



Manfred Rübner

Silke Scheerer · Ulrich van Stipriaan (Herausgeber)

Festschrift  
zu Ehren von  
Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h.  
Manfred Curbach

Dresden, 28. September 2016

## Impressum

Herausgeber	Silke Scheerer, Ulrich van Stipriaan	
Redaktion	Silke Scheerer	
Autorenfotos	<i>Fotostudio Jünger</i>	<i>S. 124 oben</i>
	<i>Edvard Krikourian</i>	<i>S. 124 unten rechts</i>
	<i>Kirsten J. Lassig</i>	<i>S. 12</i>
	<i>Bertram Lubiger</i>	<i>S. 192</i>
	<i>Juri Paulischkis</i>	<i>S. 104</i>
	<i>A. T. Schaefer, Stuttgart</i>	<i>S. 62</i>
	<i>Sylke Scholz, Dresden</i>	<i>S. 256</i>
	<i>Ulrich van Stipriaan</i>	<i>S. 80, 90, 104, 124 Mitte rechts, 146, 150, 152, 160, 216, 228, 234 Mitte links und unten links/rechts, 292, 320</i>
	<i>Nic Vermeulen</i>	<i>S. 280</i>
	<i>Irina Westermann</i>	<i>S. 42 oben</i>
	<i>Von Autoren zur Verfügung gestellt: S. 16, 24, 42 unten, 124 (2x), 178, 234 (3x)</i>	
Layout, Satz	Ulrich van Stipriaan	
Titelbild	Ulrich van Stipriaan	
Korrektur	Birgit Beckmann, Angela Heller	
Druck	addprint AG, Bannewitz	

Redaktionsschluss für dieses Buch war der 28. August 2016.

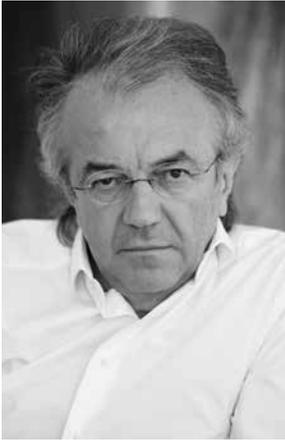
# Inhalt

<i>Silke Scheerer, Ulrich van Stipriaan und Wolfgang Leiberg</i> Zum Geleit .....	8
<b>Teil I – Texte zum Kolloquium .....</b>	<b>11</b>
<i>Hans Müller-Steinhagen</i> Grußwort .....	12
<i>Harald Budelmann</i> Laudatio .....	16
<i>Konrad Bergmeister</i> Weniger ist manchmal mehr – ein Beitrag zur Mindestbewehrung .....	24
<i>Harald S. Müller und Michael Haist</i> Opus Caementitium Optimum – Der nachhaltige Beton des 21. Jahrhunderts .....	42
<i>Werner Sobek</i> Über die Gestaltung der Bauteilinnenräume .....	62
<b>Teil II – Weitere Beiträge .....</b>	<b>79</b>
<i>Thomas Bösche</i> Mehr Mut im Ingenieurbau.....	80
<i>Harald Budelmann und Sven Lehmborg</i> Von der Küchenarbeitsplatte zum leichten Tragwerk – Was kann ultrahochfester faserverstärkter Feinkornbeton? .....	90

<i>Luna Manolia Daga und Udo Wiens</i>	
Mehr als nur schwarze Buchstaben auf weißem Papier – Ein Essay .....	104
<i>Ulrich Häußler-Combe</i>	
Aspekte der Modellierung von Stahlbetontragwerken .....	108
<i>Josef Hegger, Norbert Will, Rostislav Chudoba, Alexander Scholzen und Jan Bielak</i>	
Bemessungsmodelle für Bauteile aus Textilbeton .....	124
<i>Frank Jesse</i>	
Über die Länge der Leine .....	146
<i>Peter Mark</i>	
Mit Leichtigkeit .....	150
<i>Steffen Marx</i>	
Gute Lehre im Konstruktiven Ingenieurbau .....	152
<i>Viktor Mechtcherine</i>	
Hochduktiler Beton – eine Konkurrenz zu Textilbeton? .....	160
<i>Karl Morgen</i>	
Deutschlands größte Kamera .....	178
<i>Peter Offermann</i>	
Wie alles begann .....	188
<i>Dirk Proske</i>	
Ist die Energiewende ein technischer Hype? .....	192
<i>Mike Schlaich</i>	
Die Hommage als Quelle der Inspiration .....	216

<i>Jürgen Schnell</i>	
Fashion Statement .....	228
<i>Mario Smarslik, Christoph Kämper, Patrick Forman, Tobias Stallmann, Peter Mark und Jürgen Schnell</i>	
Topologische Optimierung von Betonstrukturen .....	234
<i>Jürgen Stritzke</i>	
Leipziger Großmarkthalle – ein „Historisches Wahrzeichen der Ingenieurbaukunst in Deutschland“	256
<i>Luc Taerwe</i>	
Self-anchored suspension bridges with prestressed concrete deck: historic examples .....	280
<b>Teil III – Institut für Massivbau .....</b>	<b>291</b>
<i>Silke Scheerer (Text) · Ulrich van Stipriaan (Fotos)</i>	
Massivbau an der TU Dresden gestern und heute .....	292
<i>Angela Schmidt</i>	
Die eingeschlichenen Fehler .....	320
<i>Manfred Curbach</i>	
Habilitation / Promotionen .....	326
<i>Ulrich van Stipriaan (Fotos)</i>	
Institut für Massivbau   Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter .....	330

Teil I  
Texte zum Kolloquium



Werner Sobek

## Über die Gestaltung der Bauteilinnenräume

Meinem Freund Manfred Curbach zum 60. Geburtstag gewidmet

*Prof. Werner Sobek, Stuttgart*

*Werner Sobek ist Architekt und Ingenieur. Er befasst sich insbesondere mit der Beziehung von Gestaltung und Technologie sowie Fragen des Bauens von morgen.*

### Ein Ausschnitt aus dem Gesamtbild

Eine der elementaren Forderungen an das Bauschaffen von Morgen lautet, mit einem Weniger an Material mehr zu bauen [1]. Diese Forderung gründet sich auf die Erkenntnis, dass das Bevölkerungswachstum ein signifikant steigendes Wachstum des Bauvolumens bei gleichzeitig auftretender Verknappung von Rohstoffen bewirkt. Beides macht die verstärkte Einbringung von Leichtbautechnologien und, gleichzeitig, drastisch erhöhte Recyclingquoten im Bauwesen erforderlich. Das internationale Bauschaffen ist hierauf nicht vorbereitet. Umso wichtiger erscheint es deshalb, die Grundlagen hierfür zu legen.

Das Gros der in der gebauten Umwelt verbauten Baustoffe ist, wenn man einmal vom Verkehrswegebau absieht, in den tragenden Konstruktionen

der Gebäude oder Brücken zu finden. Leichtbau findet in diesen beiden Kategorien heute zumeist nur dann statt, wenn große Spannweiten zu überbrücken, große Höhen zu erreichen oder Bauteile (wie z. B. wandelbare Dächer) zu bewegen sind. Die Gründe hierfür sind naheliegend: Ein zu hohes Eigengewicht der tragenden Konstruktion würde die Baubarkeit als solche verhindern oder zu allzu hohen Kosten führen. Im Rest des Bauschaffens spielt Gewichtsreduktion nur noch dort eine wesentliche Rolle, wo die Materialkosten signifikant hoch im Verhältnis zu den Arbeitskosten sind [2].

Eine Einsparung an Eigengewicht geht in den meisten Fällen auch mit einer Einsparung an grauer Energie einher, wobei allerdings definitorisch darauf zu achten ist, sorgfältig zwischen fossil-basierter und nicht-fossiler (sogenannte „erneuerbarer Energie“, wobei jedermann weiß, dass Energie nicht

erneuerbar ist) zu unterscheiden. Auf lange Sicht ist eine Beschränkung der Verwendung nicht-fossil basierter Energie nicht erforderlich, denn aufgrund der Tatsache, dass die Sonne ca. 10.000-mal mehr Energie auf die Erde einstrahlt als die Menschheit für alle ihre Bedürfnisse benötigt, hat die Menschheit kein Energieproblem im eigentlichen Sinn. Das sogenannte Energieproblem besteht vielmehr darin, dass die Energiebereitstellung zumeist auf Basis der Verbrennung fossiler Materialien wie Erdöl, Kohle, Pellets etc. erfolgt, wodurch infolge der dabei freigesetzten Emissionen die Erderwärmung beschleunigt wird [1].

Die Ursachen, warum die Menschheit auf die am Horizont der Geschichte heraufziehenden, in ihren Auswirkungen klar beschriebenen, die Zukunft fundamental negativ beeinträchtigenden Phänomene nicht anders reagiert, als sie es tatsächlich tut, sind weitestgehend unklar und nur in Ansätzen beschrieben. Dies gilt auch für das Bauwesen. So erscheint es nahezu unerklärlich, warum Energieeffizienz gefordert wird, anstatt das notwendige Verbot des Verbrauchs fossil erzeugter Energie auszusprechen. Es erscheint unerklärlich, warum die massive Integration von Photovoltaik einschließlich der zugehörigen Batterietechnik in die gebaute Umwelt nicht gefördert, sondern politisch behindert wird. Es erscheint unerklärlich, warum angesichts der Erderwärmung im Jahr 2015 in Deutschland mehr Ölheizungen und mehr sogenannte SUVs als je zuvor verkauft werden konnten etc. etc. In Bezug auf die Baustoffver-

wendung ist ähnliches festzuhalten. Eine Recyclingvorschrift ähnlich der im Automobilbau gibt es im Bauwesen weltweit bis heute nicht. Die Implementierung von Leichtbaustrategien erfolgt sehr zögerlich. Immerhin ist festzuhalten, dass die Forschungen in diesem Gebiet seit dem vergangenen Jahr in Deutschland, hierbei insbesondere in Baden-Württemberg, massiv gefördert werden.

Neben technischen und technologischen Hindernissen muss die Einführung von materialsparenden Bauweisen auch einen in der Bevölkerung tief verankerten, eher als psychologische Hürde zu bezeichnenden Vorbehalt überwinden, der sich darin gründet, dass dem „leicht Bauen“ der Charakter des Temporären, des Preiswerten, ja des Billigen anhaftet, während material- und gewichtsintensive Bauweisen als massiv, robust, beständig und insgesamt als höherwertig angesehen werden. Da eine bauliche Investition typischerweise zu den größten Investitionen gehört, die ein Mensch im Lauf seines Lebens tätigt, ist der Wunsch nach maximaler Wertigkeit und Beständigkeit der Investition verständlich. Es ist demnach erforderlich aufzuzeigen, dass materialsparendes Bauen ebenfalls eine hohe Wertigkeit bzw. dieselbe Wertigkeit wie ein *Massivbau* haben kann, zudem aber auch noch lebenserhaltende Qualitäten im übergeordneten Sinn und Maßstab besitzt.

Die Bedeutung von zukünftigen Einsparungen an Baustoffen wird offensichtlich, wenn man das

---

*So erscheint es  
nahezu unerklärlich,  
warum  
Energieeffizienz  
gefordert wird,  
anstatt das  
notwendige Verbot  
des Verbrauchs  
fossil erzeugter  
Energie  
auszusprechen*

---

---

*Bildlich ausgedrückt  
entspricht ein  
Bauvolumen  
von 60 Mrd. t einer  
30 cm dicken Wand  
entlang  
des Äquators,  
die ca. 2.000 m  
hoch ist*

---

Volumen zukünftiger Bauaufgaben erfasst. So beträgt der Nettozuwachs der Weltbevölkerung derzeit ca. 125 Mio. Menschen pro Jahr [1]. Legt man jedem dieser Neubürger den Baustoffbesitz eines Bundesbürgers, der bei ca. 490 t pro Person liegt [1], zugrunde, so ergibt dies einen jährlichen Baustoffbedarf von ca. 60 Mrd. t. Dieser setzt sich jeweils annähernd hälftig aus Aufwendungen für Infrastrukturmaßnahmen und solchen für den allgemeinen Hochbau zusammen. Bildlich ausgedrückt entspricht ein Bauvolumen von 60 Mrd. t einer 30 cm dicken Wand entlang des Äquators, also einer Wand von 40.000 km Länge, die ca. 2.000 m hoch ist. Eine Gewichtseinsparung allein im Hochbau von ca. 20 % würde somit Höhenreduzierung dieser jährlich zu bauenden Äquatorwand um 200 m entsprechen [1].

Eine überschlägige Betrachtung des Quotienten von Eigengewicht zu Nutzlast, außerhalb des Bauwesens auch als Quotient von *deadload* (bzw. Leergewicht bezeichnet, manchmal wird auch das Trockengewicht verwendet) zur *payload*, ergibt weitere Aufschlüsse: Im Automobilbau liegt dieses Verhältnis bei ca. 2,4 (Leergewicht ohne Fahrgewicht angesetzt) [3], im Verkehrsflugzeugbau bei ca. 0,8 (Leergewicht zu Treibstoffgewicht und Nutzlast) [3] und im Hochbau bei ca. 5. Natürlich ist aus diesen Verhältniswerten keine lineare Ableitung möglicher Gewichtseinsparpotentiale für das Bauwesen möglich, denn im Fahrzeugbau wie in der Luftfahrt können andere Grenzwerte für sta-

tionäre und instationäre Verformungen zugrundegelegt werden. Die Chance zu einer Erreichbarkeit enormer Einsparpotentiale belegen die Vergleichsziffern aber allemal.

## Leichtbau

Leichtbau wird durch zwei Maßnahmenbündel möglich. Das erste wird durch die sog. Vermeidungsstrategien, also beispielsweise der aktiven Beeinflussung der Einwirkungen auf eine Struktur, beschrieben. Das zweite Maßnahmenbündel besteht aus den klassischen Kategorien des Leichtbaus: Materialleichtbau, Strukturleichtbau und Systemleichtbau, wobei die beiden letztgenannten bei Einführung von Adaptionsmechanismen dem Ultraleichtbau [4] zuzuordnen sind.

Die nachfolgenden Betrachtungen beschränken sich auf die Betrachtung der Optimierung eines einzelnen Bauteils bzw. einer einzelnen Komponente einer Struktur und damit auf einen speziellen Aspekt des Strukturleichtbaus. Generell kann ein Bauteil als Element einer übergeordneten Tragstruktur angesehen werden. Im Leichtbau wird diese Tragstruktur durch eine Geometrie- und/oder eine Topologieoptimierung bei gleichzeitiger Einhaltung einer Reihe von Nebenbedingungen wie beispielsweise einer Restriktion des Entwurfsraumes entwickelt. Die hierfür zur Verfügung stehenden Methoden und Werkzeuge sind hinreichend beschrieben, siehe z. B. [5], [6].

Im Leichtbau wird das tragende Element selbst wiederum als Struktur gesehen, also einer Geometrie- und einer Topologieoptimierung (bei gleichzeitiger Einhaltung einer Reihe von Nebenbedingungen) unterworfen. Wird die Geometrie des Bauteils dabei in mehrere Komponenten aufgelöst, z. B. in eine Fachwerkstruktur, so kommen für die Bauteiloptimierung sowohl eine Geometrie- wie auch eine Topologieoptimierung zum Einsatz. Für den Fall, in dem aus architektonischen, nutzungstechnischen oder anderen Gründen eine Auflösung des Bauteilquerschnittes, also Fachwerk- oder Vierendeel- und ähnliche Strukturen nicht infrage kommen, erfolgt eine Geometrieoptimierung. Diese Geometrieoptimierung kann als Findung der idealen Geometrie der Bauteilumhüllenden, also der Außenfläche eines Bauteils angesehen werden. Diese Außenfläche umschließt typischerweise einen vollständig mit Material ausgefüllten Hohlraum. Bei den Blechbauweisen des Metallbaus umschließt sie einen Hohlkörper, dessen Wandungen typischerweise eine konstante Wandstärke aufweisen [7].

Es ist evident, dass bei ausschließlich zugbeanspruchten Bauteilen eine Geometrieoptimierung irrelevant ist, dass sie bei ausschließlich druckbeanspruchten Bauteilen zu einer dem jeweiligen Stabilitätsproblem optimal angepassten Geometrie führt und dass sie bei biegebeanspruchten Bauteilen zu einer Anpassung der Bauteilgeometrie an die Momentenverläufe führen wird. Gleichzeitig ist klar, dass bei druck- und biegebeanspruchten Bau-

teilen eine „Optimierung“ der Bauteilaußenform aufgrund der im Bauteilinneren stets vorhandenen Bereiche spannungsmäßig geringer ausgenutzten Materials lediglich von „suboptimalen“ Lösungen im Sinn des Leichtbaus gesprochen werden kann. Dies gilt letztlich auch bei den Hohlprofil- und Blechbauweisen, solange sich bei beiden keine im Bauteilinneren, also im Hohlraum, angeordneten weiteren tragenden Elemente befinden – was typischerweise nicht der Fall ist. Eine Optimalität von Bauteilen im Sinn einer Gewichtsminimalität wird also bei Anwendung der heute verfügbaren und üblichen Methoden nicht erzielt. Der einzige Weg, diese Potentiale auszunutzen, liegt in einer auf einer bewussten Gestaltung basierten Optimierung des Bauteilinnenraumes.

Es ist im Bauwesen sehr häufig der Fall, dass aus übergeordneten gestalterischen, herstellungs- oder nutzungstechnischen Erwägungen eine Gestaltung der Bauteil(-außen-)geometrie im Sinn der Findung einer Geometrie, die zu reduziertem Materialverbrauch führt, nicht möglich bzw. nicht durchsetzbar ist.

Einfache Beispiele hierfür sind Flachdecken im Hochbau, deren Unterseite aus schalungstechnischen Überlegungen genauso eben zu sein hat wie deren Oberseite, auf der der Personenverkehr stattfindet. Die einzigen Optimierungsparameter sind in diesem Fall die Deckendicke und die Art der Platzierung der Bewehrung. Von Optimierung zu

---

*Eine Optimalität  
von Bauteilen  
im Sinn einer  
Gewichtsminimalität  
wird bei  
Anwendung der  
heute verfügbaren  
und üblichen  
Methoden  
nicht erzielt*

---

---

*Die Optimierung eines Bauteils im Sinn einer Gewichts-optimierung setzt als erstes die Kenntnis und das Verständnis der dreidimensionalen Spannungszustände in so einem Bauteil voraus*

---

sprechen ist in diesem Fall – ähnlich wie bei druckbeanspruchten Stützen mit vertikal verlaufender Außenkante – in mathematischem Sinn korrekt. Die tatsächlichen Gewichtseinsparpotentiale eines Bauteils werden dabei allerdings nicht gezogen. Der einzige Weg, diese Potentiale zu ziehen, liegt auch hier in einer auf einer bewussten Gestaltung basierten Optimierung des Bauteilinnenraumes.

### Über die Gestaltung des Bauteilinnenraumes

Das Verständnis der nachfolgenden Überlegungen wird vereinfacht, wenn man die tragstrukturell phänomenologische Einheit von druck- und biegebeanspruchten Bauteilen zugrunde legt. Da es prinzipiell nicht möglich ist, druckbeanspruchte Bauteile mit einer perfekt geradlinigen Bauteilachse (Systemlinie), einem entlang der Bauteilachse perfekt symmetrischen Querschnitt und einer über den Querschnitt perfekt symmetrisch verteilten Baustoffqualität (E-Modul, Kriechmodell...) herzustellen, ist bei „ausschließlich druckbeanspruchten Bauteilen“ a priori von einem Bauteil auszugehen, welches eine dominierende Druckbeanspruchung bei gleichzeitig vorhandener subdominanter Biegebeanspruchung aufweist. Die modernen Bemessungsverfahren tragen dem bereits Rechnung, indem sie die Zugrundelegung einer vorverformten Systemlinie bzw. -ebene und eine anschließende nichtlineare Berechnung des Bauteils unter Belastung zulassen. Für die im Nachfolgenden zu be-

trachtenden Spannungsfelder im Bauteilinneren bedeutet dies aber nichts anderes, als dass diese über den Querschnitt des Bauteils wie auch über die Bauteillängsentwicklung hin nicht konstant sind. Die Optimierung eines Bauteils im Sinn einer Gewichtsoptimierung setzt demnach als erstes die Kenntnis und das Verständnis der dreidimensionalen Spannungszustände in so einem Bauteil voraus. In einem zweiten Schritt verändert sie diese Spannungsfelder durch Verändern der Steifigkeiten im Bauteilinneren, was durch Einbringen „anderer“ Materialien (Sandwichbauweisen, Multimaterialbauweisen) und/oder der gezielten Platzierung von Hohlräumen geschieht mit dem Ziel einer Homogenisierung der Spannungsfelder im Sinn eines *fully-stressed designs*.

Das Platzieren unterschiedlicher Steifigkeiten entlang der drei Raumachsen eines Bauteils kann mit einer Monomaterial- oder mit einer Multimaterialtechnologie geschehen. Letztere stellt im Hinblick auf eine ideale Anpassung der Steifigkeitsverteilungen innerhalb des Bauteils wahrscheinlich den am besten geeigneten Ansatz dar. Da hierbei aber zumeist verschiedene Materialien kraft- und verformungsschlüssig miteinander zu verbinden sind, entsteht zwangsläufig das bei allen Hochleistungsverbundwerkstoffen (der Verbundwerkstoff Beton gehört nicht zu dieser Gruppe) bekannte Recyclingproblem. Der Autor hat daher schon vor längerem beschlossen, sich in seinen Forschungsarbeiten über die Gestal-

tung der Innenräume von Bauteilen zunächst den Monomaterialtechnologien – und dort dem Bauen mit Beton – zu widmen.

## Gradiententechnologien

Baustoffe, die eine unterschiedliche Steifigkeit entlang der drei Raumachsen eines Bauteils aufweisen können, werden als Gradientenwerkstoffe bezeichnet. Die ursprünglich im Bereich der Oberflächen-technik entwickelten Ansätze, siehe z. B. [8], [9], wurden vom Autor auf den Betonbau übertragen [10]. Am ILEK (Institut für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren der Universität Stuttgart unter der Leitung von Werner Sobek) entstanden daraufhin seit ca. 2000 eine Reihe grundlegender Arbeiten zu diesem Thema. Einen guten Überblick hierüber gibt [10].

## Gradiententechnologien im Betonbau

Der Gedanke der Einführung von Gradiententechnologien in den Stahlbetonbau eröffnet drei Problemfelder:

1. Mit welchen Methoden kann die ideale Gradierung ermittelt und festgelegt werden?
2. Wie berechnet man ein gradiertes Bauteil?
3. Wie stellt man eine (Monomaterial-)Gradierung her?



*Bild 1  
„Hexapod“: Zweidü-  
sensspritzverfahren  
zur Herstellung von  
Gradientenbetonen,  
entwickelt am ILEK in  
Kooperation mit ISYS*

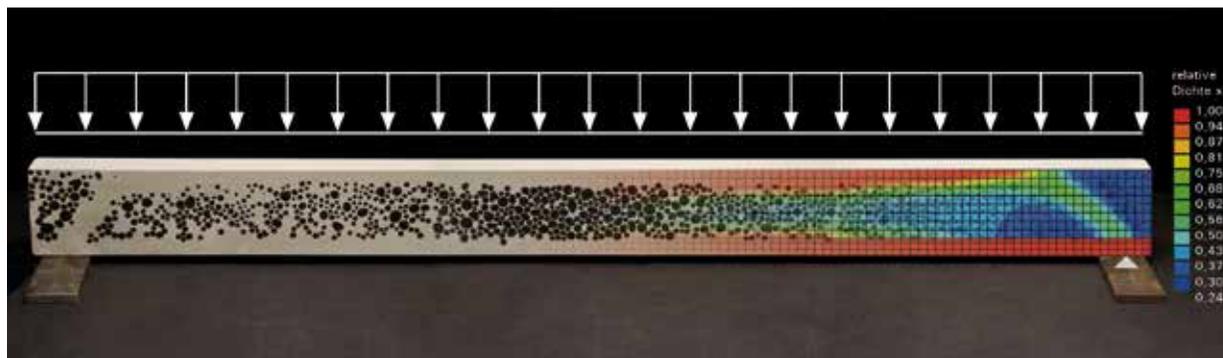
*(Foto: © ILEK,  
Gabriela Metzger)*

Das erstgenannte Problemfeld wurde insbesondere von Michael Herrmann am ILEK untersucht. In [11] präsentiert Herrmann eine erste Methode zur Lösung des Problems. Zur Berechnung von gradierten Bauteilen bieten sich nach wie vor die

Bild 2

Ein mit dem Zweidüsen-spritzverfahren hergestelltes Bauteil aus Gradientenbeton. Die rechte Seite der Abbildung zeigt den Beanspruchungszustand im Bauteil.

(Grafik: © ILEK, Michael Herrmann)



FE-Methoden an. Zur Herstellung von (Monomaterial-)Gradienten wurde am ILEK von Walter Haase, Michael Herrmann und Daniel Schmeer zunächst der Weg eines robotisch gestützten Mehrdüsen-Spritzverfahrens begangen, Bild 1. Mit diesem Ansatz ist man heute in der Lage, gradierte Bauteile aus Beton herzustellen, die, bei gleicher Tragfähigkeit, gegenüber einem Bauteil in nicht-gradierter Ausführung eine Gewichtsersparnis von bis zu 70 % aufzeigen [12], Bild 2. Die Automatisierung der Herstelltechnik lag im Wesentlichen in den Händen von Mark Wörner und Benjamin Schuler vom ISYS (Institut für Systemdynamik der Universität Stuttgart unter der Leitung von Oliver Sawodny). Die Entwicklung geeigneter Betonmischungen lag im Wesentlichen in den Händen von Sören Sippel und Julian Pfänder vom IWB (Institut für Werkstoffe im Bauwesen der Universität Stuttgart unter der Leitung von Harald Garrecht). Beide Institute, ISYS und IWB,

sowie das ILEK arbeiten seit Jahren aufs Engste in interdisziplinären Kooperationen erfolgreich zusammen.

### Hohlkörperbauweisen

Bei der Anwendung von Monomaterial-Gradiententechnologien mittels Spritzverfahren ist an jedem Punkt im Inneren eines Bauteiles Material zu platzieren. Da die Porengröße der eine Schaum- oder eine Schwammstruktur ausbildenden leichten Komponenten nicht beliebig gesteigert werden kann, sondern auf den Millimeter- und Submillimeterbereich beschränkt ist, bedeutet dies, dass selbst in Bereichen mit sehr niedrigem Beanspruchungsniveau noch ein „Zuviel“ an Masse eingesetzt wird. Die Lösung dieses Problems besteht in der Platzierung größerer Hohlräume ( $1 \text{ mm} < d < 200 \text{ mm}$ ) im Bauteilinneren, die jetzt allerdings mit anderen als mit schaubildenden Technologien herzustellen sind.

Das Einbringen von derartigen Hohlräumen zur Reduktion des Eigengewichtes bei gegebenen Bauteilabmessungen ist, beginnend mit dem zweiten Jahrhundert und hauptsächlich im dritten und vierten Jahrhundert, als Bautechnik in Rom verbreitet. So wurden beispielsweise am Helena-Mausoleum Amphoren zur Gewichtsreduktion verbaut [13]. Aus neuerer Zeit sind Ansätze bekannt, bei denen kugelförmige Hohlkörper aus Polyethylen (z. B. bei der sog. *Bubble-deck*-Bauweise) zu einer Hohlraumbildung in einem Betonbauteil führen. Bei der letztgenannten Technik werden sich nicht berührende Kunststoffhohlkugeln mit identischem Durchmesser in einlagiger Anordnung in Bewehrungskörper eingebaut (Auftriebssicherung) und anschließend einbetoniert. Die Hohlraumstruktur im Bauteilinneren verläuft also nach einer 0/1-Funktion und lässt somit eine Gradierung im eigentlichen Sinn nicht zu. Deshalb, und weil die einbetonierten Kunststoffhohlkugeln letztlich zu einem Recyclingproblem führen, hat der Autor bereits im Jahr 2008 beschlossen, die Entwicklung von Betonhohlkörpern, die – idealerweise – robotisch während eines Spritzprozesses in die frische Betonstruktur eingebracht werden, zu verfolgen.

Die am ILEK entwickelte Herstellung von Betonhohlkörpern und das Einbringen derselben in die Schalung bzw. in den Betonierprozess stellen eine komplexe Aufgabenstellung dar, auf die zunächst nur kurz eingegangen werden soll. Danach stellen sich die Fragen nach der optimalen Geometrie der

Hohlkörper und deren Anordnung innerhalb eines Betonbauteils. Letztere ist – auch hinsichtlich der menschlichen Vorstellungskraft – eine sehr komplexe Fragestellung. Der Autor bearbeitet diese mit einem Team von Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern derzeit an seinem Institut. Aufgrund der Schwierigkeit der Fragestellung begann das Team seine Arbeiten dabei zunächst im Bereich der Anordnung von kugelförmigen Hohlräumen im Bauteilinneren – wohl wissend, dass mit diesem Ansatz zunächst nur suboptimale Lösungen erzielbar sind. Der Autor sieht aber die Beherrschung von Kugelagglomerationen als Voraussetzung für die Beherrschbarkeit von Agglomerationen von Hohlkörpern allgemeiner Geometrie.

### Kugelförmige Hohlkörper aus Beton

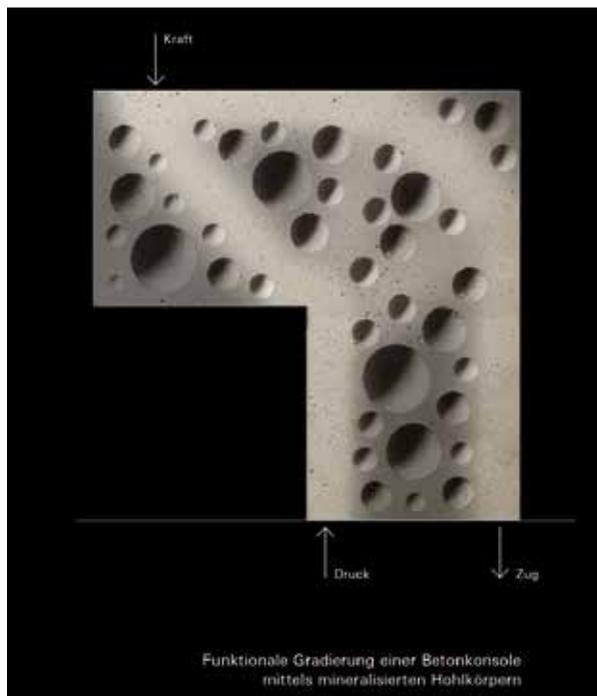
Die Entwicklung einer zur Herstellung von Hohlkugeln aus Beton geeigneten Betonmischung lag in



*Bild 3  
Betonhohlkugeln,  
hergestellt am ILEK. Die  
Wandstärke der Hohl-  
kugeln beträgt, je nach  
Erfordernis und ge-  
wünschter Robustheit,  
zwischen 1 und 4 mm,  
der Kugeldurchmesser  
beträgt bis zu 250 mm.*

*(Foto: © ILEK,  
Daria Kovaleva)*

*Bild 4  
Betonhohlkugeln, eingebracht in eine Konsole. Skizzierung des Kräfteverlaufs mittels Stabwerkmodell. Das Experimentalbauteil ist Bestandteil einer Studie am ILEK, in der die Einbringung, die Lagegenauigkeit und die Betonieretechnik bei Verwendung von Betonhohlkugeln studiert werden. (Foto: © ILEK, Daria Kovaleva)*



*Bild 5  
Betonbalken mit Abmessungen Breite / Höhe / Länge entsprechend  $a / a / n \times a$ . Der Durchmesser der eingebrachten Betonhohlkugeln entspricht der Balkenbreite bzw. -höhe  $a$ , d. h. die Hohlkugeln berühren die Innenhaut der Schalung. (Grafik: © Werner Sobek Stuttgart)*



den Händen von Julian Pfänder am IWB, die einer geeigneten Herstelltechnik bei Daniel Schmeer am ILEK [14]. Die Automatisierung der Herstelltechnik lag im Wesentlichen in den Händen von Benjamin Schuler und Mark Wörner am ISYS. Heute ist das Forscherteam von ILEK/ISYS in der Lage, Hohlkugeln aus Beton mit Durchmessern bis zu 250 mm bei Wandstärken von lediglich 1–4 mm automatisiert herzustellen, Bild 3. Mit den heute verfügbaren Hohlkugeln lassen sich alle derzeit am ILEK untersuchten Fragestellungen experimentell unterstützen und verifizieren [14], Bild 4.

### Quaderförmige Bauteile mit kugelförmigen Hohlkörpern

Es ist offensichtlich, dass das Gewichtsminimum eines Bauteils durch eine Optimierung der äußeren wie der inneren Geometrie erzielt wird. Zur Reduktion der Komplexität der Darstellung und zu der Verstehbarkeit der Zusammenhänge soll an dieser Stelle aber lediglich die Frage diskutiert werden, welche Potentiale in der Platzierung kugelförmiger Hohlkörper in einem quaderförmigen Bauteil gegeben sind. Dabei wird die Betrachtung eines balkenförmigen Bauteils mit dem Querschnitt  $a \times a$  und der Länge  $n \times a$  zugrunde gelegt.

Die Platzierung von  $n$  Kugeln mit dem Durchmesser  $d = a$  führt als Orthogonalpackung (die Mittelpunkte der Kugeln liegen auf den Knotenpunkten eines dreidimensionalen orthogonalen Gitters mit

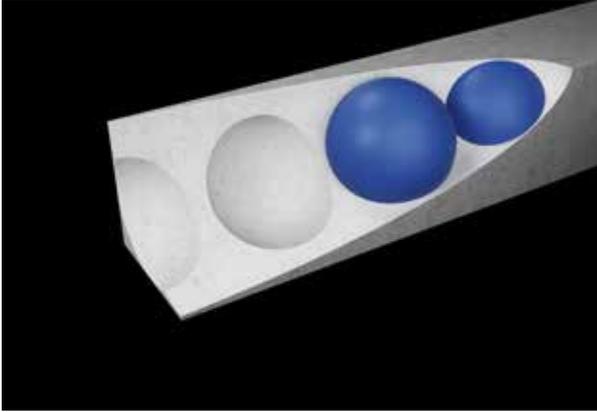


Bild 6 Hohlkugeldurchmesser  $d = a$ : Lage der Hohlkugeln innerhalb des Bauteils  
(Grafik: © Werner Sobek Stuttgart)

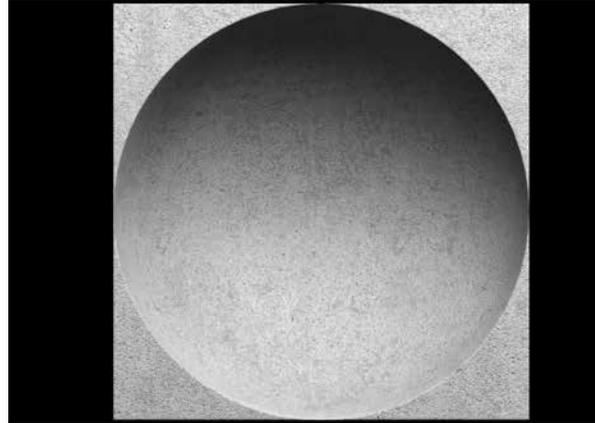


Bild 7 Hohlkugeldurchmesser  $d = a$ : Vertikaler Schnitt durch den Mittelpunkt der Hohlkugel  
(Grafik: © Werner Sobek Stuttgart)

Knotenabstand  $b = a$ ) zu einer Volumen- und damit Gewichtsreduktion von 52 %, Bild 5. Das tragende Skelett zwischen den Hohlkugeln hat die Geometrie eines Vierendeelträgers, dessen Berandungsflächen (definiert als die zwischen jeweils vier Eckpunkten aufgespannte ebene Fläche) einen „Wandstärkenverlauf“ von  $0 < d < 0,5 a$  aufweisen, Bilder 6 und 7.

Die Platzierung von 8 n Kugeln mit dem Durchmesser von je  $d = 0,5 a$  (Bild 8) führt, wie jedwede weitere Verkleinerung des Kugeldurchmessers, ebenfalls zu einer Volumen- und damit Gewichtsreduktion von 52 %. Dieses Ergebnis überrascht zunächst, da die Anschauung etwas anderes erwarten ließ. Eine Erhöhung der Kugelanzahl führt also

lediglich zu einer Verlagerung des eingebrachten Materials dahingehend, dass, mit abnehmendem Kugeldurchmesser, die Materialverteilung über den Querschnitt hin immer homogener wird, Bilder 9 und 10.

Die Betrachtung der Geometrie eines Knotens (wie in Bild 11 dargestellt) legt die Einführung eines zweiten Kugeldurchmesser  $d_2$  nahe, wobei  $d_2$  zunächst so gewählt wird, dass die Kugeln mit Durchmesser  $d_2$  in dem durch jeweils vier Kugeln mit Durchmesser  $d_1$  aufgespannten Raum, den man als *Würfellücke* bezeichnen kann, zu liegen kommen und sie diese vier Kugeln je einmal berühren. In einer Einheitszelle (Bild 12) kann das Kugelvolumen und damit die Gewichtsersparnis gegenüber dem

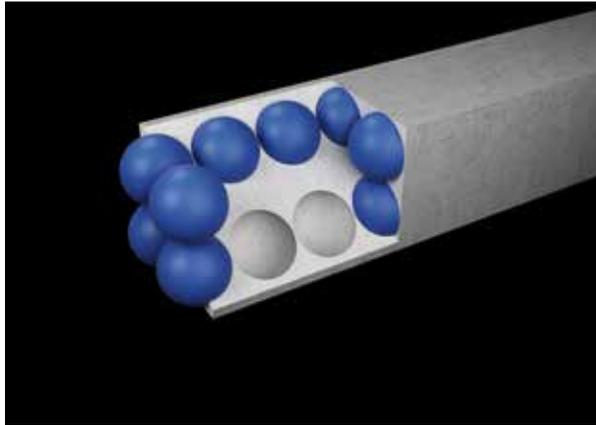


Bild 8 Hohlkugeldurchmesser  $d = 0,5 a$ , Orthogonalpackung: Lage der Hohlkugeln innerhalb des Bauteils (Grafik: © Werner Sobek Stuttgart)

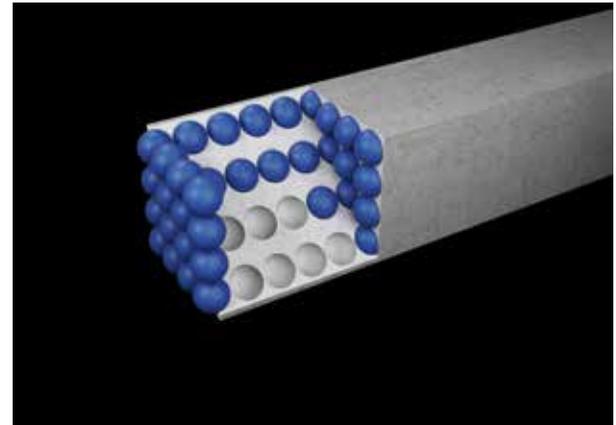


Bild 9 Hohlkugeldurchmesser  $d = 0,25 a$ , Orthogonalpackung: Lage der Hohlkugeln innerhalb des Bauteils (Grafik: © Werner Sobek Stuttgart)

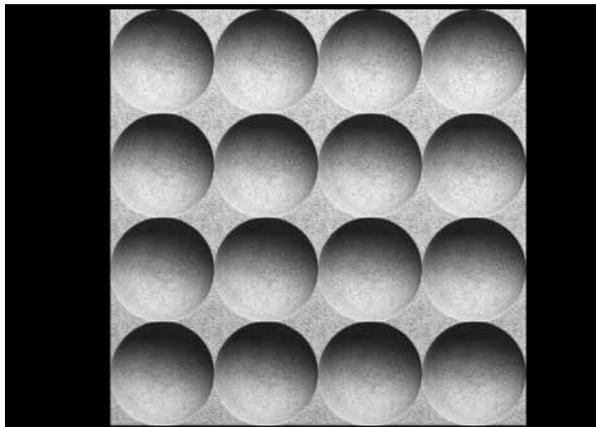


Bild 10 Hohlkugeldurchmesser  $d = 0,25 a$ , Orthogonalpackung: Ausschnitt aus der tragenden Betonstruktur (Grafik: © Werner Sobek Stuttgart)

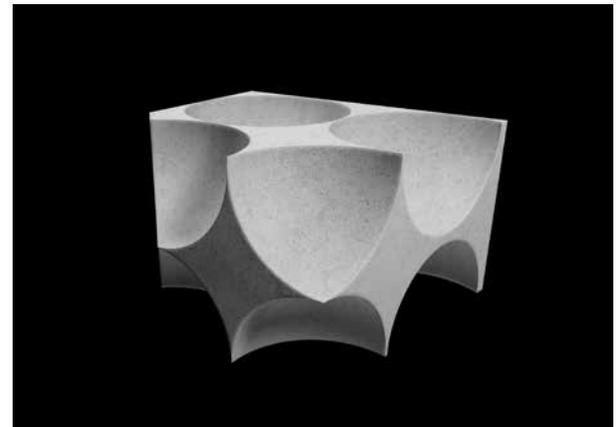


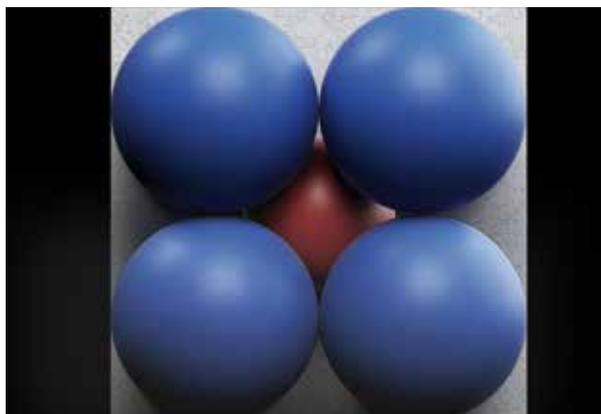
Bild 11 Hohlkugeldurchmesser  $d = 0,25 a$ , Orthogonalpackung: Knotengeometrie der tragenden Betonstruktur (Grafik: © Werner Sobek Stuttgart)

massiven Bauteil auf 73 % gesteigert werden. Unter der für die hier anzustellenden Betrachtungen erforderlichen Annahme, dass an den Berandungsflächen des Balkens keine Viertel- oder Halbkugeln zugelassen sind, ergibt sich eine Vergrößerung des eingesparten Volumens in der Größenordnung von 5 % auf insgesamt 57 %, Bild 13.

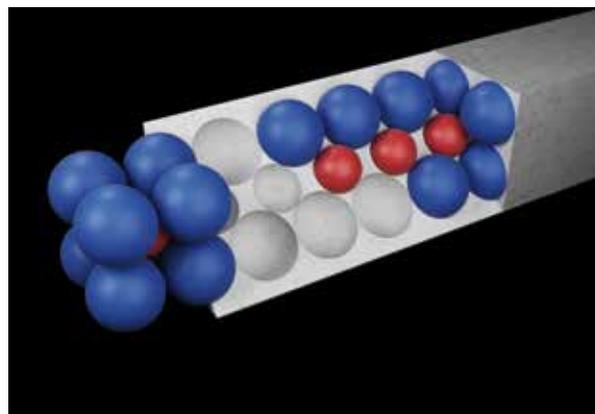
Die Einführung eines zweiten und weiterer Kugeldurchmesser bedeutet nichts anderes als die Einführung einer Sieblinie. In der Sieblinientheorie geht man allerdings nicht mehr von Orthogonalpackungen, sondern von einer Kugelanordnung aus, die eine maximale Packungsdichte erlaubt. Im einfachen Fall einer Packung mit Kugeln konstanten Durchmessers  $d_1$  ergibt sich dabei die in Bild 14 dargestellte An-

ordnung von jeweils in einer Ebene hexagonal angeordneten Kugeln, wobei die einzelnen Ebenen so gegeneinander versetzt sind, dass die Kugeln einer Schicht jeweils in den dreiecksförmigen Leerstellen der benachbarten Schicht zu liegen kommen. Die Formulierung des Problems einer Kugelanordnung mit maximaler Packungsdichte geht auf Sir Walter Raleigh zurück [15]. Johannes Kepler beantwortete die Frage erstmals in seiner berühmten Keplerschen Vermutung, Carl Friedrich Gauß bewies die Keplersche Vermutung unter Zugrundelegung der Annahme, dass alle Kugeln auf einem Gitter liegen. Die maximale Packungsdichte liegt jetzt bei ca. 74 %.

Zwischen den einzelnen gleich großen Kugeln in einer Anordnung mit maximaler Packungsdichte er-



*Bild 12 Hohlkugeldurchmesser  $d = 0,5 a$ , Orthogonalpackung: Füllung der Würfellücke, hier dargestellt durch die rote Kugel  
(Grafik: © Werner Sobek Stuttgart)*



*Bild 13 Hohlkugeldurchmesser  $d = 0,5 a$ , Orthogonalpackung: Lage der Füllungen der Würfellücken innerhalb des Bauteils  
(Grafik: © Werner Sobek Stuttgart)*

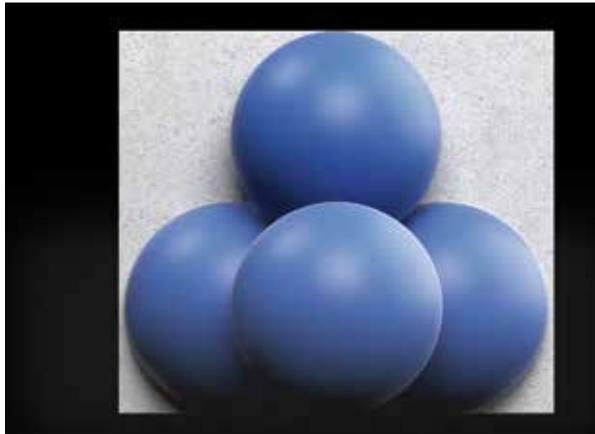


Bild 14 Unendliche Kugelpackung: Anordnung von Kugeln in maximaler Packungsdichte  
(Grafik: © Werner Sobek Stuttgart)

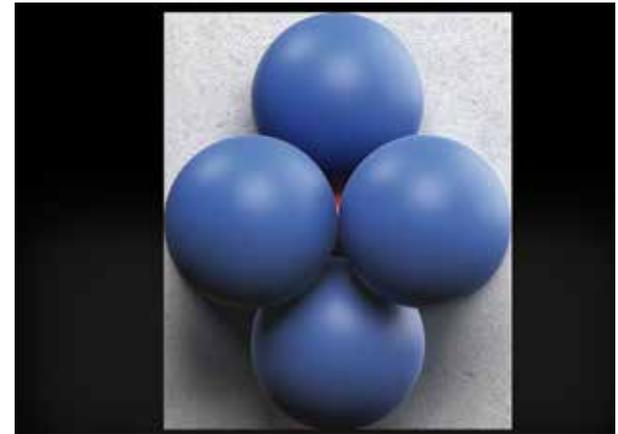


Bild 15 Unendliche Kugelpackung: Tetraederlücke  
(Grafik: © Werner Sobek Stuttgart)

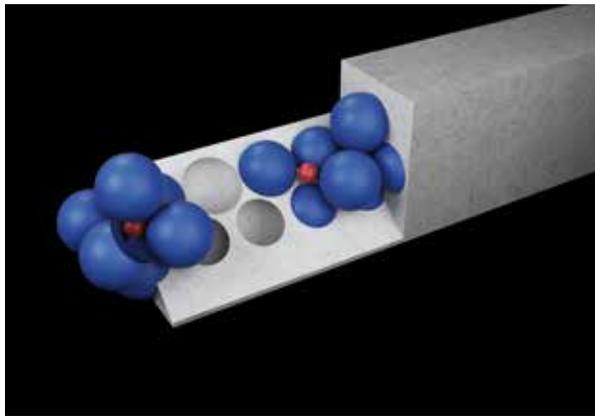
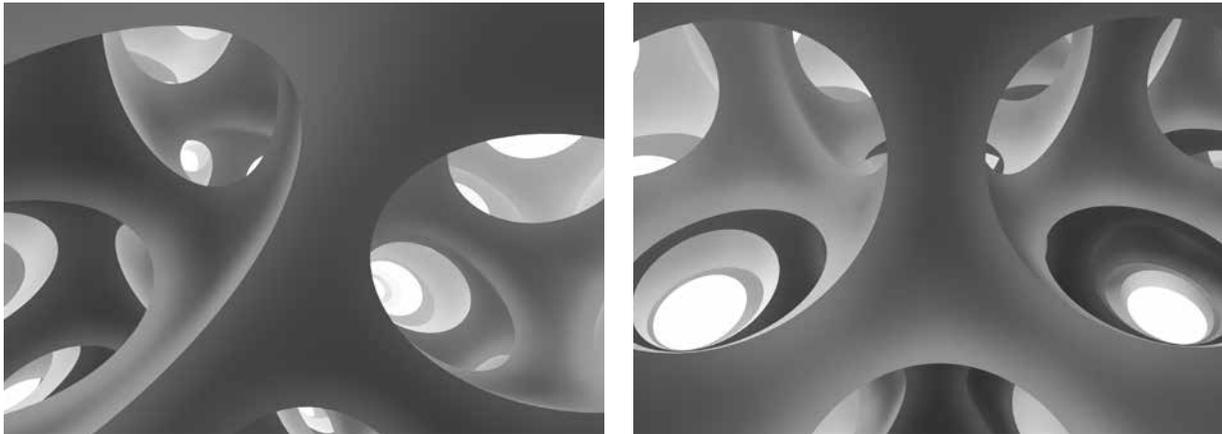


Bild 16 Unendliche Kugelpackung: Die Tetraederlücke wird mit einer weiteren Kugel mit  $d_2 = (3^{1/2} - 1) d_1$  gefüllt.  
(Grafik: © Werner Sobek Stuttgart)

geben sich Lücken, welche mit weiteren Kugeln, jetzt kleineren Durchmessers, gefüllt werden können. Den mit  $d_2 \approx 0,224 d_1$  größtmöglichen Durchmesser haben dabei die Kugeln, welche die sog. *Tetraederlücken* füllen, Bilder 15 und 16. Die Frage nach der weiteren Füllung der jetzt noch verbleibenden, noch kleineren „Lücken“ führt in die Theorie der Sieblinien. Basierend auf den Untersuchungen von Fuller und Thompson [16] liegt die hohlraumärmste und damit, im vorliegenden Fall, gewichtsminimale Kugelpackung bei einem Körnungsexponenten von  $q = 0,4$  vor. Der Hohlraumanteil im Bauteil liegt dann bei  $V_{\text{Hohlraum}} = V_{\text{Bauteil}} - (d_{\text{min}} \cdot d_{\text{max}}^{-1})^{0,4}$ . Legt man die heute am ILEK herstellbaren Betonhohlkugeldurchmesser von  $10 < d < 250$  mm zugrunde, dann resultiert hieraus ein erzielbares Hohlraumvolumen von ca. 96 %.



*Bilder 17 und 18 Betonbalken mit zusätzlichen, durch Hohlkugeln im Bereich der Tetraederlücken geschaffenen Hohlräumen. Zum besseren Verständnis sind Wandstärken kleiner 5 mm nicht dargestellt.*

*(Grafiken: © Werner Sobek Stuttgart)*

## Ausblick

Die vorgenannten Überlegungen haben tragstrukturelle Anforderungen genauso wie die Möglichkeiten einer irregulären Packungsstruktur oder eines Verlassens der Voraussetzung der Kugelform der Hohlräume außen vor gelassen. An diesen Themenstellungen sowie an der Frage der Bewehrungsführung und den Fragen zur punktuellen Lasteinleitung wird am ILEK zur Zeit von einem größeren Team von Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern gearbeitet. Die diesbezüglichen Untersuchungen und Erkenntnisse werden in weiteren Publikationen vorgestellt werden. Die im vorliegenden Aufsatz vorgenommene Fokussierung auf Kugelanordnungen zur Bildung von Hohlräumen dient also lediglich

einer ersten Einführung in die prinzipielle Struktur des Problems sowie einer Konfrontation mit seiner geometrischen Komplexität, welche, häufig genug, die menschliche Vorstellungskraft an ihre Grenzen führt, Bilder 17 und 18.

## Literatur

- [1] Sobek, W.: Die elektrische Stadt. Rede anlässlich der Verleihung des Fritz-Leonhardt-Preises am 4.7.2015 in Stuttgart
- [2] Sobek, W.: Zum Entwerfen im Leichtbau. Bauingenieur 70 (1995) 7/8, 323–329
- [3] <https://www.adac.de/infotestrat/autodatenbank/> und <http://www.civilaviation.eu/type/airliners.htm> (Geprüft am 18.8.2016)

- [4] Sobek, W.: Ultraleichtbau. Stahlbau 83 (2014) 11, 784–789
- [5] Bletzinger, K.-U.; Ramm, E.: Structural optimization and form finding of lightweight structures. Computers and Structures 79 (2001) 22–25, 2053–2062
- [6] Bischoff, M.: Theorie und Numerik einer dreidimensionalen Schalenformulierung Diss., Universität Stuttgart, 1999
- [7] Sobek, W.; Schäfer, S.: An der Nahtstelle: Fügen von Bauteilen aus unterschiedlichen Werkstoffen. Deutsche Bauzeitung 130 (1996) 1, 106–114
- [8] Sobek, W.; Haase, W.; Heinz, P.; Herrmann, M.: Gradientenwerkstoffe im Bauwesen. Detail Research – URL: <http://www.detail.de/research/forschung-entwicklung/gradientenwerkstoffe-im-bauwesen-006528.html> (Geprüft am 18.8.2016)
- [9] Heinz, P.; Herrmann, M.; Sobek, W.: Herstellungsverfahren und Anwendungsbereiche für funktional gradierte Bauteile im Bauwesen. Forschungsbericht, Institut für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren, Stuttgart, 2011
- [10] Herrmann, M.; Haase, W.; Sobek, W.: Gradientenbetone: ökologische und ökonomische Optimierungspotentiale. Deutsche Bauzeitschrift 59 (2011) 12, 52–54
- [11] Herrmann, M.: Gradientenbeton – Untersuchungen zur Gewichtsoptimierung einachsiger biege- und querkraftbeanspruchter Bauteile. Diss., Universität Stuttgart, 2015
- [12] Herrmann, M.; Sobek, W.: Gradientenbeton – Numerische Entwurfsmethoden und experimentelle Untersuchung gewichtsoptimierter Bauteile. Beton- und Stahlbetonbau 110 (2015) 10, 672–686
- [13] Rasch, J. J.: Die Kuppel in der römischen Architektur. Entwicklung, Formgebung, Konstruktion. In: Graefe, R. (Hrsg.): Zur Geschichte des Konstruierens. Stuttgart 1989, S. 29.
- [14] Schmeer, D. et al.: Efficient and automatized manufacture of multifunctional graded components with mineralized hollow spheres. Vortrag zum 5. Jahrestreffen des SPP 1542, 7.–9.10.2015 in Bochum, Ruhr-Universität
- [15] [https://de.wikipedia.org/wiki/Dichteste\\_Kugelpackung](https://de.wikipedia.org/wiki/Dichteste_Kugelpackung) (geprüft am 18.8.2016)
- [16] Fuller, W. B.; Thompson, S. E.: The Laws of Proportioning Concrete. Transactions of the American Society of Civil Engineers LIX (1907) 2, 67–143