

# Ausarbeitung und Untersuchung eines bruchwinkelbasierten Degradationsmodells für die Bruchkriterien nach Puck

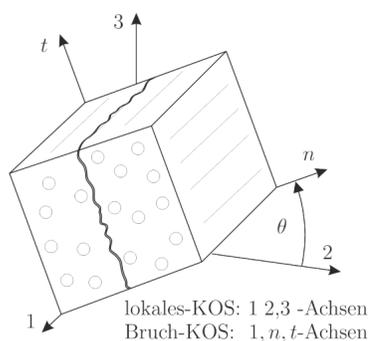
Hannes Hirsch

## 1. Einleitung

Unidirektional faserverstärkte Verbundwerkstoffe konkurrieren auf Grund ihrer hohen Festigkeiten und gleichzeitig geringer Dichte erfolgreich mit herkömmlichen Leichtbaumaterialien. Für eine effiziente Nutzung von Faserverbundlaminaten sind numerische Simulationen unabdingbar. Dabei stellt die Analyse des Zwischenfaserbruchs (ZfB) eine besondere Herausforderung dar. Einerseits muss mit einem Bruchkriterium der Zeitpunkt der Schädigung erfasst werden. Dafür wird in dieser Arbeit die bruchwinkelbasierte Bruchbedingung nach Puck verwendet. Andererseits muss mit einem Degradationsmodell das Nachbruchverhalten richtig beschrieben werden. Dies ist besonders relevant, da nach ZfB durch Lastumlagerungen zwischen den einzelnen Schichten noch große Laststeigerungen möglich sein können. Dabei ist das Ziel dieser Arbeit ein Degradationsmodell für einen allgemeinen räumlichen Spannungszustand zu entwickeln.

## 2. Degradationsmodell

Zur Simulation des Nachbruchverhaltens wird eine diskontinuierlich gerissene Schicht mechanisch weiterhin als homogenes Kontinuum beschrieben. Das Modell beschränkt sich darauf die Auswirkungen der Risse durch eine passende Steifigkeitsabminderung der Schicht im Mittel richtig wiederzugeben. Deuschle stellt in seiner Doktorarbeit ein 3D-Degradationsmodell vor. Sein Ansatz sieht eine bruchwinkelabhängige Abminderung der Ingenieurkonstanten einer gerissenen Schicht vor. Die Höhe der Abminderung gibt er durch die Annahme einer konstanten ZfB-Anstrengung vor. Davon ausgehend wird ein neues Degradationsmodell entwickelt. Die Idee besteht darin sich zunächst an der realen Symmetrie einer gerissenen Schicht zu orientieren. Für eine gerissene Schicht wird zunächst orthotropes Materialverhalten bezüglich des durch die sich einstellende Bruchebene vorgegebenen Bruch-Koordinatensystems (KOS) angenommen.



$$S_{\text{Bruch}}^{\text{red}} = \begin{pmatrix} \frac{1}{E_1} & \frac{\nu_{1n}}{E_1} & \frac{\nu_{1t}}{E_1} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\nu_{1n}}{E_1} & \frac{1}{E_n^{\text{red}}} & \frac{\nu_{nt}}{E_n} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\nu_{1t}}{E_1} & \frac{\nu_{nt}}{E_n} & \frac{1}{E_t^{\text{red}}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{1n}^{\text{red}}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{1t}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{nt}^{\text{red}}} \end{pmatrix}$$

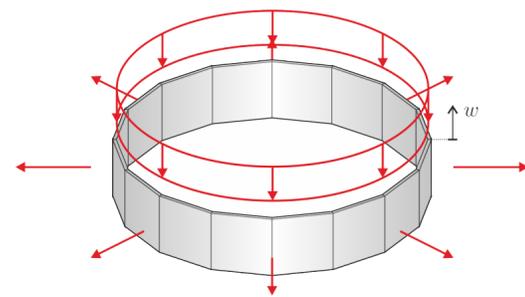
$$\rightarrow S_{\text{lokal}}^{\text{red}} = R^T(\theta) S_{\text{Bruch}}^{\text{red}} R(\theta)$$

Die Ingenieurkonstanten werden in diesem KOS abgemindert und damit die Materialmatrix aufgestellt. Diese wird anschließend aus dem Bruch-KOS in das lokale-KOS transformiert. Daraus resultiert eine Materialmatrix, die im Allgemeinen nicht mehr orthotrop ist. Dies soll jedoch im Interesse eines stabileren Programmablaufs durch die Entkopplung von Dehnungen und Winkeländerungen der Fall sein.

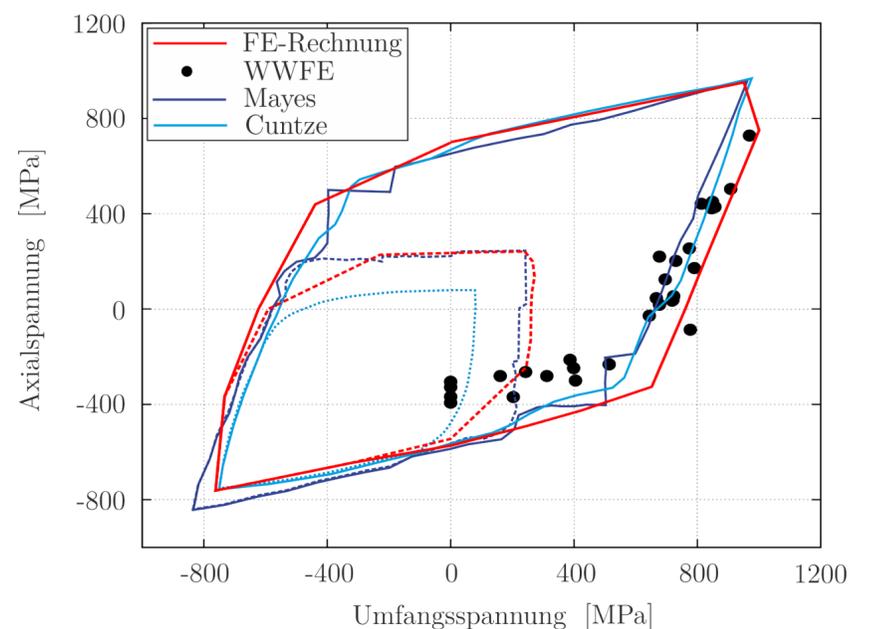
Deshalb wird die bezüglich des lokalen-KOS orthotrope Materialmatrix gesucht, die am nächsten an dieser Materialmatrix liegt. Daraus werden für die einzelnen Ingenieurkonstanten Abminderungsvorschriften abgeleitet.

## 3. Numerisches Beispiel

Als numerisches Beispiel wird eine zwängungsfrei gelagerte, dünnwandige Röhre unter Axial- und Radialbelastung betrachtet. Dies erzeugt einen homogenen, ebenen Spannungszustand, bestehend aus Umfangs- und Axialspannung, im untersuchten Laminat.



Betrachtet man unterschiedliche Spannungsverhältnisse und ermittelt jeweils den Zeitpunkt des Eintretens erster Schädigungen und des Totalversagens, lassen sich daraus Umhüllende für alle biaxialen Spannungszustände erstellen, die ohne Schädigungen (gestrichelte Linie) und maximal (durchgezogene Linie) vom untersuchten Laminat ertragen werden können.



Besonders im Zug-Zug-Bereich zeigen sich nach dem ersten Eintreten von Schädigungen noch große Lastreserven bis zum Totalversagen, welche die Relevanz eines exakten Degradationsmodells belegen. Da das Beispiel dem World Wide Failure Exercise entstammt, stehen reale Versuchsergebnisse und Simulationsergebnisse von anderen Wissenschaftlern zur Verfügung. Der Vergleich mit diesen zeigt qualitativ eine sehr gute Übereinstimmung. Quantitativ weichen die Simulationsergebnisse von den realen Versuchsergebnissen ab. Dies ist zum Teil auf das betrachtete Modell zurückzuführen, mit welchem keine Randeinflüsse berücksichtigt werden.