



**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**

# Entwurf und Herstellung von Optimalstrukturen aus funktional gradiertem Beton

Claudia Wolf  
Michael Herrmann  
Walter Haase  
Werner Sobek

Institut für  
Leichtbau Entwerfen  
und Konstruieren  
(ILEK),  
Universität Stuttgart

Die Gradierung von Betonbauteilen durch eine in bis zu drei Raumrichtungen kontinuierliche Manipulation der Materialeigenschaften, wie beispielsweise Porosität, Festigkeit oder Steifigkeit, ermöglicht eine Anpassung des Bauteilinneren an das vorherrschende statische oder bauphysikalische Anforderungsprofil. Dies kann zur Massenminimierung und zur Erzielung multifunktionaler Eigenschaften eingesetzt werden. Die zur Herstellung funktional gradiertem Betonbauteile besonders geeigneten Verfahren Schichten und Spritzen ermöglichen die Entwicklung des gesamten Eigenschaftsspektrums zwischen zwei Referenzmischungen mit konträren Festigkeits- und Porositätseigenschaften. Numerische Entwurfsmethoden liefern ein Gradientenlayout als digitalen Bauplan für diese Bauteile.

## 1 Einleitung

Die gebaute Umwelt steht nicht nur für ca. 35 % des Energieverbrauchs und 35 % der Emissionen, sondern auch für 60 % des Ressourcenverbrauchs und – zumindest in Zentraleuropa – für mehr als 50 % des Massenmüllaufkommens [1], [2]. Daher spielt das Bauwesen eine zentrale Rolle für die Bewahrung oder Zerstörung unseres Ökosystems im Hinblick auf die bekannten Fakten Erderwärmung, zur Neige gehende Rohstoffe und steigende Energiekosten. Der Entwicklung von Bauteilen, welche in ihrer Masse optimiert und durch einen sortenreinen Aufbau leicht rezyklierbar sind, kommt somit eine entscheidende Bedeutung zu.

Ein Ansatz, um diese Ziele zu erreichen, stellt die Gradierung der zugrundeliegenden Bauteilwerkstoffe dar. Dabei lassen sich die entsprechenden Möglichkeiten und Potentiale besonders deutlich am Beispiel des Werkstoffs Beton aufzeigen. Dieser Optimierungsansatz stellt im Vergleich zu bisher angewandten Verfahren, welche ausschließlich die äußere Form eines Bauteils berücksichtigen, erstmals eine vollständige Optimierung des Bauteilinneren dar.

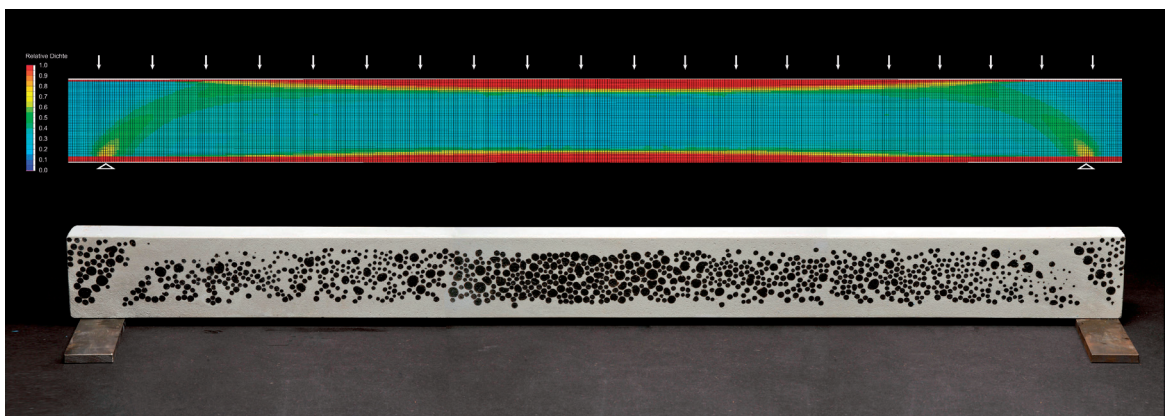


Bild 1: Gradientenlayout aus der numerischen Optimierung und dessen Umsetzung als Porositätsverteilung an einem Balkenelement [Foto: ILEK/Gabriela Metzger]



Bild 2:  
Schnitt durch eine  
Wand mit funkti-  
onal gradiertem  
Wandaufbau  
[Foto: ILEK /  
Gabriela Metzger]

## 2 Grundlagen und Anwendung der Gradientenbetontechnologie

Die Idee der Gradientenbetone wurde erstmals von WERNER SOBEK formuliert [3]. Die Weiterentwicklung erfolgte am Institut für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren (ILEK) der Universität Stuttgart in den Forschungsvorhaben *Gradientenwerkstoffe im Bauwesen* [4] und *Funktional gradierte Elementdecken* [5], beide gefördert über die Forschungsinitiative *Zukunft Bau* des BMVBS. In einer interdisziplinären Kooperation der Institute für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren (ILEK), Systemdynamik (ISYS) und Werkstoffe im Bauwesen (IWB) der Universität Stuttgart werden aktuell Fragen der Herstellung, Automatisierung, Optimierung und Betontechnologie untersucht. Das gemeinsame Forschungsvorhaben *Optimalstrukturen aus funktional gradiertem Beton* ist Teil des Schwerpunktprogramms 1542 *Leicht Bauen mit Beton* der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG).

Definitionsgemäß sind funktional gradierte Bauteile durch eine ortsabhängige kontinuierliche Eigenschaftsänderung in bis zu drei Raumrichtungen charakterisiert, so dass die innere Struktur eines Bauteils optimal auf die tatsächlich auftretenden Beanspruchungen und damit auf die Anforderungen an das Bauteil abgestimmt werden kann. Dabei werden Betoneigenschaften wie Dichte, Porosität, Wärmeleitfähigkeit und Festigkeit angepasst. Der Einbau von Material, das später nicht oder nur geringfügig benötigt wird, die Gesamtmasse der Struktur aber wesentlich erhöht, wird dadurch a priori vermieden.

So sind beispielsweise bei biegebeanspruchten Bauteilen durch die zielgenaue Anordnung leichterer Betonmischungen in Bereichen geringer Beanspruchung (Bild 1) hohe Massen- und CO<sub>2</sub>-Einsparungen möglich.

Eine weitere vielversprechende Anwendung stellen multifunktionale Bauteile aus einem Werkstoff dar. Rein mineralische, funktional gradierte Wandbauteile sind in der Lage, die Anforderungen an Tragfähigkeit, Dauerhaftigkeit, architektonisches Erscheinungsbild und Wärmeschutz gleichzeitig zu erfüllen. Durch die monolithische Ausführung mit hochfestem Beton an den Außen- und Innenseiten sowie einer Kernzone mit Leichtbeton können sowohl der Materialeinsatz minimiert und ein schlanker Querschnitt erzielt als auch die Recyclingfähigkeit als sortenreines Bauteil gewährleistet

werden. Dichte und hochfeste Bereiche werden innerhalb des Bauteilquerschnitts mit hochporösen, niedrigfesten Zonen durch fließende Porositätsverläufe (Gradierungen) homogen und dauerhaft verbunden (Bild 2).

### 3 Werkstoffentwicklung

Für die Entwicklung automatisiert herstellbarer Betonbauteile werden Betonmischungen notwendig, welche sich einerseits in ihren statischen und bauphysikalischen Eigenschaften vollständig unterscheiden, jedoch andererseits gleichermaßen den Anforderungen aus den unterschiedlichen Herstellungsverfahren Rechnung tragen. Es kommt dabei neben der Materialzusammensetzung auch der Verarbeitbarkeit, Dichte und Festigkeitsentwicklung der Mischung eine erhebliche Bedeutung zu.

Im Rahmen des aktuellen Forschungsvorhabens sind zunächst zwei Referenzmischungen entwickelt worden, welche die möglichen Extremeigenschaften abbilden. Dabei besitzt Mischung I die Eigenschaften minimale Porosität mit zugehöriger maximaler Festigkeit, Mischung II bildet die gegenläufigen Eigenschaften mit maximaler Porosität und geringer Festigkeit ab. Innerhalb dieser Grenzen können die Werkstoffeigenschaften im Inneren der Bauteile durch eine Kombination der beiden Referenzmischungen und eine damit verbundene Anpassung der Porosität frei variiert werden (Bild 3).

Weitere Angaben zu den entwickelten Betonmischungen finden sich im Beitrag *Mischungsentwicklung für funktional gradierten Betonbau* in diesem Band.

### 4 Herstellungsverfahren

Ein zentraler Aspekt bei der Erforschung der Gradientenbetontechnologie ist die Entwicklung von Herstellungsmethoden für eine zielgenaue und reproduzierbare Steuerung der Porositätsverläufe innerhalb der Bauteile. Dabei müssen die materiellen Anforderungen mit Fragestellungen der Regelung und Steuerung einer automatisierten Herstellung gekoppelt werden.

Grundsätzlich haben sich im Rahmen vorangegangener Forschungen [4], [5] die beiden Verfahren Schichtauftrag und Trockenspritzen als besonders zielführend herausgestellt, so dass sich die aktuelle Forschungstätigkeit zunächst auf die Weiterentwicklung dieser Verfahren konzentriert.

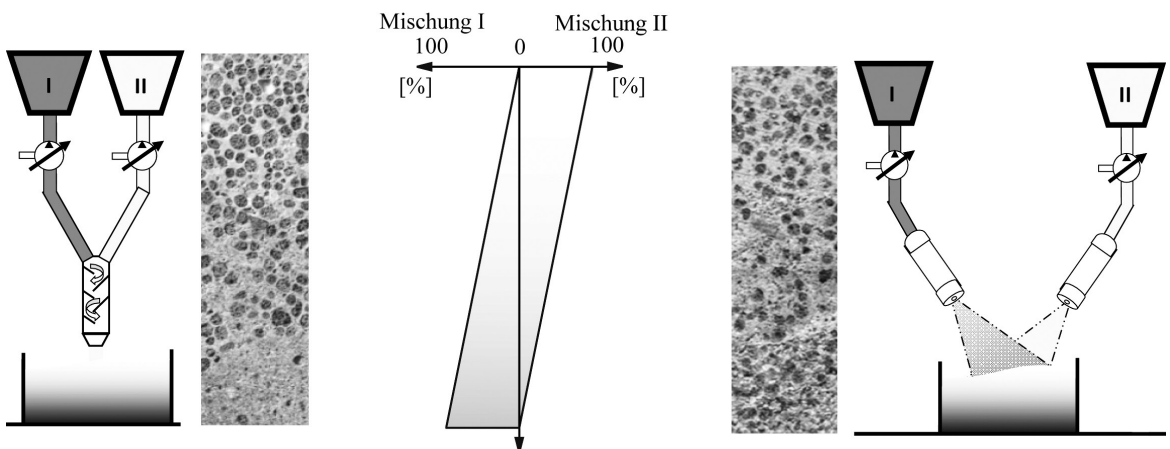


Bild 3: Herstellungsansätze und Ergebnisse einer unidirektionalen Dichtegradierung im Bauteilquerschnitt mittels Schichtauftrag (links) bzw. Trockenspritzen (rechts) [Quelle: ILEK/Michael Herrmann [6]]

Beim Schichten wird das Material in einer vorge-schalteten Mischeinrichtung zusammengeführt und dann schichtweise aufgebracht. Dieses Ver-fahren eignet sich deshalb insbesondere für eine unidirektionale Gradierung von Bauteilen. Grund-lage des Verfahrens bilden die bereits beschrie-benen konträren Betonmischungen I und II sowie der Ansatz ihrer gezielten volumenspezifischen Kombination. Bild 3 zeigt links exemplarisch den Herstellungsansatz des Schichtverfahrens, in Bild 4 ist der Querschnitt eines im Schichtver-fahren hergestellten Balkens dargestellt.



*Bild 4: Bauteilquerschnitt eines gradierten Betonbal-kens, hergestellt im Schichtverfahren  
[Foto: ILEK/ Gabriela Metzger]*

Beim Trockenspritzen wird das jeweilige Aus-gangsmaterial (Mischung I bzw. Mischung II) trocken, ohne Zugabe von Wasser, vorgemischt und mit Luftdruck über einen Schlauch zur Mischdüse gefördert. Erst in dieser Düse wird Wasser zugeführt und das Material beim Auftrag vermischt. Durch die räumliche Flexibilität des Materialauftrags eignet sich das Trockenspritzen insbesondere für die Herstellung räumlicher Gra-dientenbetonlayouts. In den Bildern 3 rechts und 5 sind der Herstellungsansatz des Trockensprit-zens sowie das Ergebnis einer unidirektionalen Dichtegradierung im Bauteilquerschnitt dargestellt.

Um die Festigkeitskennwerte der verwendeten Mischungen ermitteln zu können, bedarf es der Herstellung von Mörtelprismen mit den Abmessungen von  $40 \times 40 \times 160$  mm. Dabei müssen sowohl die beiden Herstellungsverfahren als auch die verschiedenen Mischungsverhältnisse der Grundmischungen I und II berücksichtigt werden.

Die Ergebnisse der Rohdichte- und Druckfestigkeitsmessung der Proben sind in Bild 6 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass sich die Festigkeitswerte aus den Schichtversu-chen annähernd durch eine Exponentialfunktion beschreiben lassen. Durch diesen Zusammenhang können anhand des gewählten Mischungsverhältnisses die erreichba-ren Materialkennwerte abgeschätzt werden. Das Verfahren der Kombination beider Ausgangsmi-schungen zur Herstellung von Eigenschaftsgra-dienten im Bauteil kann daher grundsätzlich als geeignet angenommen werden.

Weiter zeigt sich bei den im Trockenspritzver-fahren hergestellten Proben eine im Vergleich zu den geschichteten Prismen erhöhte Streuung der Festigkeitseigenschaften (Bild 6). Diese Streuung ist – bedingt durch die manuelle Herstellung der Probekörper – maßgebend abhängig von den beim Trockenspritzen stark einflussnehmenden Parametern des Sprühabstandes und der Was-serzufuhr.



*Bild 5: Bauteilquerschnitt eines gradierten Betonbal-kens, hergestellt im Trockenspritzverfahren  
[Foto: ILEK/Gabriela Metzger]*

Die gezielte Automatisierung dieser und weite-erer Einflussgrößen für einen homogenisierten

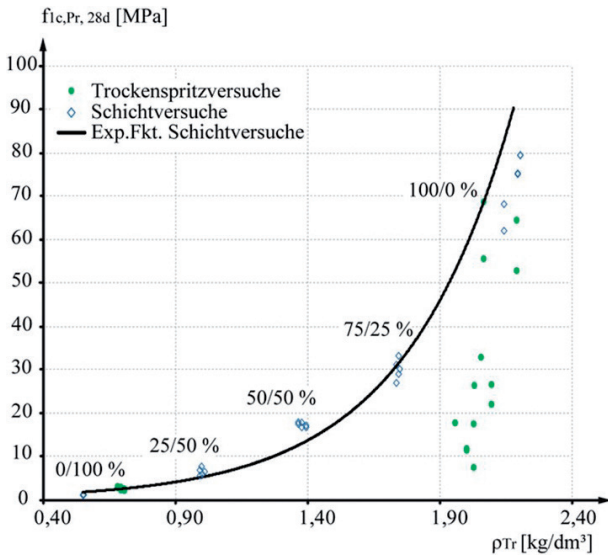


Bild 6: Vergleich der Festigkeitsergebnisse aus geschichteten und gespritzten Mörtelprismen  
[Quelle: ILEK/Jan Mittelstädt]

werden können. Detaillierte Informationen zum entwickelten Mehrachs-Roboter sind im Beitrag *Automatisierte Herstellung funktional gradierter Betonbauteile* in diesem Band zu finden.

Da die Festigkeitseigenschaften der gespritzten Bauteile stark herstellungsabhängig sind, muss die sensible Einstellung der Systemsteuerung des Manipulators experimentell erarbeitet werden. Derzeit erfolgen für beide Referenzmischungen Versuchsreihen mit dem Mehrachs-Roboter, um optimale Grundeinstellungen für die jeweilige Mischung festlegen und damit reproduzierbare Betoneigenschaften generieren zu können.



Bild 7:  
Mehrachs-Manipulator mit Hexapod und Spritzdüsen  
[Foto: ILEK / Gabriela Metzger]

Materialauftrag wie Sprühdruk, Vorbenetzung, gezielte Materialzugabe im Sprühnebel sowie Eigenrotation des Sprühkopfes führt zu einer erhöhten Herstellungsgüte des Bauteils und einer damit einhergehenden Reproduzierbarkeit der Materialeigenschaften. In der grundsätzlichen Möglichkeit, eine Vielzahl an Steuerungskomponenten beim Spritzvorgang zu automatisieren und damit reproduzierbare Randbedingungen für die Herstellung zu schaffen, liegt das Potential dieses Verfahrens. Eine Automatisierung verspricht weiterhin eine kostengünstige Produktion gradierter Bauteile.

Im Rahmen des aktuellen, interdisziplinären Forschungsprojektes wurde vom Institut für Systemdynamik (ISYS) ein Manipulator zur Herstellung funktional gradierter Bauteile mit räumlich freien Gradierungen entwickelt (Bild 7). Dieser bietet die Möglichkeit, die beiden konträren Ausgangsmischungen durch die Einstellung unterschiedlicher Mischungsverhältnisse so zu verarbeiten, dass alle zwischen den Ausgangsmischungen liegenden Eigenschaften erreicht

## 5 Bauteilversuche

Bislang sind Bauteile, die hinsichtlich ihrer Tragfähigkeit geprüft wurden, stets in einem Verfahren hergestellt worden, bei dem der Betonaufrag schichtweise erfolgt [4], [7]. Bei diesem Verfahren werden die zur Verfügung stehenden homogenen Mischungen unterschiedlichen Bereichen innerhalb eines Bauteils so zugeordnet, dass sie das dort vorhandene Anforderungsprofil erfüllen. Anschließend werden die Mischungen parallel in einem Zwangsmischer angemischt und manuell eingebracht. Dies führt zu Eigenschaftssprüngen an den Schichtgrenzen. Unterschiedliche Schwind- und Kriechbeiwerte sowie thermische Ausdehnungskoeffizienten müssen durch eine ausreichend feine Abstufung angeglichen und bei der Dimensionierung berücksichtigt werden, damit es nicht zu Vorschädigungen infolge inneren Zwangs kommt. Dies wiederum führt zu einer Vielzahl an erforderlichen Arbeitsschritten und vorzuhaltenden Mischungen und somit zu einer Unwirtschaftlichkeit des Prozesses.

Daher wird im Forschungsvorhaben *Optimalstrukturen aus funktional gradierten Betonen* der Ansatz der Verhältnismischung zweier konträrer Ausgangsmischungen I und II in einem automatisierten Sprühverfahren verfolgt (Abschnitt 4). Um parallel zur Entwicklung der automatisierten Herstellungsvorrichtung die Vorteile des Gradientenspritzverfahrens bei der Vermeidung auftretender Gefügestörungen an den Schichtgrenzen zu belegen, ist vorab ein gradiertes Bauteil manuell mit zwei Trockenspritzmaschinen gefertigt und durch einen Vierpunkt-Biegeversuch bei der MPA Stuttgart auf seine Tragfähigkeit geprüft worden.

Der Prüfaufbau (Bild 8) orientiert sich am Aufbau der geschichteten Balken des Forschungsvorhabens *Gradierte Elementdecken* [5]. Zur Vergleichbarkeit der Ergebnisse mit einer massiven, einachsig gespannten Platte werden die Abmessungen der Gradientendecke aus der Vordimensionierung einer Flachdecke hergeleitet. Die Breite des Plattenstreifens wird mit 400 mm zur doppelten Bauteilhöhe gewählt, um den einachsigen Lastabtrag einer Platte sicher abzubilden. Über die Bauteilhöhe erfolgt ein Schichtenaufbau mit zwei 10 mm starken Deckschichten aus der gefügedichten Mischung I oben und unten sowie einer 180 mm starken Kernschicht. Die Kernschicht ist über die Bauteillänge unter Berücksichtigung der Querkraftbeanspruchung im Vierpunkt-Biegeversuch in einen leichten mittleren Kernbereich KM 2 aus der Mischung II und einen tragfähigeren querkraftbeanspruchten Bereich KM 1, bestehend aus 50 % Mischung I und 50 % Mischung II, untergliedert. Die Bewehrung erfolgt mit dem textilen Kohlefasergelege SIGRATEx® Grid 600 [8]. Es werden 37 Rovings à 1,83 mm<sup>2</sup> verbaut. Die mittlere Bruchspannung  $\sigma_{\text{tex}}$  ist zuvor in Zugversuchen experimentell zu 1300 N/mm<sup>2</sup> bestimmt worden. Infolge des Ausschalens und des Transports vom Herstellungsort zur Prüfmaschine kam es zu einer Vorschädigung des Balkens, die sich durch zwei Biegerisse auf der Bauteilunterseite im Bereich KM 2 äußerte.

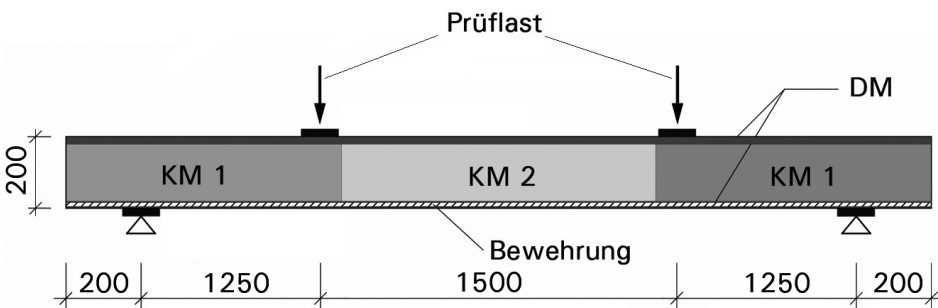
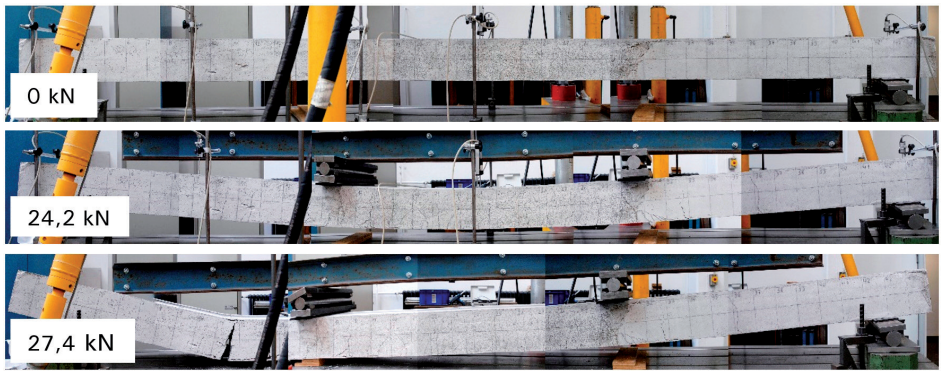


Bild 8: Prüfaufbau und Abmessungen in mm, wobei KM 1 und 2 für die leichten Kernschichtmischungen und DM für Deckschichtmischung stehen

[Quelle: ILEK/Michael Herrmann]

Bild 9:  
 Prüfaufbau und  
 Lastschritte beim  
 Vierpunkt-Biege-  
 versuch  
 [Fotos: ILEK /  
 Michael Herrmann]



Die Last wird weggesteuert, kontinuierlich und stoßfrei aufgebracht, die Belastungsgeschwindigkeit zu 3 mm/min gewählt. Das beschriebene Bauteil versagt durch Reißen der textilen Bewehrung unter Biegezug im Bereich KM 1 zwischen Endauflager und Lasteinleitungspunkt (Bild 9). Das rechnerische Biegebuchmoment von 16,6 kNm wird mit einem Prüfmoment von 17,1 kNm geringfügig überschritten.

In Bild 10 ist das Kraft-Durchbiegungs-Diagramm des textilbewehrten Balkens (im Diagramm mit V4.1 bezeichnet) dargestellt. Aufgrund der beschriebenen Vorschädigung durch Biegerisse ergibt sich im Versuch eine geringere Steifigkeit als die rechnerische Steifigkeit im Zustand I. Der Steifigkeitsunterschied bei diesem gespritzten Bauteil fällt jedoch gegenüber vergleichbaren Bauteilen, die im Schichtverfahren hergestellt wurden und ebenfalls eine Vorschädigung aufwiesen, wesentlich kleiner aus. Da die untere Deckschichtdicke stärker als die geplanten 10 mm ausgeführt wurde, liegt das rechnerische Rissmoment unter dem Prüfmoment bei Rissbildung. Die Steifigkeit im Zustand II hängt maßgebend von der Bewehrungsmenge und der Dehnsteifigkeit der Bewehrung ab. Sowohl die Steifigkeit im Zustand II als auch das Bruchmoment können rechnerisch gut vorhergesagt werden. Mit dem Erreichen der Textilbruchspannung versagt das Bauteil spröde.

Mit dem gespritzten gradierten Aufbau kann der Grenzzustand der Tragfähigkeit analog zu einer massiven Flachdecke erfüllt werden. Das Bauteileigengewicht liegt mit 554 kg um 256 kg unter dem Referenzgewicht einer massiven Flachdecke mit gleichen Abmessungen. Somit konnte eine Massenersparnis von 32 % realisiert werden.

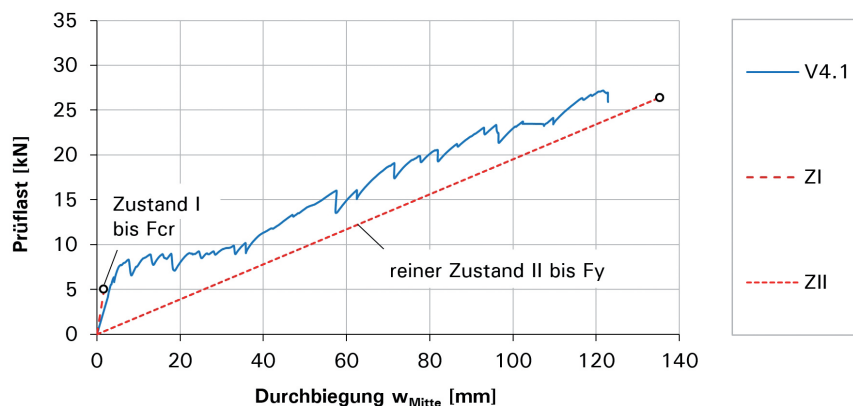


Bild 10: Kraft-Durchbiegungs-Linien des textilbewehrten Prüfkörpers  
 [Quelle: ILEK/Michael Herrmann]



## 6 Simulation und Optimierung gradierter Betonbauteile

Der automatisieren Herstellung geht der Entwurf dichtegradierter Bauteile voraus. Die Verwendung von dichtegradierten Strukturen hat das tragstrukturelle Ziel, mit einem Minimum an Materialeinsatz eine gegebene Belastung unter Einhaltung von Verformungsbegrenzungen abzutragen. Die Entwicklung der optimalen Eigenschafts- und Materialverteilung im Bauteil, des sogenannten „Gradientenlayouts“, stellt dabei eine besondere Herausforderung dar. Bei einfachen Tragwerken können noch natürliche Vorbilder oder in der Literatur beschriebene Ansätze auf Grundlage der Hauptspannungstrajektorien zum Gradientenentwurf herangezogen werden. Dies ist jedoch bei räumlich komplexen Tragwerken nicht mehr möglich. Um diese Entwurfsaufgabe erfüllen zu können, müssen numerische Routinen entwickelt werden. Die Strukturoptimierung stellt hierfür ein geeignetes Vorgehen dar.

Grundlage der numerischen Optimierung bildet eine materiell nichtlineare Bauteilsimulation, welche das Verhalten gradierter Bauteile zutreffend beschreibt. Die im Rahmen des Forschungsvorhabens durchgeführten Simulationen werden mit dem kommerziellen Finite-Elemente-Programm ABAQUS durchgeführt. Der Werkstoff Beton wird mit dem Materialmodell *Concrete Damaged Plasticity* erfasst, einem elastisch-plastischen Schädigungsmodell für die Abbildung von bewehrtem und unbewehrtem Beton. In einem ersten Schritt werden bestehende Referenzversuche [7] mit einem diskreten Schichtenaufbau simuliert. Das verwendete Materialmodell kann anhand experimentell ermittelter Festbetoneigenschaften kalibriert werden. Diese Ausgangssimulation bildet die Grundlage der numerischen Optimierung.

Die Topologieoptimierung als Teil der Strukturoptimierung beschäftigt sich mit der optimalen Materialverteilung in einem Entwurfsraum. Dabei wird im Laufe der Optimierungsschleifen Material entnommen oder umgelagert. Die verbleibende Struktur ist unter einer gegebenen Belastung möglichst voll ausgenutzt. Die Ziele und Herangehensweisen der Topologieoptimierung decken sich mit dem Ansatz der Dichtegradierung eines Bauteils. Es wird eine Materialverteilungsstrategie unter Verwendung des SIMP-Ansatzes (Solid Isotropic Material with Penalization) [9], [10] entwickelt. Der SIMP-Ansatz ermöglicht es, mittlere Dichten im Entwurfsraum einzuführen. Dabei wird der Zusammenhang zwischen dem E-Modul  $E_i$  und der Designvariablen  $x_i$  über folgenden Potenzansatz beschrieben:

$$E_i = (x_i)^p \cdot E_i^0, \quad p > 1 \quad \text{und} \quad x_i = \frac{\rho_i}{\rho_i^0}$$

$E_i^0$  ist der E-Modul und  $\rho_i^0$  die Dichte eines massiven Elements. Die Exponentialfunktion des Ansatzes wird an den exponentiellen Zusammenhang zwischen Steifigkeit und Dichte der entwickelten Gradientenbetonmischungen angepasst (Bild 11).

Somit stehen während des gesamten Optimierungsvorgangs nur physikalisch realisierbare Materialien zur Verfügung. Das Optimierungsergebnis ist eine mit den Gradientenbetonmischun-

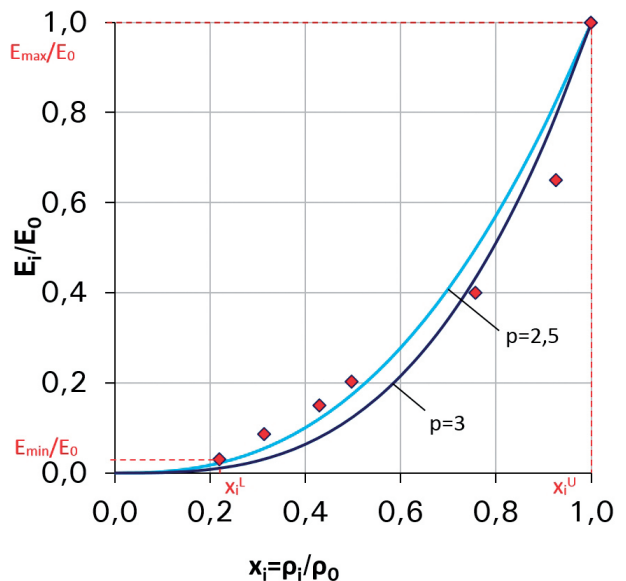


Bild 11: Anpassung des SIMP-Ansatzes an die Prüfergebnisse der gradierten Betonmischungen  
[Quelle: ILEK/Michael Herrmann [6]]

gen herstellbare Dichteverteilung und wird als Gradientenentwurf bezeichnet. Alle durchgeführten Optimierungen finden im linear elastischen Bereich des Materialverhaltens statt. Im Anschluss an eine Optimierung wird eine materiell nichtlineare Simulation durchgeführt, um das Optimierungsergebnis in allen Traglastbereichen bewerten zu können. Bei gleicher Bauteilmasse wie im Referenzversuch (manuell geschichteter Balken, mit V2 bezeichnet) lässt sich mit der Optimierungsstrategie ein Steifigkeitsgewinn im Bereich von 30 % erzielen sowie die Erstrisslast um 24 % steigern.

Tabelle 1: Optimierungsergebnis der Materialverteilungsstrategie [6]

Materialverteilung relative Dichte $x_i$	Ziel- funktion	C [Nm]	m [kg]	$\Delta C$ [%]
Referenzversuch V2 	-	238	551	-
Gradient G1 	min C	164	551	-31
C	Gesamtverzerrungsenergie			
m	Gesamtmasse der Bauteile			
$\Delta C$	Veränderung der Gesamtverzerrungsenergie (Steifigkeitsgewinn)			

Im Vergleich zum Referenzversuch kann die Steifigkeit bei gleichem Materialeinsatz deutlich erhöht (Tabelle 1) oder die Bauwerksmasse bei gleichbleibender Steifigkeit weiter reduziert werden. Gegenüber einem massiven Bauteil lassen sich so 34 % an Bauteilmasse einsparen. Die Steifigkeitsgewinne der optimierten Bauteile gegenüber dem Referenzversuch lassen sich durch zwei wesentliche Effekte erklären. Einerseits wird mehr steifes Material in der Zug- und in der Druckzone zwischen den Lasteinleitungen angeordnet, andererseits bildet sich ein Druckbogen bzw. ein Stabwerk zwischen Auflager und Lasteinleitung aus. Ergebnis des Optimierungsprozesses ist ein digitaler Bauplan, welcher die zugehörige Dichte zur räumlichen Position im Bauteil enthält.

## 7 Ausblick

Nach dem jetzigen Stand der Forschungsarbeiten im Rahmen des Projektes *Optimalstrukturen aus funktional gradiertem Beton* lässt sich zusammenfassend festhalten, dass die Ziele der interdisziplinären Forschergruppe in einem Prototypen der Herstellungsplattform für funktional gradierte Betonbauteile zusammengeführt werden konnten. Die entwickelten Simulations- und Optimierungsverfahren ermöglichen die numerische Abbildung des Tragverhaltens gradiertem Betonbauteile und den Entwurf kontinuierlich gradiertem Dichtelayouts.

Im weiteren Verlauf des Projektes sollen daher gradierte Betonbauteile wie z. B. Balken oder Ausschnitte aus Deckenkonstruktionen automatisiert hergestellt und auf ihre jeweiligen Festigkeitseigenschaften sowie die erzielte Gradiierung geprüft werden. Die bisherigen Erfahrungen zeigen allerdings, dass sich durch die Prozesskette werkstoffliche und fertigungstechnische Restriktionen ergeben, welche als Randbedingungen in das Optimierungsverfahren aufgenommen werden sollten.

## Danksagung

Besonderer Dank gilt der DFG für die Förderung des Forschungsvorhabens *Optimalstrukturen aus funktional gradierten Betonbauteilen* als Teil des Schwerpunktprogramms 1542 *Leicht Bauen mit Beton*. Weiterer Dank gilt den Industriepartnern Otto Knecht GmbH & Co. KG, Sika Deutschland GmbH, Werner Mader GmbH, Winkel GmbH, Festo AG & Co. KG und Kaeser Kompressoren SE für die Unterstützung mit Geräten und Materialien.

## Literatur

- [1] HERRMANN, M.; MITTELSTÄDT, J.; WÖRNER, M.; SAWODNY, O.; SIPPEL, S.; REINHARDT, H.-W.; SOBEK, W.: Precast components made from functionally graded concrete. *CPI – Concrete Plant International* (2013), Heft 6, S. 60–64.
- [2] SOBEK, W.; TRUMPF, H.; HEINLEIN, F.: Recyclinggerechtes Konstruieren im Stahlbau. *Stahlbau* 79 (2010), Heft 6, S. 424–433.
- [3] SOBEK, W.; HERRMANN, M.; HAASE, W.: Gradientenbetone. *Beton- und Stahlbetonbau*, (zur Veröffentlichung angenommen).
- [4] HEINZ, P.; HERRMANN, M.; SOBEK, W.: Herstellungsverfahren und Anwendungsbereiche für funktional gradierte Bauteile im Bauwesen. Abschlussbericht Forschungsinitiative Zukunft Bau (1/2011), Stuttgart: ILEK, 2011.
- [5] HERRMANN, M.; SOBEK, W.: Entwicklung gewichtsoptimierter funktional gradiertes Elementdecken. Abschlussbericht Forschungsinitiative Zukunft Bau, Stuttgart: ILEK, 2014.
- [6] HERRMANN, M.: Weiterentwicklung der Gradientenbetontechnologie und deren Anwendung auf gewichtsreduzierte einachsige Bauteile. Dissertation, Universität Stuttgart, voraussichtlich 2014.
- [7] HERRMANN, M.; Haase, W.: Tragverhalten biege- und querkraftbeanspruchter Bauteile aus funktional gradiertem Beton. *Beton- und Stahlbetonbau* 108 (2013), Heft 6, S. 382–394.
- [8] JESSE, F.; CURBACH, M.: Verstärken mit Textilbeton. In: BERGMEISTER, K.; FINGERLOOS, F.; WÖRNER J.-D. (Hrsg.): *Beton-Kalender 2010; Teil I*, Berlin: Ernst & Sohn, 2009, S. 458–565.
- [9] BENDSØE, M. P.: Optimal shape design as a material distribution problem. *Structural Optimization* 1 (1989), Heft 4, S. 193–202.
- [10] BENDSØE, M. P.; SIGMUND, O.: *Topology optimization: theory, methods and applications*. 2. Aufl., Berlin: Springer, 2004.

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

#### Projektleiter

Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Dr. h.c. Werner Sobek<sup>1</sup>

#### Projektbearbeiter

Prof. Dr.-Ing. Prof. h.c. Dr.-Ing. E.h. Hans Wolf Reinhardt<sup>3</sup>  
 Prof. Dr.-Ing. Harald Garrecht<sup>3</sup>  
 Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Oliver Sawodny<sup>2</sup>  
 Dipl.-Ing. Michael Herrmann<sup>1</sup>  
 Dipl.-Ing. Jan Mittelstädt<sup>1</sup>  
 Dipl.-Ing. Claudia Wolf<sup>1</sup>  
 Dipl.-Ing. Mark Wörner<sup>2</sup>  
 Dipl.-Ing. Sören Sippel<sup>3</sup>

<sup>1</sup> <http://www.uni-stuttgart.de/ilek>

<sup>2</sup> <http://www.isys.uni-stuttgart.de>

<sup>3</sup> <http://www.iwb.uni-stuttgart.de>

#### Projektlaufzeit

05/2012 – 04/2015

#### Industriepartner

Otto Knecht GmbH & Co. KG, Metzingen  
 Sika Deutschland GmbH, Stuttgart  
 Werner Mader GmbH, Erbach  
 Winkel GmbH, Illingen  
 Festo AG & Co. KG, Esslingen  
 Kaeser Kompressoren SE, Coburg  
 Holcim (Süddeutschland) GmbH, Dotternhausen