

Baubetriebliche Optimierung des vollwandigen Beton-3D-Drucks

Construction process optimization of full-wall 3D-concrete-printing

Kurzfassung der Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)

vorgelegt an der

Technischen Universität Dresden

Fakultät Bauingenieurwesen

Institut für Baubetriebswesen

eingereicht von

Dipl.-Ing. Martin Krause

geboren am 18.09.1986 in Dresden

Gutachter:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wirt.-Ing. Jens Otto, Technische Universität Dresden

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Konrad Nübel, Technische Universität München

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Frank Will, Technische Universität Dresden

Tag der Einreichung: 01.07.2020

Tag der Verteidigung: 02.12.2020

Kurzfassung

Aktuell wird weltweit daran geforscht, 3D-Druckverfahren für das Bauwesen zu entwickeln. Durch die innovative Technologie sollen die Bauabläufe produktiver, effizienter und planbarer werden. Ein weit verbreiteter Ansatz des 3D-Drucks im Bauwesen ist es, fertig gemischten Beton aus einem geometrisch präzise geführten Druckkopf auszubringen. Die Betonbauteile werden durch kontinuierliches Aufeinander-schichten von Betonsträngen schalungsfrei erzeugt. Diese Arbeit fokussiert den vollwandigen Beton-3D-Druck, bei dem massive Betonwände in einem Zug mit voll ausgefülltem Wandquerschnitt gedruckt werden. Als Beispiel dient das an der TU Dresden entwickelte Beton-3D-Druckverfahren CON-Print3D®. Um den Beton-3D-Druck umzusetzen, muss das Druckgerät über speziell aufbereitete Datenstrukturen angesteuert werden. Die bestehende digitale Prozesskette des kleinformigen 3D-Drucks ist dazu nur bedingt anwendbar. Insbesondere der Teilprozess des „Slicings“ von Betonbauteilen oder ganzen Bauwerken ist mit den aktuell verfügbaren Softwarelösungen stark fehlerbehaftet oder gar nicht umsetzbar. Die digitale Prozesskette ist auf die speziellen Randbedingungen des Beton-3D-Drucks anzupassen und unter Beachtung geeigneter 3D-Druckstrategien baubetrieblich zu optimieren.

Im Rahmen der Arbeit wird eine wissenschaftliche Untersuchung zur baubetrieblichen Optimierung des vollwandigen Beton-3D-Drucks durchgeführt. Dabei werden drei Schwerpunkte fokussiert:

- 1) Verfahrensspezifische Randbedingungen und geeignete Lösungsstrategien,
- 2) Druckpfadoptimierung nach Methoden des Operations Research (OR),
- 3) Analyse druckzeitbeeinflussender Prozessparameter.

Schwerpunkt 1) fokussiert die verfahrensspezifischen Randbedingungen hinsichtlich der Baukonstruktion, Maschinenteknik, Betontechnologie, Bauverfahrenstechnik, Umweltbedingungen und der Druckzeitminimierung. Dabei werden Anforderungen, Restriktionen und Lösungen abgeleitet, die für die baubetriebliche Optimierung des vollwandigen Beton-3D-Drucks bedeutsam sind.

Schwerpunkt 2) behandelt die wirtschaftliche Optimierung des Druckpfads unter Anwendung von OR-Methoden. Im Rahmen der Forschungsarbeit konnte eine IT-Software entwickelt werden, die für jeden beliebigen Grundrissgraphen den optimierten Druckpfad generiert. Die Software kann zukünftig verfahrensunabhängig für den Beton-3D-Druck eingesetzt werden.

Um druckzeitbeeinflussende Prozessparameter zu analysieren, wird im Schwerpunkt 3) eine umfassende zeitliche Simulationsstudie durchgeführt. Ein repräsentativer Grundriss eines Einfamilienhauses dient als Beispielprojekt. Die Ergebnisse der dynamisch-deterministisch-kontinuierlichen Simulationsstudie liefern wesentliche Erkenntnisse zur baubetrieblichen Optimierung des vollwandigen Beton-3D-Drucks. Im Rahmen von fünf Simulationsaufgaben werden druckstrategische Problemstellungen analysiert sowie eine Sensitivitätsanalyse der maßgebenden Prozessparameter durchgeführt. Im Ergebnis werden Werte oder Wertebereiche der Prozessparameter definiert, die unter Berücksichtigung des maschinentechnischen Aufwandes eingehalten werden sollten. Im Besonderen wird auf die Relation der beiden einflussreichsten Parameter, der Druckgeschwindigkeit und der Schichthöhe, eingegangen. Darüber hinaus werden modellbasierte Zeit-Aufwandswerte [h/m^2] berechnet und die zeitliche Auswirkung verschiedener Grundrisse geprüft. Abschließend wird eine Vorgehensweise zur Berechnung der Druckzeit für Neuprojekte erarbeitet.

Weltweit gibt es aktuell keine vergleichbare Untersuchung mit baubetrieblichem Fokus. Diese Arbeit wird es ermöglichen, zukünftig fundierte Wirtschaftlichkeitsanalysen, z. B. hinsichtlich der Baukosten, durchführen zu können. Die Ergebnisse sind darüber hinaus in einer angepassten Slicing-Software für den vollwandigen Beton-3D-Druck zu integrieren.

Summary

Development of 3D printing processes for construction industry is a rapidly growing research topic throughout the world. These innovative technologies are ought to make construction processes more productive, efficient and reliable. A common approach of 3D printing in construction industry is to deposit pre-mixed concrete with a precisely guided print head. The concrete structures are created by continuously stacking concrete layers without using formwork. This thesis focuses on full-wall 3D-concrete-printing, in which horizontal layers of solid concrete walls are fully extruded in one run of the printhead. The 3D-concrete-printing process CONPrint3D[®] developed at the TU Dresden serves as an example. In order to implement 3D-concrete-printing, the printing machine must be controlled using specifically prepared data structures. For which, the existing digital process chain of small scale 3D printing can only be used to a limited extent. In particular, the sub-process of “slicing” concrete structures is highly error-prone or cannot be implemented at all with the current software solutions. The digital process chain has to be adapted to the complex boundary conditions of 3D-concrete-printing and has to be optimized in building operations taking into account suitable 3D printing strategies.

In the framework of the thesis a scientific investigation for optimization of full-wall 3D-concrete-printing was carried out. The key aspects under investigation are:

- Focus 1: Process-specific boundary conditions and suitable solution strategies,
- Focus 2: Print path optimization according to methods of Operations Research (OR),
- Focus 3: Analysis of process parameters influencing printing time.

The Focus 1 deals with the process-specific boundary conditions with regard to construction design, machine technology, concrete technology, construction process technology, environmental conditions and printing time minimization. Requirements, restrictions and solutions are derived which are significant for the constructional optimization of full-wall 3D-concrete-printing.

The economic optimization of the printing path using OR methods was dealt in Focus 2. Therefore, a software was developed that generates optimized printing paths for any floor plan. In future, the software can be used for all 3D-concrete-printing methods.

In order to analyze process parameters influencing printing time, a comprehensive temporal simulation study is carried out in Focus 3). A representative floor plan of an individual house is taken as an example project. The results of the dynamic-deterministic-continuous simulation study provide essential insights for the optimization of the full-wall concrete 3D printing. As part of five simulation tasks, printing strategy problems are investigated and a sensitivity analysis of the relevant process parameters is realized. As a result, values or ranges of values are defined as process parameters, which should be adhered to taking into account the mechanical engineering effort. In particular, the relation between the two most influential parameters, the printing speed and the layer height, is discussed. In addition, model-based time expenditure values [h/m^2] are calculated and the temporal impact of various floor plans is examined. Finally, a procedure for the calculation of printing times for the application of new projects is developed.

Currently, there is no comparable study focusing on construction economic aspects throughout the world. This thesis will enable well-founded economic viability analysis, for example, in terms of construction costs. The results are also to be integrated into a customized slicing software for full-wall 3D-concrete-printing.