

# A Fully Coupled Dynamic Framework for Two-Scale Simulations of SHCC

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

## DISSERTATION

vorgelegt von  
**Dipl.-Ing. ERIK TAMSEN**  
geboren am 30. Dezember 1990 in Norden

Gutachter:

Prof. Dr.-Ing. habil. Daniel Balzani  
Prof. Dr.-Ing. habil. Michael Kaliske  
Prof. Dr.-Ing. Stefan Löhnert

Eingereicht am: 21.07.2020  
Verteidigt am: 18.09.2020

# Abstract

In this dissertation a general numerical two-scale homogenization method for large strains is developed, which consistently takes into account inertia forces at the microscale. The energetic scale coupling of the framework is based on the extended HILL-MANDEL condition of macro-homogeneity. Furthermore, kinematic scale links are discussed and a volume integral displacement constraint is proposed. To enable an efficient algorithm, closed form formulations of four macroscopic tangent moduli are derived. These consistently include the microscale inertia effects as well as the proposed displacement constraint. Two numerical examples are presented, a layered microstructure and a locally resonant material. These examples are used to analyze general properties of the presented framework, namely the macroscopic convergence behavior and the overall match with single-scale reference calculations. In addition, both the displacement constraint and the choice of unit cell as representative volume element are studied with respect to their influence on the macroscopic response. Subsequently, the thesis focuses on the modeling of strain-hardening cementitious composites under impact loading. First, a simplified material model representing the homogenized fiber pullout behavior is calibrated using experimental data. Then, this fiber pullout model is used at the microscale and studied using the proposed dynamic homogenization framework. Finally, a split HOPKINSON bar tension test is numerically replicated and used to showcase the ability of the framework to thoroughly study the dynamic effects of the material and structure.

# Zusammenfassung

In dieser Dissertation wird eine allgemeine zweiskalige Homogenisierungsmethode für große Deformationen entwickelt, welche die Trägheitskräfte der Mikroskala konsistent berücksichtigt. Die energetische Skalenkopplung der Methode basiert auf der erweiterten HILL-MANDEL Bedingung für Makrohomogenität. Darüber hinaus wird die kinematische Skalenkopplung diskutiert und eine Volumenintegrals-Verschiebungsbedingung aufgezeigt, die eine allgemeine dynamische Betrachtung ermöglicht. Um einen effizienten Algorithmus zu gewährleisten, werden vier makroskopischen Tangenten-Module in geschlossener Form hergeleitet. Es werden zwei Rechenbeispiele genutzt, um allgemeine Eigenschaften der Methode zu analysieren. Dazu gehören das makroskopische Konvergenzverhalten und die Übereinstimmung mit einskaligen Referenzsimulationen. Des Weiteren wird der Einfluss der Verschiebungsbedingung und die Wahl der Einheitszelle als repräsentatives Volumenelement auf die Antwort der Makroskala untersucht. Der Fokus der Arbeit wird im Anschluss auf die Modellierung hochduktiler Betone (Engl.: Strain-Hardening Cementitious Composites – SHCC) unter Stoßbelastung gelegt. Zunächst wird anhand von experimentellen Daten ein vereinfachtes Materialmodell kalibriert, welches das homogenisierte Faserauszugsverhalten repräsentiert. Danach wird dieses Faserauszugsmodell auf der Mikroskala eingesetzt und mit der vorgestellten Homogenisierungsmethode untersucht. Schließlich wird ein Split-HOPKINSON-Bar Zugversuch numerisch repliziert. Dieser wird verwendet, um die Funktionalität der Methode aufzuzeigen, wie dynamische Effekte des Materials und der Struktur untersucht werden können.