

# ENTWICKLUNG EINES REPRÄSENTATIVEN VOLUMENELEMENTS ZUR BETRACHTUNG VON SCHÄDIGUNGSVORGÄNGEN IN FASERVERSTÄRKTEN KUNSTSTOFFEN

Martin Giersberg Sola

Institut für Kunststoffverarbeitung (IKV) an der RWTH Aachen  
martin.giersberg@ikv.rwth-aachen.de

19. Dezember 2023

## I. EINLEITUNG

Faserverstärkte Kunststoffe (FVK) sind multiskalare Gebilde deren makroskopisches Schädigungsverhalten durch Mechanismen auf der Mikroebene bestimmt wird (Abb. 1). Um diese Werkstoffdegradation in numerische Multiskalensimulationen bei der Strukturauslegung zu berücksichtigen, müssen die Werkstoffeigenschaften anhand von mikroskopischen repräsentativen Volumenelementen (RVE) bestimmt werden. Basierend auf dem RVE ermöglichen klassische Homogenisierungsmethoden die Berechnung der elastischen Eigenschaften auf Laminebene. Die Anwendung ist dabei auf ungeschädigte Werkstoffe beschränkt, sodass diese Ansätze nicht zur Berechnung der Festigkeiten und Steifigkeiten von bereits degradierten Werkstoffen genutzt werden können [1]. Die hierdurch entstehenden Ungewissheiten führen bei der Auslegung von Bauteilen aus FVK zu Überdimensionierung und zu einer Schmälerung des Leichtbaupotentials des Werkstoffs.

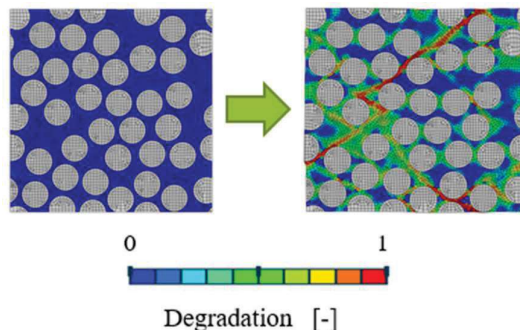


Abb. 1: Degradation im Mikromodell bei Faserparalleler Zugbelastung.

Folglich besteht Bedarf nach einer Formulierung von RVE für FVK, die das Materialverhalten von der initialen Belastung bis zum Werkstoffversagen abbilden können. Diese Arbeit bietet hierzu erstmals eine quantitative und allgemeingültige Methode zur Bestimmung und Bewertung solcher RVE.

## II. PROBLEMSTELLUNG

Aufbauend auf dem Hill-Mandel-Ansatz [2] ist es möglich, die Eigenschaften des Faser- und des Matrixwerkstoffs im Verbund zwischen der

Mikro-, der Meso- und der Makroebene in Beziehung zu stellen. So können die Verbundeigenschaften von den homogenisierten Eigenschaften eines RVE abgeleitet werden. Diese Übertragbarkeit stützt sich auf der Unabhängigkeit der Werkstoffeigenschaften von der Größe der zur Untersuchung gewählten repräsentativen Mikromodelle. Die Anwendung von Homogenisierungsverfahren ist hierbei nur bei statistisch homogenen Werkstoffen möglich [3]. Bei der Degradation des Verbunds kommt es, etwa durch das Entstehen von Rissen, zu einer lokalisierten Änderung der Werkstoffeigenschaften. Die Position und Ausprägung dieser lokalisierten Degradation ist abhängig von der Mikromodellgröße und somit nicht auf Modelle unterschiedlicher Größe übertragbar. Hiermit verliert das Mikromodell seine Repräsentativität und die Anwendung von konventionellen Homogenisierungsverfahren im Zusammenhang mit Multiskalenmethoden zur simulativen Bestimmung der Restfestigkeit eines geschädigten Bauteils ist grundsätzlich nicht länger möglich [1].

## III. METHODIK

Aufbauend auf bestehenden Methoden zur Bestimmung der Größe von RVE [4] sowie der Definition der Failure Zone Averaging (FZA) Homogenisierungsmethode [5] ist es erstmals möglich eine formale und quantitative Methode für den Nachweis eines RVE des degradierten Werkstoffs zu entwickeln.

Dazu wurden eine Reihe an Mikromodellen zunehmender Faseranzahl bei konstantem Faservolumengehalt in einer numerischen Simulation untersucht. Zu jeder Modellgröße werden mehrere Mikromodelle mit einer unterschiedlichen Mikrostrukturen erzeugt.

Zur beurteilung der Repräsentativität der Mikromodelle wird das Streuband der durch konventionelle Homogenisierung bestimmten Spannungs-Dehnungs-Verläufe der Mikromodelle gleicher Größe betrachtet. Unterschreitet dieses einen festgelegten Schwellwert kann von der Repräsentativität der Mikromodelle ausgegangen werden. In einem weiteren Schritt

# ENTWICKLUNG EINES REPRÄSENTATIVEN VOLUMENELEMENTS ZUR BETRACHTUNG VON SCHÄDIGUNGSVORGÄNGEN IN FASERVERSTÄRKTEN KUNSTSTOFFEN

wird das RVE als jenes Mikromodell bezeichnet, dessen Spannungs-Dehnungs-Verläufe innerhalb einer hinreichend kleinen Abweichung von den Verläufen des nächstgrößeren Mikromodells liegen. Das RVE ist somit das kleinste Mikromodell dessen Eigenschaften unabhängig von seiner Größe sind.

Zur Betrachtung des Materialverhaltens des geschädigten Werkstoffs wird die FZA-Homogenisierungsmethode eingesetzt. Im Gegensatz zur konventionellen Homogenisierung wird hierbei ausschließlich über den aktiv schädigenden Bereich des Mikromodells homogenisiert. Zusätzlich zu den bisherigen Kriterien wird bei den Ergebnissen der FZA-Methode die Unabhängigkeit der dissipierten Bruchenergie  $G_f$  von der betrachteten Mikromodellgröße als ein notwendiges Kriterium für die Repräsentativität des Mikromodells eingeführt. Diese Methode bietet die Möglichkeit Größe und den Gültigkeitsbereich des RVE systematisch zu bestimmen.

## IV. ERGEBNISSE UND DISKUSSION

Die entwickelte Methode wurde zur Bestimmung eines RVE eines endlosfaserverstärkten Kunststoffes mit dehnratenabhängigem Materialverhalten eines Epoxidharz-Systems bei fasersenkrechter Zugbelastung bei einer Dehnrate von  $\dot{\epsilon} = 100 \text{ s}^{-1}$ . Es werden periodische Randbedingungen angewendet und die Modelle werden unter Verwendung des ebenen Verzerrungszustands berechnet.

Die Ergebnisse des konventionellen Homogenisierungsverfahrens zeigen geringes Streuband im Spannungs-Dehnungs-Verhalten von Mikromodellen einer Kantenlänge von dem 7,5-Fachen Faserdurchmesser mit 38 Fasern im Bereich des unbeschädigten Materials im linearelastischen Bereich bis zu einer Dehnung von ca. 3 % (Abb. 2, links).

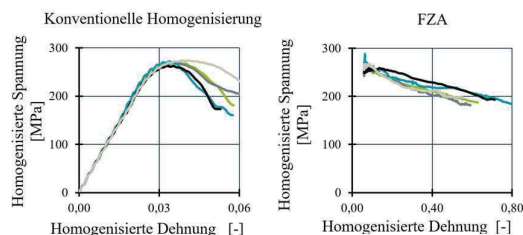


Abb. 2: Konventionelle und Failure Zone Averaging Homogenisierung der Spannungen und Dehnungen an einem Mikromodell mit 38 Fasern.

Nach auftreten erster Schädigung divergieren die Kurvenverläufe. Die Größe des Streubands der Spannungsverläufe von Mikromodellen

gleicher Größe mit unterschiedlicher Mikrostruktur übersteigt einen kritischen Schwellwert, sodass das RVE seine Gültigkeit verliert. Diese Abhängigkeit ist auch bei der Betrachtung der dissipierten Bruchenergie  $G_f$  des Mikromodells in Abhängigkeit der Modellgröße erkennbar (Abb. 3, links).

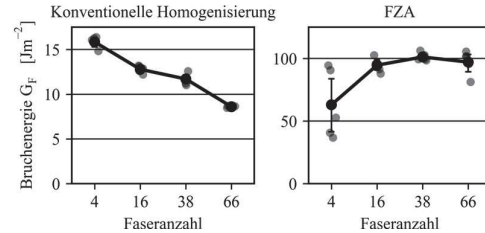


Abb. 3: Dissipierte Bruchenergie  $G_f$  der konventionellen und der Failure Zone Averaging Homogenisierung.

Die mit der FZA-Homogenisierung bestimmten Spannungs-Dehnungs-Verläufe (Abb. 2, rechts) konvergieren im Gegensatz zu denen der konventionellen Homogenisierung im Dehnungsbereich nach dem nach dem auftreten erster Schädigung. Zudem ist, im Gegensatz zur Konventionellen Homogenisierung, ab einer Mikromodellgröße der fünffachen Kantenlänge des Faserdurchmesser bei 16 Fasern eine Unabhängigkeit der Bruchenergie  $G_f$  von der Mikromodellgröße erkennbar (Abb. 3, rechts).

Hierdurch kann gezeigt werden, dass dieses Modell repräsentativ für die Abbildung des Schädigungsverhaltens des Werkstoffs ist und somit zur Beschreibung der homogenisierten Spannungs-Dehnungs-Eigenschaften des Werkstoffs bis zum vollständigen Materialversagen genutzt werden kann.

## V. FAZIT

Durch die in dieser Arbeit gezeigte Methode ist erstmals die systematische Bestimmung sowie die quantitative Beurteilung des Gültigkeitsbereichs von repräsentativen Volumenelementen bis zum Werkstoffversagen möglich. Die Methode konnte erfolgreich zur Entwicklung eines RVE für einen duroplastischen endlosfaserverstärkten Kunststoff bei faserparalleler Zugbelastung unter Berücksichtigung unterschiedlicher Dehnraten genutzt werden.

## VI. LITERATUR

- [1] GITMAN, I. M.; ASKES, H.; SLUYS, L. J.: Representative volume: Existence and size determination. *Engineering Fracture Mechanics* 74 (2007) 16, S. 2518-2534
- [2] HILL, R.: The essential structure of constitutive laws for metal composites and polycrystals. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids* 15 (1967) 2, S. 79-95
- [3] GITMAN, I.: *Representative Volumes and Multi-scale Modelling of Quasi-brittle Materials*: 2006 - ISBN: 90-64641-22-6
- [4] MIRKHALAF, S. M.; ANDRADE PIRES, F. M.; SIMÕES, R.: Determination of the size of the Representative Volume Element (RVE) for the simulation of heterogeneous polymers at finite strains. *Finite Elements in Analysis and Design* 119 (2016), S. 30-44
- [5] PHU NGUYEN, V.; LLOBERAS-VALLS, O.; STROEVEN, M.; JOHANNES SLUYS, L.: On the existence of representative volumes for softening quasi-brittle materials – A failure zone averaging scheme. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering* 199 (2010) 45-48, S. 3028-3038