

Modulare Brückenbauwerke aus carbonfaserbewehrtem Ultrahochleistungsbeton

Graph-basierter Entwurf und trajektoriensensitive Fertigung

Für die Vorfertigung von Brückentragwerken in industrieller Fließfertigung sind weitreichende Veränderungen in Entwurf und Ausführung nötig. Deshalb erläutert dieser Aufsatz einen ganzheitlichen und durchgängig digitalen Planungsprozess für eine modulare Bauweise mit ebenen, additiv gefertigten Grundmodulen. Als Grundlage eines automatisierten Entwurfs wird das System mithilfe eines graph-basierten Modells abgebildet, darauf aufbauende Graphersetzungsgesetze erzeugen modulare Tragwerke gemäß zwei Herangehensweisen: Einerseits werden bestehende Bauteilgeometrien segmentiert, andererseits formalisieren Regeln die Aggregation zu Strukturen. Die zu diesem Prozessschritt vorrangig geometrische Information wird in eine semantisch reichhaltige Darstellung der Zerlegung entwickelt, sodass daraus ein hochdetailliertes Produktionsmodell für jedes Modul parametrisch instanziiert werden kann. Dieses Modell ist durch die flexible Beschreibung mit NURBS in der Lage, eine Vielzahl an Verbindungs- und Fugesituationen abzubilden. Schließlich fungiert es auch als Grundlage der Pfadgenerierung für die additive Fertigung. Der Druckpfad wird dabei entlang den Hauptzugspannungsrichtungen ermittelt, durch numerische Interpolation der Ergebnisse einer nichtlinearen FE-Analyse. Entlang dieses Pfades wird die Ausrichtung von Carbonfaserbewehrung mithilfe angepasster Düsenteknik gesteuert, wodurch herausragende Materialeigenschaften der gefertigten Komponenten erreicht werden können.

Stichworte Graphersetzung; Entwurfsautomatisierung; Parametrische Modellierung; Additive Fertigung; Ultrahochleistungsbeton

1 Einleitung und Motivation

Der Herstellungsprozess von Brückenbauwerken aus Stahlbeton ist heute meist dadurch gekennzeichnet, dass die Ausführungsarbeiten zu großen Teilen auf der Baustelle erfolgen. Das Bauwerk wird individuell geplant und hergestellt, entweder als Ganzes oder aus großformatigen Fertigteilen, welche vor Ort durch konventionelle Fügeverfahren verbunden werden. Dabei ergeben sich lange Bauzeiten, eine Abhängigkeit der Qualität des Bauwerks von den Witterungsbedingungen und ein hoher Bedarf an qualifiziertem Personal. Einer stärkeren Industrialisierung der Ausführungsprozesse steht im Weg, dass vorgefertigte Einzelelemente sowohl projektspezifische Abmessungen als auch hohe Gewichte haben und deshalb nur in kleinen Serien gefertigt werden können. Diese Einschränkungen der derzeitigen Baupraxis können durch ein flexibles modulares System auf Basis ebener Grund-

■ Englischen Titel bitte ergänzen ■

In order to enable the prefabrication of bridge structures in a continuous production line, extensive changes in design and execution are necessary. Therefore, this paper explains a holistic and end-to-end digital design process for a modular construction system that composes planar, additively manufactured modules. The system is computationally represented with a graph-based data model, laying the foundation for design automation employing graph rewriting rules. Sets of rules are employed to generate modular structures according to two approaches: Either existing component geometries are segmented, or rules formalize the aggregation of structures. At this process state, predominantly geometric information is available. This information is developed into a semantically rich representation of the decomposition until a highly detailed production model for each module can be instantiated parametrically. Because of the flexible definition based on NURBS, the production model can depict a variety of possible joining situations and connections. Beyond this, the model is the basis of the printing path generation for the additive manufacturing process. The path is determined according to the principal stress directions, numerically interpolating the results of a non-linear FE analysis. Along this printing path, the alignment of carbon fibre reinforcement is steered by custom nozzle technology, enabling outstanding material properties of the manufactured components.

Keywords graph rewriting; design automation; parametric modeling; additive manufacturing; ultra-high performance concrete

einheiten ausgeglichen werden, wie es die Konzeptskizze (Bild 1) zeigt und wie es konstruktiv bereits prototypisch umgesetzt wurde [1, 2].

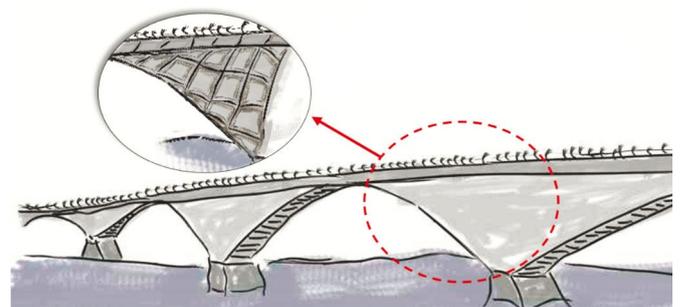


Bild 1 Konzeptskizze der erforschten Modulbauweise am Beispiel eines Überbaus mit veränderlicher Höhe
Concept sketch of the researched modular construction method using the example of a superstructure with variable height

Autor: Titel

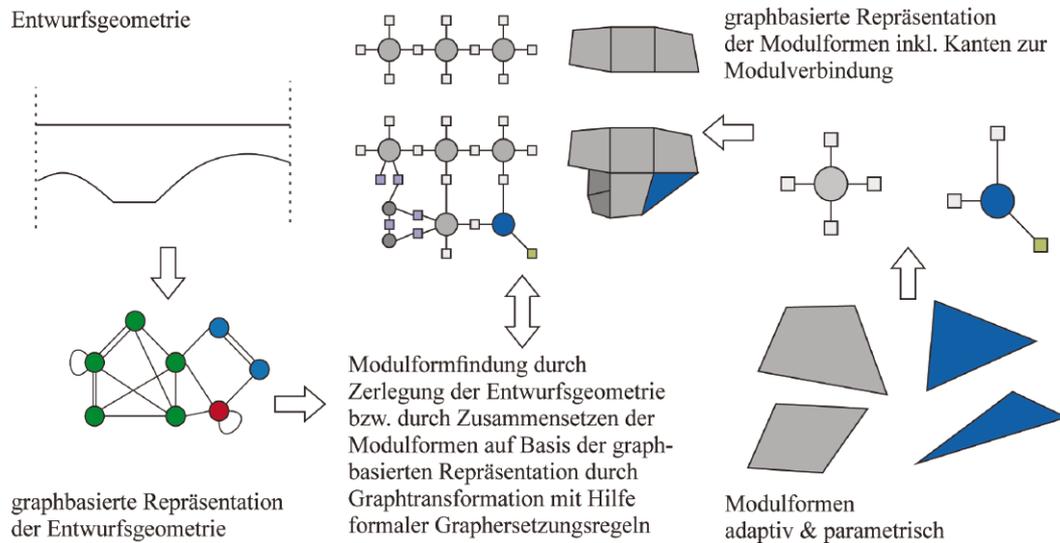


Bild 2 Segmentation oder Aggregation einer modularen Bauteilgeometrie mithilfe von Graphersetzungsregeln
Segmentation or aggregation of a modular structure employing graph rewriting rules

Im hier beschriebenen Projekt liegt eine Priorität auf der Konzeption von durchgängigen digitalen Planungsprozessen für diese Modulbauweise. Diese Prozesse sollen die Konsistenz des Entwurfs mit den Fertigungsmethoden ermöglichen sowie klar definierte Schnittstellen zwischen den Planer*innen. Der Beitrag stellt dafür zunächst die rechnergestützte Entwurfsmethodik dar, die die Ingenieur*innen in der anspruchsvollen Aufgabe eines fertigungs- und kraftflusskonformen Entwurfs unterstützt. Ein hochdetailliertes parametrisches Modell eines Grundmoduls wird in seiner Funktion als Schnittstelle zwischen Entwurf und Ausführung beschrieben. Schließlich wird die additive Fertigungsmethodik auf Basis des Produktionsmodells erläutert, welche eine gezielte Ausrichtung von Carbonfaserbewehrung entlang des Druckpfades vorsieht. Durch die Ausrichtung der Bewehrung lassen sich herausragende Materialeigenschaften erreichen, was allerdings die entsprechende Berücksichtigung nichtlinearer und anisotroper Materialeigenschaften in Entwurf und Analytik voraussetzt.

2 Rechnergestützte Entwurfsmethodik

2.1 Allgemeines

Die rechnergestützte Entwurfsmethodik unterstützt die Ingenieur*innen bei der Suche nach fertigungs- und kraftflussoptimierten Modularisierungen. Dabei werden zwei Vorgehensweisen vorgesehen: Entweder, die Planung und Bemessung der Bauteilgeometrien erfolgt unabhängig von der Fertigung. In diesem Falle ist die *Segmentierung* der vorgegebenen Geometrien eine multikriterielle Optimierungsfragestellung. In der Menge möglicher Segmentierungsvarianten muss diejenige Konfiguration gefunden werden, bei der sich eine ideale Belastungssituation ergibt, welche aber gleichzeitig eine hohe Uniformität der Module sicherstellt. Dieser top-down Ansatz folgt der in der Bauplanung üblichen Trennung von Entwurf und

Ausführung. Genauso ist aber auch die Geometriefindung ausgehend von uniformen Grundmodulen denkbar. Im Maschinenbau ist die bottom-up Komposition standardisierter Module eine gängige Vorgehensweise, bei der die Entwurfsaufgabe als Problem der Kombinatorik oder der *Aggregation* betrachtet wird. Dies setzt allerdings eine enge Integration von Ausführungs- und Entwurfsplanung voraus. Im vorliegenden Forschungsprojekt werden beide Herangehensweisen untersucht, die Erkundung der möglichen Modularisierungen soll top-down und bottom-up unterstützt werden. Die entwickelten Algorithmen basieren dabei auf einem einheitlichen, graph-basierten Datenmodell der Modulbauweise. Instanzen dieses Datenmodells werden prozedural entwickelt, ausgehend von einer Repräsentation der Bauteilgeometrie bzw. von uniformen Grundmodulen. Die Beschreibung der Segmentierungs- bzw. der Aggregationsvorgänge erfolgt regelbasiert, in Form von sogenannten Graphersetzungsregeln. Jede dieser Produktionsregeln p beschreibt deklarativ die Veränderung eines Graphen, mithilfe eines linksseitigen Mustergraphen L sowie eines rechtsseitigen Ersetzungsgraphen. Aus einer Menge M solcher Regeln definiert sich dann ein sogenanntes Graphersetzungs-system, wie in Gl. (1) dargestellt:

$$M = \{p: L \rightarrow R\} \quad (1)$$

Bild 2 illustriert den Einsatz zweier Graphersetzungs-systeme im Forschungsprojekt, mit der erläuterten Unterscheidung eines Graphersetzungs-systems für die Segmentierung und für die Aggregation eines modularen Bauteils:

Die regelbasierte Formulierung von Entwurfsschritten bietet zwei wesentliche Vorteile: Erstens erlaubt eine Variation der Regelanwendung die Erzeugung einer Vielzahl an Entwürfen. Der Nicht-Determinismus kann entweder durch die Reihenfolge der Regelanwendung entstehen oder aber durch die zufällige Auswahl der Muster, die das Konditional der Regel erfüllen. Zweitens ist die

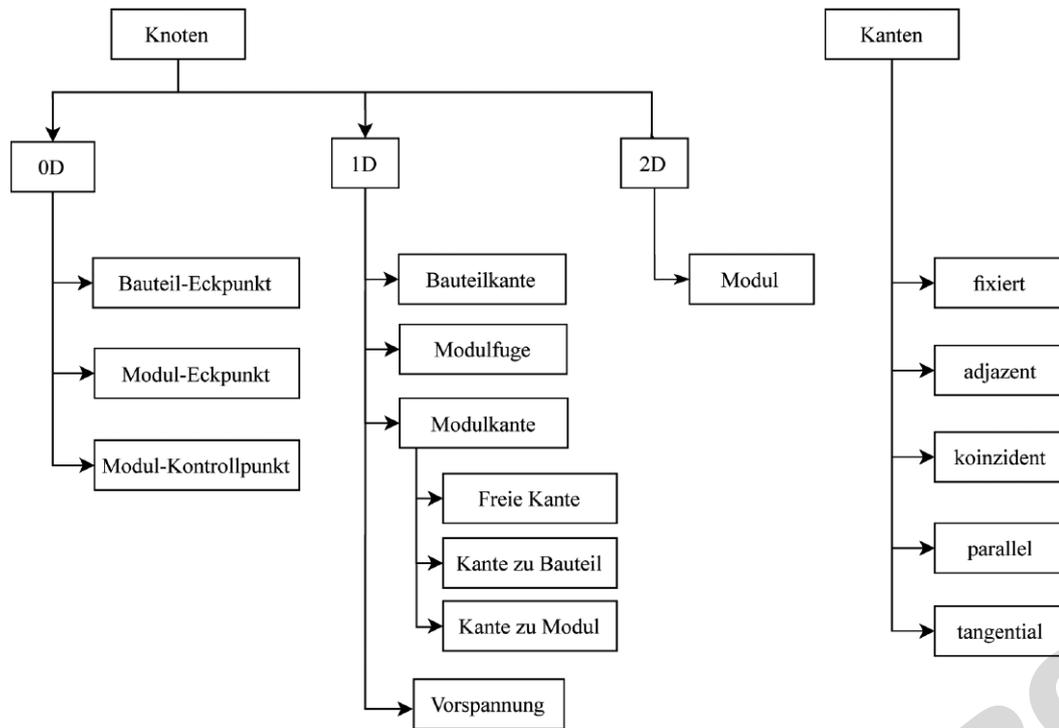


Bild 3 Graph-Modell zur Repräsentation des Baukastensystems mit Knoten- und Kantentypen
 Graph-model to represent the modular system with typed nodes and edges

Formulierung von Wissen in Regelform eine gängige und gewohnte Ingenieurpraxis. Beispielsweise gibt es im Brückenbau Empirie zur Feldanzahl oder zu Bemessungen, welches aber nur selten explizit formuliert wird [3]. Die Vorteile dieser deklarativen Vorgehensweise motivieren Forschungsfelder wie die des Knowledge-based Engineerings [4] oder Grammatik-basierter Entwurfssynthese [5], zu denen die von uns entwickelte Methodik einen Beitrag leistet. Dafür muss gewonnenes Wissen zur Modulbauweise in Regeln formuliert, formalisiert und zur graduellen Entwicklung des Entwurfs angewandt werden. Jeder Entwurfszwischenstand und jede Regel muss dafür eine Entsprechung im Datenmodell finden, welches im folgenden Abschnitt erläutert wird.

2.2 Graph-basierte Modellierung des Baukastensystems

Graphen sind eine Datenstruktur, die besonders geeignet sind zur Abbildung netzwerkartigen Strukturen, wie es auf die Aggregation von Modulen zu Strukturen zutrifft. Die Erweiterung um eine Typisierung und Attribuierung von Graphen bietet die Möglichkeit, Produktsysteme mit großer Informationstiefe abzubilden [6]. Für die Nutzung eines Graphmodells im regelbasierten Entwurf modularer Tragwerke ist von Bedeutung, dass die Entwicklung kleinteilig und graduell verläuft. Deswegen muss das Metamodell neben einem detaillierten Endzustand des Entwurfs verschiedene Entwicklungszustände abbilden können, die zu jedem Zeitpunkt eine verständliche Formulierung von Regeln zur weiteren Entwicklung ermöglichen. Instanzen des in Bild 3 dargestellten Graph-Metamodells erfüllen diese Anforderungen.

Die Knoten des Graph-Modells repräsentieren physisch-geometrische Elemente des Systems, die Kanten verschiedenartige Relationen der Knoteninstanzen. Während das Metamodell die möglichen, validen Topologien einschränken kann, werden die geometrischen Daten über primitive Datentypen in den Attributen gespeichert. So können beispielsweise jedem Modul-Eckpunkt Koordinaten zugewiesen werden oder jedem Vorspannmitglied Anzahl, Abstand und Durchmesser der Litzen.

Die Regelerstellung- und Anwendung für Instanzen dieses Metamodells, zur Automatisierung des Entwurfs modularer Bauteile, werden in den beiden folgenden Abschnitten erläutert, zuerst für den bottom-up und schließlich für den top-down Ansatz.

2.3 Bottom-Up Entwurfsmethodik

Die Entwurfsaufgabe bottom-up zu lösen bedeutet eine Invertierung des in der Bauindustrie gängigen Planungsprozesses. Anstatt die Vorfertigungsstrategie von den bemessenen Bauteilgeometrien abzuleiten, stehen standardisierte Grundmodule am Beginn des Planungsprozesses. Diese Herangehensweise ermöglicht zum einen die Sicherstellung der Uniformität der verwendeten Komponenten für die serielle Fertigung, zum anderen kann sie zum kreativen Entwurf möglicher modularer Brückentragwerke anregen. Diese Entwurfsmethodik ist im Industriedesign oder im Maschinenbau üblich, wo allerdings die Geometrie von verbundenen Komponenten weniger strengen Randbedingungen unterliegt. So ist es z.B. im Antriebsentwurf für Autos wichtig, dass Komponenten in

Autor: Titel

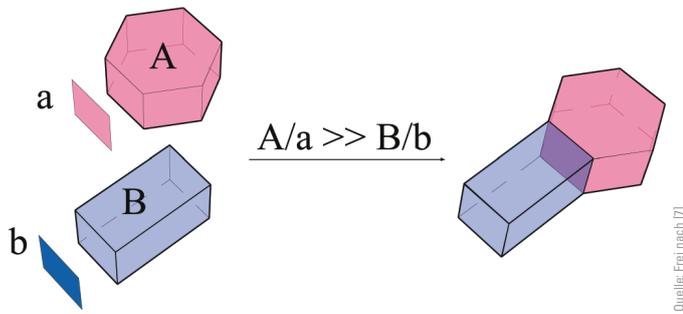


Bild 4 Regeldefinition für die Aggregation von uniformen Grundmodulen
Rule definition for the aggregation of uniform basic modules.
Source. Freely adapted from [7]

einem definierten Motorraum nebeneinander angeordnet werden, jedoch muss nicht jede Komponente form- und kraftschlüssig mit den benachbarten Komponenten verbunden werden. Die Problemstellung eines bottom-up Assemblierungsvorgangs für Ingenieurbauwerke erweitert sich im Vergleich dazu einerseits um dreidimensionale Fügungsdetails und andererseits um die Notwendigkeit der Aggregation harmonischer Bauteilformen aus den Grundmodulen. In der Literatur [7] wird daher eine dezidierte Methodik eines discrete assembly *design* für Architektur und Bauwesen vorgeschlagen, basierend auf einer Graphgrammatik nach [8]: Grundmodule werden in Form und Topologie beschrieben, wobei zulässige Fügungen über die Seitflächen der Module spezifiziert werden. Dies ist Bild 4 dargestellt:

Um einem chaotischen Resultat vorzubeugen, wird vorgeschlagen [10] die Aggregation der Module mithilfe diskret beschriebener Felder oder Volumina zu steuern. Dafür kann beispielsweise ein Materialdichtefeld aus der Topologieoptimierung [10] dienen. Im Hinblick auf die bottom-up Entwurfsmethodik wäre diese globale Steuerung allerdings unerwünscht. Zwar wird die strenge Uniformität der Module, ihrer Fügungen und der globalen Ausrichtung an den Kraftflüssen eingehalten, zur Gewährleistung einer Exploration des möglichen Lösungsraums ist hingegen eine möglichst lokale Steuerung der Regelanwendung notwendig. Für solch eine lokale Beschreibung eines dennoch geordneten Wachstums von Strukturen bieten regelbasierte Methoden aus der Bioinformatik einen reichen Fundus an übertragbaren Konzepten. Lindenmayer-Systeme [11] stammen aus der Bioinformatik und wurden entwickelt, um das Wachstum verschiedenster organischer Systeme abzubilden. In der langen und vielfältigen Forschung entstanden zahlreiche Erweiterungen, die eine differenzierte Formulierung und Anwendung von Regeln ermöglichen. Beispielhaft können tabellierte L-Systeme dazu dienen, Regeln gemäß verschiedenen „Wachstumsphasen“ zu gruppieren oder stochastische L-Systeme zur expliziten Steuerung des gewünschten Non-Determinismus im generativen Entwurf. Leistungsfähige, graphbasierte Implementierungen [12] der L-Systeme dienen deshalb als unkonventioneller Ausgangspunkt für die Weiterentwicklung des discrete assembly design in unserem Vorhaben.

2.4 Top-Down Entwurfsmethodik und Automatisierte Detaillierung

Beim top-down Ansatz ist es nicht Priorität, die automatisierte Exploration der Entwurfsmöglichkeiten der Modulbauweise zu ermöglichen. Stattdessen steht das Finden einer geometrisch gleichmäßigen und kraftflussgerechten Segmentierung für bereits festgelegte Bauteilgeometrien im Mittelpunkt. Wie in Bild 2 dargestellt, müssen hierfür die Geometrien vorfertigbarer Bauteile in eine graphbasierte Darstellung überführt werden. Jede überführte Geometrie besteht dann aus Instanzen der Knotentypen Bauteilkante und Bauteileckpunkt. Daraufhin findet mithilfe einer ersten Gruppe an Ersetzungsregeln eine Diskretisierung des Bauteils in annähernd uniforme Segmente statt. Diese Regeln erlauben die Erzeugung einer gewissen Bandbreite an gültigen Segmentierungen. Allerdings wird für eine weitere, rein geometrische Verbesserung guter Varianten anschließend eine zweite Gruppe an Regeln angewandt. In einer metaheuristischen Logik verändern diese die Positionsattribute der Moduleckpunkte, wodurch automatisiert eine optimale Lösung angenähert wird. Die formalisierte Bewertung erfolgt durch eine Kostenfunktion, die sich aus der Abweichung der Fugen von den Hauptspannungsrichtungen sowie der geometrischen Uniformität der Segmente zusammensetzt. Die Kopplung einer regelbasierter Erzeugung und Veränderung von Geometrie, informiert von analytischen Ergebnissen, wurde bereits erfolgreich im Industriedesign angewandt. Diese Anwendung war allerdings auf einfache Geometrien beschränkt, wie es beispielsweise auf die Räder von Inlineskates zutrifft [13]. In unserem Anwendungsfall findet die Erweiterung auf komplexe Bauteilgeometrien von Ingenieurbauwerken statt, was die Definition robuster und geeigneter Regeln erheblich anspruchsvoller macht. Ausgehend von einer abgeschlossenen Segmentierung erfolgt zudem eine regelbasierte, adaptive Detaillierung der Bauteile. Nach einer für Tunnelbauwerke demonstrierten Herangehensweise [14] soll das Bauwerk graduell detailliert werden. Zum Beispiel spezifizieren die Graphersetzungsregeln dabei eine generische Modulfuge in eine oder zwei zueinander kompatible Modulkanten oder ergänzen die Vorspannungsführung. Bild 5 zeigt einen Ausschnitt des dadurch entstehenden Zerlegungsmodells:

In den Attributen der Knoten und Kanten sind alle relevanten Informationen erhalten, um daraus ein hochdetailliertes parametrisches Modell zu instanziiieren. Dieses fungiert als leistungsfähige und nahtlose Schnittstelle in die Ausführungsplanung und wird in den folgenden Abschnitten erläutert.

3 Ausführungsplanung für Additive Fertigung der Grundmodule

3.1 Allgemeines

In der vorgestellten Entwurfsmethodik werden regelbasiert Tragwerke erzeugt, deren modularen Bestandteile

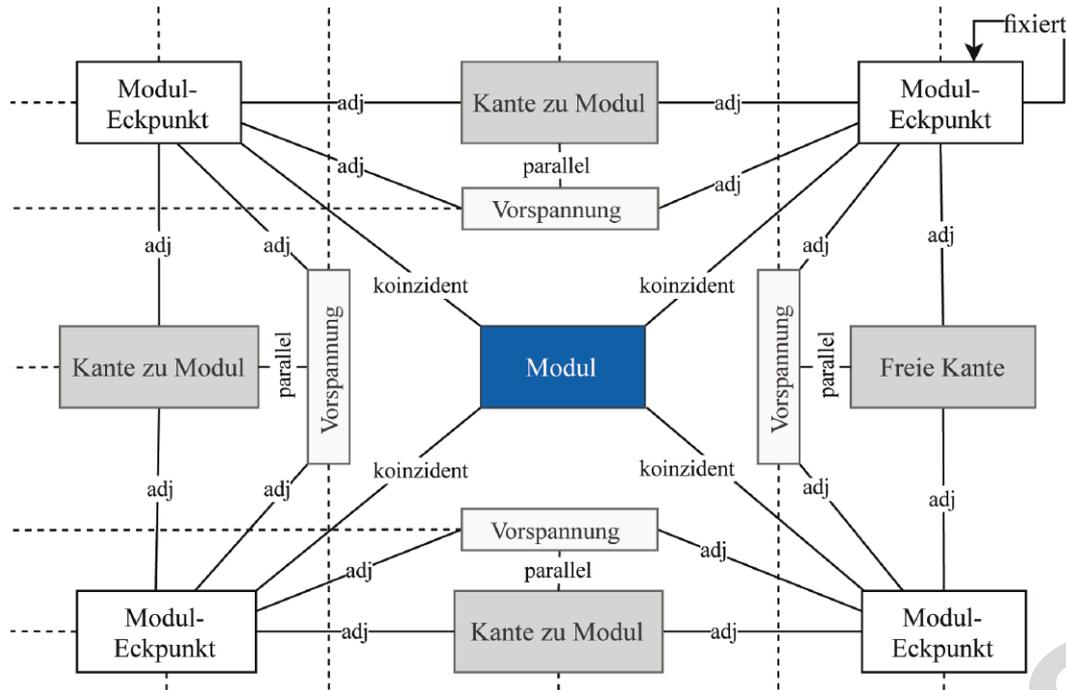


Bild 5 Ausschnitt einer Instanz des Datenmodells zur Abbildung der Modulbauweise in höchster Detaillierungsstufe; gestrichelte Linien führen zu verbundenen Knoten außerhalb des Ausschnitts, die Abkürzung „adj“ bedeutet adjazent
 Section of an instance of the data model to represent the modular construction in the highest level of detail; dotted lines lead to connected nodes outside the section, the abbreviation “adj” stands for adjacent.

am globalen Kraftfluss im Bauwerk orientiert werden. Es wird eine optimale Ausrichtung der Modulkanten an den Hauptspannungsrichtungen im Bauteil gesucht, weil dies eine konstruktionsgerechte Beanspruchung des additiv gefertigten Moduls (Bilder 6 bis 9) ermöglicht. Die Fertigung erfolgt daraufhin mit carbonkurzfaserbewehrtem Beton, der während des Extrusionsvorgangs beanspruchungsgerecht [15–20] entlang der Zugspannungen orientiert wird. Diese Steuerung der Faserorientierung geschieht durch eine angepasste Düsenteknik und eine Pfadplanung des Industrieroboters in Richtung der lokalen Hauptzugspannungen im Modul. Somit besteht eine Analogie des Vorgehens mit der top-down Entwurfsmethodik: In beiden Fällen werden Bauteile kraftfluss- und fertigungsgerichtet diskretisiert.

Als geometrische Grundlage der Extrusionspfadberechnungen werden die optimiert ausgerichteten Module aus dem graph-basierten Zerlegungsmodell in Instanzen eines hochdetaillierten parametrischen Produktionsmodells übersetzt. Die prozedurale Erzeugung und die konstruktiven Möglichkeiten dieses Produktionsmodells werden in den folgenden Abschnitten beschrieben.

3.2 Parametrisches Modell

Das Produktionsmodell wird prozedural generiert, auf Basis zahlreicher Eingabeparameter, welche aus Instanzen des graph-basierten Modells (Bild 5) ausgelesen werden. Tab. 1 zeigt in Ausschnitten die Datenstruktur des Produktionsmodells, wobei die äußersten, farblich abgehobenen Ebenen die Parameter darstellen, die zur Instan-

zierung der konkreten Segmente genutzt werden. Im Folgenden wird auf einige Parameter eingegangen.

Die zur Abgrenzung einzelner Segmente (Bild 6) genutzten Systemlinien werden durch Freiformkurven mit Polynomgrad zweiter Ordnung, sogenannten nichtuniformen rationalen B-Splines (NURBS), beschrieben. Zur Berechnung der B-Spline – Basisfunktionen $N_{i,p}(\xi)$ wird auf die eingängige Fachliteratur verwiesen [21]. Freiformkurven bestehen dabei aus einer Kombination der Basisfunktionen, den Kontrollpunkten v_i und deren Gewichtung w_i . Ein Modul wird von vier Systemlinien $e_j(\xi)$ beschrieben, die jeweils durch drei Kontrollpunkte v_i modelliert werden. Aufgrund des interpolierenden Charakters der Freiformkurven am Anfang und Ende der Kurve reduziert sich die Anzahl einzigartiger Kontrollpunkte je Modul somit auf acht Stück. Der besondere Vorteil dieses Modellierungsansatzes ist die Fähigkeit von NURBS – Basisfunktionen – durch Variation der Knotengewichte w_i – neben Geraden und parabolischen Kurven ebenfalls Ausschnitte von Kreisbögen darzustellen, um architektonischen Anforderungen gerecht zu werden. Die in einer Ebene liegenden Systemlinien bilden die Systemebene, auf die sich weitere geometrische Operationen referenzieren.

Zur Darstellung eines dreidimensionalen Bauteils werden die Systemlinien normal zur Systemebene mit einem negativen und positiven Versatz versehen, um die Bauteilhöhe zu modellieren. Das eingefasste Schalenelement wird analog modelliert. Zur Erhöhung der Entwurfsfreiheit soll das parametrische Modul nicht auf die Abbildung ebener Bauteile beschränkt sein, sondern durch

Autor: Titel

Tab. 1 Auszug aus der Datenstruktur des parametrischen Produktionsmodells, wobei [+] sich wiederholende Elemente darstellt
 Extract from the data structure of the parametric production model, where [+] represents repeating elements

0	1	2	3	4	5	6	7	8
module								
vertices								
	controlPoint_0							
		xCoordinate_0						
		yCoordinate_0						
		zCoordinate_0						
		wCoordinate_0						
	controlPoint_1	[+]						
	controlPoint_2	[+]						
	controlPoint_3	[+]						
	controlPoint_4	[+]						
	controlPoint_5	[+]						
	controlPoint_6	[+]						
	controlPoint_7	[+]						
edges								
	border							
		edge_0						
			edgeAngleAlpha_0					
			edgeAngleBeta_0					
			edgeType_0					
			arc					
			linear					
			parabolic					
			joints					
			geometry					
			smoothJoint					
			keyedJoint					
				keyWidth_1				
				keyWidth_2				
				keyHeight				
				keyFactor_1				
				keyFactor_2				
				keyGap_1				
				keyGap_2				
				keyShape				
					rectangular			
					circular			
			sign					
				positive				
				negative				
			edgeWidth_0					
			edgeWidth_0_start					
			edgeWidth_0_end					
			edgeHeight_0					
			edgeHeight_0_start					
			edgeHeight_0_end					
			prestressing					
				concreteCover				
				tendonDiameter				
				tendonSpacingDirection_Y				
				tendonSpacingDirection_Z				
				tendonCount_Y				
				tendonCount_Z				
		edge_1	[+]					
		edge_2	[+]					
		edge_3	[+]					
	rib							
		rib_0						
			edge_i					
				startParameter				
				endParameter				
			edge_j					
				startParameter				
				endParameter				
			prestressing	[+]				
		rib_1	[+]					
face								
		globalUniqueIdentifier						
		faceThickness						
		faceNeighbors						
			faceNeighbor_0					
			faceNeighbor_1					
			faceNeighbor_2					
			faceNeighbor_3					

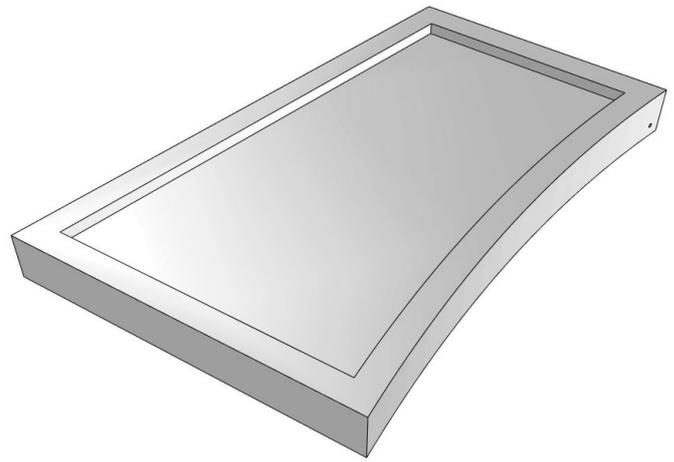


Bild 6 Gekrümmte Fügeränder, dargestellt durch Systemlinien, zur Erfüllung architektonischer Ansprüche
 Curved joint edges, represented by system lines, to meet architectural requirements

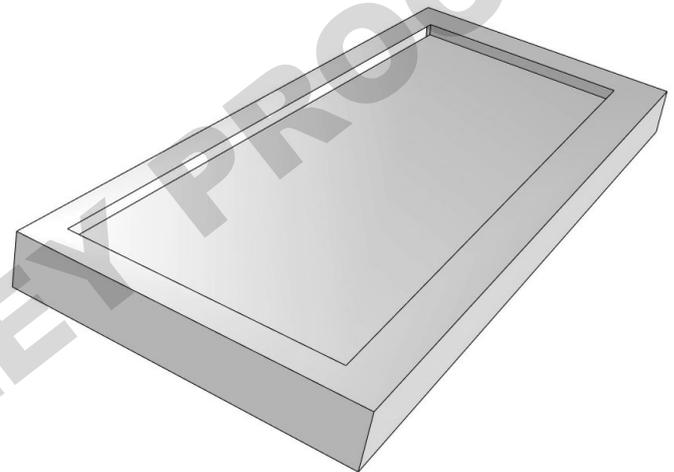


Bild 7 Geneigte Fügeränder zur Erzeugung einer räumlich gekrümmten Struktur
 Inclined joint edges to create a spatially curved structure

Anpassung der Winkel der Segmentberandungen (Bild 7) räumlich gekrümmte Strukturen approximieren können. Hierzu werden aus den in positive und negative Richtung versetzten Systemlinien Parallelkurven nach innen oder außen erzeugt, welche abhängig von der Orientierung der Fügekanten sind.

Um einen effizienten Lastübertrag zwischen den Modulen zu gewährleisten, müssen die Fügeränder zweier angrenzender Module kongruent ausgebildet werden. Am

Beispiel von verzahnten Fugen bedeutet dies, dass ein Modul das Positiv und das andere Modul das Negativ des Fugenprofils abbilden muss. Prinzipiell gilt dies aber auch für andere Geometrien der Fügeränder. Beim Fügen mit geneigten Rändern ist zusätzlich auf einen bündigen Abschluss der angrenzenden Fügeränder zu achten. Die Geometrie des Fügerandes folgt ebenfalls einer parametrischen Beschreibung, die es erlaubt durch Abändern weniger Parameter sowohl klassische verzahnte Schubfugen (Bild 8) über die komplette Breite des Fügerands darzustellen, als auch Raster kegelstumpfähnlcher Verbindungselemente.

Die parametrische Beschreibung eröffnet zudem das Potenzial, die geometrische Ausbildung der Fugenprofilierung numerisch zu optimieren, ohne Änderungen am Gesamtsystem vornehmen zu müssen. Hierzu wurde ein Viertel des doppelsymmetrischen schubkraftübertragenden Elements mit Freiformkurven modelliert und mittels geometrischer Operationen ein Volumenkörper erzeugt, der anschließend auf die Fuge transformiert wird. Die

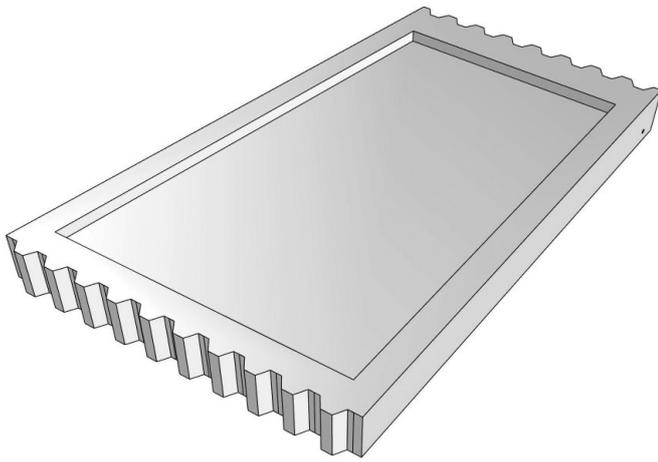


Bild 8 Formschlüssige Fugenausbildung des viereckigen Grundmoduls
 Form-fitting joint formation of the square base module

Unterscheidung zwischen einem Raster von Verbindungselementen und einer klassischen Schubfuge erfolgt über die Rasterabstände sowie die Neigung der Elemente.

Aus den zuvor beschriebenen Modellierungsstrategien der Fügeränder hinsichtlich Geometrie und deren Neigung folgt, dass ein Modul immer im Kontext der benachbarten Module und somit des gesamten Bauwerks betrachtet werden muss. Es ist dabei notwendig die geometrischen Kompatibilitätsbedingungen als mathematische Regeln zu hinterlegen und deren Einhaltung vor der Instanziierung des Produktionsmodells sicherzustellen. Zum globalen Lastabtrag kann, je nach zugrunde gelegtem statischen System eine Vorspannung notwendig werden. Zur Einbringung sind in den Modulrändern Hohlräume für nachträgliche, verbundlose Vorspannglieder vorzusehen. Randbedingungen sind hierbei die notwendige Betondeckung, die Anzahl und lichten Abstände der Spannglieder untereinander, das Verhindern von Kollisionen, sowie ein Übergang des Spanngliedverlaufs (Bild 9) zwischen den Segmenten mit stetiger Krümmung.

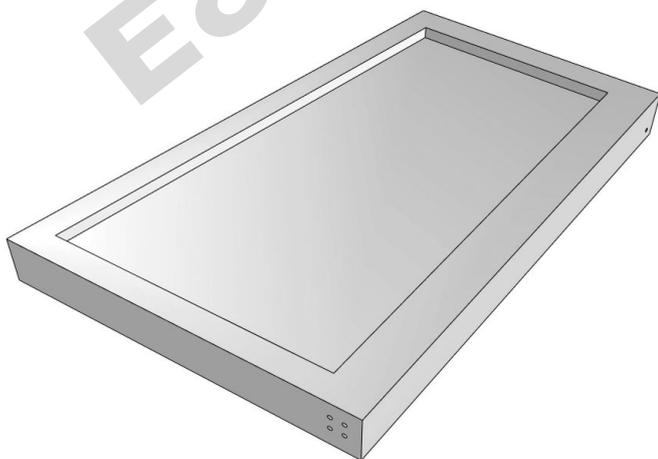


Bild 9 Darstellung der Hohlräume für nachträgliche verbundlose Spanngliedführung
 Representation of the voids for subsequent prestressing without bond

3.3 Generierung des Extrusionspfades mit nichtlinearer Finite-Elemente-Methode

3.3.1 Berechnung der Extrusionspfade

Zur Segmentierung wird das Modell der Brücke unter der maßgebenden Lastfallkombination numerisch simuliert und im Berechnungsnetz anschließend die Trajektorien sowie der Verlauf der Größe der Hauptspannungen entlang der Trajektorien berechnet. Aus den sich kreuzenden Hauptspannungstrajektorien kann die Geometrie der Segmente abgeleitet werden, wenn die Hauptspannungstrajektorien zuvor mittels B-Splines vom Polynomgrad zwei interpoliert wurden. Hier ist zu beachten, dass die an den Knoten ausgewerteten Kurvenpunkte im Schnittpunkt der Trajektorien liegen, um eine komplikationsfreie Unterteilung in Subkurven vom Polynomgrad zwei zu ermöglichen.

Basierend auf einer numerischen Simulation werden die relevanten Ergebnisse über eine Programmierschnittstelle aus der Berechnungsdatenbank in ein plattformunabhängiges Format hierarchisch exportiert. Zur Bestimmung der Hauptspannungen in Größe und Richtung einer Struktur sind neben dem Berechnungsnetz und dessen Randbedingungen die belastungsabhängigen Größen der Knotenverschiebungen und Materialsteifigkeitsmatrizen D für jedes finite Element notwendig.

Zur Berechnung kontinuierlicher Hauptspannungstrajektorien aus diskreten Simulationsergebnissen wurde ein Plug-In für die visuelle Programmiersprache Grasshopper entwickelt. Durch die Interpretation des Problems der Berechnung der Trajektorien als gewöhnliche Differentialgleichung können die Hauptspannungstrajektorien durch die Anwendung numerischer Lösungsverfahren berechnet werden. Vereinfachend wird das Prinzip durch Anwendung des Einschrittverfahrens nach Heun gezeigt, im Plug-in selbst wird das klassische Runge-Kutta-Verfahren angewendet.

Ausgehend von einem Startpunkt (x_i, y_i) werden die Dehnungen durch Differenzierung der linearen Interpolation aus den Verformungsfeldern $u(x, y)$ und $v(x, y)$ des Elements berechnet, in dem der aktuelle Ausgangspunkt liegt. Dies erfolgt gemäß Gl. (2). Mithilfe der Materialkennwerte D lassen sich daraus die Spannungen nach Gl. (3) bestimmen [22].

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_{xx}(x_i, y_i) \\ \varepsilon_{yy}(x_i, y_i) \\ \gamma_{xy}(x_i, y_i) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial y} \\ \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial x} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u(x_i, y_i) \\ v(x_i, y_i) \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} \sigma_{xx}(x_i, y_i) \\ \sigma_{yy}(x_i, y_i) \\ \tau_{xy}(x_i, y_i) \end{bmatrix} = D \cdot \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx}(x_i, y_i) \\ \varepsilon_{yy}(x_i, y_i) \\ \gamma_{xy}(x_i, y_i) \end{bmatrix} \quad (3)$$

Autor: Titel

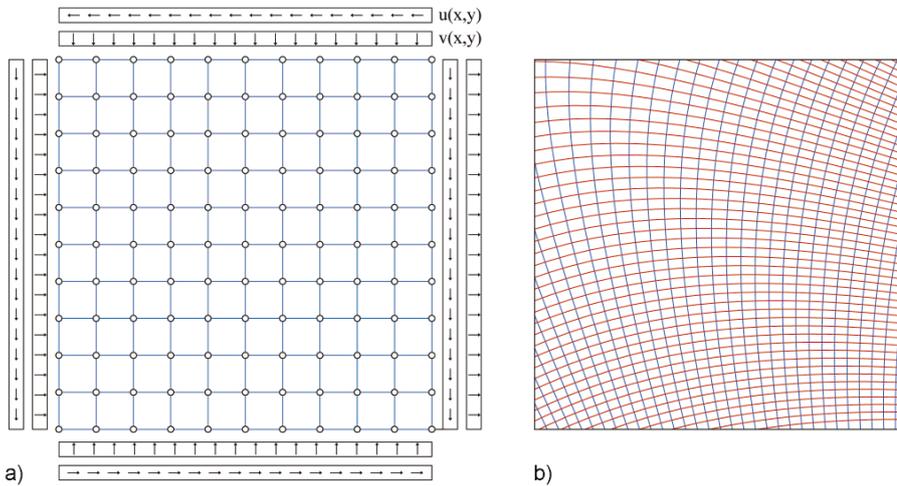


Bild 10 Hauptspannungstrajektorien a) am Berechnungsnetz b) mit umlaufenden Verschiebungsrandbedingungen
 Principal trajectories (right) on the computational mesh (left) with displacement boundary conditions

Aus den Werten der Spannungen, die sich am globalen Koordinatensystem orientieren, wird anschließend die Hauptspannungsrichtung $\varphi_1(x_i, y_i)$ als Winkel bezüglich des Koordinatensystems nach Gl. (4) berechnet. Durch Addition von $\frac{\pi}{2}$ auf den Hauptspannungswinkel $\varphi_1(x_i, y_i)$ der ersten Richtung kann die zweite Hauptspannungsrichtung $\varphi_{II}(x_i, y_i)$ berechnet werden. Die Berechnung der Hauptspannungen ist in diesem Kontext nicht relevant.

$$\varphi_1(x_i, y_i) = \frac{1}{2} \cdot \arctan\left(\frac{2 \cdot \tau_{xy}(x_i, y_i)}{\sigma_{xx}(x_i, y_i) - \sigma_{yy}(x_i, y_i)}\right) \quad (4)$$

Anschließend wird vom Startpunkt (x_i, y_i) mit einem hinreichend kleinen Schritt dt auf den nächsten Punkt (x_{i+1}, y_{i+1}) gemäß Gln. (5) und (6) der Trajektorie extrapoliert. Von einem Punkt kann durch Invertierung des Vorzeichens der Schrittweite dt in Vorwärts- wie auch in Rückwärtsrichtung der Trajektorie gerechnet werden.

$$x_{i+1} = x_i + dt \cdot \cos(\varphi_1(x_i, y_i)) \quad (5)$$

$$y_{i+1} = y_i + dt \cdot \sin(\varphi_1(x_i, y_i)) \quad (6)$$

Das Verfahren wird sukzessiv so lange wiederholt, bis die Grenzen des Berechnungsnetzes erreicht sind. Danach ist ein neuer Startpunkt zu wählen. Um mit geeigneter Düsenteknik additiv fertigen zu können, müssen die Trajektorien (Bild 10) einen Mindest- und Maximalabstand zueinander einhalten. Alternativ können geeignete Homogenisierungskonzepte angewandt werden.

3.3.2 Postprocessing der berechneten Extrusionspfade

Damit die berechneten Hauptspannungstrajektorien als Grundlage des additiven Fertigungsprozesses verwenden zu können, müssen diese in kontinuierliche Extrusionspfade konvertiert werden, die anschließend in ein für In-



Bild 11 Der am Lehrstuhl für Massivbau der TU München verwendete Industrieroboter KUKA KR340 R3300 bei der Simulation des additiven Fertigungsprozesses
 The KUKA KR340 R3300 industrial robot used at the Chair for Concrete and Masonry Structures at the TU Munich during the simulation of the additive manufacturing process

dustrieroboter (Bild 11) verständliches Programm übersetzt werden. Hierbei ist die Abstimmung zwischen der Verfahrensgeschwindigkeit des Industrieroboters am Düsenkopf, der Fördergeschwindigkeit des Materials und externen Achsen abzubilden.

4 Resümee

Die Vorfertigung von Brückenbauwerken in industrieller Fließfertigung erfordert umfangreiche Anpassungen im gesamten Planungsprozess. So müssen Ingenieur*innen möglichst früh in der Tragwerksplanung dahingehend unterstützt werden, dass ihr Entwurf mit den zur Verfügung stehenden Fertigungssystemen effizient gefertigt werden kann. Die graph-basierten Methoden zur Erkundung geeigneter Modularisierungen sind hierfür leistungs-

starke Werkzeuge, die den Entwurfsprozess sogar kreativ bereichern können. Zudem wird eine automatisierte Detaillierung modularer Bauteile bis zur Schnittstelle zwischen Entwurf und Produktion ermöglicht. Die graph-basierte Darstellung wird schließlich in Instanzen eines hochdetaillierten parametrischen Produktionsmodells übersetzt. Durch die flexible Modellierung mit NURBS-Kurven erweist sich dieses als fähig eine Vielzahl an möglichen Verbindungstechniken und Fügesituationen zu erzeugen. Der durchgängig digitale Planungsprozess mündet in die Extrusionspfadgenerierung auf Basis nichtlinearer FE-Analysen. Durch die Ableitung des Druckpfades aus dem Hauptzugspannungsfeld und mit-

hilfe einer angepassten Düsenteknik können so herausragende Materialeigenschaften des carbonkurzfaserbewehrten Betons erreicht werden.

Dank

Die Autoren danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) für die Unterstützung des Vorhabens (Projektnummer 423969184) im Rahmen des Schwerpunktprogramms 2187 „Adaptive Modulbauweisen mit Fließfertigungsmethoden“.

Literatur

- [1] Olipitz, M. (2015) *Paulifurtbrücke – Entwurf, Planung und Ausführung einer UHPC-Schalenbrücke* in: *Beton- und Stahlbetonbau* 110, H. 5, S. 365-374. <https://doi.org/10.1002/best.201500013>
- [2] Asprone, D.; Auricchio, F.; Menna, C.; Mercuri, V. (2018) *Printing of reinforced concrete elements: Technology and design approach* in: *Construction and Building Materials* 165, pp. 218–231. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.01.018>
- [3] Singer, D.; Borrmann, A. (2015) *A Novel Knowledge-Based Engineering Approach for Infrastructure Design* in: *Proceedings of the Fourth International Conference on Soft Computing Technology in Civil, Structural and Environmental Engineering*. United Kingdom.
- [4] Verhagen, W. J. C.; Bermell-Garcia, P.; Van Dijk, R. E. C.; Curran R. (2012) *A critical review of Knowledge-Based Engineering: An identification of research challenges* in: *Advanced Engineering Informatics* 26(1), pp. 5-15. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2011.06.004>
- [5] Chakrabarti, A.; Shea, K.; Stone, R.; Cagan, J.; Campbell, M.; Hernandez, N. V.; Wood, K. L. (2011) *Computer-Based Design Synthesis Research: An Overview* in: *Journal of Computing and Information Science in Engineering* 11(2). <https://doi.org/10.1115/1.3593409>.
- [6] Helms, B.; Shea, K. (2013) *Object-Oriented Graph Grammars for Computational Design Synthesis*. [Dissertation]. Technische Universität München
- [7] Rossi, A.; Tessmann, O. (2017) *Designing with digital materials. A computational framework for discrete assembly design* in: *Proceedings of the 22nd international conference on computer-aided architectural design research in Asia (CAADRIA)*. Hong Kong.
- [8] Klavins, E.; Ghrist, R.; Lipsky, D. (2004) *Graph grammars for self assembling robotic systems* in: *Proceedings of the International Conference on Robotics and Automation*. New Orleans. pp. 5293-5300
- [9] Rossi, A.; Tessmann, O. (2018) *From Voxels to Parts: Hierarchical Discrete Modeling for Design and Assembly* in: *Proceedings of the 18th International Conference on Geometry and Graphics*. Milan, pp. 1001–1012.
- [10] Rossi, A.; Tessmann, O. (2017) *Aggregated Structures: Approximating Topology Optimized Material Distribution with Discrete Building Blocks* in: *Proceedings of the IASS Annual Symposium 2017*. Hamburg.
- [11] Prusinkiewicz, P.; Lindenmayer, A. (1990) *The Algorithmic Beauty of Plants*. New York: Springer.
- [12] Kniemeyer, O. (2008) *Design and Implementation of a Graph Grammar Based Language for Functional-Structural Plant Modelling* [Dissertation]. Brandenburgische Technische Universität.
- [13] Zimmermann, L.; Chen, T.; Shea, K. (2018) *A 3D, performance-driven generative design framework: automating the link from a 3D spatial grammar interpreter to structural finite element analysis and stochastic optimization* in: *Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing* 32(2), pp. 189-199. <https://doi.org/10.1017/S0890060417000324>.
- [14] Vilgertshofer, S.; Borrmann, A. (2017) *Using graph rewriting methods for the semi-automatic generation of parametric infrastructure models* in: *Advanced Engineering Informatics* 33, pp. 502–515. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2017.07.003>.
- [15] Fischer, O.; Volkmer, D.; Lauff, P.; Hambach, M.; Rutzen, M. (2019) *Zementgebundener kohlenstofffaserverstärkter Hochleistungswerkstoff (Carbonkurzfaserbeton)*. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag, 2019.
- [16] Lauff, P. (2017) *Carbonkurzfaserbeton: Eine neuartige Komposition mit gezielter Faserausrichtung beeindruckt durch signifikante Steigerung der Zugfestigkeit* in: *Beton- und Stahlbetonbau* 112, H. 7, S. 460.
- [17] Lauff, P.; Fischer, O. (2018) *Zum Trag- und Ermüdungsverhalten von im 3D-Druck hergestellten Carbon-Kurzfaserbeton mit hoher Zugfestigkeit* in: 59. DAfStb Forschungskolloquium. München, S. 103–113.
- [18] Lauff, P. *Carbonkurzfaserbeton – Beanspruchungsorientierte Faserausrichtung durch additive Fertigung* in: 11. Carbon- und Textilbetontage. Dresden.
- [19] Rutzen, M.; Lauff, P.; Niedermeier, R.; Fischer, O.; Raith, M.; Grosse, C.; Weiss, U. Peter, M.; Volkmer, D. (2021) *Influence of fiber alignment on pseudoductility and microcracking in a cementitious carbon fiber composite material* in: *Materials and Structures* 54(2). <https://doi.org/10.1617/s11527-021-01649-2>.
- [20] Lauff, P.; Fischer, O. (2019) *Effizienter Ultrahochleistungsbeton mit innovativer trajektorienorientierter Bewehrung* in: *ce/papers* 3(2), S. 82-88. <https://doi.org/10.1002/cepa.976>.
- [21] Piegl, L.; Tiller, W. (1997) *The NURBS Book* (Second Edition) Berlin, Heidelberg: Springer.
- [22] Zienkiewicz, O. C.; Taylor, R. L. (2002) *The finite element method*. 5. ed., reprinted. Oxford: Butterworth and Heinemann.

Autor: Titel

Autoren



Lothar Kolbeck, M. Sc. (Korrespondenzautor)
lothar.kolbeck@tum.de
Technische Universität München
Lehrstuhl für Computergestützte Modellierung und Simulation
Arcisstraße 21
80333 München



Simon Vilgertshofer, M. Sc.
simon.vilgertshofer@tum.de
Technische Universität München
Lehrstuhl für Computergestützte Modellierung und Simulation
Arcisstraße 21
80333 München



Daniel Auer, M.Sc.
daniel.auer@tum.de
Technische Universität München
Lehrstuhl für Massivbau
Theresienstraße 90
80333 München



Prof. Dr.-Ing André Borrmann
andre.borrmann@tum.de
Technische Universität München
Lehrstuhl für Computergestützte Modellierung und Simulation
Arcisstraße 21
80333 München



Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wirt. Oliver Fischer
oliver.fischer@tum.de
Technische Universität München
Lehrstuhl für Massivbau
Theresienstraße 90
80333 München

Zitieren Sie diesen Beitrag

Kolbeck, L.; Auer, D.; Fischer, O.; Vilgertshofer, S.; Borrmann, A. (2021) *Modulare Brückenbauwerke aus carbonfaserbewehrtem Ultra-hochleistungsbeton: Graph-basierter Entwurf und trajektoriensensitive Fertigung*. Beton- und Stahlbetonbau 116, Sonderheft Schneller bauen S2. <https://doi.org/10.1002/best.202100053>

Dieser Aufsatz wurde in einem Peer-Review-Verfahren begutachtet.
Eingereicht: 15. Mai 2021; angenommen: 8. Juli 2021.