

Effiziente automatisierte Herstellung multifunktional gradierter Bauteile mit mineralischen Hohlkörpern | Efficient automated production of multifunctional graded components with mineral hollow bodies

► Daniel Schmeer¹, Mark Wörner², Harald Garrecht³, Oliver Sawodny², Werner Sobek¹

► ¹ Institut für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren (ILEK), Universität Stuttgart

► ² Institut für Systemdynamik (ISYS), Universität Stuttgart

► ³ Institut für Werkstoffe im Bauwesen (IWB), Universität Stuttgart

1 Einführung und Zielsetzung

Das Bauwesen steht in den kommenden Jahren vor der Herausforderung, für eine steigende Weltbevölkerung Habitate und Infrastruktursysteme zu errichten – unter Berücksichtigung abnehmenden Ressourcenvorkommens. Dies erfordert die Erforschung und Entwicklung neuer, innovativer Leichtbautechnologien für die Baubranche, die auf ein möglichst leichtes Bauen, die Minimierung des Verbrauchs an fossil erzeugter Energie sowie eine recyclinggerechte Bauweise abzielen [1]. Eine Möglichkeit im Bereich des Bauens mit Beton ist die von Werner Sobek entwickelte Technologie des Gradientenbetons. Dieser technologische Ansatz befasst sich erstmalig mit der Optimierung des Bauteilinnenraums und verfolgt das Ziel, die im Bauteil vorherrschenden Spannungsfelder durch die gezielte Platzierung von Hohlräumen zu homogenisieren. Dies ermöglicht die Herstellung von gewichtsminimalen, sortenrein rezyklierbaren und multifunktionalen Bauteilen aus Beton.

Die grundlegende Frage, wie ein gradiertes Bauteil entworfen und reproduzierbar in einer automatisierten Fertigung hergestellt werden kann, konnte bereits im Vorgängerprojekt *Optimalstrukturen aus funktional gradierten*

1 Introduction and objectives

For years to come, the construction industry will be faced with the challenge of building habitats and infrastructure systems for an increasing world population – with regard to dwindling resources. This requires the research and development of new, innovative lightweight-construction technologies for the building sector that aim at constructions that are as light as possible, minimize the consumption of fossil-based energy and are designed for recycling [1]. One possibility to meet these requirements in the field of concrete construction is the technology of graded concrete which was invented by Werner Sobek. This technological approach focuses for the first time on the optimisation of the component's interior and pursues the goal of homogenizing the stress fields prevailing in the component through the targeted placement of cavities. This enables the production of minimal-weight, mono-material and multifunctional components.

The fundamental question of how to design a graded component and manufacture it reproducibly in an automated procedure has already been answered in the SPP project *Optimal Structures made out of Functionally*

Betonbauteilen der ersten Förderphase des DFG-SPP 1542 beantwortet werden, s. S. 642 ff. Die Ergebnisse des Projekts zeigten, dass das vollständige ökonomische und ökologische Potential der Technologie nur dann ausgeschöpft werden kann, wenn in der weiterführenden Forschung die entwickelte Gradientenbetontechnologie um die folgenden Aspekte erweitert wird:

- Adaption des Spektrums der Betoneigenschaften zur Steigerung der Massenreduktion,
- Kopplung von Entwurf und Fertigung zu einem integralen Gesamtprozess,
- Verbesserung der Effizienz des automatisierten Herstellungsverfahrens.

Diese Schwerpunkte wurden in einer interdisziplinären Kooperation zwischen den Instituten für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren (ILEK), Systemdynamik (ISYS) und Werkstoffe im Bauwesen (IWB) der Universität Stuttgart im Rahmen des abgeschlossenen Projekts in der zweiten Förderphase des DFG-SPP 1542 erfolgreich bearbeitet. Die erzielten Ergebnisse werden im Folgenden zusammenfassend dargestellt.

2 Gradierungsansätze zur Gestaltung des Bauteilinnenraumes

Das Grundprinzip der Gradierung von Betonbauteilen besteht in der Platzierung von Hohlräumen im Inneren des Bauteils, deren Form und Größe sich nach dem vorherrschenden Beanspruchungszustand richten, um das Eigengewicht und somit den Materialverbrauch einer tragenden Konstruktion zu reduzieren. Die damit einhergehende Anordnung unterschiedlichen Steifigkeiten entlang der drei Raumachsen im Bauteil kennzeichnet die Gradiententechnologie. Die Anfänge dieses Ansatzes gehen zurück auf das Jahr 1972 mit der Erforschung gradierter Variationen von Fasern und deren Ausrichtung in Polymermatrizen [2]. Diese Technologie wurde in Europa maßgeblich durch die Arbeiten im DFG-SPP 733 *Gradientenwerkstoffe* weiter erforscht [3]. Im Hinblick auf eine

Graded Concrete during the first funding phase of the German Research Foundation's Priority Programme 1542 (DFG-SPP 1542), see page 642 et seq. The results of the project indicate that the technology's economic and ecological potential can only be exploited entirely if further research adds the following aspects to the developed technology of graded concrete:

- Adaptation of the range of concrete properties to increase mass reduction,
- Interlinking design and production to create an integral process,
- Efficiency improvement of the automated processing technique.

During the second funding phase of the DFG-SPP 1542, these key aspects were successfully dealt within the interdisciplinary cooperation between three institutes at the University of Stuttgart, namely the Institute for Lightweight Structures and Conceptual Design (ILEK), the Institute for System Dynamics (ISYS), and the Institute for Construction Materials (IWB). The results achieved are summarized and presented in the following.

2 Gradation approaches for designing the component's interior

The basic principle of graded concrete components consists of the placing of cavities in the component's interior, which form and size are dependent on the prevailing stress conditions, to reduce the construction's dead weight and consequently the material consumption in its construction. The accompanying arrangement of different degrees of material stiffness along the three spatial axes of a component can be described as gradation. The beginnings of this material technology reach back to 1972, when initial research was conducted into graded variations of fibres and their alignment in polymer matrices [2]. In Europe, substantial further research into this technology took place as part of the German Research Foundation's Priority Programme 733 on *Functionally Graded Mate-*

ideale Anpassung der Steifigkeitsverteilungen innerhalb eines Bauteils erwiesen sich hierbei Multimaterialtechnologien als zielführender Ansatz. Aufgrund der kraft- und formschlüssigen Verbindung der eingesetzten Hochleistungsverbundwerkstoffe entstehen jedoch bei dieser Technologie zwangsläufig Recyclingprobleme.

Die Forschungsarbeiten der Autoren zur Gestaltung der Innenräume von Betonbauteilen widmen sich folglich den Monomaterialtechnologien, damit die jederzeitige Rezyklierbarkeit des Bauteils sichergestellt ist. Die Gradierung der Bauteile wird durch zwei technologische Strategien möglich, die auch kombiniert werden können (Bild 1). Bei der ersten Strategie, der sogenannten Mikrogradierung, wird die Steifigkeit der Betonmatrix durch die Zugabe von Leichtzuschlägen und/oder schaubildenden Technologien (1–10 mm Porengröße) manipuliert. Dies führt jedoch dazu, dass selbst in den niedrig bis gar nicht beanspruchten Bereichen des Bauteils immer noch Material zu platzieren ist, das nicht für den Lastabtrag benötigt wird. Aus diesem Grund soll mit der zweiten Strategie, der sogenannten Mesogradierung, die Porengröße deutlich erhöht werden. Bei diesem Ansatz werden mineralische Hohlkörper (10–250 mm Durchmesser) im Inneren des Bauteils platziert, wodurch das Eigengewicht des Bauteils nochmals reduziert werden kann – bei gleichzeitiger Gewährleistung der sortenreinen Rezyklierbarkeit.

rials (DFG-SPP 733 *Gradientenwerkstoffe*) [3]. Multi-material technologies proved to be a purposeful approach with regard to the ideal adaptation of stiffness distributions within a component. However, these high-performance composite materials have inevitably a recycling problem, since this technology uses a combination of frictional-locked and form-fit.

As a consequence, the authors' research into the design of concrete component's interior structure is devoted to mono-material technologies to ensure that components can be recycled at all times. The gradation of the component is enabled through two technological strategies, which can also be combined with each other (Fig. 1). In the case of the first strategy, the so-called micro gradation, the stiffness of the concrete matrix is manipulated by adding lightweight aggregates and/or applying foaming technologies (1–10 mm pore size). However, this leads to the circumstance that even in those zones of the component that are subjected to low stress, or no stress whatsoever, material is to be placed that is not required for the load bearing capacity. For this reason, the second strategy, defined as meso gradation, serves the purpose of significantly increasing the pore size. With this approach, mineral hollow bodies (from 10 mm up to now 250 mm in diameter) are placed inside the component, thereby further reducing the dead weight of the component – while at the same time ensuring recyclability by type.

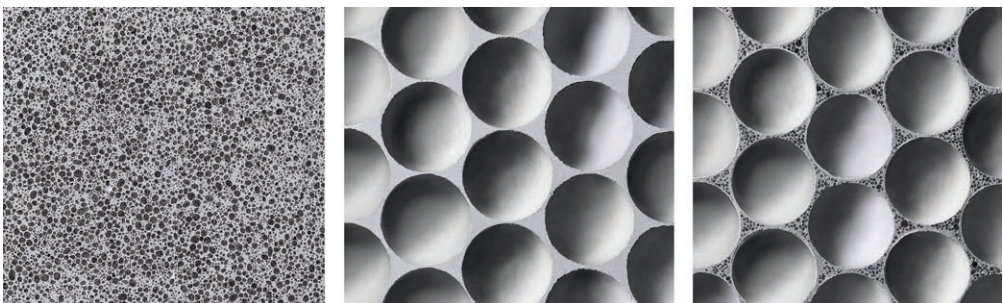


Bild 1: Mikrogradierung durch Leichtzuschläge (links), Mesogradierung durch mineralische Hohlkörper (Mitte) und Kombination der beiden Strategien (rechts) | **Fig. 1:** Micro gradation with lightweight aggregates (left), meso gradation with mineral hollow spheres (center) and combination of both strategies (right)

3 Entwurfs- und Berechnungsmethoden für Betonbauteile mit Mikrogrädierung (ILEK)

3.1 Numerische Berechnungsmethoden für mikrogradierte Betonbauteile

Für die Berechnung und Bemessung mikrogrädierter Betonbauteile eignet sich die Finite-Element-Methode (FEM), mit der eine realitätsnahe Abbildung des Tragverhaltens erzielt werden kann. Die numerische Berechnung des Tragverhaltens wird mittels der FE-Software *ABAQUS* durchgeführt und am Beispiel von skalierten Probekörpern verdeutlicht. Die in der Simulation gewählte Probekörpergeometrie ($1,2 \times 0,1 \times 0,1$ m) und die aufgebrachte 4-Punkt-Biegebelastung ergeben sich aus den durchgeführten experimentellen Bauteilversuchen aus dem Vorgängerprojekt (vgl. S. 642 ff.). Das Bauteil wird als dreidimensionaler Volumenkörper mit achtknotigen Kontinuumelementen *C3D8I* modelliert (Bild 2) und mit einer Elementgröße von 5 mm vernetzt. Die Bewehrung wird als verschmierte Fläche mit *Surface*-Elementen vom Typ *SFM3D4* in das Kontinuum eingebettet. Bei diesem Ansatz wird die gesamte Bewehrungsmenge als äquivalente Fläche über die Gesamtbreite des Bauteils approximiert. Zusätzlich wird von einem vollständigen Verbund zwischen den Materialien ausgegangen [4]. Die Lagerung sowie die verschiebungsgesteuerte Lastaufbringung erfolgt über vollständig steife Elemente mit einer Breite von 10 mm. Die statisch bestimmte Lagerung wird durch Ausnutzung der Achssymmetrie in Balkenmitte (x-Richtung) und durch unverschiebliche Linienlager (y- und z-Richtung) gebildet.

3 Design and calculation methods for micro graded concrete components (ILEK)

3.1 Numerical calculation methods for micro graded concrete components

The finite element method is suitable for calculating and dimensioning functionally graded concrete components and enables a realistic representation of their load-bearing performance. The numerical calculation of the load-bearing behaviour of graded components is carried out using the FE software *ABAQUS* and is illustrated by scaled test specimens as an example. The test specimen's geometry selected in the simulation ($1.2 \text{ m} \times 0.1 \text{ m} \times 0.1 \text{ m}$) and the load position follow the experimental four-point bending tests performed in the previous project (see page 642 seq.). The component is modelled as a three-dimensional solid body with eight-nodal continuum elements *C3D8I* (Fig. 2) and meshed with an element size of 5 mm. The reinforcement is embedded in the continuum as a smeared surface with elements of the type *SFM3D4*. In this approach, the entire reinforcement is approximated as an equivalent area over the total width of the component. Additionally, a full bond is assumed between the materials [4]. The support, as well as the displacement-controlled application of load, is executed through rigid elements with a width of 10 mm. The statically determined support is achieved by utilizing the axis symmetry at the centre of the beam (x-direction) and through the fixed line supports (y- and z-direction).

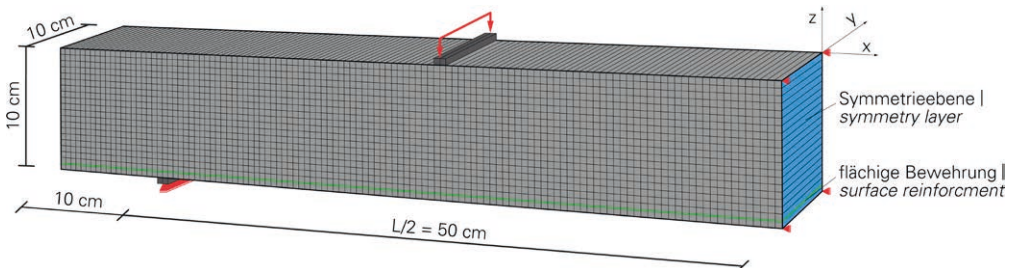


Bild 2: FE-Modell des skalierten Probekörpers | Fig. 2: FE model of the scaled test specimen

Mit dem in der FE-Software zur Verfügung stehenden Materialgesetz *Concrete Damaged Plasticity* [4] ist es möglich, das nichtlineare Materialverhalten von bewehrtem sowie unbewehrtem Beton abzubilden. Dieses elastisch-plastische Schädigungsmodell basiert auf der Weiterentwicklung der Drucker-Prager-Fließbedingung [5], [6] und wird in [7] ausführlich beschrieben. Für den Bewehrungsstahl, dessen Spannungs-Dehnungsbeziehung durch ein linear-elastisches Verhalten bis zum Erreichen der Fließgrenze und einen anschließenden plastischen Bereich gekennzeichnet ist, wird ein elastisch-plastisches Materialgesetz mit isotroper Verfestigung verwendet [8].

Mit dem beschriebenen numerischen FE-Modell werden unter Berücksichtigung der vorgestellten Materialgesetze für Beton und Bewehrung die Versuchsserien RL₅₅ und KL₅₅ aus dem Projekt der ersten Förderphase nachgerechnet. RL₅₅ beschreibt einen Referenzprobekörper mit homogener Materialverteilung und Stabstahlbewehrung. Das gradierte, stabstahlbewehrte Bauteil KL₅₅ besteht aus einer oberen und unteren Deckschicht zur Aufnahme des Biegemomentes und einem dreifach abgestuften Kern, der entsprechend der im Bauteil herrschenden Querkraft dimensioniert ist. Bild 3 stellt die Ergebnisse der nichtlinearen numerischen Simulation und die Ergebnisse der Bauteilversuche zusammenfassend dar. Die Simulation des Tragverhaltens des massiven Referenzbauteils zeigt eine hinreichend genaue Übereinstimmung mit den experimentellen Versuchen und bestätigt somit den gewählten Ansatz zur Modellierung. Durch den systematischen Übertrag der identifizierten Modellierungsparameter auf gradierte Betonbauteile konnte das experimentell ermittelte Tragverhalten in der Simulation ebenfalls hinreichend genau abgebildet werden. Beim Kammerlayout wird im linear-elastischen Zustand I das Tragverhalten geringfügig unterschätzt. Diese Abweichung kann durch den automatisierten schicht- und zonenweisen Herstellungsprozess begründet werden. Bei den Übergangsbereichen zwischen den Zonen einer Schicht wird aufgrund des charakteristischen Materialauftrags des Spritzbetons primär das höherfeste Material

The material law of *concrete damaged plasticity* [4], which is made available by the FE software, enables the reproduction of the non-linear material behaviour of both, reinforced and non-reinforced concrete. This elastic-plastic damage model is based on the further development of the Drucker-Prager yield criterion [5], [6] and is described in detail in [7]. An elastic-plastic material law with isotropic hardening is applied for the reinforcing steel, whose stress-strain relationship is characterized by a linear-elastic behaviour until the yield point and a subsequent plastic zone [8].

The numerical FE model described above is used to calculate the RL₅₅ and KL₅₅ test series from the project of the first funding phase, taking into account the presented material laws pertaining to concrete and reinforcement. RL₅₅ describes a reference test specimen with homogeneous material distribution and steel rebar reinforcement. The graded, reinforced (steel rebar) component KL₅₅ consists of an upper and a lower cover layer to absorb the bending moment and a triple-graded core, which is dimensioned according to the shear force prevailing in the component. Fig. 3 summarizes the results of the non-linear numerical simulation and those of the component tests. The simulation of the load-bearing performance of the solid reference component exhibits a sufficiently exact consensus with the experimental tests, thus confirming the chosen calculation approach. The systematic transfer of the identified modelling parameters to graded concrete components also enabled the sufficiently accurate reproduction of the experimentally determined load-bearing performance in the simulation. In the case of the linear-elastic state I of the segmented layout, the load-bearing performance had been marginally underestimated. This deviation can be explained by the automated layer-by-layer and zone-by-zone production process. In the transition areas between the zones of a layer and on account of the characteristic material application of the shotcrete, a high-strength material is primarily installed. It follows from this, that non-linear FE simulation is able to reproduce – reliably and with sufficient

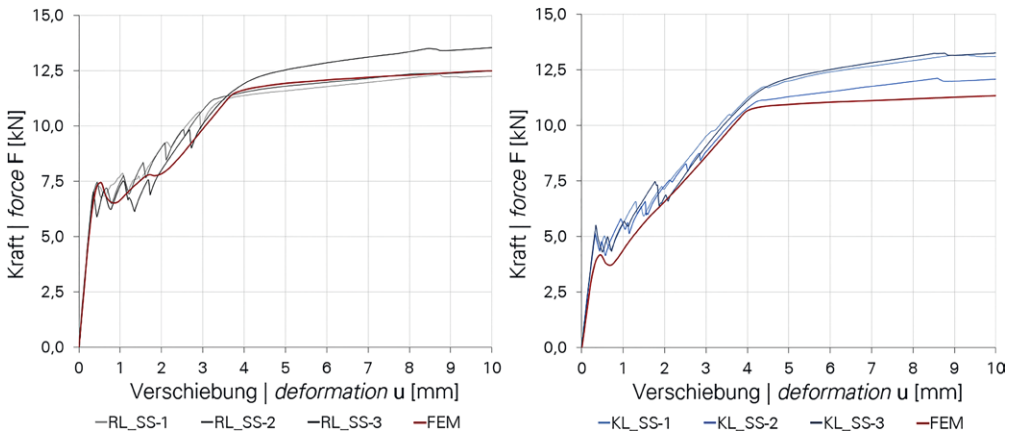


Bild 3: Gegenüberstellung von experimentell bestimmten Kraft-Verformungsdiagrammen aus den Versuchen der Serie RL_{SS} (grau) sowie KL_{SS} (blau) und den numerisch bestimmten Kraft-Verformungsdiagrammen (rot) | **Fig. 3:** Comparison of the experimental force displacement diagram for the test series RL_{SS} (grey) und KL_{SS} (blue) with the numerical force displacement diagram (red)

eingebaut. Daraus folgt, dass das Tragverhalten gradiert Betonbauteile auf charakteristischem Lastniveau durch die nichtlineare FE-Simulation auf der sicheren Seite liegend abgebildet wird. Entsprechend ermöglicht dieser Berechnungsansatz die Nachweisführung für das Bauteil in den Grenzzuständen von Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit.

Innerhalb des Projekts wurden außerdem Versuche an gradierten Betonbauteilen mit unterschiedlichen Bewehrungen (Carbonfasergelege, Glasfasergelege, Glasfaserstab und Basaltfaserstab) durchgeführt und numerisch berechnet. In der Simulation wurde das elastisch-plastische Modell der Bewehrung entsprechend den eingesetzten Materialien adaptiert. Die Kraft-Verformungsdiagramme der Versuchsserien und die Simulationsergebnisse sind beispielhaft für das Kammerlayout mit Glasfaser- (KL_{GS}) und Basaltfaserbewehrung (KL_{BS}) in Bild 4 zusammengefasst. Das Kraft-Verformungsverhalten spiegelt sowohl für die Versuche als auch die Simulation den typischen Verlauf für faserverbundbewehrte Betonbauteile nach [9] wider. Die Untersuchungen verdeutlichen, dass für mikrogradierte Betonbauteile das Tragverhalten auch für unterschiedliche Bewehrungen durch die nichtlineare FE-Simulation sehr gut wiedergegeben wird.

accuracy – the load-bearing performance of graded concrete components at characteristic load levels. Accordingly, this method of calculation makes it possible to validate the component in the ultimate limit state and in the service limit state.

Furthermore, tests were carried out and numerically simulated as part of the project by using graded concrete components with different reinforcement types (textile reinforcements made of carbon or glass fibres and rebars made of glass or basalt fibres). In the simulation, the elastic-plastic model of the reinforcement was adjusted according to the material used. The force-displacement diagrams of the test series and simulation are summarized in Fig. 4 exemplary. It is illustrated for the segmented layout reinforced by a rebar made of glass fibre (KL_{GS}) and of basalt fibre (KL_{BS}). The force-displacement behaviour reflects the typical trend for fibre-reinforced concrete components according to [9] in the tests as well as in the simulation. The examinations show that non-linear FE simulation at characteristic load level is able to deliver a satisfactory representation of the load-bearing performance of graded concrete components with different reinforcements.

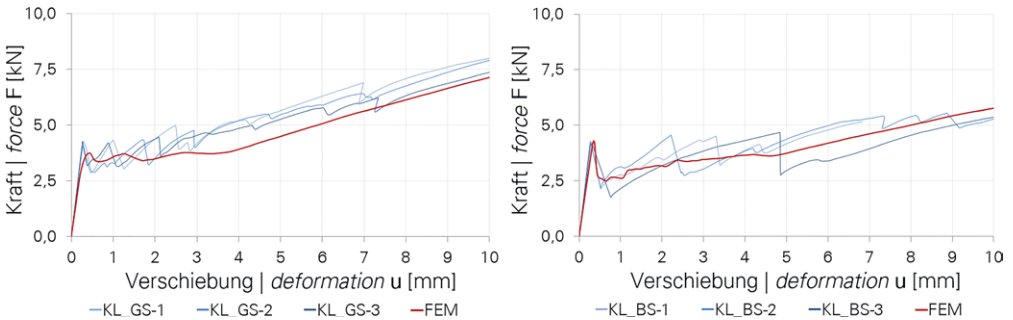


Bild 4: Gegenüberstellung von experimentell bestimmten Kraft-Verformungsdiagrammen aus den Versuchen der Serie KL_{GS} (blau, links) sowie KL_{BS} (blau, rechts) und den numerisch bestimmten Kraft-Verformungsdiagrammen (rot) | **Fig. 4:** Comparison of the experimental force displacement diagram for the test series KL_{GS} (blue, left) and KL_{BS} (blue, right) with the numerical force displacement diagram (red)

3.2 Entwurf mikrogradiertes Betonbauteile unter Berücksichtigung eines automatisierten Herstellungsprozesses

Der Entwurf funktional gradiertes Betonbauteile zielt auf die Bestimmung der idealen Steifigkeitsverhältnisse im Bauteil ab, sodass Spannungen homogenisiert und folglich der Materialeinsatz minimiert werden. Für eine detaillierte Beschreibung der Entwurfsgrundlagen sei sowohl auf den Buchbeitrag zum Vorgängerprojekt *Optimalstrukturen aus funktional gradierten Betonbauteilen* als auch auf [10] verwiesen. Auf diesen Ergebnissen aufbauend wurde der Gesamtprozess des Entwurfs erweitert, um die Randbedingungen des automatisierten Herstellungsverfahrens mit einzubeziehen. Der iterative Ablauf des erweiterten Entwurfsprozesses ist in Bild 5 schematisch dargestellt. In einem ersten Schritt werden dabei die Entwurfsrandbedingungen festgelegt, die im Hochbau zumeist durch die Bauteilgeometrie, Belastung, Auflagersituation und das Material vorgegeben sind. Auf Grundlage der Entwurfsrandbedingungen erfolgt eine Vordimensionierung inklusive der Bewehrungsdimensionierung, die zur Aufnahme der Zugkräfte im Betonbauteil notwendig ist. Dementsprechend werden die Menge und der Querschnitt bei ebener Bewehrungsführung ermittelt. Auch wenn mit einer ebenen Anordnung der Bewehrung im Bauteil keine tragstrukturelle Optimalität erreichbar ist. Eine der Beanspruchung nachfolgende Bewehrungsführung, die sich beispielsweise aus

3.2 Design of micro graded concrete components considering an automated production process

The design of functionally graded concrete components aims at determining the ideal stiffness configuration within the component so that stress fields are homogenized and consequently the use of material is minimized. For a detailed description of the design fundamentals, please refer to both, the report regarding the previous project *Optimal Structures made out of Functionally Graded Concrete* and to [10]. Based on the previous results, the overall design process was advanced to include the boundary conditions of the automated production process. The iterative design process is schematically depicted in Fig. 5. As a first step, the design's boundary conditions are determined, which in building construction are usually pre-defined by the component's geometry, the loads, the support and the material. On the basis of these boundary conditions, a pre-dimensioning is carried out including the reinforcement design, which is necessary to absorb the tensile forces within the concrete component. Correspondingly, quantity and cross section of the reinforcement are dimensioned. Even if a planar arrangement of the reinforcement in the component does not achieve structural optimality. Research at the ILEK is currently focused on a reinforcement design following the stress state within the component, which can be derived from known strut and tie models or determined by topology optimisation.

bekanntes Stabwerksmodell ableiten oder mit Verfahren der Topologieoptimierung bestimmen lässt, ist derzeit Gegenstand der Forschung am ILEK.

Im nächsten Schritt wird das sogenannte Gradientenlayout ermittelt, welches die ideale Material- bzw. Porositätsverteilung im Inneren des Betonbauteils beschreibt. Das Ziel dieser Optimierung besteht in der Minimierung des Eigengewichts der Konstruktion unter Einhaltung der Anforderungen an die Tragfähigkeit und die Gebrauchstauglichkeit. Hierfür stehen zwei Entwurfsprinzipien zur Verfügung: zum einen das Prinzip *design for strength*, bei dem die Materialverteilung nach den im Bauteil vorliegenden Beanspruchungen erfolgt; zum anderen das Prinzip *design for deformation*, bei dem das

The following step determines the so-called graded layout, which describes the ideal material or porosity distribution within the concrete component. The goal of this optimisation is to minimize the construction's dead weight, while complying with the requirements regarding to ultimate limit state (ULS) and service limit state (SLS). For this purpose, two design principles are available: on the one hand, the *design for strength* approach, in which the material is distributed according to the stress state in the component; on the other hand, the *design for deformation* approach, in which the material is distributed on the basis of a maximized bending stiffness of the component, while observing an admissible deformation limit. The required objective functions, and their possible optimisation solution, are known from the previous

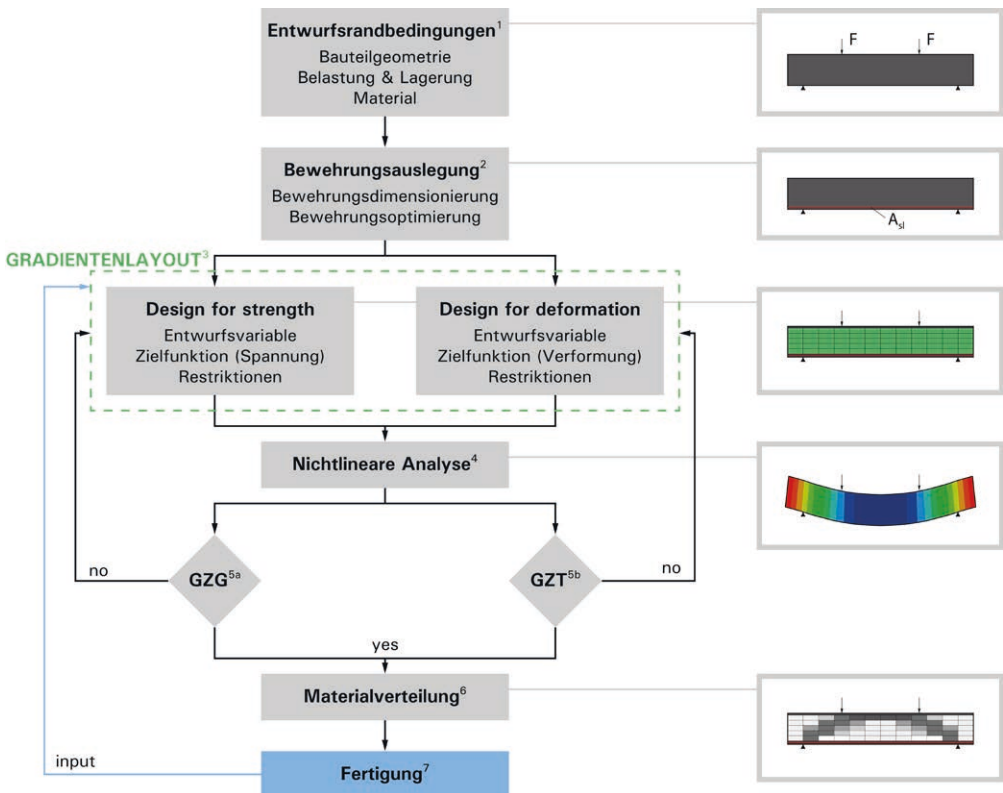


Bild 5: Ablaufdiagramm mit den einzelnen Phasen des Entwurfsprozesses | **Fig. 5:** Flow chart with the single design steps: ¹ design constraints; ² design of the reinforcement layout; ³ definition of the graded layout according to the principle design for strength or design for deformation; ⁴ non-linear finite element analysis; checking SLS ^{5a} and ULS ^{5b}; ⁶ final material distribution and ⁷ manufacturing

Material auf Basis einer Maximierung der Biegesteifigkeit des Bauteils bei einer zulässigen Grenzverformung verteilt wird. Die Formulierung der hierzu notwendigen Zielfunktionen und deren mögliche Optimierungslösung sind aus dem Vorgängerprojekt bekannt und auch in [10] ausführlicher beschrieben. In die zur Verfügung stehenden Optimierungsmethoden werden im Folgenden die Randbedingungen des automatisierten Fertigungsverfahrens sukzessive integriert, sodass ausschließlich herstellbare Materialverteilungen entworfen werden. Die materialspezifischen Optimierungsrandbedingungen können mit Hilfe des SIMP-Ansatzes im Bauteilentwurf berücksichtigt werden [10]. Dabei wird der zur Verfügung stehende Grenzbereich der Gradientenbetone über eine normierte E-Modul-Dichtebeziehung definiert. Diese Beziehung wird von der Basismischung MI mit einem E-Modul von 35.718 N/mm² bei zugehöriger Rohdichte von 2,21 kg/dm³ sowie der leichten Basismischung MII bei einer Rohdichte von 1,04 kg/dm³ und zugehörigem E-Modul von 7.754 N/mm² begrenzt. Zwischen diesen Grenzwerten kann der materialspezifische Anpassungsfaktor p frei gewählt werden. Im vorliegenden Fall werden für $p = 2$ die experimentell ermittelten Materialkennwerte sehr gut abgebildet (Bild 6), sodass nur herstellbare Dichten in der numerischen Simulation verwendet werden.

Die verfahrensbedingten Restriktionen der Schicht-zu-Schicht-Herstellung werden über eine Sektionierung des Entwurfsraumes berücksichtigt [11]. Durch die Zusammenfassung einzelner finiter Elemente zu Voxeln und deren Dichteoptimierung werden sprunghafte Eigenschaftsänderungen ausgeschlossen und kontinuierlich herstellbare Porositätsverläufe entworfen. Die Größe der Sektionen lässt sich je nach Auflösung des Materialauftrags individuell anpassen. Die Charakteristika des schichtweisen Fertigungsprozesses werden bei der Optimierung durch Anpassung des Dichtefilters erfasst. Der Filter ist so eingestellt, dass in der Horizontalen nur geglättete Materialübergänge möglich sind, wohingegen in der Vertikalen die Eigenschaftsänderungen nicht beschränkt werden. Darüber hinaus lässt sich die Material-

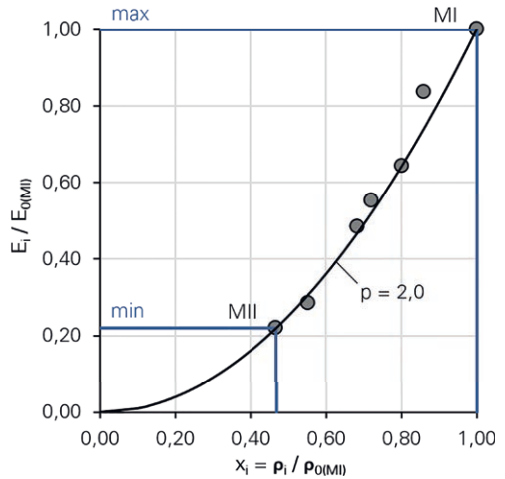


Bild 6: Anpassung des SIMP-Ansatzes an die Betoneigenschaften des automatisierten Trockenspritzverfahrens | Fig. 6: Adjustment of the SIMP approach to the concrete properties of the dry spraying technique

project and are also described in detail in [10]. To only design, such material distributions that are producible, the boundary conditions of the automated production process are successively integrated into the available optimisation methods. The material-related boundary conditions can be taken into account using the SIMP approach [10]. The available range for graded concretes is defined by a normalized relationship between Young's modulus and bulk density. This relationship is restricted to the base mixture MI, with a Young's modulus of 35,718 N/mm² at a corresponding bulk density of 2.21 kg/dm³, as well as the lightweight base mixture MII, with a bulk density of 1.04 kg/dm³ and corresponding Young's modulus of 7,754 N/mm². The material-related coefficient p can be freely selected between these limit values. In the present case, the experimentally determined material properties are mapped very well by a factor for $p = 2$ (Fig. 6), so that only producible densities are used in the numerical simulation.

The process-related restrictions of the layer-to-layer production are taken into account by sectioning the design space [11]. By combining individual finite elements to voxels, and opti-

verteilung bestimmter Voxel vorgeben, um konstruktive Randbedingungen bei der Optimierung abzudecken (z. B. die Betondeckung, den Bewehrungsverbund etc.). Zusätzlich kann die Anzahl an zur Verfügung stehenden Materialien unter Berücksichtigung der Bauteilgröße sowie der Dynamik des Misch-, Dosier- und Förderprozesses beschränkt werden.

Das aus der Optimierung mit linear-elastischem Materialverhalten resultierende Gradientenlayout wird abschließend durch die nichtlineare FE-Simulation auf Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit überprüft. Sollte einer dieser Nachweise nicht erfüllt sein, werden die Randbedingungen angepasst und die Optimierung erneut durchgeführt. Bild 7 zeigt beispielhafte Ergebnisse dieses Optimierungsprozesses. Bei der Materialverteilung ohne Einsatz des Dichtefilters ist ersichtlich, dass dieses Layout aufgrund der fein aufgelösten Materialverteilung (5 × 5 mm Elementgröße) mit der automatisierten Fertigung nicht realisierbar ist. Des Weiteren resultiert aus der nichtlinearen Berechnung ein frühzeitiges Querkraftversagen des Bauteils in Querschnittsmitte unter der Lasteinleitung. Durch Anpassung der Randbedingungen der Optimierung und den Einsatz des Dichtefilters kann diesen Problematiken begegnet werden. Daraus ergibt sich ein produzierbares Bauteil, das bei einer Gewichtsreduktion von 20 % allen Anforderungen der Standsicherheit gerecht wird.

minimizing the latter's density, incoherent changes in properties are excluded and continuously producible porosity distributions are created. The size of the sections can be individually adjusted according to the resolution of the material application. During the optimisation, the characteristics of the layer-by-layer production are captured by adjusting the density filter. The filter is set in such a way that only smoothed material transitions are enabled in the horizontal direction, whereas property changes in the vertical direction are unlimited. Furthermore, the material distribution of specific voxels can be predefined to cover structural boundary conditions during the optimisation (such as the concrete cover, the bond condition, etc.). Additionally, the number of available materials can be determined taking into account the component size as well as the dynamics of the mixing, dosing and conveying process.

The graded layout resulting from the optimisation with linear-elastic material behaviour is finally verified with regard to its ULS and SLS through a non-linear FE simulation. If one of these verifications cannot be provided, the boundary conditions are adjusted, and the optimisation is carried out again. Figure 7 illustrates exemplary results from this optimisation process. In the case of the material distribution without the use of the density filter, it is evident that this layout (element size of 5 mm × 5 mm) cannot be realized by means of automated production owing to the fine resolved material application. Moreover, the non-linear calculation results in an early shear-force failure of the component in the core zone under the load application. These problems can be solved by adjusting the optimisation's boundary conditions and by using the density filter. The result is a reproducible component that meets all requirements of the limit states, while reducing its weight by 20%.

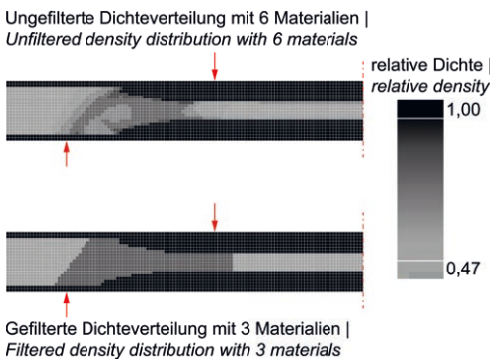


Bild 7: Dichteverteilung als Entwurfsergebnis der Optimierung ohne (oben) und mit Berücksichtigung von Verfahrensrandbedingungen | **Fig. 7:** Density distribution as an optimization result considering different boundary conditions

4 Verfahren zur Herstellung mikrograderter Betonbauteile (ISYS)

4.1 Automatisierte Herstellungsplattform

Im Rahmen des Forschungsprojekts wurde die zuvor realisierte Anlagentechnik systematisch weiterentwickelt und optimiert. Zentral ist hierbei die Automatisierung und vollständige Integration der Wiege-, Dosier- und Mischtechnik in die Herstellungsplattform zu nennen. Dadurch können ein gleichmäßiger Mischprozess und ein stetiger Materialfluss erzeugt werden, welcher die kontinuierliche Materialausgabe sicherstellt. Das weiterentwickelte Gesamtkonzept zur automatisierten Herstellung und dessen Realisierung ist in Bild 8 dargestellt.

4 Production process for micro graded concrete components (ISYS)

4.1 Automated production system

As part of the research project, the previously realized machine technology was developed further and systematically optimised. At this, it is crucial to mention the automation and full integration of the weighing, metering and mixing technology into the system. In this way, a homogenous mixing process and constant material flow are enabled, which ensure a continuous material output. The refined overall concept of automated production and its realization is depicted in Fig. 8.

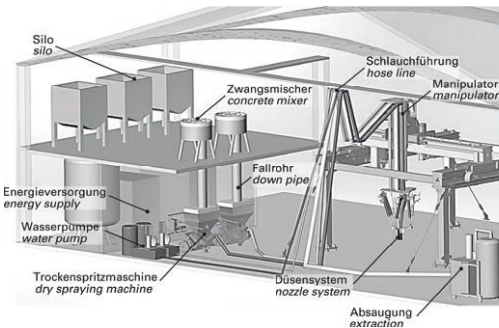


Bild 8: Gesamtkonzept und Realisierung der Plattform zur Herstellung funktional graderter Betonbauteile | **Fig. 8:** Concept and realization of the whole manufacturing system to produce graded concrete components

Innerhalb des Gesamtprozesses werden in einem ersten Schritt die trockenen Ausgangsstoffe für die Betonrezepturen aus den Silos den Zwangsmischern zugeführt. Die Zwangsmischer sind mit Wägezellen ausgerüstet, die eine Dosierung der Ausgangsstoffe sowie eine Erfassung der Materialströme in das System ermöglichen. Nach abgeschlossenem Mischvorgang werden die Basismischungen über Fallrohre den Trockenspritzmaschinen zugeführt. Der Materialstrom der Betone wird durch die Vorgabe einer spezifischen Drehzahl eingestellt und mittels eines geregelten Luftdrucks und Volumenstroms zur Düse gefördert. Zur Sicherstellung definierter und maximaler Krümmungsradien der Förderschläuche ist eine passive Linearführung in die Herstellungsplat-

As the first step of the overall process, the raw materials of the concrete recipe are from the silos supplied to the compulsory mixers. The mixers are equipped with weighing cells which allow dosing of the raw materials and recording of the material flows into the system. After completing the mixing process, the base mixtures were supplied to the dry-spraying machines via downpipes. The material flow of concretes is adjusted by setting a specific rotational speed and conveyed to the nozzle through controlled air pressure and volume flow. A passive linear guideway is integrated into the production system to ensure defined and maximum radii of curvature in the conveying hoses. The dry materials are mixed with water by using two wetting units situated in front of and within the

form integriert. Durch zwei unabhängige Benetzungseinheiten kann vor und in der Düse die Durchmischung der trockenen Ausgangsstoffe mit Wasser erfolgen. Anschließend kann die Gradierung der Betone auf Basis zweier Mischkonzepte umgesetzt werden. Zum einen werden bei der Zwei-Düsenteknologie die beiden Sprühstrahle entsprechend den geforderten Eigenschaften im Betonbauteil überlagert. Zum anderen werden bei der Ein-Düsenteknologie nach Benetzung der trockenen Ausgangsstoffe die Basismischungen in einer vorgelagerten Mischeinheit mit stationärem Strömungskörper zusammengeführt [12]. Die Ausbringvorrichtung beider Konzepte wird mit dem Manipulator, bestehend aus Mehrachslinearsystem und Stewart-Gough-Plattform, zielgerichtet geführt und stellt den positionsgenauen Auftrag der Spritzbetone somit sicher. Durch die Integration einer Absaugvorrichtung können Rückprall ebenfalls entfernt werden. Ein Laserdistanzsensor ermöglicht die Vermessung der Topografie des applizierten Materials.

4.2 Modellierung des Gesamtprozesses

Die Vielzahl an Variationsparametern im Herstellungsprozess erfordert zur Umsetzung der entworfenen Gradientenlayouts ein ganzheitliches Simulationsmodell. Das zugrundeliegende Modell muss sowohl die Abbildung dreidimensionaler und ortsbezogener Materialverläufe im Bauteil als auch die dynamischen Prozesse der Herstellungsplattform in adäquater Berechnungszeit ermöglichen. Insbesondere bei komplexen Gradientenlayouts stoßen die bislang eingesetzten zweidimensionalen Überlagerungsmodelle, welche Spritzstreifen mit konstanten Prozessparametern und Zustandsgrößen superpositionieren, an ihre Grenzen. Daher werden auf Basis der analytischen Modellierung der Teilprozesse sowie empirischer Untersuchungen die approximativen Modelle der Betonverfahrenstechnik und des Manipulators abgeleitet. Auf Grundlage dieser Modelle kann letzten Endes der Applikationsprozess simuliert und von der Plattform zielgerichtet umgesetzt werden [12]. Die Analysen zeigten,

the concretes can then be graded on the basis of two mixing concepts. On the one hand, in the case of the dual-nozzle technology, the two spray jets are superimposed according to the properties required within the concrete component. On the other hand, in the case of the single-nozzle technology, once the dry material has been wetted, the base mixtures are brought together through an upstream mixing unit that includes a stationary flow body [12]. The spreading device of both concepts can purposefully be guided with the manipulator's help – which consists of a multi-axial linear system and a Stewart-Gough platform – thereby ensuring a precise application of the shotcrete. By integrating a suction device, dust can be absorbed and unavoidable rebound can be eliminated, as well. A laser distance sensor enables the measuring of the applied material's topography.

4.2 Modelling of the overall process

The multitude of variation parameters in the production process requires a holistic simulation model to realise the designed gradient layouts. The underlying model must enable, within an adequate calculation time, the mapping of the three-dimensional and site-specific layout of the concrete characteristics within the component as well as the dynamic processes of the production system. Especially with complex gradient layouts, the used two-dimensional superimposition models, which overlap spray strips with constant process parameters and state variables, reach their limits. Accordingly, the approximate models of concrete technology and the manipulator are derived, on the basis of the analytical modelling of sub-processes and empirical studies [12]. Analyses have shown that with sufficient mixing time of the raw materials, this sub-process has no influence on the subsequent processes of the graded dry spraying technique. Thus a reduced model (Fig. 9), consisting of the dosing and conveying process as well as the application process under consideration of the manipulator, is sufficient for the simulation of the manufacturing platform.

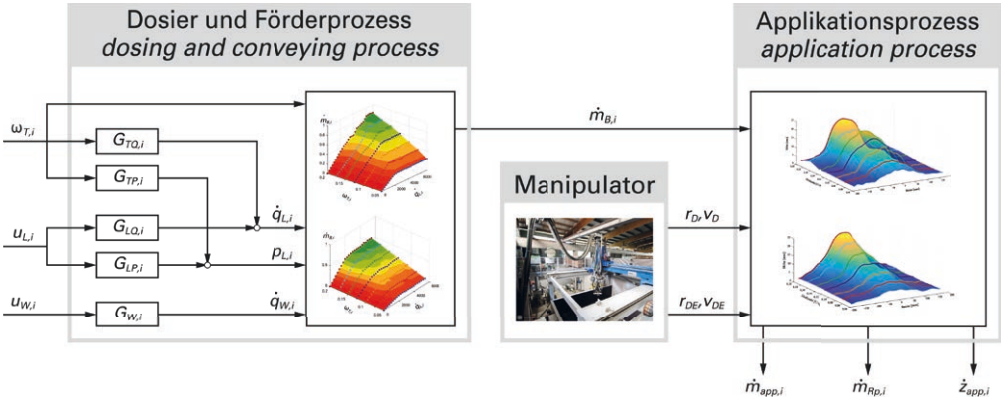


Bild 9: Reduziertes Modell der Herstellungsplattform | Fig. 9: Reduced model of the production system

dass bei hinreichender Mischdauer der Ausgangsstoffe dieser Teilprozess keinen Einfluss auf die nachfolgenden Prozesse des gradierten Trockenspritzverfahrens besitzt. Somit ist ein reduziertes Modell (Bild 9), bestehend aus Dosier- und Förderprozess sowie dem Applikationsprozess unter Berücksichtigung des Manipulators ausreichend, für die Simulation der Herstellungsplattform.

Für die Modellierung der Betonverfahrenstechnik konnten systemtheoretische Modelle identifiziert und experimentell validiert werden [12]. Diese beschreiben das dynamische Übertragungsverhalten ($G_{*,i}$) von den Eingangsgrößen des Systems – Drehzahl des Taschenrades $\omega_{i,r}$, Eingänge des Luftventils $u_{L,i}$ und des Wasserventils $u_{W,i}$ – auf die messbaren Zustandsgrößen Druck $p_{L,i}$ sowie Durchflüsse der Luft $\dot{q}_{L,i}$ und des Wassers $\dot{q}_{W,i}$. In Abhängigkeit der messbaren Zustandsgrößen können für beide Basismischungen pneumatische Zustandsdiagramme abgeleitet werden, welche die Rekonstruktion der Massenströme $\dot{m}_{B,i}$ ermöglichen. Des Weiteren kann überprüft werden, ob die notwendige Flugförderung der Betonkonglomerate sichergestellt ist. Die Dynamik des Manipulators ist mit der Methode der starren Mehrkörpersysteme modelliert, um die Düsenführungs- (r_D, v_D) und die Düsen eigenbewegung (r_{DE}, v_{DE}) zielgerichtet ausführen zu können. Weiterhin kann durch die analytische und approximative Modellierung von Frei- und Wand-

To model the concrete technology, system-theoretical models were identified and experimentally validated [12]. These models describe the dynamic transmission behaviour ($G_{*,i}$) of the system's input variables (rotational speed of the pocket wheel $\omega_{i,r}$, the input of the air valve $u_{L,i}$ and of the water valve $u_{W,i}$) on the measurable state variables (pressure $p_{L,i}$, air flow $\dot{q}_{L,i}$, and water flow $\dot{q}_{W,i}$). Depending on these state variables, pneumatic state diagrams can be derived for the base mixtures that enable the reconstruction of the mass flows $\dot{m}_{B,i}$. Furthermore, it is possible to check whether the required pneumatic transmission of the concrete conglomerates has been ensured. Manipulator dynamics are modelled by using the method of rigid multi-body systems to enable the guided nozzle motion (r_D, v_D) and the nozzle's self-motion (r_{DE}, v_{DE}) in a targeted manner. Moreover, the analytical and approximate modelling of the free jet and wall jet enables the shotcrete's application process to be mapped, and the free parameters to be identified by means of characteristic spraying slats [12]. On the one hand, the reduced model can be used to simulate both the dosing and conveying process of the material as well as the addition of liquids to the shotcrete. On the other hand, the mass distribution during the application process, that consists of applied material ($\dot{m}_{app,i}$) and rebound ($\dot{m}_{RP,i}$), as well as the theoretical layer-profile thickness in relation to time ($\dot{z}_{app,i}$) can be calculated. Fig. 10 shows in an exemplary simulation of the material ap-

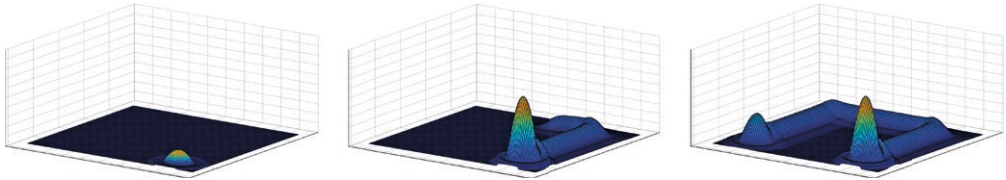


Bild 10: Simulation des Materialauftrags zu drei unterschiedlichen Zeitpunkten | **Fig. 10:** Simulation of the material application at three different time stages

strahl der Applikationsprozess des Spritzbetons abgebildet werden. Darauf aufbauend lassen sich die freien Parameter anhand der charakteristischen Spritzstreifen identifizieren [12]. Mit dem reduzierten Modell können einerseits der Dosier- und Förderprozess der Ausgangsstoffe sowie die Zugabe flüssiger Bestandteile zum fertigen Spritzbeton simuliert werden. Andererseits werden die Massenverteilung beim Applikationsprozess bestehend aus appliziertem Material ($\dot{m}_{app,i}$) sowie Rückprall ($\dot{m}_{RP,i}$) und die theoretische Schichtprofilstärke in Abhängigkeit der Zeit ($\dot{z}_{app,i}$) berechenbar. So zeigt Bild 10 exemplarisch die Simulation des Materialauftrags bei konstanten Prozessparametern und Zustandsgrößen der Basismischung MI zu drei unterschiedlichen Zeitpunkten. Die Führungsbewegung wird mittels einer mäanderförmigen Trajektorie ausgeführt und mit einer kreisförmigen Düseneigenbewegung überlagert. Neben der Simulation des Materialauftrags wird die Dynamik des Manipulators abgebildet und mit dem Matlab-Tool *Simscape* visualisiert [13].

plication with the base mixture MI at constant process parameters and state variables at three different points in time. The guided motion is carried out through a meander-shaped trajectory and superimposed with a circular nozzle's self-motion. Apart from simulating the material application, manipulator dynamics are mapped and visualized by using the Matlab tool *Simscape* [13].

The quality of the reduced overall model of the production system can be assessed by taking the characteristic material application as an example. Fig. 11 compares the simulated material application with the real material application. The reduced model can reproduce the real material distribution of the shotcrete on the application surface with sufficient accuracy. This confirms the chosen modelling approach and enables the shotcrete's three-dimensional simulation of the material application at varying process parameters and state variables.

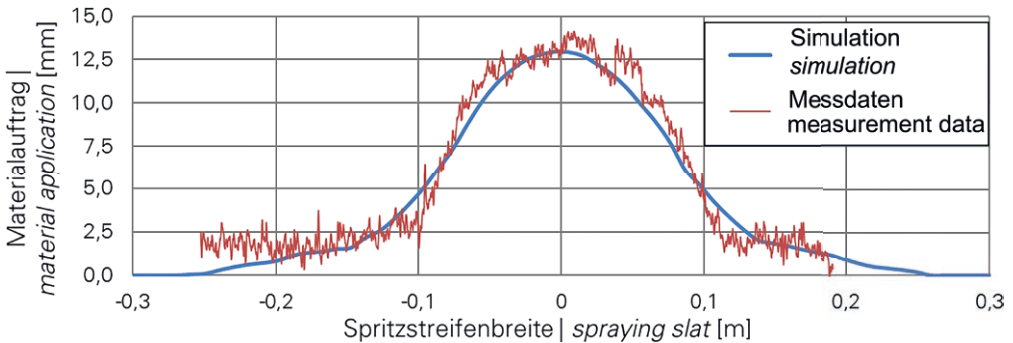


Bild 11: Exemplarisch vermessener und simulierter Spritzstreifen | **Fig. 11:** Validation of the simulated spraying slit with the experimental results

Am Beispiel des charakteristischen Materialauftrags kann abschließend die Güte des reduzierten Gesamtmodells der Herstellungsplattform bewertet werden. Bild 11 stellt beispielhaft den simulierten Materialauftrag dem tatsächlich gemessenen Materialauftrag gegenüber. Das reduzierte Modell kann dabei den realen Spritzreifen auf der Auftragsfläche mit hinreichender Genauigkeit abbilden. Dies bestätigt den gewählten Modellansatz und ermöglicht die dreidimensionale Simulation des Materialauftrags bei variierenden Prozessparametern und Zustandsgrößen.

4.3 Prozesssteuerung und -regelung zur Bauteilherstellung

Durch die Prozesssteuerung und -regelung wird zunächst der schichtweise Materialauftrag auf Grundlage des entworfenen Gradientenlayouts geplant. Auf Basis der Simulationsergebnisse können die erforderlichen Prozessdaten generiert werden und der Bauteilentwurf lässt sich umsetzen. Um den hohen Anforderungen zur Herstellung gradierteter Betonbauteile gerecht zu werden, wurde der in Bild 12 schematisch abgebildete, iterative Ablauf der Prozesssteuerung und -regelung konzipiert. Ein Hauptaugenmerk liegt dabei auf der Planung und Optimierung des Materialauftrags. Nur dadurch werden die positionsgenaue Applikation der Gradientenbetone sichergestellt und die reproduzierbare Betonqualität gewährleistet.

Aus dem Bauteilentwurf werden zunächst für den Herstellungsprozess alle relevanten Daten wie geometrische Abmessungen und Materialverteilung an die Prozesssteuerung und Prozessregelung übergeben. Aus der Simulation der mikrogradierten Betonbauteile resultieren positionsabhängige Informationen zu den Materialeigenschaften, welche die Grundlage zur Planung des Materialauftrags durch die Herstellungsplattform darstellen. Mit diesen Daten kann unter Anwendung des vorgestellten Simulationsmodells die Optimierung der charakteristischen Spritzbetonverteilung und der Prozessparameter des Gesamtsystems erfolgen. In den experimentellen Untersuchungen hat sich

4.3 Process control for the component production

Due to the process control, the layer-to-layer production is initially planned and implemented on the basis of the designed graded layout. Dependence of the simulation results, the required process data can be generated and the component design can be realized. In order to meet the high requirements for the production of graded concrete components, the iterative process control shown schematically in Fig. 12 was established. One of the main focuses lies on the planning and optimisation of the material application. Only this ensures the precise positioning during the application of the graded concretes and guarantees reproducible concrete quality.

All relevant data for the manufacturing process, such as geometry and material distribution, are first transferred from the conceptual design to the process control. Numerical simulations of the micro graded concrete components provide position-dependent information on the material properties that forms the basis for planning the material application through the production system. Based on these data, the characteristic shotcrete distribution and process parameters of the overall system can be optimised using the presented simulation model. The experimental analysis of the production system's state variables and process parameters showed that, for a given material property $p_{i,j}$, only the concrete-conveying rate p_F and the speed of the nozzle's guiding movement v_D are available as free parameters to influence the characteristic distribution of the shotcrete on the application surface. Beside these two parameters, the material application during the manufacturing is centrally determined by the superposition of the characteristic material application, while considering the starting positions of the spraying stripes, their distance from each other and their number. By sectioning the concrete components into layers i and zones j the material application can be planned layer-by-layer and zone-by-zone, with regard to the different demands for the load-bearing capacity. Corre-

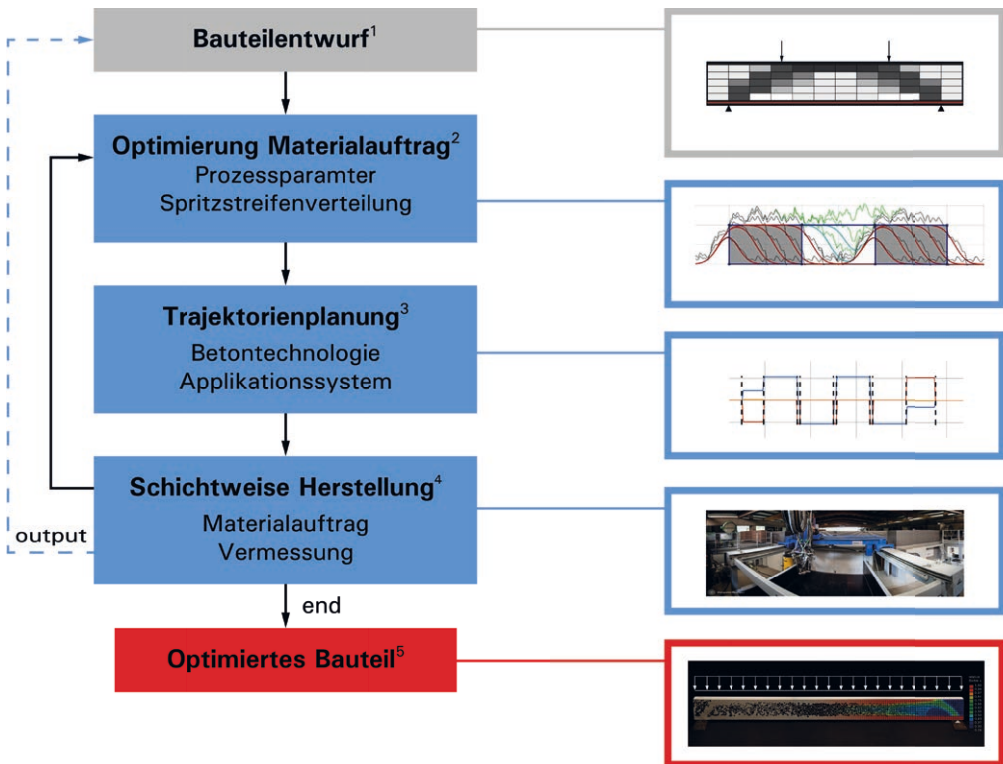


Bild 12: Ablaufdiagramm mit den einzelnen Phasen des Herstellungsprozesses | Fig. 12: Flow chart with the single production steps: ¹ component design, ² optimization of the material application, ³ trajectory planning, ⁴ additive manufacturing and ⁵ optimized component

dabei herausgestellt, dass für eine gegebene Materialeigenschaft $p_{i,j}$ einzig die Betonförderleistung p_F und die Düsenführungsgeschwindigkeit v_D als freie Parameter zur Beeinflussung der Verteilung des Spritzbetons zur Verfügung stehen. Neben diesen beiden Parametern wird der Materialauftrag bei der Bauteilherstellung durch die Superposition der charakteristischen Materialverteilungen anhand der Startposition der Spritzbahnen, deren Abstand und Anzahl zentral determiniert. Mit der bereits aus dem Entwurf bekannten Sektionierung des Betonbauteils in Schichten i und Zonen j kann die Planung des Materialauftrags unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Ansprüche an die Tragfähigkeit Schicht für Schicht sowie Zone für Zone durchgeführt werden. Dementsprechend kann die Zielfunktion für die optimale Materialverteilung innerhalb einer Zone aus der Gleich-

spondingly, the objective function for optimizing the material distribution in a zone can be obtained from the uniformity of the layer thickness of this zone $G_{S,i,j}$ and the uniformity of the layer thicknesses of the adjacent left zone $G_{S,i,j-1}$ and right zone $G_{S,i,j+1}$ and formed as follows:

$$J = [G_{S,i,j} \quad e_{S,i,j,\min} \quad G_{S,i,j-1} \quad e_{S,i,j-1,\min} \quad G_{S,i,j+1} \quad e_{S,i,j+1,\min}]^T$$

For the optimization, the absolute minimum error $e_{S,i,j,\min} = ||\min (S_{S,i,j}(x,y) - S_{soll,i,j}(x,y))||$ of the target layer $S_{soll,i,j}(x,y)$ from the applied layer $S_{S,i,j}(x,y)$ is integrated in the objective function of the optimisation algorithm. The weighting of the minimum error enables, for example, the guarantee of a specific minimum concrete thickness for the reinforcement's complete embedding [12]. The result of the material application's optimi-

mäßigkeit der Schichtdicke dieser Zone $G_{s,i,j}$ sowie der Gleichmäßigkeit der Schichtdicken der benachbarten linken $G_{s,i,j-1}$ und rechten Zone $G_{s,i,j+1}$ wie folgt gebildet werden:

$$J = [G_{s,i,j} \quad e_{s,i,j,\min} \quad G_{s,i,j-1} \quad e_{s,i,j-1,\min} \quad G_{s,i,j+1} \quad e_{s,i,j+1,\min}]^T$$

Dabei wird der absolute minimale Fehler $e_{s,i,j,\min} = ||\min(S_{s,i,j,(x,y)} - S_{\text{soll},i,j,(x,y)})||$ der Sollschicht $S_{\text{soll},i,j,(x,y)}$ von der applizierten Schicht $S_{r,i,j,(x,y)}$ in die Zielfunktion des Optimierungsalgorithmus integriert. Durch die Gewichtung des minimalen Fehlers kann beispielsweise gezielt eine Mindestbetondicke für die vollständige Einbettung der Bewehrung sichergestellt werden [12]. Exemplarisch ist das Ergebnis der Optimierung des Materialauftrags in Bild 13 für eine beispielhafte Schicht mit drei Zonen dargestellt. Zonen, die für die Tragfähigkeit des Bauteils entscheidend sind, werden möglichst zuerst mit der Basismischung MI gefüllt. Übergangsbereiche zwischen verschiedenen beanspruchten Zonen können durch Gewichtungsfaktoren in der Zielfunktion des Optimierungsalgorithmus eingestellt werden. Somit werden Zonen mit höheren Ansprüchen an die Tragfähigkeit vollständig mit dem vorgeschriebenen Material ausgefüllt, bei niedrigfesten Zonen wirken sich Abweichungen nicht nachteilig auf die Tragfähigkeit aus und werden in Grenzen toleriert. Anschließend werden die äußeren Zonen mit der leichten Basismischung MII materialisiert, um das Gradientenlayout der Schicht zu vervollständigen.

Die aus der Planung und Optimierung des Materialauftrags resultierenden Prozessdaten liefern die Grundlage zur Trajektoriengenerierung für die Komponenten der Betonverfahrenstechnik und des Manipulators. Unter Berücksichtigung

sation is shown in Figure 13, by the example of a three-zone layer. Zones that are decisive for the load-bearing capacity of the component are possibly filled first with the basic mixture MI. Transition areas between different stressed zones can be adjusted purposefully through weighting factors in the objective function of the optimisation algorithm. Thus, zones with higher requirements on the load-bearing are completely filled with the specified material; in the case of weak zones, deviations do not adversely affect the load-bearing capacity and are tolerated within limits. Afterwards, the outer zones are materialized by using the lightweight basic mixture MII to complete the layer's graded layout.

The process data resulting from the planning and optimisation of the material application provide the basis for generating trajectories for the concrete technology and for the manipulator. With regard to the time delays and the dynamics of the mixing, dosing and conveying process, the manipulator's trajectories are synchronised with those of the concrete technology [12]. The mass flows of the concretes are adjusted according to these target trajectories. The nozzle's predefined guiding- and self-motion are realised by the manipulator. After applying a layer, it is measured by a laser distance sensor, while the rebound of the shotcrete conglomerates is removed by suction. The measured shotcrete surface is then used for planning the material application of the following layer, in this way, possible disturbances in the production process can be compensated. A detailed description of the process steps for producing components can be found in [12].

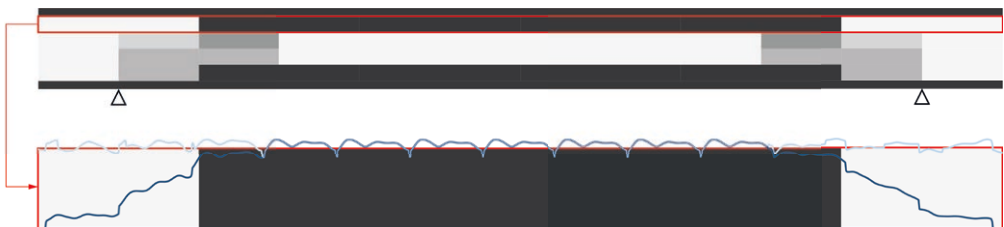


Bild 13: Optimierte Materialverteilung für eine beispielhafte Schicht eines Layouts | **Fig. 13:** Optimized material application for an exemplary layer

der Zeitverzögerungen und der Dynamik des Misch-, Dosier- und Förderprozesses werden die Trajektorien des Manipulators mit denen der Betonverfahrenstechnik synchronisiert [12]. Entsprechend diesen Solltrajektorien werden die Massenströme der Betone eingestellt. Die vorgegebene Düsenführungs- und Düseneigenbewegung wird durch den Manipulator realisiert. Nach der Applikation einer Schicht wird diese mittels eines Laserdistanzsensors vermessen, gleichzeitig wird der Rückprall der Spritzbetonkonglomerate durch die Absaugung entfernt. Die vermessene Spritzbetonoberfläche wird anschließend der Planung des Materialauftrags der folgenden Schicht übergeben, sodass mögliche Störungen im Produktionsprozess kompensiert werden können. Eine detaillierte Beschreibung der Prozessschritte zur Bauteilherstellung findet sich in [12].

5 Experimentelle Validierung des erweiterten Gesamtprozesses zu Entwurf und Herstellung mikrograder Betonbauteile

5.1 Bauteilentwurf und Herstellung (ILEK, ISYS, IWB)

Analog zum Vorgängerprojekt wurden im Rahmen dieses Projekts Bauteilversuche an skalierten Probekörpern (Länge $l = 120$ cm, Breite und Höhe $b = h = 10$ cm) durchgeführt, um die erweiterte Gradientenbetontechnologie vergleichend bewerten zu können. Dies erfolgte an drei exemplarischen Materialverteilungen (Bild 14). Es wurden ein Referenzlayout (RL) mit homogener Materialverteilung, eine abgestufte Gradierung auf Basis der inneren Schnittkräfte (KL = Kammerlayout) und das zuvor entworfene Layout auf Basis der Topologieoptimierung unter Berücksichtigung der Herstellungsrestriktionen der automatisierten Gradiententrockensprüh-technik (TL = Topologielayout) gewählt. Als Bewehrung kamen Stahlstäbe, Glasfaserstäbe, Basaltfaserstäbe, Glasfasergelege und Carbonfasergelege zum Einsatz.

Auf Basis des vorgestellten schematischen Ablaufs zur Prozesssteuerung und -regelung wer-

5 Experimental validation of the advanced process for the design and production of micro graded concrete components

5.1 Component design and production (ILEK, ISYS, IWB)

Analogous to the previous project, experimental component tests were carried out on scaled test specimens (length $l = 120$ cm, width $b = 10$ cm and height $h = 10$ cm) to comparatively evaluate the advanced technology of graded concrete. This was conducted by using three layouts as examples and their consequent material distribution is illustrated in Fig. 14. A reference layout (RL) was selected that is characterised by a homogeneous material distribution, a segmented gradation based on the internal forces (KL = segmented layout) and the previously designed layout that results upon the topology optimisation while considering production-related restrictions of the automated graded dry-spraying technique (TL = topological layout). Steel, glass-fibre and basalt-fibre rebars, as well as planar textile reinforcements made of carbon or glass fibres, are used as reinforcement.

On the basis of the presented schematic procedure for process control, the designed graded layouts are manufactured by the advanced production system. The exemplary use of the topological layout in Fig. 15, compares the target distribution of the material with the actually produced and measured layer structures. It illustrates that the developed automated process enables the planning and reproducible production of graded components with complex material distribution in accordance with the specified requirements. The transition areas between the zones and the border of the formwork could also be carried out as designed by the developed process [12].

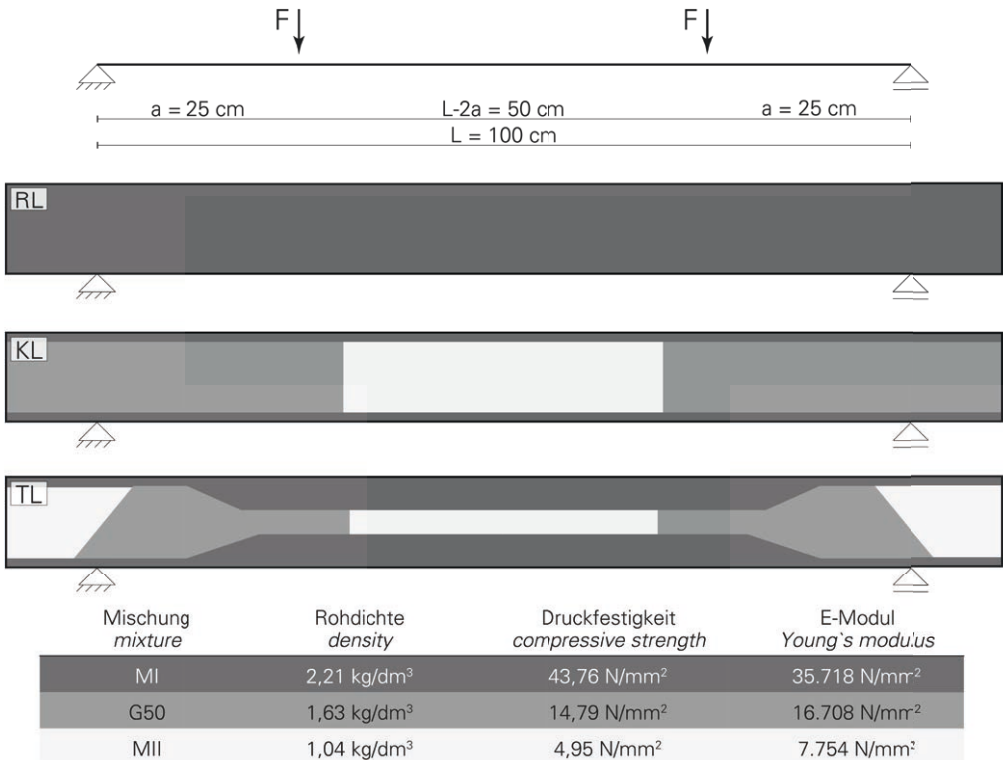


Bild 14: Materialverteilung der untersuchten Probekörper | Fig. 14: Material distribution of the test specimens

den die entworfenen Gradientenlayouts mit der weiterentwickelten Herstellungsplattform gefertigt. Bild 15 stellt beispielhaft für das Topologielayout die Soll-Materialverteilung des Entwurfs den tatsächlich hergestellten und vermessenen Schichtstrukturen gegenüber. Daraus ist ersichtlich, dass mit dem entwickelten Gesamtprozess gradierte Bauteile mit komplexer Materialverteilung sowohl planbar sind, als auch reproduzierbar hergestellt werden können. Auch die Übergangsbereiche zwischen den Zonen und die Randbereiche an der Schalung konnten durch den entwickelten Prozess entwerfungsgemäß ausgeführt werden [12].

5.2 Bauteilprüfung (ILEK)

Das Potential der erweiterten Gradientenbontentechnologie soll im Folgenden anhand der drei entworfenen Layouts exemplarisch für die

5.2 Component testing (ILEK)

By using the three designed layouts with steel reinforcement as examples, the potential of the advanced technology of graded concrete is illustrated in the following. During the testing, all test specimens reach the design value and exhibit the typical force-displacement behaviour at the point of bending failure (Fig. 16). The load-bearing performance of the graded test specimens differ notably in the linear-elastic state of force displacement compared to a component with a solid full cross-section.

As a result of the gradation, and owing to the lower Young's modulus of the graded concretes, the elastic cross-sectional stiffness is reduced. The outcome is a lower degree of stiffness in state I at reduced cracking load. Moreover, it is evident that the stiffness-based optimisation

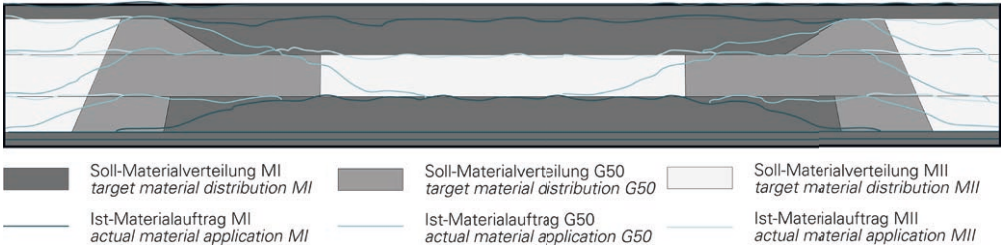


Bild 15: Gegenüberstellung von Soll-Materialverteilung und gemessenem Schichtauftrag der Versuchsserie TL | **Fig. 15:** Comparison of the target material distribution with the measured material application from a test specimen of the series TL

stabstahlbewehrten Probekörper verdeutlicht werden. Alle Probekörper erreichen im Versuch den dimensionierten Bemessungswert und zeigen das typische Kraft-Verformungsverhalten bei Biegeversagen (Bild 16). Das Tragverhalten der gradierten Probekörper unterscheidet sich im Vergleich zu einem Bauteil mit massivem Vollquerschnitt vor allem im linear-elastischen Bereich der Kraft-Verformungsbeziehung.

Durch die Gradierung wird die elastische Biegesteifigkeit aufgrund des niedrigeren E-Moduls der gradierten Betone reduziert, was zu einer früheren Erstrissbildung führt. Zudem ist zu

process has led to a positive improvement regarding the force-displacement behaviour of the graded test-specimen series TL, compared to the KL test series. This is reflected in the lower deformation at the same load level. However, this improvement entails a lower mass reduction at 17% compared to the segmented layout of 22% in relation to the reference layout. Upon reaching the first crack load $F_{c,cr}$, the test specimens show a qualitatively uniform force-displacement progression in all test series, with only a slight deviation of the maximum test force at the end of the test.

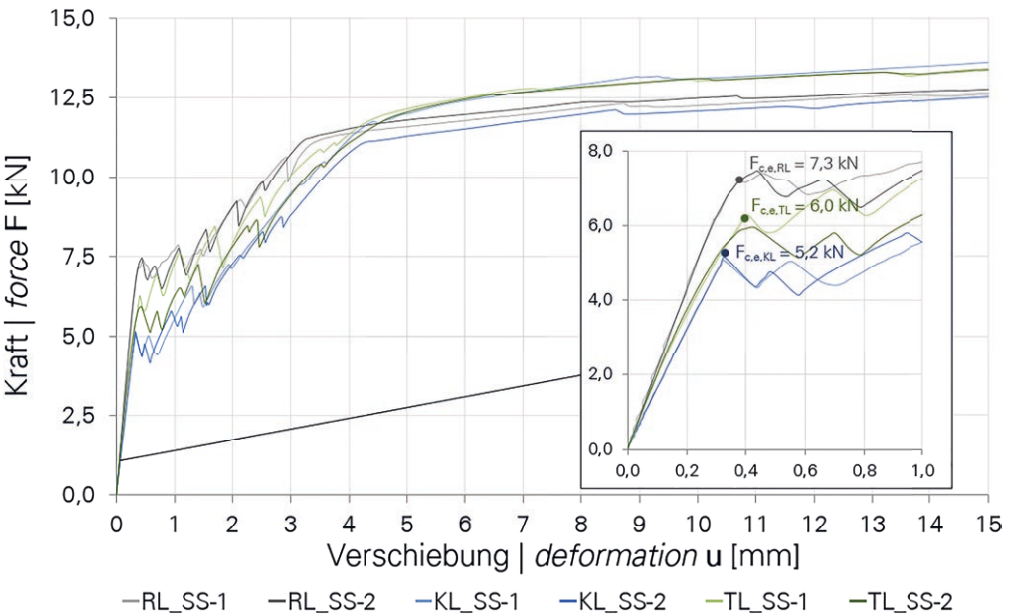


Bild 16: Kraft-Verformungsdiagramm der stabstahlbewehrten Versuchsserie RL_{SS} (grau), KL_{SS} (blau) und TL_{SS} (grün) | **Fig. 16:** Force-displacement diagram of the steel reinforced test series RL_{SS} (grey), KL_{SS} (blue) and TL_{SS} (green)

Versuchsserie Test series	RL _{SS}	KL _{SS}	TL _{SS}
Erststrisslast First crack force $F_{c,e}$ [kN]	7,29	5,24	6,04
Prüfkraft Load at failure F_{max} [kN]	13,22	13,67	13,73
Max. Moment Moment at failure M_{dV} [kNm]	1,65	1,71	1,71
Versagensart Failure mode	Biegeversagen Bending failure		
Probekörpermasse Specimen's mass m_{ist} [kg]	27,8	21,7 (-22 %)	23,2 (-17 %)

Tabelle 1: Gemittelte Prüfergebnisse der stabstahlbewehrten Versuchsserie RL_{SS}, KL_{SS} und TL_{SS} | **Table 1:** Mean values of the experimental test results of the steel reinforced test series RL_{SS}, KL_{SS} and TL_{SS}

erkennen, sich das Kraft-Verformungsverhalten der gradierten Probekörperserie TL gegenüber der Versuchsserie KL verbessert hat. Dies zeigt sich in der geringeren Verformung bei gleichem Lastniveau. Allerdings geht die Verbesserung mit einer geringeren Masseneinsparung von 17 % im Vergleich zum Kammerlayout mit 22 % bezogen auf das Referenzlayout einher. Nach Erreichen der Erststrisslast $F_{c,e}$ weisen die Probekörper in allen Versuchsserien einen qualitativ einheitlichen Kraft-Verformungsverlauf bei nur geringfügiger Abweichung der maximalen Prüfkraft am Versuchsende auf (Tabelle 1).

5.3 Ökologische Bilanzierung (ILEK)

Im Rahmen einer ganzheitlichen Bilanzierung wurden die ökologischen Vorteile der Gradientenbetontechnologie am Fraunhofer Institut für Bauphysik (IBP), Stuttgart, in Zusammenarbeit mit dem ILEK untersucht. Dabei wurde die direkte Massenreduktion in ökologische Wirkungskategorien überführt, die von den verwendeten Betonmischungen, dem Bauteilentwurf und dem Herstellungsverfahren beeinflusst werden. Am Beispiel eines automatisiert hergestellten, gradierten Deckenstreifens (5,0 × 1,0 × 0,2 m) wurde die Technologie exemplarisch bilanziert und mit einem konventionellen Betonfertigbauteil gleicher Geometrie verglichen. Das entworfene und simulativ hergestellte Bauteil aus Gradientenbeton besitzt in allen untersuchten Kategorien Vorteile gegenüber der konventionellen Referenzdecke. Neben der primären Massenersparnis von rund 30 % kann der Bedarf an Bewehrungsstahl zusätzlich um etwa 10 % reduziert werden. In der Wirkungskategorie des Treibhauspotentials (GWP) liegen die Einsparungen bei rund 7 %. Dieses Potential

5.3 Ecological assessment (ILEK)

The ecological advantages of the technology of graded concrete were investigated at the Department of Life Cycle Engineering at the Fraunhofer Institute for Building Physics in cooperation with the University of Stuttgart's Institute for Lightweight Structures and Conceptual Design (ILEK). In this regard, the direct mass reduction was converted into ecological impact categories, which are influenced by the concrete mixtures used, the component design and the production technique. By taking the example of an automatically produced, graded floor slab (5.0 m × 1.0 m × 0.2 m), the technology was assessed and compared to a conventional precast concrete component with the same functional features. The designed and simulative produced component made out of graded concrete, possesses advantages in all examined categories over the conventional reference slab. Besides the primary mass reduction of around 30%, the required amount of reinforcing steel can be reduced by an additional 10%. Reductions in the impact category of global warming potential (GWP) amounts to about 7%. This potential has not yet been fully exploited and can be further increased by optimising the base mixtures and ensuring that production plants are supplied with sustainable energy. These results indicate that the developed technology of graded concrete already exhibits great ecological and economic potential, which can be developed further. Secondary reduction effects resulting from a weight reduction of load-transferring elements such as walls and supports have not yet been taken into consideration.

ist derzeit noch nicht vollständig ausgeschöpft und kann durch die Optimierung der Basismischungen sowie eine nachhaltige energetische Versorgung der Produktionsanlage gesteigert werden. Diese Ergebnisse verdeutlichen, dass die entwickelte Gradientenbetontechnologie bereits ein hohes ökologisches und ökonomisches Potential besitzt, das zudem weiter ausgebaut werden kann. Sekundäre Einspareffekte infolge einer Gewichtsreduktion der lastweiterleitenden Elemente wie Wände und Stützen sind hierbei noch unberücksichtigt.

6. Entwicklung der Mesogradierung von Betonbauteilen

6.1 Herstellung von mineralischen Hohlkugeln (ILEK, ISYS, IWB)

Bei der Mikrogradierung ist an jeder Stelle im Bauteil Material zu platzieren, dessen minimale Rohdichte mit dem Trockenspritzverfahren derzeit auf $1,0 \text{ kg/dm}^3$ herabgesetzt werden kann. Dies hat zur Folge, dass in den sehr niedrig beanspruchten Bereichen des Bauteils immer noch eine ineffiziente Materialausnutzung vorliegt. Durch den Einbau von größeren Hohlräumen in das Bauteil kann dieser Problematik begegnet werden. Beispielsweise werden in der Baupraxis zweiachsige Hohlkörperdecken auf Grundlage dieses Ansatzes realisiert [15]. Die dort verwendeten Kunststoffhohlkörper ermöglichen jedoch keine Gradierung und sind zudem in ihrer Rezyklierfähigkeit als kritisch zu bewerten. Diese Aspekte führten zur Erforschung von Herstellungsansätzen für mineralische Hohlkörper unterschiedlicher Form und Größe.

Zur Herstellung dünnwandiger, mineralischer Hohlkörper wurden Verfahren aus materialübergreifenden Bereichen innerhalb des Projekts analysiert [16]. Als besonders vielversprechend sind Beschichtungs-, Press- und Rotationsverfahren zu bewerten, mit denen Hohlkörper erfolgreich hergestellt werden konnten (Bild 17). Beim Beschichtungsverfahren [17] wurde ein verllorener Kern, hier ein Rezyklat aus Mineralwolle, in einem Tauchbadver-

6 Development of meso graded concrete components

6.1 Production of mineral hollow spheres (ILEK, ISYS, IWB)

In the case of the micro graded concrete, material has to be placed at every point within the component, of which the material is currently reducible to a minimum bulk density of 1.0 kg/dm^3 by dry spraying. As a result, the material used in the component zones that are subjected to very low stress is inefficiently utilised. This problem can be counteracted by integrating hollow bodies into the component. For instance, in construction practice, so-called bubble decks are realised on the basis of this approach [15]. However, the plastic hollow bodies used there do not allow for gradation and must be critically assessed regarding to their recyclability. These reasons have led to the development of production methods for mineral hollow bodies in varying shape and size.

Within the project, different methods for the production [16] of hollow bodies were analysed and transferred to the manufacture of thin-walled, mineral hollow bodies [16]. Coating, pressing and rotation processes with which hollow bodies could be successfully produced are particularly promising (Fig. 17). In the coating process, a lost core – in the form of a recycle of mineral wool – is coated with a concrete slurry in a procedure involving an immersion bath and is thereby sealed [17]. In the case of the pressing method, hemispherical shells with defined wall thicknesses could be produced by pressure forming [18]. First, a defined quantity of concrete slurry is filled into a negative mould; then a stamp is lowered, forming an annular gap in the desired wall thickness in which the flowable concrete is distributed. In a further process step, two cured spherical shells are joined, creating hollow spheres of uniform size and wall thickness. In the rotational-moulding procedure, a mould containing the raw material is subjected to biaxial rotation, so that the liquid-state material can be evenly distributed [19], [20]. Translating this method



Bild 17: Prototypen von mineralischen Hohlkörpern, hergestellt (von links nach rechts) im Beschichtungs-, Press- und Rotationsverfahren | **Fig. 17:** Prototypes of concrete hollow spheres produced by coating, pressing and rotating (from left to right)

fahren mit einer Betonsuspension umhüllt und dadurch abgedichtet. Mit dem Pressverfahren [18] konnten Halbkugelschalen mit definierten Wandstärken durch Druckumformung erzielt werden. Hierbei wurde eine definierte Menge einer Betonsuspension in eine Negativform gefüllt. Durch Absenken eines Stempels bildete sich ein Ringspalt entsprechend der gewünschten Wandstärke, in dem sich der fließfähige Beton verteilte. Zwei ausgehärtete Halbschalen wurden dann in einem weiteren Prozessschritt gefügt, wodurch Hohlkugeln mit gleichmäßiger Größe und Wandstärke entstanden. Beim Rotationsverfahren wurde eine Form mit dem zuvor eingefüllten Ausgangsstoff in eine biaxiale Rotation versetzt, sodass sich das im flüssigen Zustand befindliche Material gleichmäßig verteilen konnte [19], [20]. Übertragen auf die Herstellung von Betonhohlkugeln musste die Betonsuspension eine entsprechende Konsistenz für eine gleichmäßige Verteilung des Materials besitzen und während des Rotationsvorganges schnellstmöglich erstarren. Durch eine gezielte Rezepturanpassung des Betons ist es mit dieser Methode möglich, Hohlkugeln unterschiedlichen Durchmessers mit Wandstärken von lediglich 1 bis 4 mm zu realisieren.

Letztgenanntes Verfahren stellte sich aufgrund der wenigen Prozessschritte, der Möglichkeit vielfältiger Formgebung sowie der hohen Qualität der Hohlkörper als das zielführende Verfahren heraus. Der Rotationsprozess wurde daher mittels einer Zentrifuge inklusive Formhalterung automatisiert (Bild 18), um mineralische Hohlkörper in großer Anzahl und in gleichbleibender Güte herzustellen. Die Zentrifuge besteht aus einem äußeren und einem inneren

to the production of mineral hollow spheres, it needs to be ensured that the concrete slurry possesses a suitable consistency to enable an even distribution of the material and the quickest-possible solidification during the rotational process. A targeted adjustment of the concrete formulation, enables with this approach the realisation of hollow spheres with different diameters and wall thicknesses of no more than 1 mm to 4 mm.

The latter approach is best suited for automated production due to its reduced process steps, the possibility of varied shaping and the high quality of the hollow bodies. It turns out, that the rotational process is the most effective due to the small number of process steps, the possibility of a variety of shapes and the high quality of the hollow bodies. Therefore, this process was automated by means of a centrifuge including mould holder (Fig. 18) in order to produce a large number of mineral hollow bodies of constant quality. The centrifuge consists of an outer and inner frame, of which rotation can independently be controlled by an individual servomotor with absolute encoders. The mould holder in the inner frame is used to fix the formwork and submit the latter to biaxial rotation. The distribution of the liquid concrete slurry in the formwork is ensured by rotational speeds of up to 50 Hz. The mould holder is designed to be variably adjustable, thus enabling the use of formwork systems with sizes of up to 300 mm × 300 mm. As a result, the size of the formwork system is designed to be variably adjustable, thereby enabling, the production of individual large-scale hollow bodies or large quantities of smaller hollow bodies with

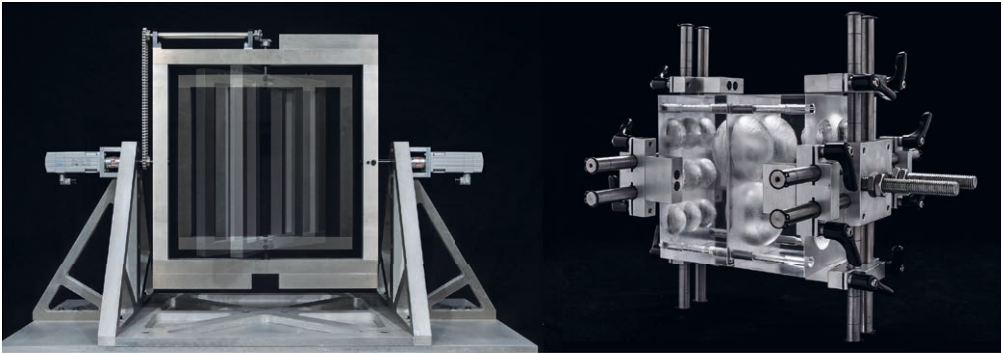


Bild 18: Zentrifuge und Schalungsblock zur automatisierten Herstellung mineralischer Hohlkörper | **Fig. 18:** Zentrifuge and formwork system for the automated production of mineral hollow parts

Rahmen, welche durch je einen Servomotor mit Absolut-Encoder in ihrer Rotation unabhängig voneinander gesteuert werden können. Mittels der Formhalterung im inneren Rahmen kann der Schalungsblock fixiert und in eine biaxiale Rotation versetzt werden. Durch Rotationsgeschwindigkeiten von bis zu 50 Hz wird die Verteilung der flüssigen Betonsuspension in der Schalung sichergestellt. Die Formhalterung ist variabel verstellbar konzipiert, sodass Schalungsblöcke mit einer Größe von bis zu 300 mm × 300 mm eingesetzt werden können. Dadurch können der Schalungsblock flexibel in seiner Größe ausgeführt und individuelle, großformatige Hohlkörper oder eine Vielzahl kleinerer Hohlkörper mit gleicher Geometrie in einem Rotationsvorgang gefertigt werden.

Der Prozess zur Herstellung der Hohlkörper beginnt mit der Bereitstellung der Betonsuspension, der je nach Anforderung des Hohlkörpers Kurzfasern hinzugefügt werden können. In Abhängigkeit der Größe und der gewünschten Wandstärke des Hohlkörpers wird anschließend eine exakt abgestimmte Betonmenge in eine der Schalungshälften gefüllt. Nach Zusammenfügen der beiden Hälften zum Schalungsblock wird dieser mit der Formhalterung in der Zentrifuge fixiert. Durch ein Prozessleitsystem werden die Rotationsbewegung und die Verweilzeiten auf Basis einer Trajektoriengenerierung zielgerichtet geregelt. Dies garantiert eine vollständige und gleichmäßige Verteilung des Materials in der Schalungsform. Durch die hohen Rotations-

the same geometrical features in a single rotational process.

The process for the production of hollow bodies starts with the preparation of the concrete slurry to which short fibres may be added according to the requirements of the hollow body. Depending on the size and desired wall thickness of the hollow bodies, a precisely adjusted quantity of fresh concrete is then poured into one of the formwork halves. After joining the formwork system together, it is fixed in the centrifuge with the mould holder. A process control system purposefully controls the rotational movement and residence times based on a trajectory generation. This ensures a complete and even distribution of the material in the formwork. Owing to the high rotational speed during the centrifugation, as well as the associated energy input, the solidification of the concrete is delayed. This can be counteracted by successively throttling the speed as soon as the material has been distributed. Accordingly, the accelerator reaction is enabled, and the concrete suspension can solidify. The production time is largely determined by the complexity of the hollow body's shape and the concrete slurry used. Once the concrete hardened, the hollow bodies can be stripped. The research results show that hollow bodies of consistent quality can be produced and that forms the basis for practical use in construction.

geschwindigkeiten beim Zentrifugieren und den damit verbundenen Energieeintrag verzögert sich die Erstarrung des Betons. Dem kann durch eine sukzessive Drosselung der Geschwindigkeit nach der Verteilung des Materials entgegenge-wirkt werden, damit die Reaktion des Beschleunigers stattfinden und die Betonsuspension erstarren kann. Die Produktionszeit wird maßgeblich durch die Komplexität der Hohlkörperform und die verwendete Betonsuspension bestimmt. Nach abschließender Aushärtung des Betons können die Hohlkörper ausgeschalt werden. Die Forschungsergebnisse zeigen, dass mit diesem Verfahren Hohlkörper gleichbleibender Qualität reproduzierbar hergestellt werden können und die Grundlage für einen baupraktischen Einsatz damit geschaffen ist.

6.2 Entwurfsansatz zur Mesogradierung (ILEK)

Auch bei der Mesogradierung wird im Entwurf das Ziel verfolgt, den Materialeinsatz einer monofunktional lastabtragenden Struktur zu reduzieren. Hierzu muss eine optimierte Verteilung von Hohlkörpern unter Berücksichtigung ihrer Geometrie und Größe bestimmt werden. Ein naheliegender Entwurfsansatz kann aus Stabwerkmodellen [21] abgeleitet werden. Dabei werden die Trajektorien einzelner Spannungsfelder im Bauteil zu resultierenden Druck- und Zugstreben zusammengefasst und entsprechend dimensioniert. Die sich ausbildenden Stabwerke sind vergleichbar mit den Minimalstrukturen von Michell [22] und können als Vorbild herangezogen werden. Idealerweise werden somit die Streben größter Hauptspannung dimensioniert und materialisiert. Die Zwischenräume werden mit Hohlkörpern ausgefüllt. Bei dieser Verteilungsstrategie werden sehr komplexe und sich in ihrer Form nicht wiederholende Hohlkörper im Bauteil notwendig. Dies ist für eine baupraktische Anwendung mit den derzeit zur Verfügung stehenden Herstellungstechniken nur bedingt umsetzbar. Aus diesem Grund beschränken sich die Forschungen derzeit auf die Verwendung von kugelförmigen Hohlkörpern, um ein Gewichtsmilieu mit wiederholbarer Kugelgeometrie und reduzierter Kugelanzahl zu ermöglichen [23].

6.2 Design approach for meso graded concrete components (ILEK)

Also for meso gradation, the aim of the design is to reduce the material consumption of a mono-functional load-bearing structure. For this purpose, an optimised distribution of hollow bodies, must be determined, considering their geometry and size. An obvious design approach can be derived from the so-called strut-and-tie models [21]. The trajectories of individual stress fields within the component are consolidated into resulting struts and ties and correspondingly dimensioned. The resulting lattice structures are comparable to the minimal structures of Michell [22] and can be used as a role model. Ideally, the struts and ties of the largest principal stress are thereby dimensioned and materialised. The gaps are filled with hollow bodies. This distribution strategy requires very complex hollow bodies with non-recurring shapes within the component. For application in practical construction, this can only be implemented to a limited extent with the production techniques currently available. Therefore, current research is restricted to investigating the use of hollow spheres in order to enable a weight minimisation with repeatable sphere geometry and a reduced number of spheres [23].

In order to achieve an optimised distribution of the hollow spheres, they must touch each other, which is not the case with the products currently used in practice. Based on this condition, the arrangement of hollow spheres with maximum mass reduction is found in the theory of the sphere packing [24], [25]. Possible arrangements, and their potentials for mass reduction in concrete components, are explained in detail in [16]. One option is the simple cubic packing of spheres, where the sphere centres are situated on a three-dimensional orthogonal grid with an equivalent node spacing to the sphere diameter (Fig. 19, top). This distribution strategy achieves a weight reduction of 52%, if the sphere diameter is an integer multiple of the component geometry. The material paths formed between the hollow spheres occupy

Um eine optimierte Verteilung von Hohlkugeln zu erreichen, müssen sich diese untereinander berühren, was bei den derzeit in der Praxis eingesetzten Produkten nicht verfolgt wird. Wird dies aber als Voraussetzung definiert, findet man die Anordnung der Hohlkugeln mit maximaler Masseneinsparung mit Hilfe der Theorie der dichtesten Kugelpackungen [24], [25]. Mögliche Anordnungen und deren Masseneinsparpotential bei Betonbauteilen sind in [16] ausführlicher erläutert. Eine Möglichkeit besteht in der kubisch primitiven Anordnung der Kugeln, bei der die Kugelmittelpunkte auf den Knotenpunkten eines dreidimensionalen orthogonalen Gitters liegen. Der Abstand der Knotenpunkte ist dabei äquivalent zum Kugeldurchmesser. Mit dieser Verteilungsstrategie ist eine Gewichtsreduktion von 52 % möglich, wenn der Kugeldurchmesser einem ganzzahligen Vielfachen der Bauteilgeometrie entspricht (Bild 19, oben). Die sich zwischen den Hohlkugeln bildenden Materialpfade nehmen die Form eines Vierendeelträgers (linear) oder eines Trägerrostes (flächig) ein. Eine Reduktion des Kugeldurchmessers und damit die Anordnung von mehreren kleineren Kugeln innerhalb des Bauteils haben bei der kubisch primitiven Packung keinen Einfluss auf die Gewichtsreduktion. Sie bewirkt lediglich eine veränderte Materialverteilung innerhalb des Bauteils. Eine Steigerung des Hohlraumvolumens kann zunächst durch eine Änderung der Kugelanordnung erreicht werden. Die Verwendung der dichtesten Kugelpackung, bei der eine Kugel 12 weitere Kugeln berührt, führt maximal zu einer 74%igen Massenreduktion des Bauteils. Die lastabtragende Struktur zwischen den Hohlkugeln nimmt dabei die Form eines räumlichen Stabwerks mit veränderlichen Querschnitten ein. Die zwischen den gepackten Hohlkugeln befindlichen Lücken können zur weiteren Massenreduktion wiederum mit Kugeln immer kleineren Durchmessers gefüllt werden (Bild 19, unten). Dies führt konsequenterweise zur Theorie der Sieblinie. Ausgehend von den Untersuchungen von Fuller und Thompsen [26] ist somit ein theoretisches Hohlraumvolumen von über 90 % erzielbar [23].

the bearing structure of a Vierendeel girder (linear) or grid (planar). A reduction of the sphere diameter and thus the arrangement of several smaller spheres within the component have no influence on the weight reduction in simple cubic packing. It only changes the material distribution within the component. An increase in the cavity volume can initially be achieved by changing the sphere arrangement. The use of the closest sphere packing, in which one sphere touches 12 other spheres, leads at most to a 74% mass reduction of the component. In this regard, the load-bearing structure between the hollow spheres takes the form of a spatial framework with variable cross sections. The gaps between the packing spheres can be filled with spheres of increasingly smaller diameters for further mass reduction (Fig. 19, down). Consequently, this leads to the theory of the grading curve. Following the research by Fuller and Thompsen [26], a theoretical void content of more than 90% is achievable [23].

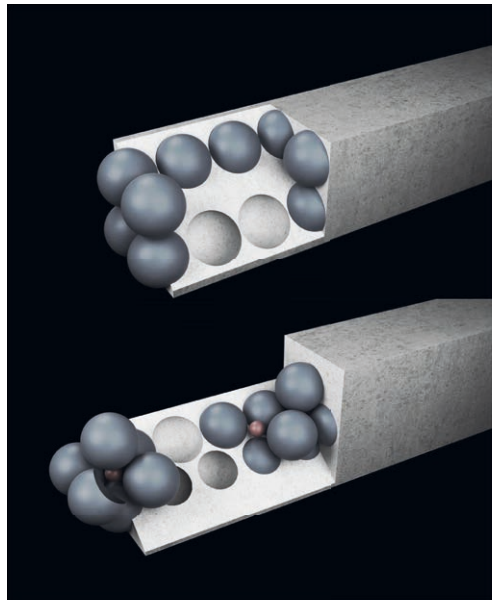


Bild 19: Kubisch primitive Kugelpackung (oben) und dichteste Kugelpackung mit Füllung der Tetraederlücken durch weitere Kugeln (unten) | **Fig. 19:** Simple cubic packing of spheres (top) and face centred packing of spheres with additional spheres placed inside the tetrahedral gaps (down)

6.3 Ansätze zur Herstellung mesogradierter Betonbauteile (ISYS, ILEK)

Die zielgenaue Positionierung der Hohlkugeln sowie deren Lage- und Auftriebssicherheit stellen eine große Herausforderung bei der Bauteilherstellung dar. In der baupraktischen Umsetzung herkömmlicher zweiachsiger Hohlkörperdecken werden die Hohlkörper zwischen zusätzlichen Bewehrungslagen zur Gewährleistung der Auftriebssicherheit eingebaut. Das Bauteil wird dann in mehreren Lagen betoniert [27]. Beim Nachweis der Tragfähigkeit dieser Systeme darf die Bewehrung zur Auftriebssicherheit nicht angesetzt werden. Zusätzlich müssen die infolge des Betonageverfahrens entstehenden Verbundfugen berücksichtigt werden [15].

Um diesen Aspekten zu begegnen, wurden im Projekt neue Ansätze für den Herstellungsprozess von Bauteilen mit integrierten Hohlkörpern erarbeitet. Ein Herstellungsansatz besteht in dem Einbau eines vorgefertigten Systems aus Hohlkörpern und Bewehrung unter Verwendung eines selbstverdichtenden und rasch erstarrenden Betons. Der Volumenstrom beim Betonieren ist auf das Erstarrungsverhalten des Betons so abgestimmt, dass das zunehmende Konstruktionseigengewicht gegenüber der steigenden Auftriebskraft stets überwiegt. Eine in der Haftfläche zwischen Kugel und Beton entstehende Zugkraft darf dabei die Adhäsion

6.3 Production approaches for meso graded concrete components (ISYS; ILEK)

Ensuring the precise placement of the hollow spheres as well as their positional and flotation stability, represents a major challenge in the production of these components. In the practical implementation of bubble decks, the hollow bodies are placed between additional reinforcement layers for flotation stability and the component is casted in two layers [27]. When verifying the load-bearing capacity of these systems, the additional reinforcement for flotation stability must not be assessed. Additionally, due to the casting method, the bond between the layers must be checked [15].

To cover these aspects, new approaches were developed in the project for the production process of components with integrated hollow bodies. One production approach consists of the integration of a prefabricated system of hollow bodies and reinforcement, using self-compacting and rapidly solidifying concrete. Therefore, the volume flow during the casting process must be adjusted to the solidification behaviour, while ensuring that the increasing dead weight of the construction outweighs the rising flotation force. A tensile force generated in the bonding area between sphere and concrete must not exceed the adhesive force between hollow body and fresh concrete. This is ensured by concrete technology through the timely addi-

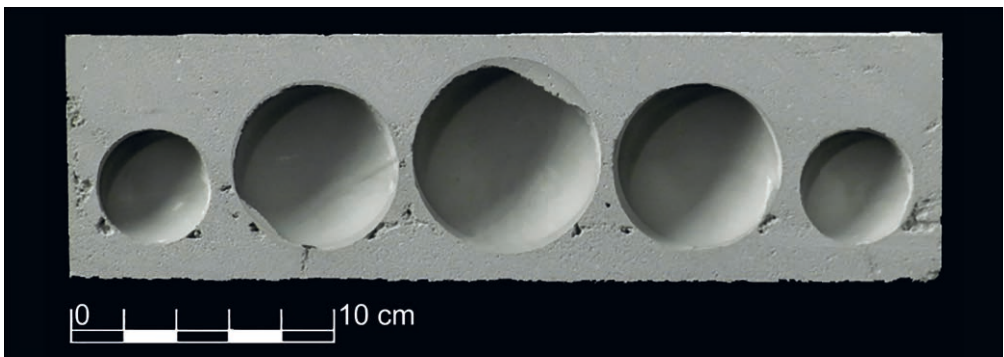


Bild 20: Prototypischer Probekörper eines automatisiert hergestellten Bauteils mit Hohlkugeln | Fig. 20: Prototype of a concrete component with hollow spheres produced in an automated spraying process

onskraft zwischen Hohlkörper und Frischbeton nicht überschreiten. Dies wird betontechnologisch durch die zeitlich abgestimmte Zugabe von Erstarrungsbeschleuniger sichergestellt. Weitere Untersuchungen zur Herstellung zeigten ein hohes Potential bei der robotischen Platzierung der Hohlkugeln in die frische Betonstruktur während des Spritzprozesses. Bild 20 zeigt ein Muster, das mit der Herstellungsplattform im Trockenspritzverfahren gefertigt wurde. Dargestellt ist sowohl die Soll- als auch die Ist-Lage der Hohlkugeln im Bauteil. Die Gegenüberstellung verdeutlicht, dass Lage- und Auftriebssicherheit während des schichtweisen Herstellungsprozesses eingehalten wurden. Lediglich unterhalb der Kugeln sind kleine Lunkerbildungen zu erkennen, die durch eine detaillierte Analyse des Verfahrens und eine entsprechende Adaption der Applikationstechnik behoben werden können. Beispielsweise kann durch die Änderung der Düsenorientierung zur Auftragsfläche zielgerichtet Material unterhalb der Kugeln platziert werden.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Gradierte Betonbauteile, deren Bauteilinnenraum an die vorherrschenden statischen und/oder bauphysikalischen Beanspruchungen angepasst ist, stellen einen innovativen Ansatz zur Herstellung von gewichtsreduzierten, multifunktionalen und vollständig rezyklierbaren Bauteilen dar. Von den Ergebnissen des SPP-Projekts *Optimalstrukturen aus funktional gradierten Betonbauteilen* ausgehend wurden im Rahmen der Forschungsarbeiten die Schnittstellen von Betontechnologie, Entwurf sowie automatisierter Fertigung systematisch ausgearbeitet und die Teilaspekte in einen ganzheitlichen Prozess überführt. Damit wird es erstmals möglich, mikrogradierte Betonbauteile unter Berücksichtigung von materialspezifischen und verfahrenstechnischen Randbedingungen zu entwerfen. Dieser digitale Fertigungsplan erlaubt durch die weiterentwickelte automatisierte Herstellungsplattform inklusive Prozessleitsystem die zielgenaue Produktion der Bauteile. Die Analysen der empirischen Ergeb-

tion of accelerator. Further production-related research indicated a high potential in the robotic placement of hollow spheres in the fresh concrete structure during the spraying process. Fig. 20 illustrates the result of a prototype production through dry spraying. Both the target and the actual position of the hollow spheres in the component are shown. The comparison makes it clear that position and floatation safety were maintained during the layer wise spraying process. Small unwanted blowholes are only visible below the spheres; they can be remedied through a detailed investigation of the process and the corresponding adaptation of the application technology. For example, by changing the nozzle orientation towards the application area, material can purposefully be placed underneath the spheres.

7 Summary and outlook

Graded concrete components represent an innovative approach for the production of weight-reduced, multi-functional and completely recyclable components due to the stress-based design of their interior structures in accordance with the prevailing static and/or construction-related requirement profiles. Based on the results of the project *Optimal Structures made out of Functionally Graded Concrete Components*, the interfaces between concrete technology, design methods and automated production techniques were systematically researched, and sub-aspects translated into an overall process. This makes it possible for the first time to design graded concrete components taking into account material-specific and process-engineering boundary conditions. This digital production strategy allows the targeted production of components through the advanced automated production system that includes the process control system. The analyses of the empirical results demonstrate that mass reductions of well over 20% are achievable. Further research was conducted into the foundations of a new scale level, the so-called macro gradation. The mineral hollow bodies required for this purpose can be automatical-

nisse zeigen, dass Masseneinsparungen von weit über 20 % erreicht werden können. Des Weiteren konnten die Grundlagen für eine neue Maßstabsebene – die sogenannte Mesogradierung – erforscht werden. Die hierfür eigens entwickelten mineralischen Hohlkörper können durch mit Hilfe einer Zentrifuge automatisiert hergestellt werden. Die Hohlkugeln führen bei entsprechender Verteilung im Bauteil zu einer weiteren Steigerung der Massenreduktion.

Die zukünftigen Forschungen im Bereich des Gradientenbetons zielen auf die systematische und ganzheitliche Weiterentwicklung der Technologie ab. Dabei nehmen die Funktionsintegration und Multifunktionalität gradierter Betonbauteile eine zentrale Rolle ein. Auf tragstruktureller Ebene sollen einerseits der Entwurf und die Herstellung von Betonbauteilen mit Mesogradierung abschließend erforscht werden. Andererseits wird an der Integration einer beanspruchungsgerechten Bewehrungsführung sowohl im Entwurf als auch im Herstellungsprozess gearbeitet.

Danksagung

Die Autoren danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) für die Förderung des Projekts Nr. 257610789 innerhalb des Schwerpunktprogramms SPP 1542.

ly produced by the realised centrifuge. Subject to the appropriate material distribution in the component, the resulting hollow spheres can lead to a further increase in the component's mass reduction.

Prospective research in the field of graded concrete must aim at the systematic and holistic further development of the technology. In this regard, the integration of functions and the multi-functionality of graded concrete components play a key role in fully exploiting the potential of the technology. On the one hand, at the level relevant to the bearing structure, conclusive research is planned with regard to the design and production of macro graded concrete components. On the other hand, research is required in terms of the integration of a stress oriented reinforcement layout, both in the design and the production process.

Acknowledgement

The authors would like to thank the German Research Foundation (DFG) for funding the project (number 257610789) within the Priority Programme SPP 1542.

Literatur | References

- [1] Sobek, W.: Die Zukunft des Leichtbaus: Herausforderungen und mögliche Entwicklungen. Bautechnik 92 (2015) 12, S. 879–882 – DOI: 10.1002/bate.201500093
- [2] Bever, M. B.; Duwez, P. E.: Gradients in composite materials. Materials Science and Engineering 10 (1972) 1, S. 1–8 – DOI: 10.1016/0025-5416(72)90059-6
- [3] Rödel, J.: Verfahren zur Herstellung von Gradientenwerkstoffen. Patent DE 44 35 146 A1, 4.4.1996
- [4] Dassault Systèmes Simulia Corp.: Analysis of concrete structures with Abaqus. Providence, RI, 2009
- [5] Lubliner, J.; Oliver, J.; Oller, S.; Oñate, E.: A plastic-damage model for concrete. International Journal of Solids and Structures 25 (1989) 3, S. 299–326 – DOI: 10.1016/0020-7683(89)90050-4
- [6] Lee, J. H.; Fenves, G. L.: Plastic-damage model for cyclic loading of concrete structures. Journal of Engineering Mechanics ASCE 124 (1998) 8, S. 892–900 – DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9399(1998)124:8(892)
- [7] Mark, P.: Zweiachsig durch Biegung und Querkräfte beanspruchte Stahlbetonträger. Habilitationsschrift, Ruhr-Universität Bochum, 2006
- [8] Dassault Systèmes Simulia Corp.: Abaqus Analysis User's Manual, Vol. 3: Materials. Providence, RI, 2014
- [9] Jesse, F.: Tragverhalten von Filamentgarnen in zementgebundener Matrix. Diss., TU Dresden, 2004
- [10] Herrmann, M.: Gradientenbeton – Untersuchungen zur Gewichtsoptimierung einachsiger biege- und querkraftbeanspruchter Bauteile. Diss., Universität Stuttgart, 2015
- [11] Wörner, M.; Schmeer, D.; Schuler, B.; Pfänder, J.; Garrecht, H.; Sawodny, O.; Sobek, W.: Gradientenbetontechnologie: von der Mischungsentwicklung über den Bauteilentwurf bis zur automatisierten Herstellung. Beton- und Stahlbetonbau 111 (2016) 12, S. 794–805 – DOI: 10.1002/best.201600056
- [12] Wörner, M.: Automatisierte Herstellung funktional gradierter Betonbauteile. Diss., Universität Stuttgart, 2017
- [13] MathWorks Inc.: MATLAB Documentation. 29th printing. Natick, MA, 2017
- [14] Wörner, M.; Schmeer, D.; Schuler, B.; Sawodny, O.; Sobek, W.: The technology of graded concrete – Interface between design and manufacturing. In: Bögle, A.; Grohmann, M. (Hrsg.): Interfaces: architecture.engineering.science – Proc. of the IASS Annual Symp. 2017, 25.–28.09.2017 in Hamburg, Hamburg: HCU und IASS, 2017, Beitrag Nr. 9601, Book of Abstracts: S. 153, Langfassung auf USB-Stick: 8 S.
- [15] Albert, A.; Pfeffer, K.; Schnell, J.: Hohlkörperdecken. In: Bergmeister, K.; Fingerloos, F.; Wörner, H.-D. (Hrsg.): Beton-Kalender 2017, Bd. 2, Berlin: Ernst & Sohn, 2017, S. 519–549 – DOI: 10.1002/9783433606803.ch10
- [16] Schmeer, D.; Sobek, W.: Weight-optimized and mono-material concrete components by the integration of mineralized hollow spheres. In: Bögle, A.; Grohmann, M. (Hrsg.): Interfaces: architecture.engineering.science – Proc. of the IASS Annual Symp. 2017, 25.–28.09.2017 in Hamburg, Hamburg: HCU und IASS, 2017, Beitrag Nr. 9600, Book of Abstracts: S. 152, Langfassung auf USB-Stick: 9 S.
- [17] Zoch, H.-W.; Spur, G. (Hrsg.): Handbuch Wärmebehandeln und Beschichten. München: Hanser, 2015
- [18] Dietrich, J.; Tschätsch, H.: Praxis der Umformtechnik: Umform- und Zerteilverfahren, Werkzeuge, Maschinen. 11. Aufl., Wiesbaden: Springer Vieweg, 2013
- [19] Ashton, L.; Christensen, R. J.; Crane, R. L.: Process and apparatus for forming hollow structures from powdered thermoplastic materials. Patent US 47 76 996 A, 11.10.1988
- [20] Crawford, R. J. (Hrsg.): Rotational moulding of plastics. 2. Aufl., Taunton: Research Studies Press, 1996
- [21] Schlaich, J.; Schäfer, K.: Konstruieren im Stahlbetonbau. In: Eibl, J. (Hrsg.): Beton-Kalender 2001, Vol. 90, Bd. 2, Berlin: Ernst & Sohn, 2001, S. 311–492
- [22] Michell, A. G. M.: The Limits of Economy of Material in Frame-structures. The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science 8 (1904) 47, Series 6, S. 589–597 – DOI: 10.1080/14786440409463229
- [23] Sobek, W.: Über die Gestaltung der Bauteilinnerräume. In: Scheerer, S.; van Stipriaan, U. (Hrsg.): Festschrift zu Ehren von Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Manfred Curbach, Dresden: Institut für Massivbau der TU Dresden, 2016, S. 62–76
- [24] Sloane, N. J. A.: The packing of spheres. Scientific American 250 (1984) 1, S. 116–125 – DOI: 10.1038/scientificamerican0184-116
- [25] Conway, J. H.; Sloane, N. J. A.: Sphere packings, lattices and groups. 3. Aufl., New York et al.: Springer, 1999
- [26] Fuller, W. B.; Thompson, S. E.: The laws of proportioning concrete. Transactions of the American Society of Civil Engineers 59 (1907) 2, S. 67–143
- [27] Heinze Cobiax Deutschland GmbH: Betondecken leicht gemacht – Technologie – Umsetzung. URL: <http://www.cobiax.com/technologie/umsetzung> (abgerufen am 27.2.2018)

Bildnachweise | Picture credits

- Bilder | Pictures 2–7, 14, 16, 20; 17 [16]: Daniel Schmeer
- Bilder | Pictures 8, 10–12, 15; 9 [12]; 13 [14]: Mark Wörner
- Bilder | Pictures 1; 18 [16]: Gabriela Metzger
- Bild 19 | Picture 19 [23]: Werner Sobek

Bereits publizierte Bilder wurden meist gegenüber der Originalquelle modifiziert. | Already published pictures were mostly modified compared to the original source.

Projektdaten | Project data

Allgemeine Angaben | General information

Effiziente automatisierte Herstellung multifunktionaler gradierter Bauteile mit mineralischen Hohlkörpern

Efficient automated Production of multifunctional graded components with mineral hollow bodies

Antragsteller 1 Applicant 1:	Prof. Dr.-Ing. Harald Garrecht Institutsleiter Institute's director
DFG-Geschäftszeichen DFG reference number:	GA 519/5-1 (Projektnummer Project number: 257610789)
Adresse Address:	Universität Stuttgart, Institut für Werkstoffe im Bauwesen (IWB), Pfaffenwaldring 4, 70569 Stuttgart
Kontakt Contact:	+49 (0)711 685-63323 harald.garrecht@iwb.uni-stuttgart.de http://www.iwb.uni-stuttgart.de/
Antragsteller 2 Applicant 2:	Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Oliver Sawodny Institutsleiter Director of the institute
DFG-Geschäftszeichen DFG reference number:	SA 847/17-1 (Projektnummer Project number: 257610789)
Adresse Address:	Universität Stuttgart, Institut für Systemdynamik (ISYS), Waldburgstraße 17/19, 70563 Stuttgart
Kontakt Contact:	+49 711 685-66302 oliver.sawodny@isys.uni-stuttgart.de https://www.isys.uni-stuttgart.de/
Antragsteller 3 Applicant 3:	Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Dr. h.c. Werner Sobek Institutsleiter Director of the institute
DFG-Geschäftszeichen DFG reference number:	SO 365/15-1 (Projektnummer Project number: 257610789)
Adresse Address:	Universität Stuttgart, Institut für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren (ILEK), Pfaffenwaldring 7+14, 70569 Stuttgart
Kontakt Contact:	+49 711 685-6 6226/-6 3599 werner.sobek@ilek.uni-stuttgart.de http://www.uni-stuttgart.de/ilek/
Berichts-/Förderzeitraum Reporting/funding period:	01.05.2015–31.06.2018
Team Team:	Daniel Schmeer (ILEK) Mark Wörner (ISYS) Walter Haase (ILEK) Christian Baumert (IWB) Christian Blatt (IWB, 10/2016–12/2016; 08/2017–10/2017) Ante Vucemilovic (IWB, 09/2015–11/2015)

Projektbezogene Publikationen | Project related publications

- Herrmann, M.; Sobek, W.: Gradientenbeton – Numerische Entwurfsmethoden und experimentelle Untersuchung gewichtsoptimierter Bauteile. Beton- und Stahlbetonbau 110 (2015) 10, S. 672–686
- Schmeer, D.; Herrmann, M.; Wörner, M.; Sippel, S.; Sawodny, O.; Garrecht, H.; Sobek, W.: Entwurf und automatisierte Herstellung von Bauteilen aus funktional gradiertem Beton. In: Garrecht, H.; Hofmann, J.; Sobek, W.; Novák, B. (Hrsg.): Beiträge zur 3. DAFStb-Jahrestagung mit 56. Forschungskolloquium am 11./12.11.2015 in Stuttgart, Institut für Werkstoffe im Bauwesen der Universität Stuttgart, 2015, S. 15–22

- Sippel, S.; Wörner, M.; Schmeer, D.; Sawodny, O.; Sobek, W.; Garrecht, H.: Dichteangepasste Betongemische für das Trockenspritzen von gradierten Bauteilen. In: Garrecht, H.; Hofmann, J.; Sobek, W.; Novák, B. (Hrsg.): Beiträge zur 3. DAFStb-Jahrestagung mit 56. Forschungskolloquium am 11./12.11.2015 in Stuttgart, Institut für Werkstoffe im Bauwesen der Universität Stuttgart, 2015, S. 137–143
- Wörner, M.; Schmeer, D.; Schuler, B.; Pfänder, J.; Garrecht, H.; Sawodny, O.; Sobek, W.: Gradientenbetontechnologie: Von der Mischungsentwicklung über den Bauteilentwurf bis zur automatisierten Herstellung. Beton- und Stahlbetonbau 111 (2016) 12, S. 794–805
- Sobek, W.: Über die Gestaltung der Bauteilinnenräume – Meinem Freund Manfred Curbach zum 60. Geburtstag gewidmet. In: Scheerer, S.; van Stipriaan, U. (Hrsg.): Festschrift zu Ehren von Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Manfred Curbach, Dresden: Institut für Massivbau der TU Dresden, 2016, S. 62–76
- Herrmann, M.; Sobek, W.: Functionally graded concrete: Numerical design methods and experimental tests of mass-optimized structural components. Structural Concrete 18 (2017), S. 54–66
- Schmeer, D.; Sobek, W.: Weight-optimized and Mono-material Concrete Components by the Integration of Mineralized Hollow Spheres. In: Bögle, A.; Grohmann, M. (Hrsg.): Interfaces: architecture.engineering.science – Proc. of the IASS Annual Symp. 2017, 25.–28.09.2017 in Hamburg, Hamburg: HCU & IASS, 2017, book of abstracts: S. 152, full paper published digitally: paper no. 9600, 9 S.
- Wörner, M.; Schmeer, D.; Schuler, B.; Sawodny, O.; Sobek, W.: The technology of graded concrete – Interface between design and manufacturing. In: Bögle, A.; Grohmann, M. (Hrsg.): Interfaces: architecture.engineering.science – Proc. of the IASS Annual Symp. 2017, 25.–28.09.2017 in Hamburg, Hamburg: HCU & IASS, 2017, book of abstracts: S. 153, full paper published digitally: paper no. 9601, 8 S.
- Schmeer, D.; Sobek, W.: Gradientenbeton. In: Bergmeister, K.; Fingerloos, F.; Wörner, J.-D. (Hrsg.): Beton-Kalender 2019, Berlin: Ernst & Sohn, 2019, S. 455–476

Qualifikation wissenschaftlichen Nachwuchses im Rahmen des Projektes | Qualification of young academics within the framework of the project

Dissertationen | Dissertations

- Wörner, M.: Automatisierte Herstellung funktional gradierter Betonbauteile. ISYS, 2017
- Schmeer, D.: Mesogradierung von Betonbauteilen. Herstellung und Tragverhalten von Betonbauteilen mit integrierten mineralischen Hohlkugeln. ILEK, 2021

Studienarbeiten | Student's research projects

- Andree, F.: Ökologische Betrachtung der automatisierten Gradientenbetonherstellung zur Sicherstellung eines nachhaltigen Prozessablaufs. Bachelorarbeit, ILEK, 2015
- Glutsch, S.: Untersuchungen zur Schwindreduzierung bei Faserbeton. Bachelorarbeit, IWB, 2015
- Wiertz, S.: Mineralisierte Hohlkörper zur Erweiterung des Eigenschaftsspektrums von funktional gradierten Betonbauteilen. Bachelorarbeit
- Dias, R.: Multifunktionale Wandbauteile aus gradiertem Beton. Bachelorarbeit, ILEK, 2016
- Hörner, N.: Methoden zur Modellierung und Regelung von hybriden Manipulatoren unter Berücksichtigung von Elastizitäten. Masterarbeit, ISYS, 2016
- Lindner, P.: Trajektorienplanung für die Herstellung funktional gradierter Betonbauteile. Bachelorarbeit, ISYS, 2016
- Villinger, M.: Modellierung und Identifikation eines hybriden Manipulators. Bachelorarbeit, ISYS, 2016
- Köppel, N.: Funktional gradierte Betonstütze. Bachelorarbeit, ILEK, 2017
- Kurz, T.: Gewichtsreduzierte und bewehrungsoptimierte Bauteile aus funktional gradiertem Beton. Bachelorarbeit, ILEK, 2017
- Stulic, T.: Parametrische Untersuchung zum Tragverhalten von Betonbauteilen mit integrierten, mineralischen Hohlkörpern. Masterarbeit, ILEK, 2017

- Vochazer, F.: Entwurf und Validierung von funktional gradierten Betonbauteilen unter Berücksichtigung des automatisierten Herstellungsprozess. Bachelorarbeit, ILEK, 2018

Patent | Patent

- DE 10 2011 102 337 A1: Vorrichtung und Verfahren zum Herstellen von Bauteilen mit zumindest einer kontinuierlichen Eigenschaftsänderung. Anmelder: Sobek, W.; Offenlegungstag: 29.11.2012

Folgeprojekte | Follow-up projects

- Entwicklung einer ökologischen und ökonomischen Bauweise durch den Einsatz vorgefertigter multifunktionaler Wandbauteile aus gradiertem Beton | Development of an ecological and economical construction method by using prefabricated multifunctional wall components made of graded concrete

Antragsteller Applicants:	Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Dr. h.c. Werner Sobek, Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Oliver Sawodny, Prof. Dr.-Ing. Harald Garrecht
Förderer Funding:	BBSR / Forschungsinitiative Zukunft Bau
Laufzeit Period:	01/2016–02/2019

- Integrale Planung und Herstellung von ressourcen-effizienten Betonbauteilen aus mineralischer Faserverbundbewehrung und gradiertem Beton | Integrated design and manufacture of resource-efficient concrete components made of mineral composite reinforcement and graded concrete

Antragsteller Applicants:	Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Dr. h.c. Werner Sobek, Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Oliver Sawodny, Prof. Dr.-Ing. Philip Leistner (Fraunhofer-IBP)
Förderer Funding:	Ministerium für Wirtschaft, Arbeit und Wohnungsbau Baden-Württemberg, Call Innovative Rohstoffnutzung in KMUs
Laufzeit Period:	01/2019–31/2020

- Co-design of functionally graded concrete (FGC) building system

Antragsteller Applicants:	Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Dr. h.c. Werner Sobek, Prof. Dr.-Ing. Harald Garrecht
Förderer Funding:	Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) / EXC 2120
Laufzeit Period:	07/2019–06/2022

- Cyber-physical fabrication of functionally graded concrete (FGC) components for multi-storey buildings

Antragsteller Applicants:	Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Dr. h.c. Werner Sobek, Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Oliver Sawodny, Prof. Dr.-Ing. Harald Garrecht
Förderer Funding:	Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) / EXC 2120
Laufzeit Period:	07/2019–06/2022

Sonstige Aktivitäten | Special activities

- Mixed Matters – AA Visiting School Stuttgart, stattgefunden am ILEK in 2016 und 2017 | held at the ILEK in 2016 and 2017 – <http://mixedmatters.aaschool.ac.uk/archive2015-2016/>
- 2. Auszeichnung materialPreis2018 | 2nd award materialPreis2018 – <https://www.raumprobe.com/materialpreis/einreichungen/daniel-schmeer-universitaet-stuttgart-gradientenbeton/>