

**Fibre-matrix interaction in mineral-bonded composites  
under dynamic loading**

**Faser-Matrix-Wechselwirkung in mineralisch gebundenen  
Kompositen unter dynamischer Belastung**

An der Fakultät Bauingenieurwesen  
der  
Technischen Universität Dresden  
zur  
Erlangung des akademischen Grades  
Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)  
eingereichte

**Dissertation**

von

**Dipl.-Ing. Enrico Wölfel**  
(geb. am 05.07.1984 in Pößneck)

eingereicht am 21.09.2020  
verteidigt am 20.11.2020

**Gutachter:** TUD Young Investigator Dr.-Ing. Christina Scheffler  
Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Dipl.-Wirt. Ing. Chokri Cherif  
Associate Prof. Ravi Ranade (University at Buffalo, USA)

## **Abstract**

Short fibres of different materials are used for crack bridging in strain-hardening cement-based composites (SHCC). Their mechanical properties and the fibre-matrix interphase on the micro level have a significant influence on the macroscopic component properties. Investigations on the specific modification and adaptation of fibre properties in relation with the failure mechanisms at different strain rates hardly exist so far, since mainly commercially available fibres are used. In the frame of this work, two different fibre types – polypropylene (PP) fibres and alkali-resistant (AR) glass fibres – were produced on lab spinning devices and the properties were adapted in such a way that fundamental correlations between the influence of fibre geometry, mechanical properties, chemical functionalities and surface structure on the behaviour during fibre pull-out from the concrete matrix can be derived. The PP fibres were produced with different degrees of stretching, cross-sectional geometries (circular, trilobal) and fibre diameters, as well as without and with sizing. The resulting changes in the crystallinity of the PP structure, surface roughness and wetting behaviour could be demonstrated by differential scanning calorimetry (DSC), roughness measurements by atomic force microscopy (AFM), and contact angle measurements.

AR glass fibres were used in the unsized state and various chemical surface treatments were applied. Aqueous polymer dispersions of different materials were characterized in detail regarding particle size, pH value, solid content, and surface tension. In addition, their film-forming properties were evaluated using prepared polymer films. Furthermore, the influence of cross-linking agents on the thermal and mechanical stability of polyurethane sizings was investigated using thermal analysis methods. After application of the sizings to the AR glass surface, changes in surface structure and roughness could be observed by scanning electron microscopy (SEM) and AFM. The amount of sizing, or rather the polymer content on the fibres, was systematically increased and investigated in the non-cross-linked and cross-linked state with respect to energy absorption during fibre pull-out.

Using a high-strength concrete matrix, all modified PP and AR glass fibres were used to produce and test single-fibre model composites by single-fibre pull-out tests, whereby the fibre pull-out was either quasi-static or dynamic. Based on the test results, design strategies for PP and AR glass fibres were derived at the end of the thesis.

## **Kurzfassung**

Für die Rissüberbrückung in hochduktilen Betonen (Strain-Hardening Cement-based Composites – SHCC) werden Kurzfasern verschiedener Materialien eingesetzt. Ihre mechanischen Eigenschaften und die Faser-Matrix-Grenzschicht auf der Mikroebene beeinflussen die makroskopischen Bauteileigenschaften deutlich. Untersuchungen zur gezielten Veränderung und Anpassung von Fasereigenschaften im Zusammenhang mit den Versagensmechanismen bei unterschiedlichen Dehnraten existieren bisher kaum, da überwiegend kommerziell verfügbare Fasern eingesetzt werden. Im Rahmen dieser Arbeit wurden daher zwei verschiedene Fasertypen – Polypropylen (PP)-Fasern und alkaliresistente (AR)-Glasfasern – an Laborspinnanlagen selbst hergestellt und die Eigenschaften so angepasst, dass sich grundlegende Zusammenhänge zwischen dem Einfluss von Fasergeometrie, mechanischen Eigenschaften, chemischen Funktionalitäten und Oberflächenstruktur auf das Verhalten bei Faserauszug aus der Betonmatrix ableiten lassen. Die PP-Fasern wurden mit verschiedenen Verstreckungsgraden, Querschnittsgeometrien (rund, trilobal), Faserdurchmessern sowie ohne und mit Schlichte hergestellt. Die dadurch hervorgerufenen Eigenschaftsveränderungen hinsichtlich Kristallinität der PP-Struktur, der Oberflächenrauheit und des Benetzungsverhaltens konnten durch dynamische Differenzkalorimetrie (DSC), Rauheitsmessungen mittels Rasterkraftmikroskopie (AFM) und Kontaktwinkelmessungen nachgewiesen werden.

AR-Glasfasern wurden im ungeschlichteten Zustand verwendet und verschiedene chemische Oberflächenbehandlungen durchgeführt. Es wurden wässrige Polymerdispersionen verschiedener Materialien detailliert hinsichtlich ihrer Partikelgröße, pH-Wert, Feststoffgehalt und Oberflächenspannung charakterisiert sowie ihre Filmbildungseigenschaften anhand hergestellter Polymerfilme bewertet. Weiterhin wurde der Einfluss von Vernetzern auf die thermische und mechanische Stabilität von Polyurethanschichten mit Methoden der thermischen Analyse untersucht. Nach dem Applizieren der Schichten auf die AR-Glasoberfläche konnten Veränderungen der Oberflächenstruktur und Rauheit mit Rasterelektronenmikroskopie (REM) sowie AFM beobachtet werden. Die Schlichtemenge bzw. der Polymeranteil auf den Fasern wurde systematisch erhöht und im unvernetzten sowie vernetzten Zustand hinsichtlich der Energieabsorption bei Faserauszug untersucht.

Mit allen modifizierten PP-Fasern und AR-Glasfasern wurden unter Einsatz einer hochfesten Betonmatrix Einzelfaser-Modellverbunde zur Durchführung von Einzelfaserauszugversuchen (Single-Fibre Pull-Out) hergestellt und geprüft, wobei der Faserauszug entweder quasistatisch oder dynamisch erfolgte. Basierend auf den Versuchsergebnissen wurden am Ende der Arbeit für PP-Fasern und AR-Glasfasern Designstrategien abgeleitet.