

# ANSCHLUSSPROJEKTE

## Magnetische Ausrichtung von Mikro-Stahldrahtfasern in UHPFRC | Magnetic alignment of microsteel fibers in UHPFRC

- ▶ Lukas Ledderose, Harald Kloft
- ▶ Institut für Tragwerksentwurf (ITE), TU Braunschweig

### 1 Einleitung

Ausgangspunkt für dieses Anschlussprojekt am Institut für Tragwerksplanung der TU Braunschweig war der Wunsch, die Effektivität des Faseraanteils derjenigen Betonbauteile zu erhöhen, die zuvor im SPP-Projekt *Entwicklung neuartiger Verbindungen für komplexe Stab-, Flächen- und Raumtragelemente aus UHPFRC* (S. 50 ff. in diesem Buch) hergestellt und untersucht wurden. Voruntersuchungen und Versuche zum Thema der magnetische Faserausrichtung in UHPFRC werden am ITE seit 2014 kontinuierlich durchgeführt [1]–[4]. Diese Voruntersuchungen berührten bereits zentrale Aspekte dieses Forschungsvorhabens und lieferten konkrete Hinweise auf die zu erwartenden Ergebnisse zur robotergestützten, magnetischen Ausrichtung und Verteilung der Mikrostahtfasern (MSF). Im Fokus der Forschungsarbeiten standen zum einen die Möglichkeiten der digitalen und robotergestützten Bauteilfertigung und zum anderen das Potenzial der Faserausrichtung zur Steigerung der Materialeffizienz von UHPFRC. In der Entwicklung des Verfahrens der magnetischen Faserausrichtung (MFA) wurden diese beiden Ansätze zusammengeführt.

### 2 Projektziele

Das MFA-Verfahren zur definierten Verteilung und Ausrichtung der Mikrostahtfasern in UHPFRC basiert auf dem physikalischen Phänomen des Magnetismus. Da Stahtfasern ferromagnetisch sind, kann ihre Position im Frischbeton durch den Einsatz von Magnetfeldern spezifisch verändert werden. Ziel dieser magnetischen

### 1 Introduction

The starting point for this follow-up project, which was carried out at the Institute of Structural Design at the Technical University of Braunschweig, was the desire to increase the effectiveness of the fibre content of the type of concrete components that were previously manufactured and investigated in the SPP project *Development of novel jointing systems for complex beam surface and spatial elements made of UHPFRC* (p. 50 et seq. in this book). Preliminary investigations and tests on the topic of magnetic fiber alignment in UHPFRC have been carried out continuously at ITE since 2014 [1]–[4]. These preliminary investigations already touched upon central aspects of this research project and provided concrete indications of the expected findings on robot-assisted magnetic alignment and distribution of the micro steel fibres (MSF). The research focused on the possibilities of digital and robot based component production on the one hand and the potential of fibre orientation to increase the material efficiency of UHPFRC on the other. In the development of the magnetic fibre alignment (MFA) process, these two approaches were brought together.

### 2 Project aims

The MFA process for the defined distribution and orientation of the micro steel fibres in UHPFRC is based on the physical phenomenon of magnetism. Since steel fibres are ferromagnetic, their position in the fresh concrete can be modified in a controlled manner by the application of

Behandlung war es, die Position der Mikrostaahlfasern in der Betonmatrix während des Herstellungsprozesses nach dem Kräftefluss und dem Motto „*form follow force*“ auszurichten. Die definierte Anordnung der Fasern in einem Bauteil sollte die Effektivität des eingesetzten Faserteils deutlich erhöhen und damit, neben einer verbesserten Verarbeitbarkeit, zu einer erheblichen Reduzierung der eingesetzten Fasermenge führen, die ein großes Potenzial zur Einsparung ökologischer und ökonomischer Ressourcen bietet und damit zur Herstellung ressourceneffizienterer Betonbauteile genutzt werden kann.

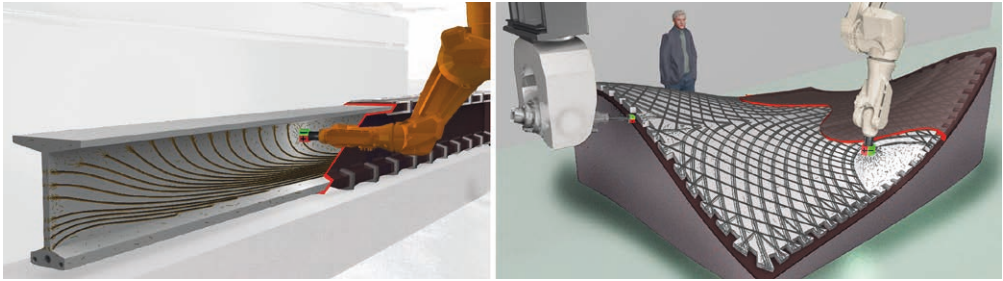
Das Verfahren könnte bei der Herstellung von modular aufgebauten Plattenelementen, dünnwandigen Tragwerken wie gegliederte Balken und Deckenelemente sowie bei hoch belasteten Zahnverbindungen eingesetzt werden, um eine deutliche Leistungssteigerung dieser UHPFRC-Bauteile zu erreichen (Bild 1). Die Faserausrichtung stellt einen von mehreren aufeinander abgestimmten Bearbeitungsschritten zur Herstellung eines Bauteils in einer zukünftigen digitalen Fertigungskette dar. Die praktischen Anwendungen für diese Methode der magnetischen Faserausrichtung sind vielfältig und für unterschiedliche Bauteilgruppen wie räumliche Fertigteilstrukturen und Schalenelemente denkbar (Bild 2). Entscheidend für eine wirtschaftliche, baupraktische Anwendung des Verfahrens wird die reproduzierbare Steuerung

magnetic fields. This magnetic treatment aimed to align the position of the micro steel fibres in the concrete matrix during the production process according to the flow of forces and the motto “*form follow force*”. The defined arrangement of the fibres in a component was intended to significantly increase the effectiveness of the fibre content used and thus, in addition to improved processability, led to a considerable reduction in the amount of fibres used, which offers great potential for saving ecological and economic resources and thus can be used to produce more resource-efficient concrete components.

The method could be used in the production of modularly constructed plate elements, thin-walled load-bearing structures such as filigree beams and ceiling elements as well as in the highly stressed tooth connections with the aim of achieving a clear increase in performance of these UHPFRC components (Fig. 1). The fibre alignment represents one of several aligned processing steps for the production of a component in a prospective digital manufacturing chain. The practical applications for this method of magnetic fibre alignment are manifold and conceivable for different component groups such as precast spatial structures and shell elements (Fig. 2). The reproducible control of the process, which was ensured by the use of the latest developments in the field of robotic production, will be decisive



**Bild 1:** Faseranordnung in einer Zahnverbindung; links: chaotisch, rechts: magnetisch ausgerichtet | **Fig. 1:** Fibre arrangement in a toothed bond; left: chaotic, right: magnetically aligned | Source: Lukas Ledderose, [4]



**Bild 2:** Mögliche Anwendungen der MFA-Methode; links: UHPFRC-Träger, rechts: Schalensegmente | **Fig. 2:** Possible applications of the MFA method; left: UHPFRC beam, right: shell segment | Source: Lukas Ledderose, [4]

des Prozesses sein, die durch den Einsatz neuester Entwicklungen auf dem Gebiet der Robotertfertigung sichergestellt werden kann.

### 3 Arbeitspakete

Das Projekt umfasste experimentelle, theoretische, numerische und bildanalytische Methoden, die aufeinander aufbauend in fünf Arbeitspaketen (AP) organisiert waren: In AP 1 wurden Permanentmagnete und Elektromagnete auf ihre Eignung für das MFA-Verfahren sowie grundlegende Prozessparameter untersucht. AP 2 hatte zum Ziel, eine digitale Prozesskette zur Steuerung des robotergestützten Ausrichtungsprozesses zu entwickeln, die eine definierte Reproduzierbarkeit des MFA-Verfahrens ermöglicht. Darüber hinaus wurden Adapter für die Montage der Magnete an den Roboterarmen entwickelt. In AP 3 wurden verschiedene Probekörper mit mono- und biaxial ausgerichteten Stahlfasern hergestellt und geprüft und in AP 4 Fasermischungen aus verschiedenen Fasermaterialien und deren Wechselwirkungen experimentell untersucht. AP 5 schließlich befasste sich mit der Entwicklung und Prüfung von robotergestützten Stahlfaseranordnungen im Fügebereich von Betonbauteilen zur lokalen Verstärkung des Lasteinleitungsbereichs.

### 4 Ergebnisse

Grundsätzlich können mit dem MFA-Verfahren drei Strategien für eine nachhaltigere Nutzung

for an economic, building-practical application of the method.

### 3 Work packages

The project included experimental, theoretical, numerical, and image analysis methods that were organized sequentially in five work packages (WP): WP 1 investigated permanent magnets and electromagnets for their suitability for the MFA process as well as basic process parameters. WP 2 aimed to develop a digital process chain for controlling the robot-assisted alignment process, which enabled defined reproducibility of the magnetic fibre alignment process. In addition, adaptations for mounting the magnets on the robot arms have been engineered. In WP 3, different test specimens with steel fibres mono- and biaxially aligned were produced and tested. In WP 4, fibre mixtures of different fibre materials and their interactions were experimentally investigated. WP 5 finally dealt with the development and testing of robot-assisted steel fibre arrangements in the joining area of concrete components for local reinforcement of the load application area.

### 4 Results

In principle, three strategies for a more sustainable use of MSF could be pursued with the MFA process. First, starting from a given fibre content, an increase in ultimate load could be achieved by transferring the individual fibres into a more

von MSF verfolgt werden. Erstens könnte, ausgehend von einem bestimmten Fasergehalt, eine Erhöhung der Tragfähigkeit erreicht werden, indem die einzelnen Fasern in eine effizientere Position und Ausrichtung gebracht werden. Zweitens könnte unter Beibehaltung einer gewünschten Materialfestigkeit der Fasergehalt durch gezielte Orientierung reduziert werden. Drittens boten die durch das MFA-Verfahren erzielten höheren Festigkeiten des Faser-Matrix-Systems die Möglichkeit, UHPFRC-Bauteile schlanker zu gestalten und damit Matrix und Eigengewicht zu reduzieren.

Anhand verschiedener Bauteilversuche konnten sowohl ökonomische als auch ökologische Einsparpotenziale durch die Reduktion des Fasergehaltes abgeleitet werden. Die mittlere Einsparung des Faservolumenanteils von 43 % führte zu einer Senkung der Materialkosten des UHPFRC um ca. 24 % und zu einer Reduzierung des Treibhauspotenzials (GWP) um ca. 25 % für die verwendete Betonrezeptur (siehe Tabelle 3 auf S. 66 in diesem Buch). Durch die Verwendung von recycelten Mikrostaalfasern aus dem Altreifenrecycling wurden sowohl die Materialkosten (ca. 55 %) als auch das GWP (ca. 49 %) weiter drastisch reduziert [5].

efficient position and orientation. Second, while maintaining a desired material strength, the fibre content could be reduced through targeted orientation. Third, the higher strengths of the fibre-matrix system achieved by the MFA process provided the opportunity for a leaner design of UHPFRC components and thus for a reduction in matrix and deadweight.

Based on various component tests, it was possible to derive both economic and ecological savings potentials by reducing the fibre content. The average fibre volume fraction saving of 43% led to a reduction in the material cost of the UHPFRC of about 24% and to a reduction in the global warming potential (GWP) of about 25% for the concrete formulation used (see Table 3, page 60 in this book). The use of recycled micro steel fibres from scrap tire recycling further drastically reduced both the material cost (about 55%) and GWP (about 49%) [5].

## Literatur | References

- [1] Ledderose, L.; Kloft, H.: Preliminary Investigations for Magnetic rearrangement of Steel Fibers in UHPFRC. In: Brasil, R. und Pauletti, R. (Hrsg.): Shells, Membranes and Spatial Structures: Footprints – Proc. of the IASS-SLTE 2014 Symp., 15.–19.09.2014 in Brasilia (Brasilien), 2014, 8 S. – <https://www.ingentaconnect.com/content/iass/piass/2014/00002014/00000011/art00012>
- [2] Ledderose, L.; Kloft, H.: Robot-aided rearrangement of steel fibres in UHPFRC via magnetic forces. In: KIVI (Hrsg.): Future Visions – Proc. of the IASS Annual Symp. 2015, 17.–20.08.2015 in Amsterdam (Niederlande), Beitrag Nr. IASS2015-517423, publiziert auf USB-Stick: 12 S.
- [3] Ledderose, L.; Kloft, H.: Snap-fits made of reinforced concrete: From advanced manufacturing to novel applications. In: Adriaenssens, S.; Mueller, C. (Hrsg.): Creativity in Structural Design – Proc. of the Annual Symp. of the Int. Association of Shell and Spatial Structures (IASS). 16.–20.07.2018 in Boston (USA), 2018, paper no. 172, 8 S. – <https://www.ingentaconnect.com/content/iass/piass/2018/00002018/00000007/art00005>
- [4] Ledderose, L.; Lehmsberg, S.; Budelmann, H.; Kloft, H.: Robotergestützte, magnetische Ausrichtung von Mikro-Stahldrahtfasern in dünnwandigen UHPFRC-Bauteilen. Beton- und Stahlbetonbau 114 (2019) 1, S. 33–42 – DOI: 10.1002/best.201800083
- [5] Ledderose, L.; Baghdadi, A.; Kloft, H.: Magnetic Alignment of Microsteel Fibers as Strategy for Reinforcing UHPFRC. Open Conf. Proc. 1 (2022) February, S. 99–114 – Proc. of Vision and Strategies for Reinforcing Additively Manufactured Concrete Structures, 04.11.2021 in Dresden, Fromm, A.; Mechtcherine, V. (Hrsg.) – <https://www.tib-op.org/ojs/index.php/ocp/issue/view/3/8>

## Projektdaten | Project data

### Allgemeine Angaben | General information

Grundlegende Untersuchungen zur robotergestützten magnetischen Verteilung und Ausrichtung von Mikrostahtfasern in dünnwandigen UHPFRC-Bauteilen

Fundamental research on robot-assisted magnetic distribution and alignment of microsteel fibers in thin-walled UHPFRC components

Antragsteller   Applicant:	Prof. Dr.-Ing. Harald Kloft
Adresse   Address:	TU Braunschweig, Institut für Tragwerksentwurf (ITE), Pockelsstrasse 4, 38106 Braunschweig
Kontakt   Contact:	+49 531 391 3571   h.kloft@tu-braunschweig.de   www.ite.tu-bs.de
Förderer   Funding:	Deutsche Forschungsgemeinschaft DFG (Projektnummer   Project number: 408043955)
Förderzeitraum   Period:	01.01.2019–31.12.2021
Team   Team:	Lukas Ledderose
Homepage   Website:	<a href="https://www.tu-braunschweig.de/ite/team">https://www.tu-braunschweig.de/ite/team</a>

### Projektbezogene Publikationen | Project related publications

- siehe Literaturverzeichnis | see reference list