

Bundesingenieurkammer (Hrsg.)

# Ingenieurbaukunst 2020

## Made in Germany

- präsentiert die herausragendsten Projekte deutscher Bauingenieure weltweit
- breites Themenpektrum von Hochbau über Brückenbau bis hin zu Tunnelbau
- Inhalt von renommiertem Fachbeirat zusammengestellt
- einziges „Architekturbuch“ für Ingenieure

Das Buch präsentiert die spektakulärsten aktuellen Ingenieurbauprojekte weltweit, an denen deutsche Ingenieure wesentlichen Anteil haben. Herausgegeben von der Bundesingenieurkammer, ist das Werk die zentrale Leistungsschau des deutschen Bauingenieurwesens.



2019 · 190 Seiten · 260 Abbildungen

Softcover

ISBN 978-3-433-03288-6 · ca. € 39,90\*

## BESTELLEN

+49 (0)30 47031-236

marketing@ernst-und-sohn.de

[www.ernst-und-sohn.de/3288](http://www.ernst-und-sohn.de/3288)

## ÜBER DAS BUCH

Die neue Ausgabe des Jahrbuchs „Ingenieurbaukunst“ präsentiert wieder eine Auswahl der spektakulärsten aktuellen Bauprojekte „Made in Germany“. Herausgegeben von der Bundesingenieurkammer, ist das Werk die zentrale Leistungsschau des deutschen Bauingenieurwesens.

Die von einem wissenschaftlichen Beirat ausgewählten Bauwerke werden von den beteiligten Ingenieuren beschrieben, sodass die jeweils spezifischen Herausforderungen und die Lösungswege in Planung und Ausführung aufgezeigt werden. Somit stellt das Jahrbuch erneut einerseits eine Galerie der Spitzenleistungen deutscher Bauingenieure dar und fungiert andererseits als Reflexionsfläche der aktuellen Debatten im Bauingenieurwesen.

## BESTELLUNG

Anzahl	ISBN / Bestell-Nr.	Titel	Preis
	ISBN 978-3-433-03288-6	Ingenieurbaukunst 2020	€ 39,90*

Privat

Geschäftlich

Bitte senden Sie Ihre Bestellung an:

Tel. +49 (0)30 47031-236

Fax +49 (0)30 47031-240

[marketing@ernst-und-sohn.de](mailto:marketing@ernst-und-sohn.de)

Firma

UST-ID Nr.

Name, Vorname

Telefon

Fax

Straße, Nr.

PLZ/Ort/Land

E-Mail

Datum/Unterschrift



Jedes Jahr leisten Ingenieurinnen und Ingenieure weltweit beachtliche Arbeit – im Kleinen wie im Großen. Das Jahrbuch INGENIEURBAUKUNST – MADE IN GERMANY stellt seit 2001 herausragende Bauprojekte vor, an denen Ingenieurbüros aus Deutschland weltweit federführend beteiligt waren. Manche der Bauwerke sind international bekannt und haben bereits große Anerkennung und Aufmerksamkeit erlangt. Andere sind möglicherweise noch nicht so berühmt, aber dennoch genauso bemerkenswert. Gemeinsam haben sie alle, dass die Realisierung ohne das Fachwissen und die Kreativität der Planerinnen und Planer nicht möglich gewesen wäre. Mit dem vorliegenden Jahrbuch wollen wir erneut diese beeindruckenden und vielseitigen Ingenieurleistungen in das öffentliche Bewusstsein rücken.

Für großes Interesse – nicht nur in der Fachwelt – sorgte beispielsweise die Eröffnung der „Sandroze von Katar“. Um die komplexen Gebilde des neuen Nationalmuseums in Doha umzusetzen, haben die beteiligten Ingenieurinnen und Ingenieure eines der bislang größten BIM-Modelle entwickelt. Gleichermaßen bekannt ist die James-Simon-Galerie in Berlin, für deren Untergeschoss ein spezielles Abdichtungskonzept gegen von unten drückendes Wasser entwickelt werden musste. Und dies war nur eine von zahlreichen ingenieurtechnischen Herausforderungen, die es beim Bau auf der Museumsinsel zu meistern galt.

Doch es geht in unserem Jahrbuch auch darum, abzubilden, welche neuen Technologien und Entwicklungen das Ingenieurwesen bereits jetzt prägen und welche uns in der Zukunft beschäftigen werden. Die sogenannten Baukastenbrücken an der L518 bei Werne entstanden beispielsweise in einer neuen Fertigteilbauweise und der TRUMPF-Steg in Ditzingen steht für modernste Fertigungsmethoden. Ebenfalls zu nennen sei hier die denkmalgerechte Revitalisierung des Height 1 in Hamburg unter Berücksichtigung höchster Energiestandards.

Ein weiteres Thema, an dem in der Baubranche kein Weg mehr vorbeiführt heißt: Digitalisierung. Daher setzen sich in der vorliegenden Ausgabe gleich zwei Essays mit der digitalen Planung auseinander. Aber auch innovative Baustoffe spielen in der Ingenieurwelt eine immer größere Rolle und finden sich in den Essays wieder.

An dieser Stelle bedanke ich mich bei dem Bundesministerium des Innern, für Bau und Heimat, das uns bei der Herausgabe des Jahrbuchs erneut sehr unterstützt hat.

Die Wahl der Beiträge für das Jahrbuch INGENIEURBAUKUNST – MADE IN GERMANY ist jedes Mal aufs Neue eine große Herausforderung, aber auch eine besondere Freude. Ich hoffe, wir haben für das Jahrbuch 2020 eine gute Auswahl getroffen und spannende Projekte exemplarisch für die vielen einzigartigen Ingenieurbauwerke herausgegriffen. Allen Leserinnen und Lesern wünsche ich nun viel Freude bei der Lektüre.

*Hans-Ullrich Kammeyer  
Präsident der Bundesingenieurkammer*

## Projekte

- 8 Hoch über Wien –  
Die Parkapartments am Belvedere
- 16 Eine Landmarke für Lahr –  
Die neue Ortenau-Brücke
- 24 Die Sandrose von Katar –  
Das neue Nationalmuseum in Doha
- 32 Neue Denkansätze in Sachen Bildung,  
Arbeitsplatz und Energiekonzeption –  
Frankfurt School of Finance & Management
- 42 Auf Mudde gebaut? –  
Die James-Simon-Galerie in Berlin
- 54 Respekt für Form und Funktion –  
Die Kienlesbergbrücke in Ulm
- 62 Tageslicht für den Plenarsaal –  
Umbau des Hauses des Landtags  
Baden-Württemberg in Stuttgart
- 68 Ein Spiegel der Stadt –  
Die neue Bibliothek in Heidenheim
- 76 Neue Nachbarschaft für die historischen  
Freihafenelbbrücken –  
Die U-Bahnhaltestelle in der HafenCity
- 84 Elegantes Stahl-Chassis mit futuristischer  
Kunststoffverkleidung –  
Die Dreifeld-Sporthalle Pfungstadt
- 90 Innovatives Bauen in die Höhe –  
Das „SKAIO“ als neuer Standard in  
der Holz-Hybrid-Bauweise
- 96 Schwebende Bauten –  
Die adidas Arena in Herzogenaurach
- 104 Schnellere Überbrückung dank Fertigteilbauweise –  
Die Baukastenbrücken über die L518 bei Werne
- 112 Steilhänge aus Sand am Tidegewässer –  
Der Himmelsberg in der HafenCity
- 120 Spannende Lösung ganz in Stahl –  
Der Hochmoselübergang
- 128 Federleichtes Atriumdach –  
Das Lilienthalhaus in Braunschweig
- 136 Schale pur –  
Der TRUMPF-Steg in Ditzingen
- 144 Denkmalgerechte Revitalisierung auf höchstem Niveau –  
Das Height 1 in Hamburg
- 152 Vierendeel 4.0 – Die TRUMPF Smart Factory in Chicago
- 160 Alte Balken auf Wanderschaft –  
Die Bibliothek Kressbronn

## Geschichte, Forschung, Essay

- 168 Der Ingenieur als Modernist – Wie die Idee vom  
elementierten Bauen industriell umgesetzt wurde
- 172 Betoninnovationen – Gradienten-, Infraleicht-,  
Textil- und Carbonbeton
- 178 Additive Fertigung im Bauwesen: 3D-Betondruck  
als eine Schlüsseltechnologie für die Digitalisierung  
der Bauwirtschaft
- 184 Wege zur Schnittstellenoptimierung – Die Integration  
digitaler Werkzeuge in Planung, Bau, Betrieb und  
Rückbau
- 188 Computational und Parametric Design – Chancen und  
Herausforderungen für die Tragwerksplanung
- 194 **Anhang**

VIERENDEEL 4.0 –  
DIE TRUMPF SMART FACTORY  
IN CHICAGO





1



2



3



4

**In der 2017 fertiggestellten ,TRUMPF Smart Factory' in Chicago kombiniert der auf Lasertechnologie spezialisierte deutsche Werkzeugmaschinenbauer Werkhalle und Ausstellungsraum zum Technologiezentrum, das eine digital vernetzte Produktion abbildet. Der Raum wird von elf Vierendeelträgern aus laser-schnittenen Stahlblechen überdacht. Das material-effizient abgestufte, monolithisch ausgeführte Tragsystem nutzt die Möglichkeiten des modernen Stahlbaus mit Industrie-4.0-Prinzipien zur Reinterpretation des von Arthur Vierendeel entwickelten ,Fachwerkträgers ohne Diagonalen'.**

Mit dem Neubau der Smart Factory in Chicago stellt sich die Firma TRUMPF, Hersteller von Werkzeugmaschinen für die flexible Blechbearbeitung und industrielles Lasern, in Nordamerika neu auf. Neben der verkehrsgünstigen Lage nahe dem Flughafen Chicago O'Hare und dem direkten Anschluss an die Interstate 90, dem längsten Interstate Highway der Vereinigten Staaten, ist der Standort Chicago/Illinois strategisch klug gewählt. Fast 40 % der blechverarbeitenden Industrie der USA befinden sich in den direkt angrenzenden Bundesstaaten, dem historischen 'Rust Belt' der USA.

Das Grundstück an der Interstate 90 ist mit den weitläufigen Grasflächen und einem neu geschaffenen See naturnah angelegt. Die von den Berliner Architekten Barkow Leibinger entworfene Anlage setzt sich aus zwei

Bauvolumen zusammen – dem der I 90 zugewandten Showroom und einem nördlich versetzt angeordneten Baukörper, in dem Büros, Schulungsräume und ein Café untergebracht sind. Die Gebäudeteile sind an ihren Ecken miteinander verbunden und definieren so zwei Außenbereiche: den Hauptzugang mit Parkplatz im Südosten und eine großzügige, geschwungene Terrasse als Aufenthaltsbereich im Nordwesten. Das durchgehende Pultdach des Gebäudeensembles steigt zur 12 Meter hohen Stahl-Glas-Fassade im Süden hin an, die das 40 x 12 Meter große Schaufenster zur I 90 bildet.

#### Der Ausstellungsraum

In der TRUMPF Smart Factory stellt der Bauherr seinen Kunden Werkzeugmaschinen und Industrielaser im Einsatz vor. Einzelne Bearbeitungsschritte von Programmierung bis Fertigung werden im Betrieb gezeigt. Die installierte High-Tech-Produktion stellt eine konsequente Umsetzung des Prinzips „Industrie 4.0“ dar: Die digital gestützte Interaktion zwischen Mensch, Maschine und Produkt wird als „vernetzte Fertigung im realistischen Umfeld“ (TRUMPF) erlebbar.

Die 45 x 55 Meter große, stützenfrei konzipierte Ausstellungshalle schafft Raum für eine vielfältige Belegung. Neben der kontinuierlich neu konfigurierten Fertigungsline ist genügend Raum für temporäre Nutzungen wie Konferenzen und Fortbildungen für Kunden. Daher sind

152/153:  
Raumkonstellation der Vierendeelträger aus Sicht des Besucherstegs

- 1 Blick auf das Grundstück
- 2 Eingangsbereich
- 3 Kontrollbereich mit Blick auf den Showroom

räumliche Qualitäten wie Tageslichtbeleuchtung und Nutzungsflexibilität wesentliche Entwurfsparameter.

Um die Hauptakteure des Showrooms – die Werkzeugmaschinen und Laser – für den Betrachter möglichst unmittelbar und aus möglichst vielen Perspektiven erlebbar zu machen, wurden bereits in den frühen Entwurfsphasen verschiedene Zugangsmöglichkeiten oberhalb der Ausstellungsfläche analysiert. Einem solchen Ansatz setzt die gemäß lokaler Baubestimmungen limitierte Gebäudehöhe jedoch enge Grenzen: So können bei einem unterhalb des 45 Meter spannenden Dachtragwerks abgehängten Stegsystem die für die gewünschte Nutzung notwendigen lichten Raumhöhen nicht erreicht werden. Im engen Dialog zwischen Archi-

tek und Ingenieur wurde das Konzept eines zugänglichen Dachraums entwickelt. Dafür wurde ein begehbares Ebenensystem in das Dachtragwerk integriert. Um dies zu ermöglichen, müssen die Geometrie und die statisch-konstruktive Auslegung des Tragwerks jedoch eine flexible und veränderbare Konfiguration der Zugangsstege ermöglichen.

Somit sind Fachwerkkonstruktionen aufgrund der den Durchgang versperrenden Diagonalen nicht einsetzbar. Als sichtbares Strukturelement soll das Tragwerk darüber hinaus auch als Demonstrationsobjekt für das Potenzial moderner Blechbearbeitungswerzeuge dienen. Der beispielhafte Einsatz optimierter, mit Lasertechnologie gefertigter Bauteilsegmente verkörpert den technologischen Anspruch des weltweit agierenden Unternehmens.

#### Das Prinzip Vierendeel

Die im Abstand von circa fünf Metern parallel angeordneten Träger sollen, neben den vorrangig gleichförmigen Vertikallasten des Daches aus dem Eigengewicht und den vergleichsweise hohen Schneelasten, auch hohe lokale und asymmetrische Lasten aus den eingesetzten begehbarsten Stegen übertragen. Das Tragsystem muss auch ausreichend robust und so ausgelegt sein, dass bei Nutzung durch größere Personengruppen keine unangenehmen Schwingungen auftreten.



5

- 4 Showroom mit TRUMPF-Maschinen  
5 Entwurfsmodell Showroom



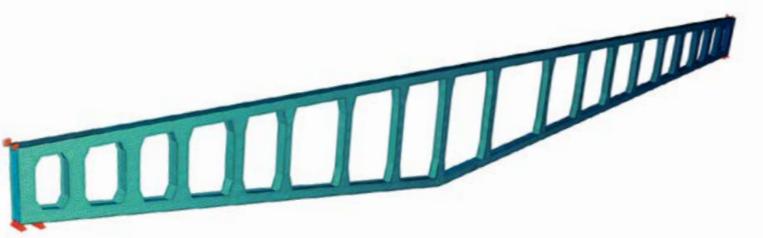
6



7

Das ursprünglich für den Brückenbau entwickelte Rahmenträgersystem des belgischen Ingenieurs Arthur Vierendeel (1852–1940) bietet dafür ideale Voraussetzungen. Im Gegensatz zum Fachwerk realisiert Vierendeels Träger die schubsteife Kopplung der Ober- und Untergurten ausschließlich mittels biegesteif ange- schlossener Vertikalstreben. Die dadurch mit Biege- momenten und Schubkräften belasteten Vertikalstreben werden häufig kraftflussgerecht mit verstärkten und aufgeweiteten Querschnitten an der Verbindung mit den Längsgurten ausgeführt. Arthur Vierendeel hat den nach ihm benannten Träger ursprünglich als eine präziser zu bemessende und damit wirtschaftlichere Alternative zu den in der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts vorrangig eingesetzten, genieteten Stahlfachwerkkonstruktionen entwickelt.

Bei den Fachwerkkonstruktionen wiesen die damals als Nietverbindung hergestellten Anschlüsse der Diagonalen und Vertikalen zu den Gurten ausführungsbedingt keine volle Rotationsfähigkeit auf. Bei den zur damaligen Zeit angewendeten grafischen Methoden bei der Schnittgrößenermittlung wurde jedoch immer ein volles Rotationsvermögen an Stabkopplungen vorausgesetzt. Nach einigen Schadensfällen wurden in zahlreichen wissenschaftlichen Versuchen signifikante zusätzliche sogenannte Sekundärspannungen in den Knotenbereichen nachgewiesen, als deren Ursache die eingeschränkte Rotationsfähigkeit des genieteten Anschlusses identifi-



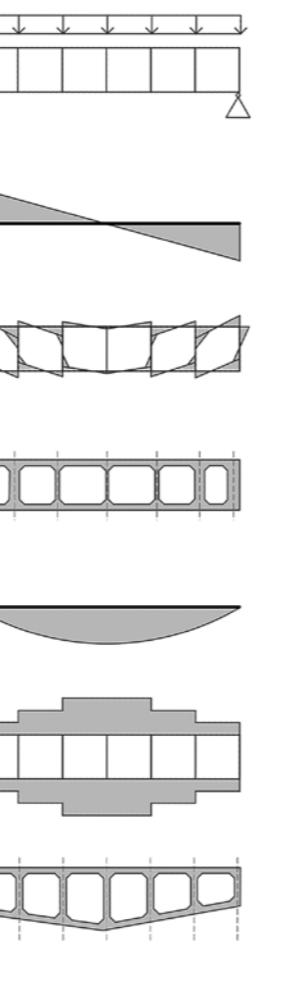
8

ziert wurde. Folglich wurden genietete Stahlfachwerke überdimensioniert, um die nicht ausreichend genau quantifizierbaren Sekundärspannungen auf der sicheren Seite liegend zu berücksichtigen. Mit dem von Vierendeel auf Basis empirischer Untersuchungen entwickelten Bemessungsansatz für den „Brückenträger ohne Diagonalen“ konnte dagegen eine präzisere Analyse der Tragwerkselemente erfolgen. Vierendeel hat damit eine Lücke geschlossen, die sich zwischen der modernen Herstelltechnologie und den zur damaligen Zeit für die so gefertigten Tragwerke verfügbaren, nicht ausreichend genauen Bemessungsmethoden aufgetan hatte.

120 Jahre nach der Premiere des Vierendeelträgers auf dem Congrès International des Architectes 1897 in Brüssel können mit modernen Fertigungsmethoden und computergestützten Analyseverfahren weitere Vorteile des Tragprinzips erschlossen werden. So wird das monolithische Trägersystem aus zusammengesetzten Stahlblechen mit digitalen Tools präzise analysiert und die Stahltonnage entsprechend der Beanspruchung im Trägersystem durch eng abgestufte Segmentdicken optimiert.

Die exakte Geometrie des Tragwerks, welcher eine Finite-Elemente-Analyse zugrunde liegt, ist das Erzeugnis eines parametrisch gesteuerten Entwurfsprozesses. Basierend auf dem mit den Architekten entwickelten geometrischen Grundmodell wurden – den ingenieurs-

- 6 Besuchersteg durch die Vierendeelträger
- 7 Arthur Vierendeels erste Brücke mit großer Spannweite: Avelgem, Belgien (1904)
- 8 3D-FE-Modell Vierendeelträger
- 9 Entwurfs- und Optimierungsprinzip Vierendeelträger von oben nach unten: System, globaler Querkraftverlauf, lokaler Biegemomentenverlauf mit dem daraus folgenden Optimierungsprinzip sowie globaler Biegemomentenverlauf und Normalkräfte Gurt mit Optimierung



9

# Wir wollten ehrlichen Stahlbau machen

„Wir wollten einen ehrlichen Stahlbau machen“, erklärt Frank Barkow, der gemeinsam mit Projektleiter Heiko Kreh in zweieinhalb Jahren die Smart Factory für den deutschen Laserhersteller TRUMPF realisierte. Das Bauwerk wurde mehrfach ausgezeichnet.

*Die TRUMPF AG ist bekannt für anspruchsvolle Corporate Architecture. Was war die Aufgabe bei der Smart Factory?*

**HK** Für TRUMPF ging es zum einen darum, den Vertrieb in Nordamerika räumlich neu zu positionieren, zum anderen ein Gebäude für ein völlig neues Produkt zu bauen. Das Unternehmen arbeitete daran, seine Maschinen miteinander „sprechen zu lassen“. Laser, Schweiß-, Kant- und Stanzmaschinen wurden digital miteinander vernetzt und somit voll automatisiert. Der neue Showroom in Chicago sollte einen geeigneten architektonischen Rahmen für diese neue Technologie bilden.

*Chicago, das architektonisch von Ludwig Mies van der Rohe geprägt wurde, oder die Industriebauten von Albert Kahn in Detroit: Welche Rolle spielte für Sie der Ort?*

**FB** Natürlich denkt man beim mittleren Westen an einige herausragenden Meilensteine der jüngeren Architekturgeschichte: an Mies in Chicago, Saarinens Traktorenfabrik in Des Moines und an Albert Kahn in Detroit. Diese Bautradition hat unseren Gestaltungsansatz enorm beeinflusst: Wir wollten einen ehrlichen Stahlbau machen und nicht mit den üblichen Fertigteilen arbeiten.

**HK** TRUMPF hat uns hier sehr unterstützt, da Metallverarbeitung Teil der Unternehmensidentität ist. Das Grundstück, auf dem 1991 die Hauptverwaltung von Ameritech (später AT&T) nach einem Entwurf von Dirk Lohan, dem Enkel von Mies van der Rohe, gebaut wurde, bot uns mit seiner Geschichte als bedeutender Firmencampus und seiner äußerst reizvollen Landschaft den perfekten Standort für das Bauvorhaben.

*Eines der prägenden Elemente der Smart Factory sind die Vierendeelträger über dem Showroom. Welchen Bezug haben Sie zum Tragwerksentwurf?*

**FB** Weder Architektur noch Tragwerk stehen für sich. Wir arbeiten bei jedem Projekt interdisziplinär mit unseren Tragwerksplanern zusammen. Alleine mit der Aufgabe, eine Halle stützenfrei mit 45 Meter zu überspannen, fängt der Diskurs schon an.

*Zu welchem Zeitpunkt sind die Ingenieure von Knippers Helbig dazu gekommen?*

**HK** Knippers Helbig kam dazu, als die Raumverteilung und die grobe Kontur des Gebäudes definiert waren und wir begannen, über das Tragwerk nachzudenken. Später haben sie uns auch bei der Fassadenplanung beraten.

*Wie war der kreative Prozess beim Dachtragwerk? Was war dabei die Rolle der Ingenieure?*

**FB** Anfangs wollten wir Holzträger verwenden, als Vollwand-Leim-schichtbinder wären diese 2–3 Meter hoch geworden und hätten zu viel Raum gebraucht. Also sind wir auf Stahl umgeschwenkt, welcher bei einer solchen Spannweite geringere Höhen benötigt. Zuerst haben wir geschweißte Dreiecksquerschnitte als Kasten-

profil versucht, die Höhe der Träger sollte sich dem Momentenverlauf anpassen. Doch dann kam uns die Idee, den von TRUMPF gewünschten Catwalk in das Tragwerk zu integrieren und damit auch die ohnehin notwendige statische Höhe zu nutzen. Deshalb der Vierendeelträger. Nur dass wir die eigentliche Brücke durch die Träger gesteckt haben. Die Transformation dieser architektonischen Idee in ein Tragwerk war nur in enger Kooperation mit den Ingenieuren zu erzielen.

*Form und Konstruktion der Träger scheinen optimiert im Hinblick auf Materialeinsatz und Fertigung. Was ist Architektur, was Tragwerksplanung? Gibt es da überhaupt eine Trennung?*

**HK** Die Idee des begehbaren Dachtragwerks war stark an das Budget gebunden. Knippers Helbig konnte aber nachweisen, dass der Stahlverbrauch durch den aufgelösten Querschnitt der Vierendeelträger keinesfalls höher war als der von Doppel-T-Trägern bei der gleichen Spannweite. Dann kam TRUMPF ins Spiel: Sie hatten die Idee, dass man die Träger, und damit quasi das eigene Dach, von einem amerikanischen Kunden mit TRUMPF-Lasern fertigen lassen könnte. Aus marketingtechnischer Sicht war das natürlich ein Volltreffer. Was folgte, war eine sehr enge Zusammenarbeit zwischen Tragwerksplanern und Architekten, aber auch den Ingenieuren von TRUMPF sowie den Stahlbauern vor Ort.

*Welchen Einfluss auf Prozess und Ergebnis hatte die Verwendung der TRUMPF-Maschinen für die Stahlbearbeitung?*

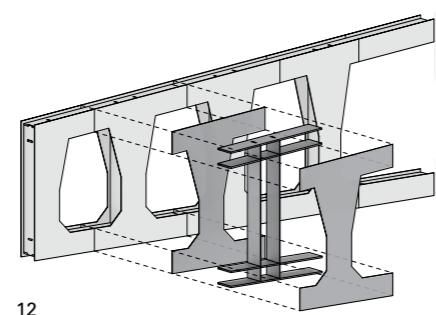
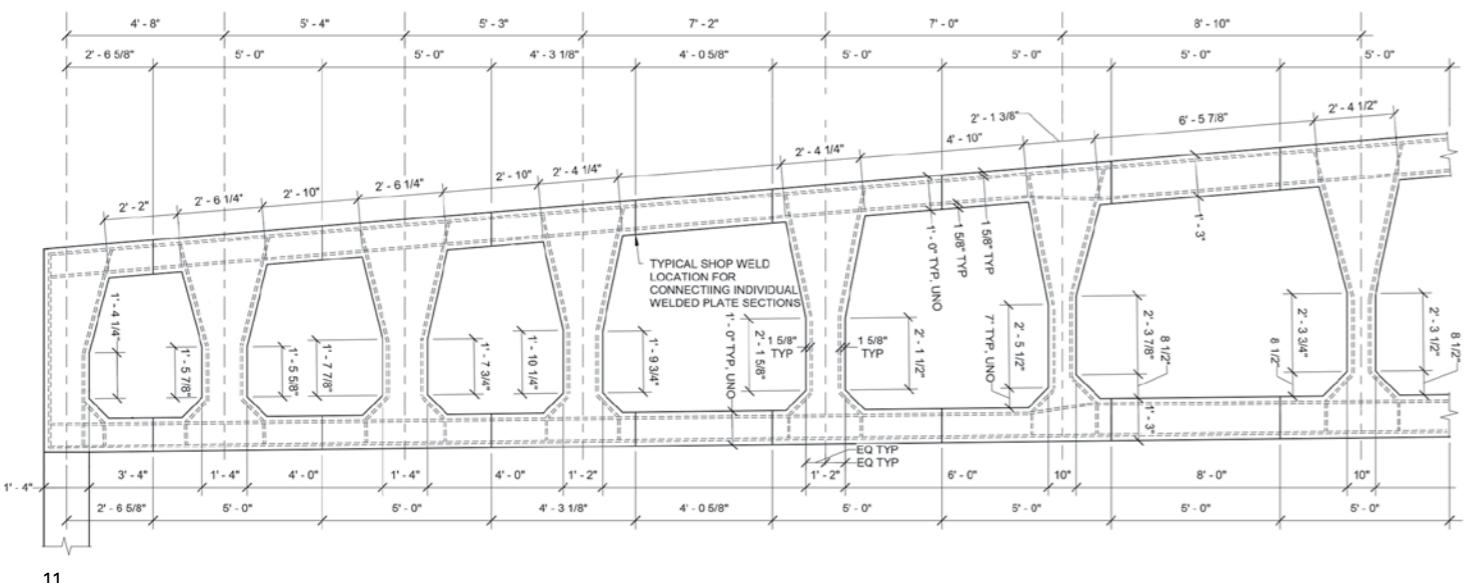
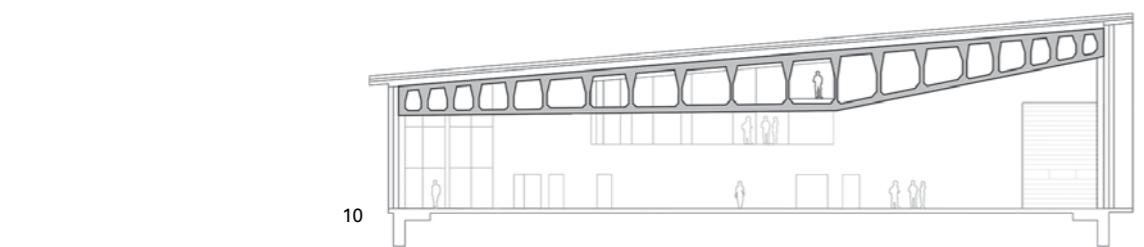
**HK** Ohne die TRUMPF-Technologie wäre der Bau maßgeschneiderter Träger, wie wir sie in diesem Projekt benötigten, nicht möglich gewesen. Knippers Helbig hat den Kräfteverlauf in unserem Vierendeelträger simuliert, wodurch wir genau wussten, an welchen Stellen Spannungen im Stahl auftreten. Auf Grundlage dieser Berechnungen konnten wir die Blechformate mit dem Laser exakt zuschneiden lassen.

*Wo sehen Sie Potenzial für lasergeschnittene Stahlkonstruktionen jenseits des Besonderen?*

**FB** In der Blechbearbeitung hat der Laser durch seine Präzision und Schnelligkeit große Vorteile. Im Automobilbau ist die Technologie dadurch bereits zum Standard geworden. In der Architektur ist es eine Kosten-Nutzen-Frage. Mit den vorhandenen Stahlbauprofilen kommt man schon ziemlich weit. Der Laser wird aber Wege öffnen, wo man mit herkömmlichen Mitteln an Grenzen stößt.



Frank Barkow (62) ist seit 1993 Partner bei Barkow Leibinger und seit 2000 Professor an der Harvard University sowie der Princeton University. Heiko Kreh (50) studierte Architektur an der Universität Kaiserslautern und ist seit 2008 Partner bei Barkow Leibinger.



technischen Grundprinzipien von Vierendeel folgend – die Eingabewerte in einem iterativen Prozess so zu dem optimierten Tragwerk weiter verfeinert.

Die Konzipierung der Profile aus lasergeschnittenen Einzelblechen bildete dabei die Voraussetzung für die Durchführung einer solchen Optimierung. Anders als bei der Verwendung von herkömmlichen Walzprofilen herrschte aufgrund der innovativen Herstellungsweise kompromisslose Freiheit in der Gestaltung der Tragelemente. Einzig die maximale Blechgröße, welche in den TRUMPF-Maschinen verarbeitet werden kann, musste beachtet werden. Die daraus resultierende Segmentierung kann im nächsten Schritt hinsichtlich effizienter Schweißnahtoptimierung und Verschnittminimierung ausgelegt werden.

#### Entwicklung der Trägerform

Der Ausbildung der Trägerform liegt neben architektonisch-funktionalen Anforderungen vor allem eine genaue Analyse des Tragwerksprinzips des Rahmenträgers zugrunde, die aus einer Beanspruchung unter gleichförmiger Vertikallast hergeleitet ist. Entsprechend dem proportional zunehmenden Querkraftverlauf verdichtet sich der Abstand der Vertikalen zu den Auflagern hin. So wird die für die Gurtkopplung notwendige Querkraftübertragung auf immer mehr Rahmenstäbe verteilt. Der vertikale Abstand der beiden Gurte wächst, dem

10 Gebäudeschnitt des Showrooms mit Vierendeelträger  
11 Teilansicht des Vierendeelträgers

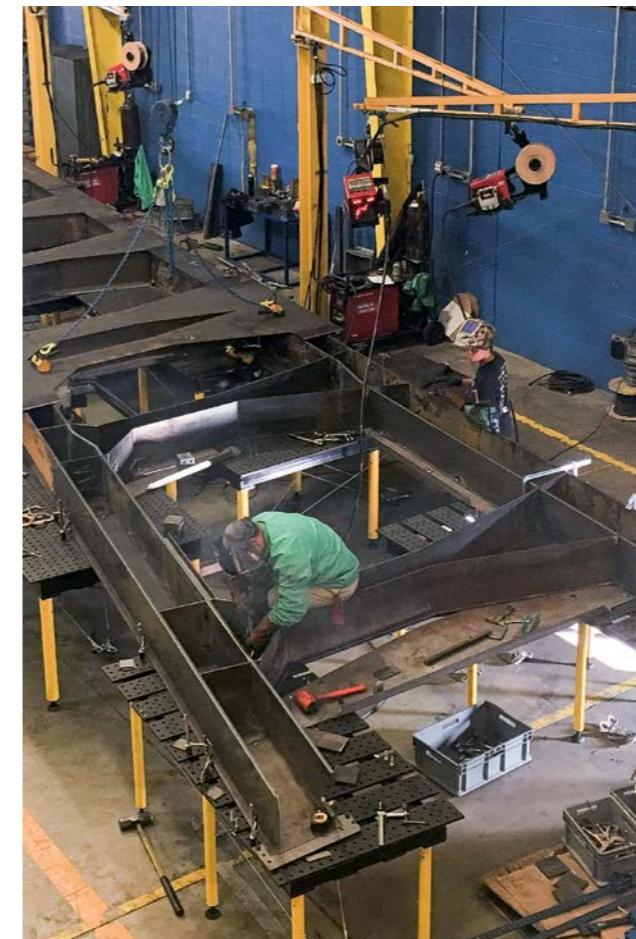
12 Explosionsdiagramm Vierendeelträger  
Seite 159:

13 Fertigung der lasergeschnittenen Teile  
14 Prinzip Zusammenbau des Trägers aus lasergeschnittenen Einzelteilen  
15 Querschnitt des Trägergurtes  
16 Entwurfsskizze Vierendeelträger

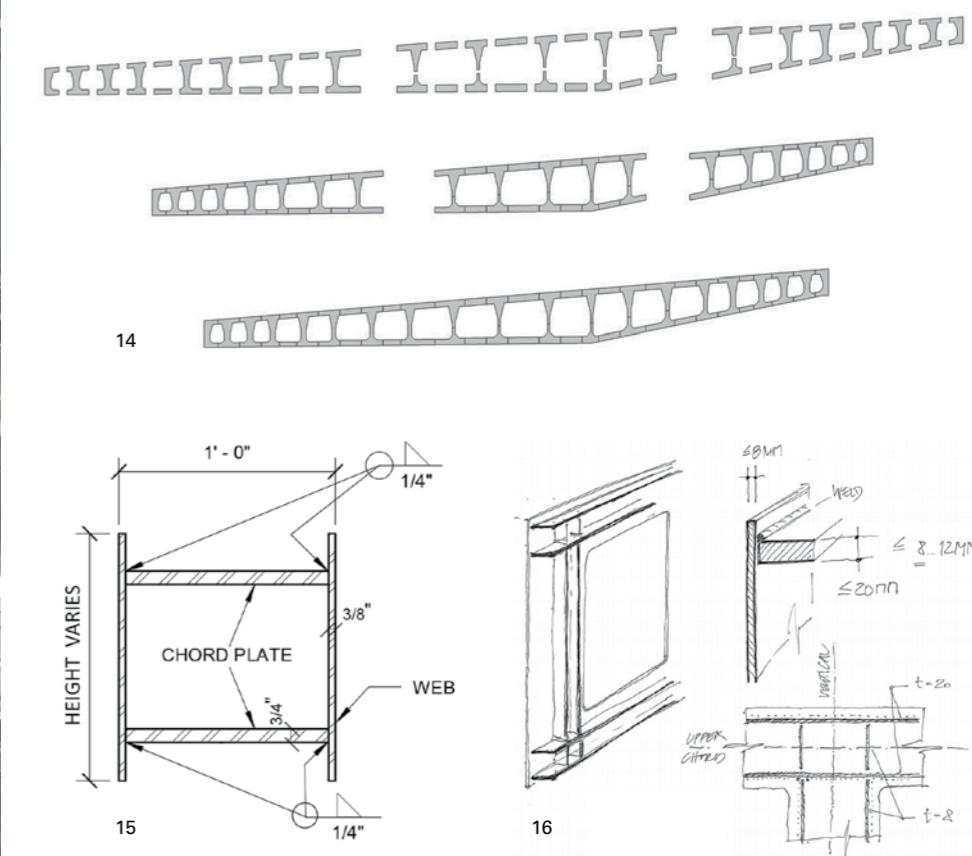
Biegemomentenverlauf entsprechend, zur Feldmitte hin stetig an. Dies führt zu einer Homogenisierung der Gurtkräfte. Der quer verlaufende Erschließungssteg kreuzt die Träger im Bereich nahe der maximalen Spreizung zwischen den Gurten. Die gestalterisch betonten typischen Aufweitungen am Übergang Gurt-Vertikalstab verweisen auf den dem Tragprinzip zugrunde liegenden Lastabtragmechanismus mit dem Maximum des Rahmenmoments am Kreuzungspunkt. Der Kraftfluss wird auch in der Trägeransicht erlebbar: Dabei nimmt die Breite der Gurte zur Trägermitte hin entsprechend dem Normalkraftverlauf stufenweise zu, während die Breiten der Vertikalen entsprechend dem Querkraft- und Biegemomentenverlauf abnehmen.

#### Konstruktion

Der Vierendeelträger ist aus ebenen Stahlblechen konstruiert. Die Einteilung der seitlichen Stegbleche ergibt sich aus den produktionsbedingten geometrischen Randbedingungen. Auf TRUMPF-Lasern können Bleche mit maximalen Abmessungen von 3 x 1,5 Meter laser-



13



#### Resümee

geschnitten werden. Die daraus resultierende Anzahl von 2 x 48 Stegblechen wird zusammen mit den Gurtblechen zum Träger gefügt. Durch die Optimierungsmaßnahmen wird eine über den Trägerverlauf homogene Spannungsauslastung bei Blechstärken von nur 10 bis maximal 20 Millimeter erreicht.

Die Träger weisen ein Konstruktionseigengewicht von circa 75 Kilogramm je Quadratmeter überspannter Fläche auf – das ist ein wirtschaftlicher Materialeinsatz für eine begehbarer Dachkonstruktion dieser Spannweite. Die vergleichsweise geringen Blechstärken ermöglichen auch ein geringes Schweißnahtvolumen der aus Blechsegmenten zusammengesetzten Stahlhohlkastenkonstruktion. Durch den Überstand der vertikalen Bleche können alle Schweißverbindungen als einfach herstellbare Kehlnähte ausgeführt werden.

#### Fertigung und Montage

Die Fertigung und Errichtung des Stahltragwerks übernahm Tie Down Engineering Atlanta, ein Kunde des Werkzeugmaschinenbauers. Der Träger wurde in drei Segmente von jeweils circa fünfzehn Meter Länge unterteilt. Der 1.200 Kilometer lange Transport der vorgefertigten Elemente erfolgte mittels achtzehn überbreiter Sondertransporte. Auf der Baustelle wurden die Trägersegmente zunächst über die Montagestöße zusammengefügt und anschließend eingehoben.

Thorsten Helbig, Florian Meier

**OBJEKT**  
TRUMPF Smart Factory  
**STANDORT**  
Hoffman Estates, Chicago, Illinois, USA

**BAUZEIT**  
2016–2017

**BAUHERR**  
TRUMPF Inc., Farmington, Connecticut, USA

**INGENIEURE + ARCHITEKTEN**  
Architekt: Barkow Leibinger, Berlin (Entwurf); Heitman Architects, Itasca, Illinois, USA (Ausführung)  
Tragwerks- und Fassadenplaner: Knippers Helbig, Stuttgart/Berlin/New York, USA (Entwurf)

IMEG, Naperville, Illinois, USA (Ausführung Tragwerk)  
**BAUAFÜHRUNG**  
Generalunternehmer: McShane Construction Company, Rosemont, Illinois, USA  
Stahlbauunternehmer: Arlington Structural Steel Company, Arlington Heights, Illinois, USA

Fertigung Vierendeelträger: Tie Down Engineering, Atlanta, Georgia, USA

**AUSZEICHNUNGEN**  
Deutscher Stahlbaupreis 2018  
AIA (American Institute of Architects) Honor Award 2019

# BETONINNOVATIONEN – GRADIENTEN-, INFRALEICHT-, TEXTIL- UND CARBONBETON



Ting-Kau-Brücke in Hong Kong

Beton ist aus der Bauwelt nicht mehr wegzudenken. Er ist ein hervorragender Baustoff und gleichzeitig der meistverwendete weltweit. Hochhäuser, die bis zu den Wolken reichen; Brücken, die reißende Flüsse überspannen; Tunnel unter den höchsten Bergen und Straßen für die Mobilität von heute und morgen – für alles wird Beton verwendet (Seite 172 und Bild 1).

Wir können es uns jedoch nicht erlauben, so weiterzubauen wie bisher. Nicht nur der World Wide Fund For Nature (WWF) berichtet in seinem aktuellen Bericht „EU Overshoot Day – Living Beyond Nature's Limits“ [1] von maßlosem Ressourcenverbrauch. Neben Aussagen wie „In Europa verbrauchen wir so viele Ressourcen, als stünden uns 2,8 Planeten zur Verfügung“ liest man täglich von einer deutlich überhöhten CO<sub>2</sub>-Emission. Die Nutzung von Beton trägt durch den hohen Sandverbrauch und den hohen CO<sub>2</sub>-Ausstoß bei der Zementherstellung maßgeblich zu der aktuellen Entwicklung bei. Innovationen im Betonbau sind daher unverzichtbar. Eine der elementaren Forderungen an das Bauen von morgen lautet, zukünftig mit wesentlich weniger Material für mehr Menschen zu bauen, dabei gleichzeitig den Anteil von Rezyklaten zu erhöhen sowie die Emissionen in der Herstellungs- und der Nutzungsphase dramatisch zu reduzieren [2]. Zu den vielversprechendsten Ansätzen gehören der Gradientenbeton, der Infraleichtbeton sowie der Textil- und Carbonbeton.

## Gradientenbeton

Klassische Strategien zur Optimierung im Leichtbau sind die Optimierung der Topologie und die Optimierung der Form ebenso wie eine Kombination der beiden Vorgehensweisen. Beide vernachlässigen aber typischerweise die Chancen einer Optimierung des Bauteilinnenraums, denn im Innern von Bauteilen sind auch bei einer optimierten äußeren Geometrie in der Regel immer noch sehr inhomogene Spannungsfelder vorzufinden. Die Überlegung, die Materialplatzierung insbesondere hinsichtlich der Parameter „spezifisches Gewicht“, „Festigkeit“ und „E-Modul“ entlang der drei Raumachsen eines Bauteils an diese Spannungsfelder anzupassen, ist Gegenstand der Gradiententechnologie.



1 Testturm für Hochgeschwindigkeitsaufzüge, Rottweil

1

Mit dieser Technologie lassen sich die Ergebnisse der üblicherweise verwendeten Optimierungsansätze signifikant steigern. In Bezug auf den Werkstoff Beton arbeitet man deshalb seit der Jahrtausendwende an den folgenden Fragestellungen:

- Wie ermittelt man die optimale Gradierung innerhalb eines Betonbauteils?
- Wie stellt man diese Gradierung her?
- Wie berechnet bzw. dimensioniert man das Endprodukt im Sinn eines statischen Nachweises?



2



3

Bei allen drei Fragestellungen wurden in den vergangenen Jahren große Fortschritte erzielt. Beispielsweise wurde durch die Entwicklung von automatisch geführten Mehrfachdüsen-Spritzbetontechnologien unterschiedlich dichte Betone so miteinander kombiniert, dass die Betonplatzierung ideal an die maßgebenden Spannungsfelder angepasst werden konnte (Bild 2).

Eine weitere Gewichtsminimierung wurde durch die Einführung der sogenannten Mesogradierung (auch Hohlkörperbauweise genannt) möglich [3]. Hierbei werden sphärische Hohlkörper mit unterschiedlichen Durchmessern so in die Schalung eingelegt und einbetoniert, dass die Hohlräumverteilung ideal an die Beanspruchungsverteilung angepasst werden kann. In ihrer Geometrie weiter angepasste bzw. optimierte Betonhohlkörper werden zukünftig Gewichtseinsparungen von bis zu 70 Prozent und mehr ermöglichen. Hierin liegt deshalb momentan auch der Schwerpunkt der entsprechenden Forschungen. Alle oben genannten Methoden basieren im Übrigen auf einer Monomaterial-Gradierung, wodurch eine sortenreine Rezyklierbarkeit der Bauteile gewährleistet ist.

Bereits heute sind wir in der Lage, Flachdecken aus Stahlbeton mit einer gegenüber einer konventionellen Lösung um 10 bis 15 Prozent reduzierten Bauteildicke und einem um mehr als 50 Prozent reduzierten Eigengewicht bei gleicher Leistungsfähigkeit, also gleicher Tragfähigkeit und identischer Verformungsbeschränkung, herzustellen (Bild 3). Die Kombination von Gieß- und Spritzverfahren im Zusammenspiel mit der Hohlkörperbauweise ebenso wie die Einführung von faserbewehrten Betonen werden weitere Gewichtsreduktionen ermöglichen.

### Infraleichtbeton

Infraleichtbeton (ILC) ist eine tragende Wärmedämmung, die einfaches und baukulturell wertvolles Bauen erlaubt. Ausgangspunkt für diesen Ansatz ist die Einsicht, dass wir, solange wir noch mit fossilen Brennstoffen heizen, auf Wärmedämmungen angewiesen sind und diese wenigstens dauerhaft und wiederverwendbar sein sollten.

Infraleichtbeton hat eine Trockenrohdichte, die unterhalb (infra) von  $800 \text{ kg/m}^3$ , dem niedrigsten Normwert von Leichtbeton, liegt. Das geringe Gewicht wird durch Leichtzuschläge wie Blähglas, Blähton oder Bims und Luftporenbildner erreicht. Infraleichtbeton hat charakteristische Festigkeiten von rund 5 bis  $10 \text{ N/mm}^2$  bei E-Moduln von 2.000 bis 4.000  $\text{N/mm}^2$ . Interessant ist, dass Infraleichtbeton stark carbonatisiert und damit einen spürbaren Teil des bei der Zementherstellung freigesetzten  $\text{CO}_2$  wieder aufnimmt.

Infraleichtbeton wird hauptsächlich für Außenwände von Gebäuden verwendet. Bei Wärmedurchgangskoeffizienten  $\lambda$  von rund 0,14 bis 0,19  $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$  lassen sich bei 40 bis 50 Zentimeter Wandstärke U-Werte von 0,26 bis 0,44  $\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$  erreichen und damit auf Gebäudeniveau die derzeitig gültigen Wärmedämmvorschriften erreichen. Vor allem aber wird das Bauen wieder einfach, siehe [4].

Viele derzeit nötige, komplexe und fehleranfällige konstruktive Lösungen für den Anschluss von Fenstern und Fassaden sowie thermische Trennungen zwischen Außenwänden und Balkonplatten können entfallen. Infraleichtbeton führt zu großer gestalterischer Freiheit und erlaubt es, Beton wieder werkstoffgerecht einzusetzen.

2 Zweidüsenspritzverfahren zur Herstellung von Gradientenbeton  
3 Betonbalken mit den Abmessungen  $825 \times 160 \times 6.000 \text{ mm}$  (B x H x L)

4 Wohnhaus in Berlin  
5 Freizeiteinrichtung „Beton-oase“ in Berlin



4

Schon 2007 wurde in Berlin ein erstes Haus aus Infraleichtbeton mit einem ILC 800 gebaut, das sich seither ausgesprochen gut bewährt hat (Bild 4).

Die hydrophobierten Außenwände erfüllen die versprochenen Dämmeigenschaften und bieten gleichzeitig ein angenehmes Innenraumklima, weil wegen der Porosität des Werkstoffes Raumfeuchtigkeit gut gepuffert werden kann und weil der „weiche“ Beton weniger Widerhall bewirkt. Im Jahr 2018 wurde dann das erste Gebäude für einen öffentlichen Bauherrn fertiggestellt. Die Jugendfreizeiteinrichtung „Beton-oase“ in Berlin-Lichtenberg hat Außenwände aus ILC 700 und biegebeanspruchte ILC-Bauteile, die bis zu 5 Meter weit spannen (Bild 6). Die dafür erwirkte Zustimmung im Einzelfall (ZIE) erleichtert nun das weitere Bauen mit Infraleichtbeton. In Berlin sind derzeit einige ILC-Gebäude in Planung, von denen vor allem ein nachhaltiger Supermarkt in Berlin-Friedrichshain erwähnenswert ist. Mit Außenwänden aus Infraleichtbeton und 40 Meter weit spannenden Brettschichtholzträgern wird auch auf diesem Gebiet bei guter Wiederverwendbarkeit ein Beitrag zur Baukultur geleistet.

Wie auch andere neue Entwicklungen wirft Infraleichtbeton immer noch Fragen auf und die Forschung geht weiter. Dem Bauen steht mit dieser interessanten Alternative schon jetzt nichts mehr im Wege. In dem Buch „Infraleichtbeton“ [5] sind alle derzeit vorhandenen Erkenntnisse zugänglich.



5

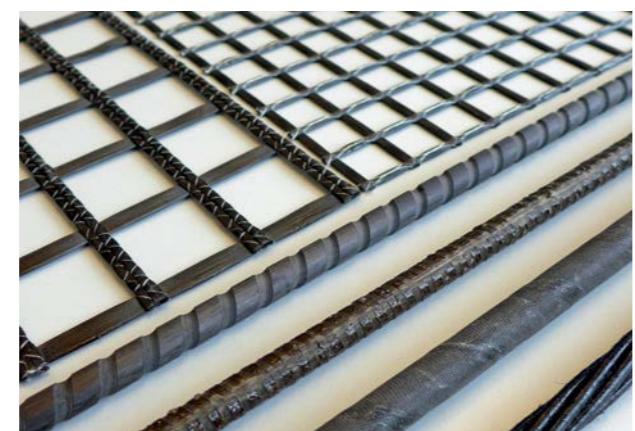
## Textil- und Carbonbeton

Die Kombination aus einem formgebenden, druckfesten und preiswerten Material, wie Beton, mit einem zugfesten Material – wie Betonstahl – revolutionierte vor mehr als einhundert Jahren das Bauwesen. Stahlbeton ist heutzutage durch seine hohe Wirtschaftlichkeit und vielseitige Anwendung mengenmäßig der bedeutendste Baustoff. Er bringt jedoch einen Nachteil mit sich: Die Stahlbewehrung kann unter ungünstigen Bedingungen korrodieren und zu erheblichen Bauwerksschäden führen. Um dies zu verhindern, werden bis zu 5 Zentimeter dicke Betonüberdeckungen erforderlich. Es entstehen massive Bauteile, die einem ressourcenschonenden Ansatz widersprechen.

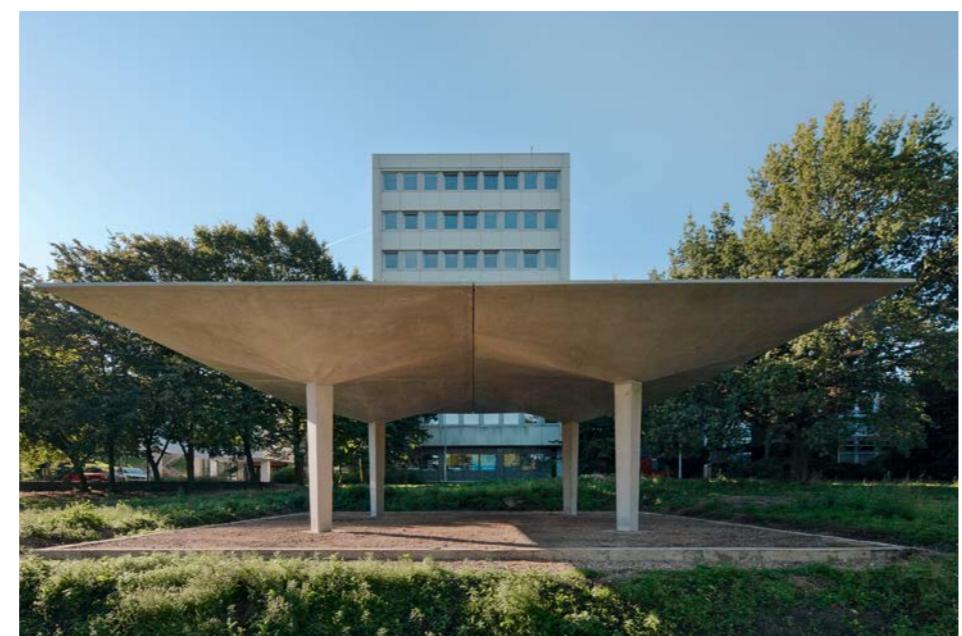
Für filigrane, materialoptimierte Betonbauteile ist der innovative Werkstoff Textil- bzw. Carbonbeton prädestiniert, der durch den Einsatz von nichtmetallischer Bewehrung keine Mindestbetondeckung für den Korrosionsschutz benötigt. Die erforderliche Betondeckung ergibt sich allein aus der Kraftübertragung zwischen dem Bewehrungselement und dem Beton.

Bereits seit Mitte der 1990er Jahre wird an diesem innovativen Verbundwerkstoff intensiv geforscht. In Deutschland wurden zunächst ebene mattenartige Bewehrungen aus alkaliresistentem Glas oder Carbon eingesetzt. Betonbauteile, die mit ausschließlich mattenartigen Gelegen aus AR-Glas, Carbon oder Basalt bewehrt sind, werden unter dem Begriff *Textilbeton* zusammengefasst. Mit zunehmendem Anspruch an den neuen Verbundwerkstoff wurden geformte Gelege und stabförmige Bewehrungselemente ergänzt. Werden Matten oder Stäbe aus Carbon als Bewehrung verwendet, wird von *Carbonbeton* gesprochen (Bild 6). Neben einer schlaffen Bewehrung ist auch das Vorspannen von Spannlitzen oder -stäben aus Carbon möglich. Durch seine gegenüber Betonstahl bis zu sechsmal höhere Zugfestigkeit von mehr als 3.000 N/mm<sup>2</sup> ist Carbon besonders für das Vorspannen geeignet.

In der Baupraxis kam der neue Verbundwerkstoff bereits in zahlreichen Bauwerken zum Einsatz, beispielsweise bei vorgehängten Fassaden [6], Sandwichwänden, Schalentragwerken und Brücken (Bilder 7). Im Zuge des C<sup>3</sup>-Forschungsvorhabens soll als Abschlussdemonstrator ein Gebäude vollständig aus Carbonbeton errichtet werden. Neben Neubauten ist der Werkstoff aufgrund der schlanken Ausführbarkeit und des damit verbundenen geringen Gesamtgewichts auch für Verstärkungsmaßnahmen prädestiniert. So konnten bereits große Dach- und Deckenkonstruktionen, Silos sowie Brücken



6



7a



7b

6 Matten- und stabförmige Bewehrungen aus Carbon  
7a Textilbetonpavillon in Aachen im Rohbauzustand 2012  
7b Vorgespannte textilbewehrte Fußgängerbrücke in Albstadt-Lautlingen

mit der neuen Materialkombination saniert bzw. verstärkt werden [7] (Bild 8).

Bewehrungen aus Carbon weisen vor allem den Vorteil einer hohen Tragfähigkeit bei geringem Querschnitt auf. Zusätzlich besitzt Carbon eine hohe elektrische Leitfähigkeit, wodurch multifunktionale Bauteile geschaffen werden können. So wurde beispielsweise an einer neuen Fahrbahndecke geforscht, die eine Rissdetektion durch die unter elektrischer Spannung stehende Carbonbewehrung ermöglicht.

Da für Textil- und Carbonbeton bisher keine Normen und Richtlinien vorliegen, sind je nach Bauvorhaben Zustimmungen im Einzelfall (ZiE) bzw. allgemeine bauaufsichtliche Zulassungen (abZ) erforderlich. Für den Neubaubereich wurden bereits Zulassungen für Fassadenplatten, Sandwichwände, Dichtflächen und Fertigteilgaragen erteilt. Im Bereich der Sanierung liegt seit mehreren Jahren eine abZ für die Biegeverstärkung von Stahlbetonbauwerken mit Carbonbeton vor. Allgemeingültige Regelwerke in Form von Richtlinien werden momentan u.a. in der Arbeitsgruppe „Nichtmetallische Bewehrung“ des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton erarbeitet.

Im Rahmen der aktuellen Textil-/Carbonbetonforschung liegen die Schwerpunkte weiterhin auf klassischen Themen wie dem Biege- und Querkrafttragverhalten, der Dauerhaftigkeit, der konstruktiven Durchbildung von Bauteilen aus Carbonbeton sowie dem Verhalten unter Brandbeanspruchung. Daneben werden aber auch äußerst innovative Herstellverfahren, wie z.B. die automatisierte Fertigung und Herstellung von Faltwerken in der Origamitechnik, erprobt und die Recyclingfähigkeit des Textil-/Carbonbetons weiter verbessert [8].

## Ausblick

In Zukunft wird es möglich sein, deutlich schlanker und materialeffizienter zu bauen und dabei erheblich langlebigere Bauwerke zu errichten. Leichtbau und Beton werden nicht länger ein Widerspruch sein, sondern wie selbstverständlich zusammengehören.

*Manfred Curbach, Josef Hegger, Frank Schladitz, Mike Schlaich, Werner Sobek*

8 Mit Carbonbeton sanierte Betonbögen einer alten Eisenbahn-Bogenbrücke in Naila



8

## Literatur

- [1] WWF: EU Overshoot Day – Living Beyond Nature's Limits. 10. Mai 2019.
- [2] Sobek, W.: Konstruieren für die Welt von morgen – Building for the world of tomorrow. In: structure. Zeitschrift für Tragwerksplanung in Ingenieurbau. 1.18 (2018), S. 4–10.
- [3] Schmeer, D.; Sobek, W.: Gradientenbeton. In: Beton-Kalender, Jg. 108 (2019), Teil 1, S. 455–476.
- [4] Hücker, A.; Schlaich, M.: Infraleichtbeton: Reif für die Praxis. In: Beton- und Stahlbetonbau 112 (2017), Heft 12.
- [5] Schlaich, M. (Hrsg.); Leibinger, R. (Hrsg.); Lösch, C.; Rieseberg, P.: Infraleichtbeton: Handbuch für Entwurf, Konstruktion und Bau. Berlin: Fraunhofer IRB Verlag, 2018.
- [6] Rempel, S.; Will, N.; Hegger, J.; Beul, P.: Filigrane Bauwerke aus Textilbeton – Leistungsfähigkeit und Anwendungspotenzial des innovativen Verbundwerkstoffes. In: Beton- und Stahlbetonbau 110 (2015), Spezialausgabe S1 – Verstärken mit Textilbeton, S. 74–82.
- [7] Erhard, E.; Weiland, S.; Lorenz, E.; Schladitz, F.; Beckmann, B.; Curbach, M.: Anwendungsbeispiele für Textilbetonverstärkung. In: Beton- und Stahlbetonbau 110 (2015), Spezialausgabe S1 – Verstärken mit Textilbeton, S. 74–82.
- [8] Kortmann, J.; Kopf, F.; Hillemann, L.; Jehle, P.: Recycling von Carbonbeton – Aufbereitung im großtechnischen Maßstab gelungen! In: Bauingenieur (2018), Heft 11, S. 38–44.