

Generative Manufacturing with Carbon Fiber- Reinforced High-Performance Concrete: Processes and Properties

Generative Fertigung mit carbonfaserbewehrtem
Hochleistungsbeton: Prozesse und Eigenschaften

DISSERTATION

zur Erlangung der Würde eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
eingereicht an der Fakultät Bauingenieurwesen der Technischen Universität Dresden

vorgelegt von
Dipl.-Ing. Tobias Neef

Gutachter:

Prof. Dr.-Ing. Viktor MECHTCHERINE, Institut für Baustoffe, Technische Universität Dresden
Prof. Dr.-Ing. Martin CLAßEN, Lehrstuhl und Institut für Massivbau, RWTH Aachen University
Prof. Dr.-Ing. Birgit BECKMANN, Institut für Massivbau, Technische Universität Dresden

Eingereicht am: 28.03.2025
Verteidigt am: 03.09.2025

KURZFASSUNG

Die stagnierende Produktivität im Bauwesen, bedingt durch Fachkräftemangel und fehlende Automatisierung, soll mithilfe innovativer Technologien wie dem Beton-3D-Druck überwunden werden. Bei diesen Verfahren erfolgt die präzise, schichtweise Ablage des Betons durch eine maschinell geführte Düse. Besonders hervorzuheben ist hierbei das extrusionsbasierte Verfahren, mit dem in den vergangenen Jahren bereits zahlreiche Bauteile, Brücken und Gebäude realisiert wurden. Die Bewehrung erfolgte dabei in der Regel manuell, da die vollständig automatisierte Bewehrungsintegration derzeit eine Herausforderung darstellt und eine nachhaltige Etablierung der 3D-Drucktechnologie erschwert. Herkömmliche Stahlbewehrung benötigt eine dicke Betondeckung als Korrosionsschutz und bietet wenig Flexibilität, um an der Düse gebogen zu werden. Dies führt zu großen Betonquerschnitten und schränkt die geometrische Gestaltungsfreiheit der Bauteile deutlich ein.

Eine innovative Alternative hierzu bietet die Verwendung nichtmetallischer Faserbewehrungen, beispielsweise aus Carbon. Um die aus tausenden einzelnen Fasern bestehenden Carbonsgarne zu bündeln, werden diese bisher vorwiegend mit polymeren Tränkungen versehen, die jedoch anfällig gegenüber hohen Temperaturen sind. Dies lässt sich durch eine mineralische Tränkung der Carbonfasern (MCF, engl. mineral impregnated carbon fiber) vermeiden. Diese mineralische Tränkung verbessert nicht nur die Beständigkeit im Brandfall, sondern gewährleistet zusätzlich einen hervorragenden Verbund zum Beton. Der Fokus dieser Dissertation liegt auf der Integration von MCF in extrusionsbasierte 3D-Druckprozesse. Dabei wurden folgende Verfahren erfolgreich umgesetzt:

- An einem Portaldrucker-System wurden mehrere MCF gleichzeitig in eine gedruckte Bahn integriert. Hierfür wurden mithilfe einer neuartigen Düse mehrere Druckversuche durchgeführt und geeignete Prüfmethoden entwickelt, um das Verbundverhalten der gedruckten Elemente umfassend zu untersuchen. Neben dem Verbund wurde auch die Rissbildung mithilfe digitaler Bildkorrelation analysiert. Zur Einordnung der Ergebnisse und Erfassung der Fehlereinflüsse aus dem Herstellungsprozess wurden zusätzlich Vergleichsexperimente mit einem „Standard“-Carbonbeton durchgeführt.
- Ein neu entwickelter Labor-Extruder ermöglichte die Herstellung nahezu endloser, horizontal belastbarer Elemente unter Verwendung besonders steifer Betonmatrices. Die dünnen, extrudierten Bauteile wurden mit MCF bewehrt und zeigten hohe Zugfestigkeiten sowie eine fein verteilte Rissbildung. Für die Integration der MCF wurde der Tränkungsprozess optimiert und eine neue kompakte Gartränkungsanlage konstruiert. Im Gegensatz zu Bauteilen mit starrer, epoxidharzgetränkter Textilbewehrung ließen sich die mit MCF bewehrten Proben nach der Extrusion noch umformen.
- Die Flexibilität der Garne wurde in einem anderen Verfahren genutzt, um geometrisch komplexe Strukturen aus feinen Betonsträngen mithilfe eines Roboterarms zu drucken. Die Matrix wies hierbei eine deutlich weichere Konsistenz als bei den vorherigen Technologien auf, was die Integration der MCF und deren Förderung mit dem Beton erheblich erschwerte. Verschiedene methodische Ansätze zur kurzzeitigen Erhöhung der Steifigkeit der frisch getränkten MCF wurden untersucht. Durch Anpassungen der MCF sowie kontinuierliche Optimierungen der Druckdüse konnten schließlich erfolgreiche Ergebnisse erzielt und mit mechanischen sowie visuellen Untersuchungen der gedruckten Proben bestätigt werden.

Abschließend wurde eine Materialoptimierung und die Pfadprogrammierung für roboterbasierte Drucksysteme anhand umfangreicher Versuche mit konventioneller, epoxidharzgetränkter Carbonmattenbewehrung etabliert. Bei allen Verfahren wurden die mechanischen Eigenschaften der gedruckten Elemente geprüft und die Ergebnisse durch visuelle Untersuchungen mittels Computertomografie und Rasterelektronenmikroskopie ergänzt.

ABSTRACT

The construction industry's stagnant productivity, caused by a shortage of skilled labor and a lack of automation, is being addressed by innovative technologies such as 3D concrete printing. In these processes, concrete is precisely deposited in layers using a machine-guided nozzle. Extrusion-based processes, in particular, have gained prominence, having been used in recent years to create numerous components, bridges, and buildings. However, reinforcement is typically applied manually, as the fully automated integration of reinforcement remains a challenge, hindering the widespread adoption of 3D printing technology.

Conventional steel reinforcement requires a thick concrete cover to prevent corrosion and offers limited flexibility, making it unsuitable for bending at the nozzle. As a result, large concrete cross-sections are required, significantly restricting the geometric freedom in the design of 3D-printed components.

An innovative alternative to rigid and corrosion-prone steel reinforcement is the use of non-metallic fiber reinforcements, such as carbon. To bundle carbon yarns – comprising thousands of individual fibers – they are typically impregnated with polymers, which, however, are not resistant to high temperatures. This limitation can be overcome by mineral impregnation of the carbon fibers, which not only improves the fire resistance but also enhances bonding with concrete.

This thesis focuses on the integration of Mineral Impregnated Carbon Fibers (MCF) into extrusion-based 3D printing processes. The following processes have been successfully implemented:

- **Integration into Printed Strands on a Gantry Printer System:** Multiple MCFs were simultaneously integrated into printed strands using a gantry printer system. Several printing tests were conducted with a novel nozzle, and appropriate testing methods were developed to thoroughly investigate the bonding behavior of the printed elements. In addition to bond strength, crack formation was analyzed using digital image correlation. Comparative tests were conducted with conventional carbon concrete to classify the results and determine the impact of the manufacturing process on the performance of printed materials.
- **Continuous Extrusion with a Laboratory Extruder:** A novel laboratory extruder enabled the continuous horizontal extrusion of elements from particularly stiff concrete matrices. The thin extruded components were reinforced with MCF and exhibited high tensile strength and finely distributed crack patterns. Additionally, the MCF impregnation process was optimized using a newly designed, compact yarn impregnation system. Unlike components reinforced with rigid epoxy-impregnated textiles, the MCF-reinforced samples could still be reshaped after extrusion.
- **Printing Geometrically Complex Structures with a Robotic Arm:** The flexibility of freshly impregnated MCF was leveraged in another process to print geometrically complex structures using fine concrete strands using a robotic arm. In this process, the matrix exhibited a much softer consistency than in the previous approaches, making it more challenging to integrate the MCF and process it within the concrete strand. Several methodological approaches were explored to temporarily increase the rigidity of the freshly impregnated MCF. Through MCF modifications and continuous optimization of the printing nozzle, successful results were ultimately achieved, as confirmed by mechanical and visual testing of the printed samples.

Finally, the adaptation of concrete's properties and path programming for robot-based 3D printing systems were established based on extensive testing with conventional epoxy resin-impregnated carbon textile reinforcements. The mechanical properties of the printed elements were analyzed in all processes, and the results were supplemented by visual examinations using computed tomography and scanning electron microscopy.