



**TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DRESDEN**

## **Mehrskalensimulation des Bruchverhaltens heterogener Strukturen unter Impaktbelastung**

## **Multiscale simulation of the fracture behavior of heterogeneous structures under impact**

Von der Fakultät Bauingenieurwesen  
der Technische Universität Dresden  
zur Erlangung des akademischen Grades  
Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.) genehmigte

### **DISSERTATION**

von Dipl.-Ing. Hannah Knobloch  
geboren am 24. Juli 1993 in Bonn

Gutachter	Prof. Dr.-Ing. Stefan Löhnert
	Prof. Dr.-Ing. habil. Fadi Aldakheel
	Prof. Dr.-Ing. habil. Michael Kaliske
Verteidigung	02. Oktober 2024

## Abstract

**Keywords:** multiscale modeling, fracture, dynamics, fiber-reinforced concrete

In this work, a framework for the numerical simulation of dynamic fracture processes in materials with a complex microstructure is developed. More precisely, impact loading scenarios are investigated, where a high velocity load is applied to a limited area, from which stress waves propagate through the body, which is why an important aspect of this work is the inclusion of inertia and an appropriate time integration scheme. Specifically, fiber-reinforced concrete (FRC) is considered. Here, short fibers are embedded into a fine-grained cement matrix, such that a complicated interaction of the individual components, that results from microscopic processes, influences the overall material behavior on the global level. Before a structure fails, fracture networks develop in the material, that are strongly influenced by microscopic aspects, such as fibers and micro cracks. In order to simulate all of these processes, a reliable and efficient multiscale framework is required, that includes dynamic effects and can handle localization phenomena.

Two different multiscale methods are examined in this work, at first regarding their performance in dynamic simulations: the Multiscale Projection Method and the Generalized Finite Element Method with global-local enrichment. The basic idea of both multiscale methods is to include microscopic effects into the global analysis by performing an additional fine scale simulation within certain areas of interest, where a more detailed analysis is of importance, due to the presence of microscopic effects. An appropriate time integration scheme and the inertia term are incorporated on both scales. The performance of the two methods is analyzed in different investigative simulations, in order to identify the relevant advantages and limits.

In a next step, fracture processes are examined and a methodological framework for their efficient simulation is presented. Therefore, the Phase-Field Method for fracture, which is able to model dynamic fracture phenomena, such as branching, is used on the fine scale of the multiscale method. Taking into account the findings of the first part of this work, a multiscale method that is able to manage structural dynamics and fracture phenomena, is constructed. Detailed investigations are conducted in 1D and 3D to better understand the behavior of the multiscale method and potential spurious wave reflections at the scale boundaries and existing cracks. Finally, the obtained knowledge is applied to enable the simulation of a shear Split-Hopkinson Bar experiment.

## Zusammenfassung

**Schlagwörter:** Multiskalenmethode, Bruchmechanik, Dynamik, faser-verstärkte Betone

In dieser Arbeit wird eine Methode zur numerischen Simulation dynamischer Prozesse in Materialien mit einer komplexen Mikrostruktur vorgestellt. Genauer gesagt werden Impaktbelastungsszenarien untersucht, bei denen in einem relativ kleinen Bereich eine Last unter hoher Geschwindigkeit aufgebracht wird. Von dort breiten sich Spannungswellen durch den restlichen Körper aus, weshalb ein wichtiger Aspekt der Arbeit die Einbeziehung der Massenträgheit und ein geeignetes Zeitintegrationsschema ist. Als Material wird faser-verstärkter Beton betrachtet. Hier werden kurze Fasern in eine feinkörnige Zementmatrix eingebettet, sodass die Interaktion der einzelnen Komponenten, die aus mikroskopischen Prozessen resultiert, das gesamte Materialverhalten auf globaler Ebene beeinflusst. Bevor eine Struktur versagt, entwickeln sich im Material Netzwerke aus Rissen, die stark von mikroskopischen Aspekten, wie Fasern und Mikrorissen, beeinflusst werden. Um all diese Prozesse zu simulieren, ist eine zuverlässige und effiziente Multiskalenmethode erforderlich, die dynamische Effekte einschließt und in der Lage ist Lokalisierungsphänomene abzubilden.

Zuerst werden zwei verschiedene Multiskalenmethoden hinsichtlich ihrer Leistungsfähigkeit bei dynamischen Simulationen untersucht: die Multiskalen-Projektionsmethode und die Generalized Finite-Elemente-Methode mit global-lokaler Anreicherung. Die Grundidee beider Multiskalenmethoden besteht darin, mikroskopische Effekte in die globale Analyse einzubeziehen, indem eine zusätzliche Feinskalen-Simulation in bestimmten Bereichen durchgeführt wird, in denen aufgrund bestimmter Aspekte eine detailliertere Analyse sinnvoll wäre. Ein geeignetes Zeitintegrationsschema und der Trägheitsterm werden auf beiden Skalen inkorporiert. Das Verhalten der beiden Methoden wird in verschiedenen Simulationen analysiert, um die relevanten Vorteile und ihre Grenzen zu ermitteln.

Im nächsten Schritt werden die Rissprozesse mit einbezogen und ein methodischer Rahmen für deren effiziente Simulation vorgestellt. Dazu wird auf der Feinskala die Phasenfeldmethode verwendet, die in der Lage ist, dynamische Rissphänomene, wie z.B. Rissverzweigung, zu modellieren. Unter Berücksichtigung der Erkenntnisse aus dem ersten Teil dieser Arbeit wird eine Multiskalenmethode entwickelt, die in der Lage ist, Dynamik und Bruchphänomene zu handhaben. Detaillierte Untersuchungen werden in 1D und 3D durchgeführt, um das Verhalten der Methode und mögliche unphysikalische Wellenreflexionen an den Skalengrenzen besser zu verstehen. Schließlich werden die gewonnenen Erkenntnisse verwendet, um die Simulation eines Split-Hopkinson-Bar-Experiments zu ermöglichen.