

**Integrale Planung und Herstellung von
ressourceneffizienten Betonbauteilen
aus mineralischer
Faserverbundbewehrung und
gradiertem Beton**



Universität Stuttgart

Institut für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren

Prof. Dr.-Ing. M. Arch. Lucio Blandini

Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Dr. h.c. Werner Sobek

Institut für Systemdynamik

Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. h.c. Oliver Sawodny



Fraunhofer

Institut für Bauphysik

Prof. Dr.-Ing. Philip Leistner

Vorhabenbezeichnung:	Integrale Planung und Herstellung von ressourceneffizienten Betonbauteilen aus mineralischer Faserverbundbewehrung und gradiertem Beton
Zuwendungsempfänger:	<p>Universität Stuttgart Institut für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren (ILEK) Pfaffenwaldring 7 und 14 70569 Stuttgart</p> <p>Institut für Systemdynamik (ISYS) Waldburgstraße 17+19 70563 Stuttgart</p> <p>Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung e.V. Fraunhofer-Institut für Bauphysik (IBP) Nobelstraße 12 70569 Stuttgart</p>
Förderkennzeichen:	3-4332.62-ILEK/1
Förderstelle:	Ministerium für Wirtschaft, Arbeit und Wohnungsbau Baden-Württemberg
Förderprogramm:	Innovative Rohstoffnutzung in KMU
Projektsumme:	491.459,00 €
Fördermittelanteil:	393.167,00 €
Projektleitung:	Dr.-Ing. Walter Haase (ILEK)
Mitarbeiter:	<p>M.Sc. Daniel Schmeer (ILEK) M.Sc. Benjamin Schönemann (ISYS) Dipl.-Wirt.-Ing. Katrin Lenz (IBP) M.Sc. Steffen Steier (IBP)</p>
Projektlaufzeit:	06.12.2018 – 30.10.2020
Laufzeitverlängerung:	31.03.2021
Berichtszeitraum:	01.01.2019 – 31.03.2021

Dieser Kurzbericht umfasst 10 Seiten.
Stuttgart, 23.07.2021

Dr.-Ing. Walter Haase

Danksagung

Das Forschungsprojekt wurde mit Mitteln des Ministeriums für Wirtschaft, Arbeit und Wohnungsbau Baden-Württemberg gefördert (Förderkennzeichen: 3-4332.62-ILEK/1). Die Autoren bedanken sich für die gewährte Förderung und die überaus kompetente Begleitung des Projekts.

Unser weiterer Dank gilt den Mitgliedern des Projektausschusses und den Industriepartnern, die das Projekt großzügig unterstützt haben:

Dr. Christian Graf

Ministerium für Wirtschaft, Arbeit und Wohnungsbau Baden-Württemberg

Dr.-Ing. Jennifer Scheydt, Stefan Schöne

HeidelbergCement AG

Dr. Mark Wörner

Liebherr Mischtechnik GmbH

Dr.-Ing. Frank Schaller

C-Con GmbH

Dr. Ulrich Lotz

Fachverband Beton- und Fertigteilewerke Baden-Württemberg e. V.

Dr.-Ing. Wolfgang Sundermann

Werner Sobek AG

Dr.-Ing. Olaf Leitzbach

MEVA Schalungs-Systeme GmbH

Dr. Thomas Müller

Sika Deutschland GmbH

Philipp Gross, Christoph Rodener

Peter Gross Bau Holding GmbH

Ulrike Möller, Vanessa Blaß

AFBW – Allianz Faserbasierter Werkstoffe Baden-Württemberg

INHALTSVERZEICHNIS

DANKSAGUNG	III
1 ANLASS UND ZIEL	1
2 AUSGANGSLAGE	1
3 GEGENSTAND DES FORSCHUNGSVORHABENS	2
3.1 Bauteilherstellung	2
3.2 Bauteilentwurf	5
4 FAZIT	9
ABBILDUNGSVERZEICHNIS	10
TABELLENVERZEICHNIS	10
LITERATURVERZEICHNIS	10

1 Anlass und Ziel

Stahlbeton, als derzeit meistverwendeter Verbundwerkstoff im Bauwesen [1], wird zumeist noch mit dem Entwicklungsstand von vor über hundert Jahren angewendet. Technologische Innovationen für eine nachhaltige Nutzung der eingesetzten Rohstoffe blieben in dieser Bauweise lange Zeit aus. In Zeiten des Klimawandels, weltweitem Bevölkerungs- und Städtewachstums sowie einer signifikanten Rohstoffverknappung sind neue Wege zu gehen, um für mehr Menschen mit weniger Material zu bauen und gleichzeitig zukünftigen Generationen rezyklierbare Bauwerke zu hinterlassen. [2]

Vor diesem Hintergrund ist das Ziel des Projekts, eine sortenreine und gewichtsoptimierte Betonbauweise unter Einsatz mineralischer und lastpfadgerechter Faserverbundbewehrungen zur vorwettbewerblichen Anwendung weiterzuentwickeln, um damit neue Geschäftsfelder für KMU im Bereich des Bauwesens zu eröffnen sowie längerfristig den Technologiestandort Baden-Württemberg zu stärken. Diesem übergeordneten Projektziel widmete sich ein interdisziplinäres Forschungskonsortium, bestehend aus dem Institut für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren (ILEK) und dem Institut für Systemdynamik (ISYS) der Universität Stuttgart, sowie dem Fraunhofer-Institut für Bauphysik (IBP).

2 Ausgangslage

Konventionelle Stahlbetonbauteile weisen aufgrund ihrer zumeist determinierten Bauteilgeometrie und den statischen Randbedingungen eine ineffiziente Materialausnutzung auf. Dies betrifft die beiden Verbundpartner Beton und Stahl. Durch den von Werner Sobek erfundenen und am ILEK entwickelten Gradientenbeton [3] konnte bereits ein Ansatz für einen effizienten Materialeinsatz aufgezeigt werden. Hierbei wird nicht wie üblich ein Beton einer Dichte, Festigkeit und Steifigkeit verbaut, sondern der Bauteilinnenraum durch hohlraumbildende Maßnahmen an den tatsächlich vorherrschenden Beanspruchungszustand angepasst (Abbildung 1).

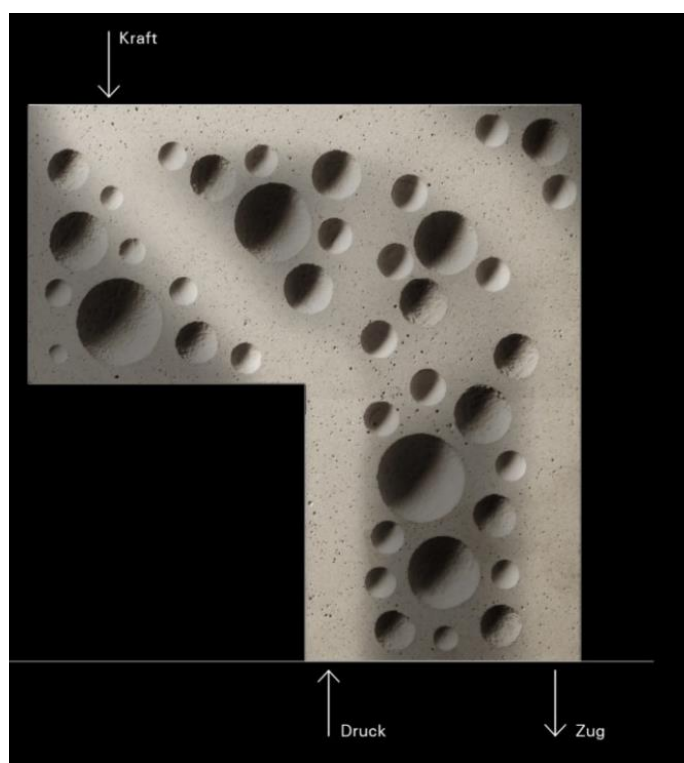


Abbildung 1: Resultierende Lastpfade einer Konsole und Strukturoptimierung via Mesogradierung. (Quelle: ILEK)

Die Gradierung des Betons innerhalb des Bauteils wird durch zwei Maßnahmenbündel möglich, die auch miteinander kombiniert werden können. So werden bei der Mikrogradierung mineralische Leichtzuschläge unterschiedlichen Volumengehalts in einem gemeinsam von ILEK, ISYS und IWB entwickelten automatisierten Sprühprozess in die Betonzusammensetzung eingebracht, um den Anforderungen im Bauteil hinsichtlich Festigkeit und Steifigkeit optimal zu entsprechen. Bei der Mesogradierung werden größere Hohlräume im Bauteil durch den Einbau am ILEK entwickelter mineralischer Hohlkörper erzeugt. Letztere werden durch einen Rotationsprozess in einer eigens von ILEK und ISYS konzipierten Zentrifuge automatisiert hergestellt. Unabhängig von der gewählten Gradierungsmethode vereinen sie zum einen den Ansatz einer Monomaterialtechnologie, um eine vollständige und sortenreine Rezyklierbarkeit des Bauteils am Lebensende sicherzustellen. Zum anderen wird Material nur dort im Bauteilinneren eingesetzt, wo es tatsächlich benötigt wird. Somit kann das Gewicht und folglich der Ressourcenverbrauch von gradierten Betonbauteilen gegenüber massiv ausgeführten Bauteilen signifikant verringert werden, bei Aufrechterhaltung gleicher Funktions- und Leistungsfähigkeit.

3 Gegenstand des Forschungsvorhabens

Im Rahmen des Forschungsprojekts befasste sich das ILEK mit der Weiterentwicklung von Entwurfs- und Berechnungsmethoden zu gewichtsoptimierten Betonbauteilen. In enger Zusammenarbeit von ISYS und ILEK wurde ein Konzept für die automatisierte Herstellung von mesogradierten Bauteilen entwickelt und umgesetzt. Das IBP übernahm die Aufgabe der prozessbegleitenden Kosten- sowie ökologischen Nachhaltigkeitsbewertung der im Projekt entwickelten Prozesse und Materialien.

3.1 Bauteilherstellung

Die Entwicklung eines neuen Verfahrensablaufs zur automatisierten Fertigung von mesogradierten Betonbauteilen ist der Tatsache geschuldet, dass die derzeit in der Praxis eingesetzten zweistufigen Betonageverfahren von Hohlkörperdecken einen enormen Optimierungsbedarf vorweisen. Neben den zeitlichen Verzögerungen bei der Herstellung, ist die dabei entstehende Verbundfuge aus statisch konstruktiver Sicht nachteilig zu bewerten. Um dieser Problematik zu begegnen, wurde am ILEK ein schichtweiser Gießprozess für die Mesogradierung entwickelt. Der Gesamtprozess sieht zunächst vor die untere Bewehrungslage in der Schalung zu verlegen. Anschließend werden Hohlkörper nach dem Vorbild einer kubisch primitiven Packung in der Schalung platziert und die obere Bewehrungslage eingebracht. Nach dem Einbau von Bewehrung und Hohlkörpern beginnt der schichtweise Gießprozess (Abbildung 2).

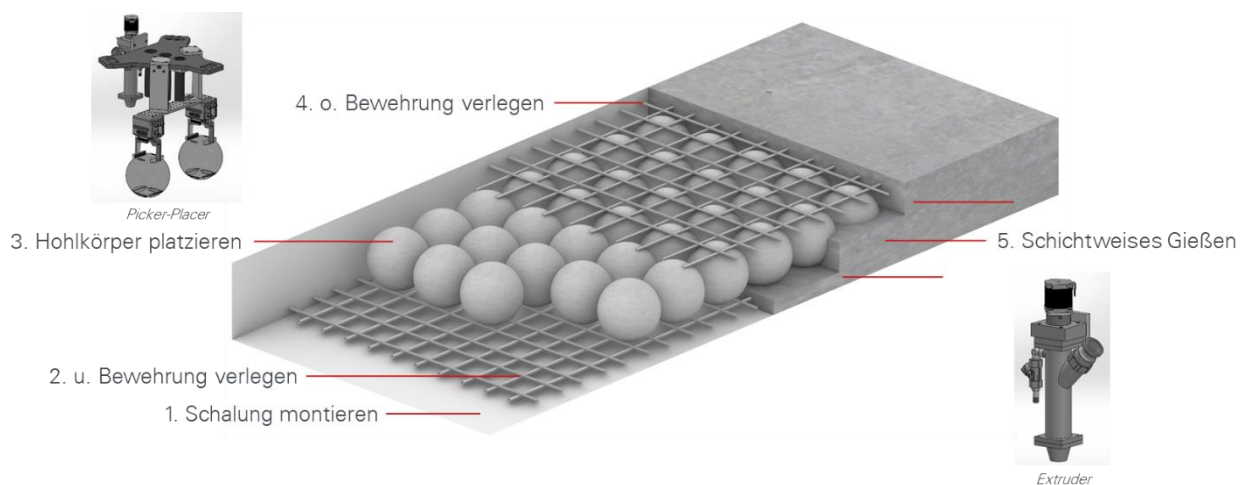


Abbildung 2: Prozessschema zur automatisierten Herstellung eines mesogradierten Betonbauteils. (Quelle: ILEK, [6])

Für den schichtweisen Gießprozess wird ein sehr fließfähiger und selbstverdichtender Beton (SVB) mit einem geringen Größtkorn erforderlich, um die Zwischenräume der Hohlkugeln vollständig auszufüllen. In Abhängigkeit des Hohlkugeldurchmessers wurden am ILEK zwei Mischungen entwickelt. Bei Einsatz von Hohlkugeln $d_k > 100$ mm ist ein Größtkorn von 8 mm zulässig, darunter wird ein Größtkorn von 4 mm empfohlen. Das Einbringen des Betons setzt einen zeitlich geregelten Prozess voraus, damit die Lage- und Auftriebssicherheit der Hohlkörper gewährleistet sind und ein vollständiger Schichtverbund sichergestellt ist. Von entscheidender Bedeutung ist der Haftverbund zwischen Hohlkugel und Betonschicht, wobei die Haftkraft größer sein muss als die Auftriebskraft der Kugel. Das Konzept des schichtweisen Gießverfahrens wurde durch die Betonage einer würfelförmigen Elementarzelle bestätigt, in der sich eine Hohlkugel vom Durchmesser 150 mm befindet (Abbildung 3).

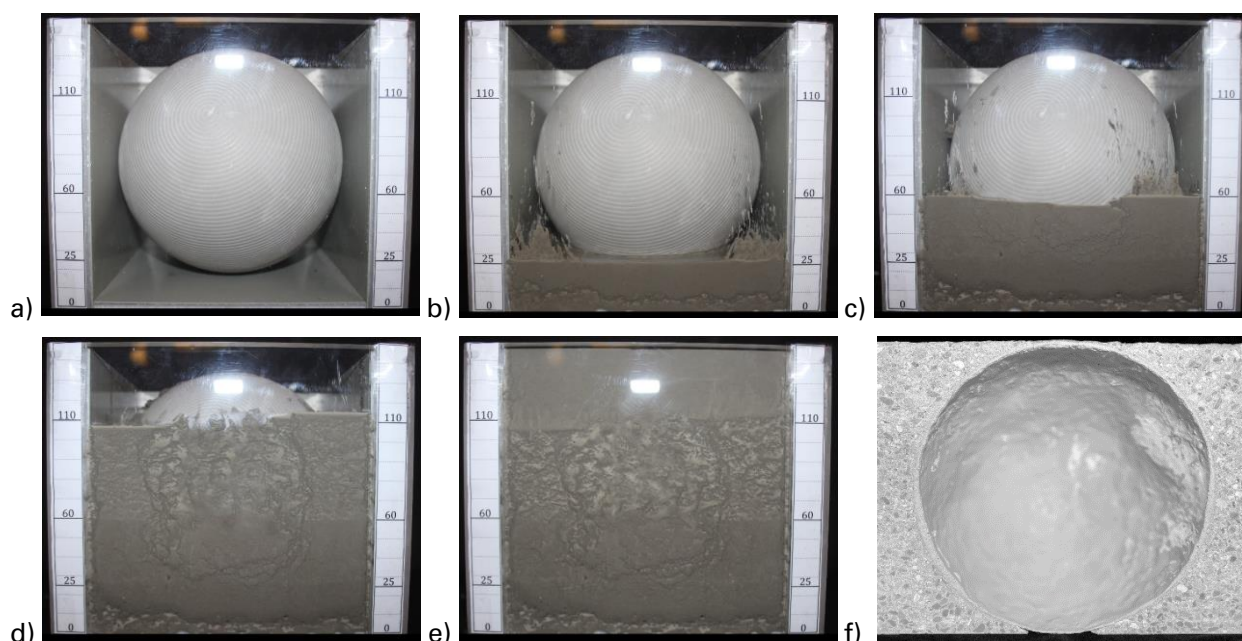


Abbildung 3: Untersuchung zur Auftriebssicherheit der Hohlkugeln mit dem schichtweisen Gießverfahren durch Herstellung einer Elementarzelle in vier Schichten (25, 60, 110 und 150 mm) nach jeweils 15 Minuten (a-e). Schnitt durch die erhärtete Elementarzelle ohne diskrete Schichtgrenzen (f). (Quelle: ILEK, [6])

Das Umweltprofil einer mineralischen Hohlkugel wird vorrangig durch den Radius sowie die Wandstärke und den damit verbundenen Materialeinsatz bestimmt. Ein weiterer umweltrelevanter Aspekt ist die benötigte elektrische Energie des Rotationsprozesses zur Herstellung der Hohlkugeln. Die bisher prototypische und singuläre Herstellung der Hohlkörper wurde im Laufe des Projektes durch ein weiterentwickeltes Verfahren abgelöst. So ist es jetzt möglich mit einem deutlich geringeren Energieaufwand mehrere Kugeln gleichzeitig herzustellen. Mit dem weiterentwickelten Verfahren der Hohlkugelherstellung lässt sich die Freisetzung klimawirksamer Gase um etwa 55 % im Vergleich zum singulären Verfahren reduzieren. Darüber hinaus wurde für den schichtweisen Gießprozess das Umweltprofil der Betonmischung betrachtet. Vor dem Hintergrund, dass der Klinkeranteil der Zemente maßgeblich zum Treibhauspotential beiträgt, wurden projektspezifische Betonmischungen auf Basis von Portlandhüttenzementen entwickelt und eingesetzt. Die für diesen Zweck entwickelten Betonmischungen setzen 13 % weniger klimawirksame Gase frei als vergleichbare konventionelle Ortbetonmischungen. Ökonomisch relevant sind dabei vor allem Zement, Sand und Kies sowie eventuell eingesetzte Zusatzmittel.

Die Bewehrung wird, mit wenigen Ausnahmen in der Herstellung von Betonfertigteilen, sowohl in der Baupraxis als auch beim Herstellungsverfahren gradierteter Betonbauteile immer noch händisch im Bauteil verlegt. Um diesen Prozess weitestgehend zu automatisieren, wurde vom ISYS ein prototypisches Greifersystem konzipiert und am Versuchsstand integriert. Hierzu wurden mögliche Greifertypen (elektrisch, elektromagnetisch oder pneumatisch) hinsichtlich der erarbeiteten Anforderungen analysiert und für die Einbringung von Bewehrung und Hohlkörper gleichermaßen bewertet. Die Wahl fiel auf das elektromechanische Greifersystem EGL 90-PN der Firma Schunk. Für die flexiblen Handhabungsaufgaben, die sich für unterschiedliche Bewehrungskomponenten und für Hohlkörper unterschiedlicher Geometrien ergeben, wurde ein passendes prototypisches Greiferwerkzeug entwickelt. Über eine Profinet-Schnittstelle wurde das Greifersystem in die Steuerungsumgebung des Versuchsstandes eingebunden und eine HMI zur Nutzung unterschiedlicher Betriebsmodi implementiert. Die Handhabungsaufgaben wie das Greifen und Platzieren von einzelnen Hohlkörpern oder von Bewehrungskomponenten wurden erfolgreich im Betrieb validiert (Abbildung 4).

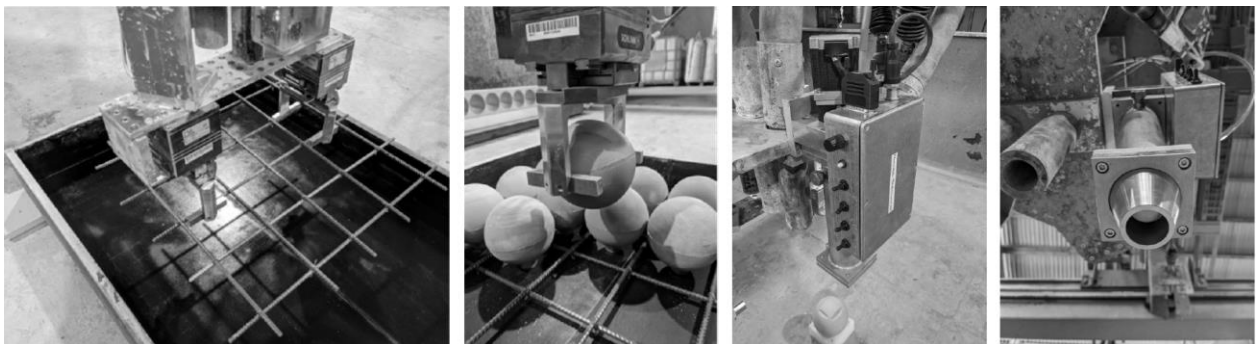


Abbildung 4: Validierung der Handhabungsaufgaben: Greifen eines Bewehrungssystems aus Stahlstäben (außen links) und Ablage eines Hohlkörpers (innen links). Prototyp der Extrusionseinheit in zwei Ansichten (innen und außen rechts). (Quelle: ISYS)

Die Umsetzung des schichtweisen Gießverfahrens in der Fertigung von mesogradierten Bauteilen sollte ebenfalls weitestgehend automatisiert erfolgen. Dies bedurfte einer Weiterentwicklung der vorhandenen Anlagentechnik. Ein wichtiger Aspekt ist dabei die positionsgenaue Materialdosierung. Zu diesem Zweck wurde gemeinsam von ILEK und ISYS eine Extrusionseinheit für den zielgerichteten Materialaustrag in die Zwischenräume der Hohlkörper konzipiert und in einem Prototyp umgesetzt (Abbildung 4). Die gemeinsam erarbeiteten Anforderungen sehen neben der Ankopplung an standardisierte Schlauchsysteme von Beton- bzw. Mörtelpumpen ebenfalls eine einfache Montage bzw. Demontage der Einheit vor. Somit ist eine flexible Nutzung der Extrusionseinheit möglich. Zur Validierung der Funktionsfähigkeit wurden mehrere, unterschiedlich gestaltete Förderschnecken hergestellt. Die gewählte Antriebseinheit besteht aus einem Nanotec High-Torque Schrittmotor (ST6018K2008-A) sowie einem passenden Planetengetriebe (GP56-S1-10-SR). Die Funktionsfähigkeit der Einheit wurde am Versuchsstand validiert und das Leistungsspektrum der Einheit experimentell bestimmt. Zusätzlich zur mechanischen Erweiterung der Anlage in Form der Extrusionseinheit wurde die Prozessplanung auf die neue Herstellung angepasst und erweitert. Die Umsetzung dieser Prozessplanung erfolgte skriptbasiert, anhand eines in MATLAB implementierten Prozessmodells. Die entwickelte Planung für das herzustellende Bauteil erfolgt in einem automatisierten Ablauf und lässt sich in die Schritte Bauplandefinition, Bauplananalyse, Trajektorienplanung für die Ablage von Bewehrung und Hohlkörpern, Trajektorienplanung für die schichtweise Betonage, sowie Bilanzierung der Energieverbräuche und Herstellungszeiten gliedern. Dieser Ablauf beinhaltet zunächst die Berechnung der erforderlichen Betonage-Schichthöhen durch Lösung eines nichtlinearen, beschränkten Optimierungsproblems zur Einhaltung der Auftriebs-Gleichgewichtsbedingung. Anschließend erfolgt die zeitliche und räumliche Planung der Wegpunkte für die Aufnahme, den Transport und die

Ablage der Bewehrungs- und Hohlkörperelemente mittels Greifersystem unter Berücksichtigung der statischen und dynamischen Beschränkungen des Manipulators. Nachfolgend wird die zeitliche und räumliche Planung der Wegpunkte für jede einzelne Betonageschicht durchgeführt, wobei das komplexe Zusammenspiel zwischen Düsenführung und Betonförderung besondere Beachtung findet. Abschließend werden die Betriebszeiten der einzelnen Komponenten der Anlage aufsummiert und deren Energieverbräuche bilanziert.

Bei ökologischer und ökonomischer Betrachtung des automatisierten Herstellungsverfahrens ist lediglich die aufgewendete Energie für die Prozesse des Betonierens sowie der Verlegung von Bewehrung und Hohlkugeln relevant. Je nach Bauteilauslegung (Dimension, Bewehrungsgrad, Anzahl Hohlkugeln) ergibt sich ein unterschiedlich hoher Bedarf an elektrischer Energie während der Herstellung. Anhand von Musterbauteilen lassen sich die genannten Potentiale vereinen und aufzeigen.

3.2 Bauteilentwurf

Im Rahmen des Forschungsprojektes wurden am ILEK Musterbauteile entworfen, hergestellt und geprüft. Die Festlegung der Musterbauteile erfolgte in Anlehnung an die frühere Modulordnung im Bauwesen (DIN 18000) und identifiziert ein Tragwerksraster für Geschossdecken von 7,2 m. Aufgrund von Restriktionen in der Prüfinfrastruktur wurden die Musterbauteile in einem verkleinerten Maßstab ausgeführt (Abbildung 5). Die geometrischen Abmessungen der Bauteile sind wie folgt: Länge $l = 1.200$ mm, Breite $b = 100$ mm, Höhe $h = 100$ mm und statische Nutzhöhe $d = 91$ mm. Bei Beachtung der Gesetze zur Bauteilskalierung [4] lassen sich die Ergebnisse auf den Realmaßstab überführen, wie bereits in [5] gezeigt wurde. Der Versuchsaufbau des 4-Punkt-Biegeversuchs ist ebenfalls in Abbildung 5 dargestellt. Die Spannweite beträgt $l_s = 1.050$ mm und der Abstand vom Auflager zum Lastangriffspunkt wurde zu $a = 275$ mm gewählt.

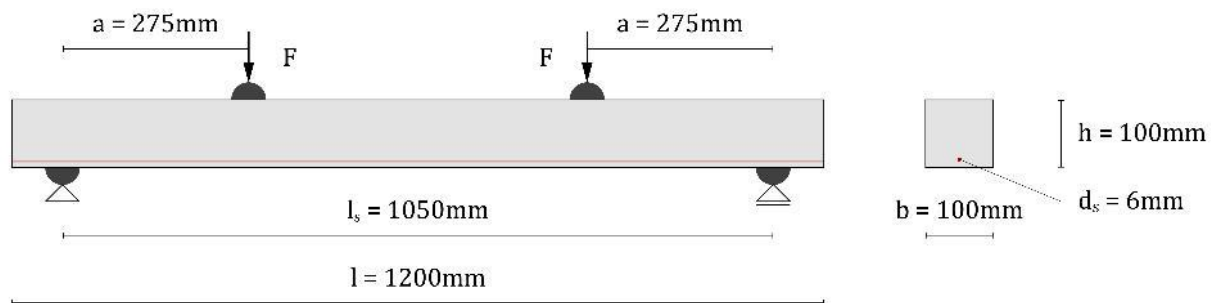


Abbildung 5: Prüfaufbau des 4-Punkt-Biegeversuch inkl. Probekörpergeometrie. (Quelle: ILEK, [6])

Vor dem Hintergrund der Ressourceneffizienz wurde die Bewehrung auf der Materialebene, wie auch auf der Ebene des Entwurfs der Bewehrungsführung untersucht und optimiert. Hinsichtlich der Materialität fokussierten sich die Untersuchungen auf den Einsatz einer Faserverbundbewehrung aus Basalt. Die Korrosionsbeständigkeit und die hohe Zugfestigkeit dieser Faserverbundbewehrung erlauben eine Reduktion des Materialeinsatzes. Darüber hinaus kann gegenüber anderen Bewehrungsmaterialien erstmals ein bewehrtes und gleichzeitig mineralisches Monostoffbauteil geschaffen werden, das mit all seinen Vorteilen insbesondere das Potenzial einer sortenreinen Rezyklierbarkeit besitzt.

Der Vergleich der Versuchsergebnisse von basaltbewehrten und stabstahlbewehrten Betonbauteilen zeigt eine Auffälligkeit im Verformungsverhalten. Bei gleichem Lastniveau tritt bei den basaltbewehrten Probekörpern eine vierfach größere Durchbiegung im gerissenen Zustand auf, die genau dem Unterschied im E-Modul der beiden Materialien entspricht (Abbildung 6). Zum jetzigen Stand der Forschung kann festgehalten werden, dass die gleiche Basaltmasse wie Stahlmasse zur Bewehrung des Bauteils erforderlich wird.

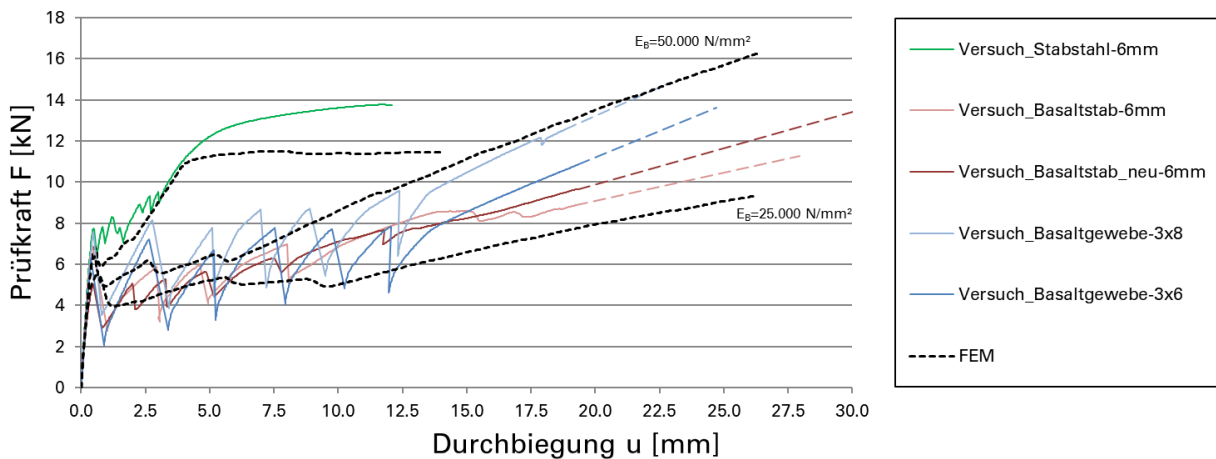


Abbildung 6: Gegenüberstellung der experimentell bestimmten Kraft-Verformungsdiagramme mit den numerisch ermittelten Kraft-Verformungsdiagrammen. (Quelle: ILEK)

Massenbezogen weist die Basaltbewehrung eine höhere Umweltwirkung als herkömmliche Stahlbewehrung auf. Der thermische Energiebedarf, der derzeit aus Russland bezogenen Basaltfasern, wird durch Strom aus fossilbasiertem Erdgas gedeckt. Dabei werden deutlich mehr treibhausrelevante Gase emittiert als bei der Herstellung von Stahl. Hinzu kommt der hohe Einfluss eines organischen Bindemittels (Harz) an den Umweltwirkungen, das zur Tränkung der Fasern eingesetzt wird. Unter Betrachtung der etwa drei Mal höheren Zugfestigkeit bei gleichzeitig geringerer Dichte von Basaltbewehrung gegenüber Stahl relativiert sich der Unterschied allerdings, vorausgesetzt die Zugfestigkeit wird vollständig ausgenutzt.

Seitens ILEK erfolgte eine weitere Studie zur Reduktion der Bewehrungsmenge, durch eine beanspruchungsgerechte Verteilung der Bewehrung im Bauteil. Als Alternativen zur konventionellen Bewehrungsführung auf Basis des Fachwerkmodells fanden Stabwerk-, Sprengwerk-, Trajektorien- und Topologiemodelle Betrachtung. Unabhängig von der jeweiligen Alternative, beträgt die Masseneinsparung ca. 10 % (Tabelle 1).

Tabelle 1: Unterschiedliche Methoden zur beanspruchungsgerechten Bewehrungsverteilung. (Quelle: ILEK)

<p>Stabwerkmodell ($\Delta m = 11\%$)</p>	<p>Sprengwerkmodell ($\Delta m = 9\%$)</p>
<p>Trajektorienmodell ($\Delta m = 9\%$)</p>	<p>Topologiemodell ($\Delta m = 10\%$)</p>

$\Delta m =$ Masseneinsparung

Zur Validierung des Tragverhaltens von mesogradierten Betonbauteilen wurden fünf Varianten entworfen. Der Entwurf beziehungsweise die Bauteilauslegung erfolgte mit einem am ILEK entwickelten Berechnungstool. Dieses ermöglicht die Berechnung und Optimierung von mesogradierten Betonbauteilen mittels Stabwerkmodellen, sodass auch die Möglichkeit der beanspruchungsgerechten Bewehrungsführung in die Auslegung einfließen kann [6]. Die Variante M ist ein massiver Betonbalken und dient als Referenz zum Vergleich der Tragfähigkeit und des Masseneinsparpotentials. DZK und TZK basieren auf dem gleichen Optimierungsprinzip, bei dem die Querkraft über die Zugfestigkeit des Betons abgetragen wird. Dies führt zur Reduktion des Kugeldurchmessers im Bereich zwischen Auflager und Lasteinleitung (Abbildung 7 a). Bei der Variante DZS erfolgt die Optimierung durch Einsatz einer lastpfadgerechten Bewehrungsführung im Querkraftbereich. Ein zusätzlicher Bewehrungsstab hängt die Zugkraft vom Fußpunkt der dritten Kugel zum Kopfpunkt der zweiten Kugel. Für die Variante HK dagegen wurde der Querkraftbereich nicht optimiert, um den unteren Grenzwert der Tragfähigkeit zu bestimmen.

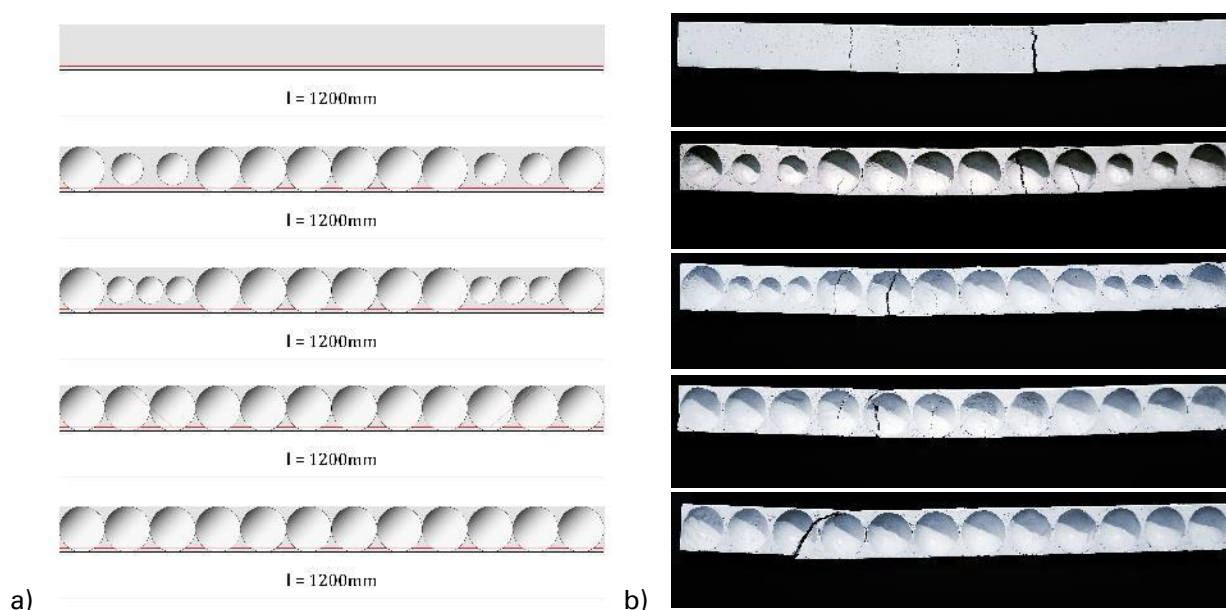


Abbildung 7: a) Geplante Varianten der Probekörper (M, DZK, TZK, DZS, HK) b) Probekörper nach der Bauteilprüfung. (Quelle: ILEK, [6])

Die Ergebnisse der Bauteilversuche bestätigen den Ansatz zur Berechnung mesogradierter Betonbauteile. Bei Masseneinsparungen zwischen 30 und 40 % erreichen die Varianten DZK, TZK und DZS jeweils die gleiche Tragfähigkeit wie das massive Bauteil und versagen erwartungsgemäß auf Biegezug. Die nicht optimierte Variante HK erreicht nicht die gleiche Tragfähigkeit wie die anderen Varianten und es tritt ein schlagartiges und sprödes Querkraftversagen ein. Die Ergebnisse dieser Variante decken sich aber auch mit der Bauteilauslegung und bestätigen den unteren Grenzwert der Berechnungsmethode.

Nach der experimentellen Bestätigung der Berechnungsmethoden kann die Auslegung des Musterbauteils erfolgen, um das Potential im Realmaßstab zu beziffern. Als Beispiel dient eine einachsige spannde Geschossdecke von 7,20 m Länge und einer Breite von 2,40 m, die für eine Standardnutzlast von $2,0\text{ kN/m}^2$ inkl. Ausbaulasten von $1,5\text{ kN/m}^2$ ausgelegt wird. Die massive Vergleichsvariante (M) hat eine Höhe von 28 cm und folglich ein Betonvolumen von $4,84\text{ m}^3$ bei einer erforderlichen Bewehrungsmenge von 22 kg/m^2 . Die gradierte Variante (G) hat bei gleicher Leistungsfähigkeit dagegen eine Deckenhöhe von 26 cm bei einem Betonverbrauch von $2,88\text{ m}^3$ und einen Stahlverbrauch von $15,5\text{ kg/m}^2$. Die Einsparung an Bewehrungsstahl beträgt damit 30 % und der Betonverbrauch kann um 40 % reduziert werden.

Folgende Ausführungen der oben genannten Musterbauteile wurden im Projekt ökologisch und ökonomisch analysiert:

- Gss bezeichnet das mesogradierete Musterbauteil mit Stahlbewehrung, welches einerseits mit 385 Kugeln und der Betonmischung C_0/4 (GSS C0_4) ausgeführt ist und andererseits mit 432 Hohlkugeln und der Mischung C_0/8 (GSS C0_8).
- Die Referenzbauteile MSS sind als massiver Querschnitt ausgeführt und ebenfalls mit Stahl bewehrt und unterscheiden sich in der eingesetzten Betonmischung für Ortbeton (Mss (Ort)) bzw. Fertigteilbeton (Mss (FT)).

Die ökologische Bewertung der Materialinputs der Bauteile ist in Abbildung 8 veranschaulicht und verdeutlicht das ökologische Potential der Masseneinsparung durch die Mesogradierung. Zum finalen Projektstand können bei der materiellen Zusammensetzung der Bauteile bis zu 43% der Treibhausgase durch den Einsatz mineralischer Hohlkugeln vermieden werden. Die ökonomische Bewertung zeigt, dass durch die Massenreduktion ebenfalls eine Reduktion der Material- und Energiekosten von über 25 % zu erreichen ist. Die Höhe der jeweiligen Gesamtkosten hängt jeweils zur Hälfte von Beton und Stahl ab. Die Kosten der Hohlkugeln sind ökologisch und ökonomisch wenig relevant.

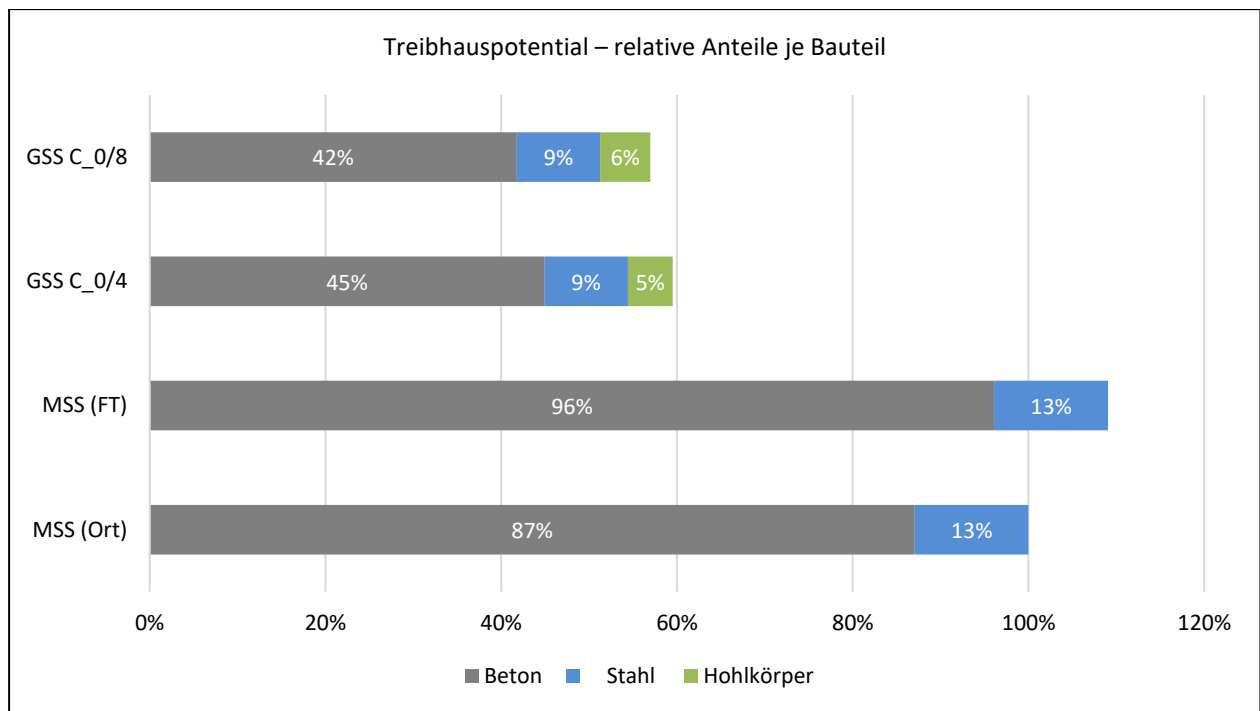


Abbildung 8: Treibhauspotential der Materialinputs für die mesogradiereten Musterbauteile gegenüber dem Referenzbauteil aus Ort- bzw. Fertigteilbeton. (Quelle: IBP)

4 Fazit

Unter den aufgeführten Gesichtspunkten ist der Einsatz von gradierten und sortenreinen Betonbauteilen in breiter Anwendung vielversprechend. Damit sich diese innovative Technologie zukünftig durchsetzen kann, wurden die Optimierungs- und Berechnungsansätze in einem validierten und für den Anwender leicht handhabbaren digitalen Planungstool am ILEK aufbereitet. Hierfür wurde erstmals ein integrales Planungsmodell erstellt, das Entwurf, Herstellung und Bilanzierung von Bauteilen aus Gradientenbeton berücksichtigt und bereits in der frühen Entwurfsphase eine Bewertung der Auswirkungen auf Ökologie und Ökonomie ermöglicht (Ökodesign). Dadurch werden Entscheidungsprozesse für die Akteure der Wertschöpfungskette frühzeitig transparent und nachvollziehbar. Darüber hinaus ermöglicht das Planungsmodell die automatisierte Fertigung der entworfenen stahl- und basaltbewehrten Gradientenbetonbauteile und stellt einerseits die Nähe zur Baupraxis sicher und andererseits können Hemmnisse für den Einsatz der Gradientenbetontechnologie bei den ausführenden Firmen abgebaut werden. Durch die interdisziplinäre Forschergruppe wurde zudem die Interaktion zwischen technologischen Entwicklungen und der Bilanzierung geschaffen, wodurch der ökologische und ökonomische Mehrwert für KMU verdeutlicht werden kann.

Das Forschungsprojekt wurde mit Mitteln des Ministeriums für Wirtschaft, Arbeit und Wohnungsbau Baden-Württemberg gefördert (Förderkennzeichen: 3-4332.62-ILEK/1).

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Resultierende Lastpfade einer Konsole und Strukturoptimierung via Mesogradierung. (Quelle: ILEK)	1
Abbildung 2: Prozessschema zur automatisierten Herstellung eines mesogradierten Betonbauteils. (Quelle: ILEK, [6])	2
Abbildung 3: Untersuchung zur Auftriebssicherheit der Hohlkugeln mit dem schichtweisen Gießverfahren durch Herstellung einer Elementarzelle in vier Schichten (25, 60, 110 und 150 mm) nach jeweils 15 Minuten (a-e). Schnitt durch die erhärtete Elementarzelle ohne diskrete Schichtgrenzen (f). (Quelle: ILEK, [6]).....	3
Abbildung 4: Validierung der Handhabungsaufgaben: Greifen eines Bewehrungssystems aus Stahlstäben (außen links) und Ablage eines Hohlkörpers (innen links). Prototyp der Extrusionseinheit in zwei Ansichten (innen und außen rechts). (Quelle: ISYS)	4
Abbildung 5: Prüfaufbau des 4-Punkt-Biegeversuch inkl. Probekörpergeometrie. (Quelle: ILEK, [6])	5
Abbildung 6: Gegenüberstellung der experimentell bestimmten Kraft-Verformungsdiagramme mit den numerisch ermittelten Kraft-Verformungsdiagrammen. (Quelle: ILEK)	6
Abbildung 7: a) Geplante Varianten der Probekörper (M, DZK, TZK, DZS, HK) b) Probekörper nach der Bauteilprüfung. (Quelle: ILEK, [6])	7
Abbildung 8: Treibhauspotential der Materialinputs für die mesogradierten Musterbauteile gegenüber dem Referenzbauteil aus Ort- bzw. Fertigteilbeton. (Quelle: IBP)	8

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Unterschiedliche Methoden zur beanspruchungsgerechten Bewehrungsverteilung. (Quelle: ILEK)	6
---	---

Literaturverzeichnis

- [1] M. Curbach, „Bauen für die Zukunft,“ *Beton- und Stahlbetonbau*, p. 751, Band 108 November 2013.
- [2] W. Sobek, „Die Zukunft des Leichtbaus: Herausforderungen und mögliche Entwicklungen,“ *Bautechnik*, pp. 879-882, Band 92 Dezember 2015.
- [3] D. Schmeer und W. Sobek, „Gradientenbeton,“ in *Beton Kalender 2019: Parkbauten*, K. Bergmeister, F. Fingerloos, J.-D. Wörner, Hrsg. Wilhelm Ernst & Sohn.
- [4] R. K. Müller, *Handbuch der Modellstatik*, Heidelberg: Springer, 1971.
- [5] M. Herrmann, *Gradientenbeton - Untersuchungen zur Gewichtsoptimierung einachsiger biege- und querkraftbeanspruchter Bauteile*, Universität Stuttgart, Dissertation, 2015.
- [6] D. Schmeer, *Mesogradierung von Betonbauteilen - Herstellung und Tragverhalten von Betonbauteilen mit integrierten mineralischen Hohlkugeln*, Universität Stuttgart, Dissertation, eingereicht am 15.07.2021.