



**MEHRSKALENMODELLIERUNG DES FASERKNICKENS IN
FASERVERSTÄRKTEN KUNSTSTOFFEN**

**MULTISCALE MODELING OF FIBER KINKING IN
FIBER-REINFORCED POLYMERS**

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

DISSERTATION

von M.Sc. Samira Hosseini
geboren am 19. Juli 1984 in Dezfool / Iran

Gutachter	Prof. Dr.-Ing. Stefan Löhnert
	Prof. Dr.-Ing. habil. Dr. h.c. mult. Dr.-Ing. E.h. Peter Wriggers
	Prof. Dr.-Ing. habil. Michael Kaliske
Verteidigung	14. Dezember 2020

Abstract

Keywords: Composite laminate, Fiber kinking, Finite deformation, Multiscale Projection Method (MPM), Delamination.

This work presents a framework to simulate fiber kinking in unidirectional layers of fiber reinforced composite laminates in a multiscale scheme. This offers the opportunity to better capture the sequence of events of fiber kinking phenomenon and deeper study the effects of micromechanical failure mechanisms such as fiber micro-buckling and fracture on the global behavior of the macro-structure.

The scales of interest consist of a micro-mechanical scale on the level of fiber, matrix and their interface, where these constituents are modeled explicitly using the Finite Element Method, and the macro-mechanical scale, where the micromechanical properties are homogenized and considered as a transversely isotropic material model for a lamina or each ply of a composite laminate. Since the scale difference between the micromechanical level and the level of a lamina is significant, a Multiscale Projection Method (MPM) is applied to project the micromechanical effects of the fiber kinking locally on certain parts of the macroscopic problem.

The numerical simulation of fiber kinking deals with two types of nonlinearities, the geometric nonlinearity regarding the large deformations of fiber buckling and the material nonlinearity in terms of matrix plastic deformation and macroscopic delamination of composite layers. Therefore, a finite deformation formulation is considered throughout this study for micro-mechanical constituents as well as macro-mechanical components. The multiscale projection technique is adjusted to ensure its consistency with those nonlinear effects. A geometrically nonlinear cohesive element is also developed to take into account the delamination or debonding between fiber and matrix.

In order to define the location where the fine scale domain should be projected in the multiscale framework, a physically based criterion for composite laminates is applied. This class of criteria could calculate the initial condition of fibers that could lead to failure of the laminate due to fiber kinking. Applying this failure criterion on a linear analysis of the laminate in the global scale, the regions where a kink band will initiate are detected and, based on this information, a fine scale domain is generated and projected on the determined area. After this point, a multiscale simulation is carried out until the formation of a kink band in that region which generally terminates the solution procedure when the fibers break at the edges of the kink band.

Multiple multiscale simulations which are presented as the results of this process demonstrate the strengths and shortcomings of the applied method.

Zusammenfassung

Schlagwörter: Verbundlaminat, Faserknicken, große Deformationen, Multiscale Projection Method (MPM), Delamination.

In dieser Arbeit wird eine Methode zur Mehrskalmodellierung des Faserknickens in faserverstärkten Laminaten vorgestellt. Dies bietet die Möglichkeit, die Abfolge der Ereignisse des Faserknickphänomens besser zu erfassen und die Auswirkungen mikromechanischer Versagensmechanismen, wie Mikroknicke und Bruch von Fasern, auf das globale Verhalten der Makrostruktur genauer zu untersuchen.

Das Modell besteht aus einer mikromechanischen Skala, auf der die Faser, Kunststoffmatrix und deren Grenzfläche mit der Finite-Elemente-Methode modelliert werden, sowie einer makromechanischen Skala, auf der die mikromechanischen Eigenschaften für die einzelnen Schichten von Verbundlaminaten mithilfe eines transversalisotropen Materialmodells homogenisiert werden. Aufgrund der erheblichen Größenunterschiede zwischen Mikrostruktur und Verbundschichten, wird eine *Multiscale Projection Method (MPM)* angewendet, um die mikromechanischen Effekte des lokalen Faserknickens auf bestimmte Bereiche des makroskopischen Problems zu projizieren.

Die numerische Simulation des Faserknickens enthält zwei verschiedene Typen von Nichtlinearitäten, eine geometrische Nichtlinearität hinsichtlich der großen Verformungen des Faserknickens und eine Materialnichtlinearität hinsichtlich der plastischen Verformung der Matrix und der makroskopischen Delaminationen von Verbundschichten. Deshalb, wird in dieser Arbeit eine Großverformungsformulierung für mikromechanische Bestandteile sowie makromechanische Komponenten verwendet. Die *Multiscale Projection Method (MPM)* wird angepasst, um ihre Konsistenz mit diesen nichtlinearen Effekten sicherzustellen. Ein geometrisch nichtlineares Kohäsivezonenelement wird ebenfalls entwickelt, um die Delamination oder Faser/Matrix Grenzflächenenthaftung zu berücksichtigen.

Um die Region zu bestimmen, in der der Feinskalenbereich projiziert werden soll, wird ein physikalisch basiertes Kriterium für Laminat angewendet. Diese Klasse von Kriterien kann den Anfangszustand von Fasern berechnen, der zum Versagen des Laminats aufgrund von Faserknicken führen könnte. Durch Anwendung dieses Versagenskriteriums auf eine lineare Analyse des Laminats auf der makromechanischen Skala werden die Bereiche erkannt, in denen ein Knickband initiiert wird, und basierend auf diesen Informationen wird ein Feinskalennetz erzeugt und auf den bestimmten Bereich projiziert. Danach wird eine Multiskalensimulation bis zur Bildung eines Knickbandes in diesem Bereich durchgeführt, was im Allgemeinen den Lösungsvorgang beendet, wenn die Fasern an den Rändern des Knickbandes brechen.

Mehrere Multiskalensimulationen, die als Ergebnisse dieses Prozesses präsentiert werden, zeigen die Stärken und Mängel der angewandten Methode.