

# Numerische Untersuchung der Schädigungsentwicklung in endlosfaserverstärkten Kunststoffen unter faserparalleler Belastung

JONAS MÜLLER\*

Institut für Kunststoffverarbeitung  
jonas.mueller@ikv.rwth-aachen.de

17. Dezember 2018

## I. EINLEITUNG

Der Leichtbau zählt zu den Schlüsseltechnologien der heutigen Zeit und stellt somit einen Forschungsbereich dar, in welchem neue Technologien mit dem Ziel entwickelt werden, die Zukunftsfähigkeit unserer Gesellschaft zu sichern. Im Leichtbau wird sich mitunter mit der Entwicklung von Materialien, wie z. B. faserverstärkte Kunststoffe (FVK) beschäftigt. Faserverstärkte Kunststoffe zeichnen sich durch eine hohe Festigkeit und Steifigkeit bei gleichzeitig geringem Gewicht aus.

Anders als die klassischen, metallischen Materialien besitzen FVK einen heterogenen Aufbau. Dabei werden die Fasern, zumeist Carbon- oder Glasfasern, in eine Matrix aus z. B. Epoxidharz eingebettet. Dieser Herstellungsprozess bietet die Möglichkeit, dass die Fasern bei korrekter Auslegung des Bauteils stets in Kraftrichtung orientiert werden können und so die anisotropen Eigenschaften des Werkstoffs ausgenutzt werden. Die Faser übernimmt hierbei die Funktion des Lasttragens. Die Matrix hingegen ist für die Formgebung und die Krafteinleitung in die Fasern zuständig und ermöglicht die Aufnahme von Druckbelastungen.

## II. PROBLEMSTELLUNG

Bei der werkstoffgerechten Auslegung eines Bauteils aus FVK führt der faserparallele Belastungszustand zum Versagen der Verbundstruktur. Abbildung 1 zeigt schematisch die Schädigungsentwicklung einer UD-Schicht, unter der Annahme einer reduzierten Anzahl an Schädigungsmechanismen. Neben der deterministischen Betrachtung der Eigenschaften der Konstituenten wird die Festigkeit der Faser probabilistisch dargestellt. Basierend auf dieser Annahme ereignen sich schon bei geringen Dehnungen  $\epsilon$  initiale Faserbrüche. Ausgehend von den initialen Faserbrüchen entwickeln sich die Schädigungsmechanismen im Verlauf der Belastung. In Abhängigkeit der Eigenschaften der Konstituenten entwickelt sich die Schädigung und führt zu unterschiedlichem Bruchverhalten. Bedingt durch die Wechselwirkung der

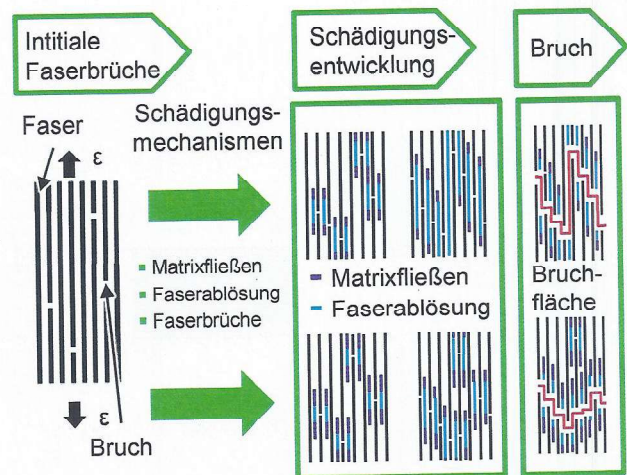


Abbildung 1: Schematische Darstellung der Schädigungsentwicklung in FVK

einzelnen Schädigungsmechanismen ist eine Betrachtung der Schädigungsentwicklung sehr komplex.

Es ist bisher unbekannt, wie sich die Konstituenteneigenschaften auf die mikromechanischen Schädigungsmechanismen und die makromechanischen Eigenschaften, wie Zugfestigkeit, Bruchenergie und Lebensdauer auswirken. Die optimalen Eigenschaften der Faser/Matrix-Kombinationen der einzelnen Lastfälle sind nicht bekannt.

Um den Einfluss der Konstituenteneigenschaften auf die mechanischen Eigenschaften des Werkstoffs unter faserparalleler Belastung besser bestimmen zu können, müssen die mikromechanischen Schädigungsvorgänge unter quasi-statischer und zyklischer Zugbelastung im Werkstoff modelliert werden.

## III. ERGEBNISSE

Der Literatur entsprechend, können die Anzahl der Schädigungsmechanismen auf drei treibende Mechanismen reduziert werden. Diese Mechanismen sind der Faserbruch, die Faserablösung von der Matrix und das Matrixfließen. Diese Mechanismen werden in der vorgestellten Arbeit modelliert.

Die Grundlage des vorgestellten Modells stellt das Shear-Lag Modell (SLM) dar (vgl. Abbildung 2), bei

\*Seffenter Weg 201, 52074 Aachen

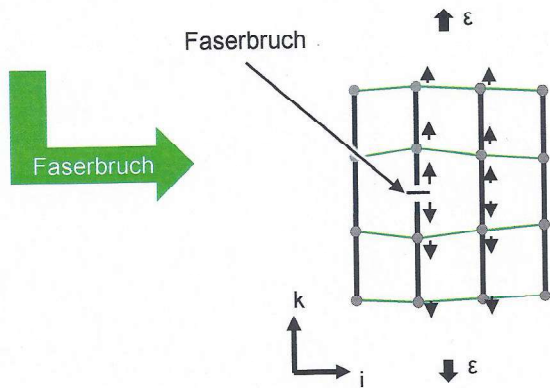
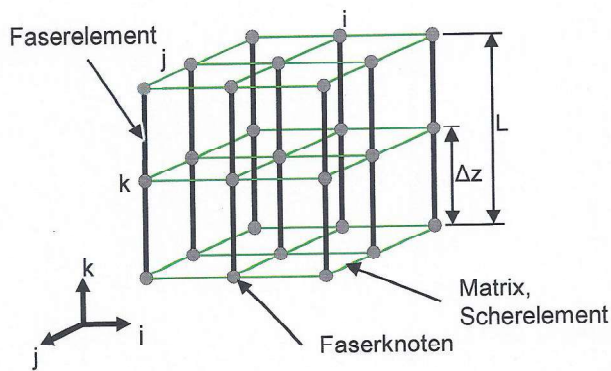


Abbildung 2: Schematische Darstellung des SLM

dem die Faser als eindimensionales Element die Lasten in faserparalleler Richtung trägt und die Matrix für die Spannungsumverteilung in Form von Schubspannungen resultierend aus einer transversalen Relativverschiebung zwischen den Fasern sorgt. Die Berechnung der Schädigungsentwicklung und statischen Festigkeit resultiert aus der Kombination des Shear-Lag Modells und einer Monte-Carlo Simulation. Das Modell besteht aus 20x20 Fasern in tetragonaler Anordnung mit einer Länge von  $L_0 = 1$  mm.

Des Weiteren wird das in der Literatur vorhandene SLM um den Aspekt der Berechnung der Bruchenergie unter statischer Zugbelastung erweitert. Die berechneten Ergebnisse der Festigkeit und der Bruchenergie finden eine gute Übereinstimmung mit der Literatur. Ein weiterer neuer Aspekt im Zuge der Modellierung des SLM's liegt in der Berechnung der Schädigungsentwicklung unter zyklischer faserparalleler Zugbelastung und daraus resultierend die Berechnung der Versagenslastspielzahl. Bei der zyklischen Belastungssimulation ist der Schädigungsmechanismus der Faserablösung der einzige, von der Lastspielzahl abhängige Mechanismus. Der Zusammenhang der Faserablösung von der ertragenen Lastspielzahl wird durch einen analytischen Ansatz mit dem Gesetz von Paris beschrieben.

Die ermittelten Verläufe der Schädigungsentwick-

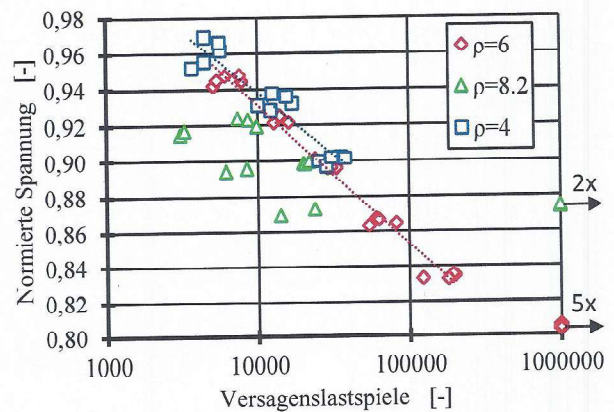


Abbildung 3: Einfluss der Streuung der Faserfestigkeit auf die Versagenslastspiele (höhere Werte für  $\rho$  entsprechen einer geringeren Streuung)

lung unter zyklischer Belastung zeigen im Wöhlerdiagramm eine logarithmische Abhängigkeit (vgl. Abbildung 3). Erste Simulationen haben den Einfluss der Streuung der Faserfestigkeit auf die Versagenslastspiele gezeigt. Dabei hat ein Modell mit einer größeren Faserfestigkeitsstreuung eine größere Ermüdungstoleranz als Faser mit einer kleineren Streuung der Faserfestigkeit.

#### IV. ZUSAMMENFASSUNG

Bei der werkstoffgerechten Auslegung von Bauteilen aus FVK liegt die Hauptbeanspruchungsrichtung in Faserrichtung. Aus diesem Grund ist es notwendig, die Schädigungsmechanismen des Verbundwerkstoffs auf der Mikroebene besser zu verstehen und abbilden zu können.

Um die identifizierten Schädigungsmechanismen modellieren zu können, wird das Shear-Lag-Modell verwendet. Mit diesem Modell ist man in der Lage, die Festigkeit der betrachteten UD-Schicht zu berechnen. Im Zuge der Arbeit wurde das Modell um die Berechnung der Bruchenergie sowie die Betrachtung der Schädigungsentwicklung unter zyklischer faserparalleler Zugbelastung erweitert. Basierend auf der zyklischen Modellierung ist man in der Lage eine Aussage über die Lebensdauer der UD-Schicht zu tätigen. Die Untersuchungen haben gezeigt, dass die Eigenschaften unter quasi-statischer Belastung der UD-Schicht durch das SLM gut beschrieben werden können. Darüber hinaus zeigt die zyklische Modellierung vielversprechende Ergebnisse.