsweise durch eine Induktion von mineralisierten Hohlkörpern in den Sprühstrahl. Zum anderen gilt es, durch Adaption der Prozessparameter respektive der Prozessregelung eine gezielte Manipulation der Sprühstrahlen zu ermöglichen.

Besonderer Dank gilt an dieser Stelle der Deutschen Forschungsgemeinschaft für die Förderung des Forschungsvorhabens *Optimalstrukturen aus funktional gradierten Betonbauteilen* als Teil des Schwerpunktprogramms 1542 *Leicht Bauen mit Beton*. Weiterer Dank gilt den Industriepartnern Festo AG & Co KG, Kaeser Kompressoren AG, Knecht GmbH und Co KG, Sika, W. Mader GmbH und Winkel GmbH für die großzügige Unterstützung mit Geräten und Materialien.

7 Literatur

- [1] SOBEK, W.; HERRMANN, M.; HAASE, W.: Gradientenbetone. Beton- und Stahlbetonbau (zur Veröffentlichung angenommen).
- [2] PUTZ, R.; PAPST, R.: SOBOTTA – Atlas der Anatomie des Menschen. 21. Auflage, München: Urban & Fischer, 2000.
- [3] SCHMIDT, T.: Entwicklung einer Apparatur zur Analyse des Einflusses mechanischer Kräfte auf osteogene Progenitorien und mesenchymale Stammzellen. Dissertation, Universität Tübingen, 2008.
- [4] BEVER, M. B.; DUWEZ, P. E.: Gradients in composite materials. Materials Science and Engineering 10 (1972), S. 1–8.

- [5] HEINZ, P.; HERRMANN, M.; SOBEK, W.: Herstellungsverfahren und Anwendungsbereiche für funktional gradierte Bauteile im Bauwesen, Abschlussbericht Forschungsinitiative Zukunft Bau (1/2011), Stuttgart: ILEK, 2011.
- [6] HERRMANN, M.; HAASE, W.: Tragverhalten biege- und querkraftbeanspruchter Bauteile aus funktional gradiertem Beton, Beton- und Stahlbetonbau 108 (2013), Heft 6, S. 382–394.
- [7] HERRMANN, M.; MITTELSTÄDT, J.; WÖRNER, M.; SIPPEL, S.; SOBEK, W.; SAWODNY, O.; REINHARDT, H.-W.: Optimalstrukturen aus funktional gradiertem Beton – Entwurf, Berechnung und automatisierte Herstellung. In: BREITENBÜCHER, R.; MARK, P. (Hrsg.): Beiträge zur 1. DAfStb-Jahrestagung mit 54. Forschungskolloquium in Bochum, 07.–08.11.2013, Ruhr-Universität Bochum, 2013, S. 41–46.
- [8] PENIN, L. F.; BALAGUER, C.; PASTOR, J. M.; RODRIGUEZ, F. J.; BARRIENTOS, A.; ARACIL, R.: Robotized Spraying of Prefabricated Panels. IEEE Robotics and Automation Magazine 5 (1998), Heft 3, S. 18–29.
- [9] WATANABE, Y.; TANIJIRI, H.; MATUO, M.; YOSHITAKE, R.; KATO, M.: Development of a Fireproof Insulation Spray Robot System. In: IAARC (Hrsg.): Proceedings of the 13th International Symposium on Automation and Robotics in Construction ISARC, 11.–13.06.1996 in Tokyo (Japan), Tokyo: Japan Robot Association, S. 963–972, 1996.
- [10] MOSER, S. B.: Vollautomatisierung der Spritzbetonapplikation – Entwicklung der Applikations-Prozesssteuerung. Dissertation, Eidgenössische technische Hochschule Zürich, Nr. 15621, 2004.
- [11] CHENG, M.; LIANG, Y.; WEYB, C.-M.; CHENA, J.-C.: Technological enhancement and creation of a computer-aided construction system for the shotcreting robot. Automation in construction 10 (2001), Heft 4, S. 517–526.
- [12] BUSWELL, R.; THORPE, A.; SOAR, R. C.; GIBB, A. G. F.: Design, data and process issues for mega-scale rapid manufacturing machines used for construction. Automation in Construction 17 (2008), Heft 8, S. 923–929.
- [13] GUTHOFF, K.: Einflüsse automatischer Düsenführung auf die Herstellung von Spritzbeton. Dissertation, Technisch-wissenschaftliche Mitteilungen des Instituts für Konstruktiven Ingenieurbau, Ruhr-Universität Bochum, Heft 7, Bochum, 1991.
- [14] DIECKEN, U. v.: Möglichkeiten zur Reduzierung des Rückpralls von Spritzbeton aus verfahrenstechnischer und betontechnologischer Sicht. Dissertation, Technisch-wissenschaftliche Mitteilungen des Instituts für Konstruktiven Ingenieurbau, Ruhr-Universität Bochum, Heft 2, Bochum, 1990.
- [15] MERLET, J. P.: Parallel robots. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2000.
- [16] MAIDL, B.; ROLF, T.; BERGER, T.: Handbuch für Spritzbeton. Berlin: Ernst & Sohn, 1992.
- [17] KLOSS, C.; GONIVA, C.: LIGGGHTS – A new open source discrete element simulation software. In: Proceedings of The Fifth International Conference on Discrete Element Methods, 25.–26.08.2010 in London (UK), Starks. 25–26.
- [18] CFDDEM. CFDDEM – Open Source CFD, DEM and CFD-DEM. URL <http://www.cfdem.com>, 2011 (abgerufen am 01.08.2014).

Optimalstrukturen aus funktional gradierten Betonbauteilen – Entwurf, Berechnung und automatisierte Herstellung

Projektleiter

Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Dr. h.c. Werner Sobek (ILEK)

Projektbearbeiter

Prof. Dr.-Ing. Prof. h.c. Dr.-Ing. E.h. Hans-Wolf Reinhardt (IWB)

Prof. Dr.-Ing. Harald Garrecht (IWB)

Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Oliver Sawodny (ISYS)

Dipl.-Ing. Michael Herrmann (ILEK)

Dipl.-Ing. Jan Mittelstädt (ILEK)

Dipl.-Ing. Sören Sippel (IWB)

Dipl.-Ing. Mark Wörner (ISYS)

Projektlaufzeit

05/2012 – 04/2015

Industriepartner

Festo AG & Co KG

Kaeser Kompressoren AG

Knecht GmbH und Co KG

Sika AG

W. Mader GmbH

Winkel GmbH

Holcim Ltd.

Web

<http://www.uni-stuttgart.de/ilek>

<http://www.isys.uni-stuttgart.de>

<http://www.iwb.uni-stuttgart.de>