

## Untersuchung der Werkstoffeigenschaften von kohlefaserverstärkten Rohrprofilen

Tobias Girresser<sup>1, a \*</sup> und Bernd Engel<sup>1, b</sup>

<sup>1</sup>Lehrstuhl für Umformtechnik, Universität Siegen, Breite Straße 11, 57076 Siegen, Deutschland

<sup>a</sup>tobias.girresser@uni-siegen.de, <sup>b</sup>bernd.engel@uni-siegen.de

**Keywords:** Kohlenstofffaserverstärkter Kunststoff (CFK), Ringzugversuch, Faservolumenanteil, Materialkarte, LS-DYNA

**Abstract.** Umfangsgewinkelte Strukturen aus kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen (CFK) werden zunehmend als tragende Strukturbauteile in Leichtbauanwendungen eingesetzt. Für eine belastbare konstruktive Auslegung solcher Strukturen sind geeignete Materialkarten für Finite-Elemente-basierte Simulationen erforderlich. Eine besondere Herausforderung stellt dabei die Abbildung der richtungsabhängigen mechanischen Materialkennwerte in Abhängigkeit der Wickelparameter dar. In diesem Beitrag wird eine methodisch strukturierte Vorgehensweise zur Entwicklung einer Materialkarte exemplarisch anhand des Ringzugversuchs vorgestellt. Ausgewählte Wickelparameter werden im Rahmen eines faktoriellen Versuchsplans variiert und ihr Einfluss auf den Faservolumenanteil sowie auf die mechanischen Eigenschaften in Faserlängsrichtung untersucht. Der Schwerpunkt liegt dabei auf der systematischen Auswertung der experimentell erfassten Daten unter Verwendung von Open-Source Softwarepaketen zur Datenanalyse. Der Faservolumenanteil wird anhand mikroskopischer Aufnahmen der Probenquerschnitte mittels bildbasierter Auswertung mit *OpenCV* bestimmt. Die mechanische Charakterisierung erfolgt durch Ringzugversuche, bei denen die Dehnungsfelder mittels digitaler Bildkorrelation erfasst und in *ParaView* weiterverarbeitet werden. Die numerische Abbildung erfolgt in *LS-DYNA* unter Verwendung des Materialmodells *\*MAT\_ENHANCED\_COMPOSITE\_DAMAGE*. Der dargestellte Ringzugversuch ist in ein umfassenderes Versuchsprogramm aus Zug-, und Druckbeanspruchung eingebettet und dient als repräsentatives Beispiel zur Veranschaulichung einer reproduzierbaren, Open-Source-basierten Vorgehensweise zur Datenbereitstellung für die Entwicklung von Materialkarten umfangsgewinkelter CFK-Strukturen.

### Einführung

Rohre und rotationssymmetrische Bauteile aus kohlefaserverstärktem Kunststoff (CFK) für Leichtbauanwendungen lassen sich effektiv mit dem Wickelverfahren herstellen. Die Beherrschung des Wickelprozesses ermöglicht die gezielte Einstellung der Steifigkeits- und Festigkeitseigenschaften. Für die numerische Auslegung dieser Bauteile ist es erforderlich, die Einflussnahme der Wickelprozessgrößen auf die Werkstoffeigenschaften quantifizieren zu können. Zur Bestimmung der Ringzugfestigkeit und des Elastizitätsmoduls in Faserlängsrichtung hat sich der Einsatz von Ringzugversuchen unter Variation der Prozessparameter Harzsystem und Harztyp [1] sowie des Wickelwinkels [1,2,3] und des Lagenaufbaus [2]. Um das Steifigkeitsverhalten der gewickelten Bauteile in der numerischen Simulation über den elastischen Bereich hin abzubilden, stehen heute unterschiedliche Materialmodellansätze zur Verfügung. Sie können nach Art des verwendeten Versagenskriteriums eingeteilt werden. Spannungsbasierte Modelle wie *Tsai-Wu* [4], *Chang-Chang* [5] und *Hashin* [6] nutzen richtungsabhängige Spannungen, um Versagen zu prognostizieren. Schädigungsmotivierte Modelle nach Puck [7, 8] und Pinho [9, 10] konzentrieren sich auf progressive Schädigung und ein Herabsetzen der Materialeigenschaften. Die spannungsbasierten Modellansätze benötigen aufgrund ihrer mathematischen Struktur eine

geringere Anzahl an experimentell zu ermittelnden Parametern als die anderen Modellansätze. Dies macht sie für Anwendungsfälle interessant, in welchen eine begrenzte Anzahl an verschiedenen Experimenten durchgeführt werden kann. Zentrale Herausforderungen bestehen in der Bestimmung geeigneter Wickelprozessparameter und in der Übertragung experimenteller Kennwerte in robuste und nachvollziehbar kalibrierte Materialkarten für die numerische Simulation. Vor diesem Hintergrund stellt der vorliegende Beitrag eine methodisch strukturierte Vorgehensweise zur Quantifizierung des Einflusses der Wickelprozessparameter auf die Werkstoffeigenschaften und zur Entwicklung einer Materialkarte für umfangsgewickelte CFK-Strukturen vor.

## Methodik

*Statistische Versuchsplanung und Probenherstellung.* Die Herstellung der CFK-Rohrprofile erfolgt durch das Umfangswickelverfahren (Abbildung 1). Hierbei wird die Endlosfaser von einer Spule abgewickelt und durch verschiedene Umlenkrollen geführt, wodurch eine definierte Faservorspannung erzeugt werden kann. Über ein Harzdosierungssystem wird die Endlosfaser mit einem definierten Volumenstrom aus Epoxidharz getränkt und mithilfe einer gesteuerten Translationsbewegung des Fadenablegers auf die rotierende Welle in einem definierten Wickelwinkel geführt. Die Kinematik der eingesetzten Wickelmaschine wird über eine speicherprogrammierbare Steuerung umgesetzt. Die dabei durch den Benutzer im Wesentlichen beeinflussbaren Wickelparameter sind die Harzdosierung, welche indirekt durch die Wickelgeschwindigkeit gesteuert wird, und das verwendete Harzsystem. Sowohl der Fasertyp als auch der Wickelwinkel bleiben unverändert.

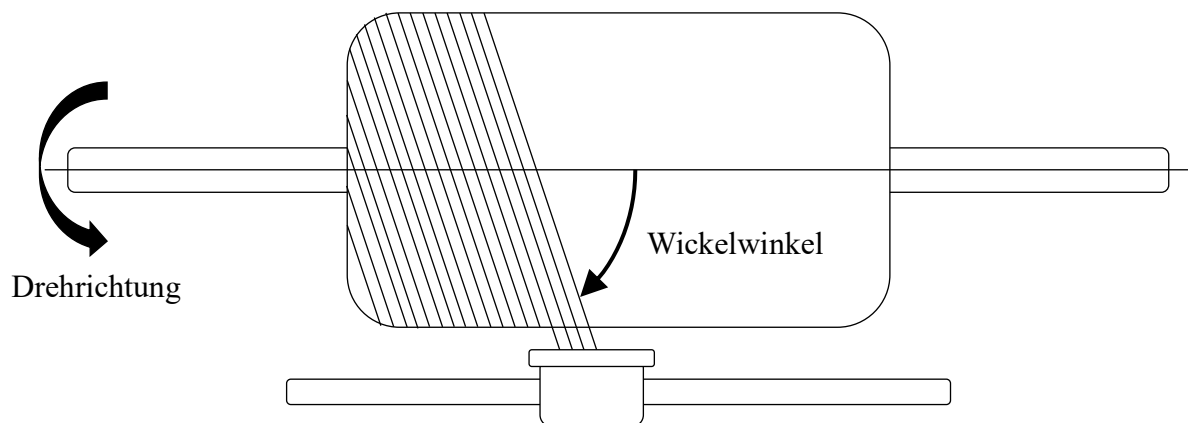


Abbildung 1: Schematische Darstellung des Umfangswickelverfahrens, nach [11]

Zur Analyse des Einflusses des Wickelwinkels auf den Faservolumengehalt, die Steifigkeit und die Festigkeit der CFK-Rohrprofile wird ein faktorieller Versuchsplan mit zwei Faktoren und jeweils drei Stufen erstellt. Die Faktoren sind das eingesetzte Harzsystem sowie die Harzdosierungsmenge. Sie werden in die Stufen *A*, *B* und *C* sowie *Hoch*, *Mitte* und *Niedrig* eingeteilt. Der Versuchsplan führt zu neun unterschiedlichen Wickelparameterkombinationen. Jede Kombination wird fünfmal wiederholt. Die Herstellung der Proben erfolgt in Chargen, welche durch die Länge der rotierenden Welle begrenzt sind. Von den Ringproben für den Ringzugversuch können pro Charge fünf Proben hergestellt werden. Bei den Rohrproben für den Rohrdruckversuch mit geringerem Durchmesser, aber größerer Länge können drei Proben pro Charge gefertigt werden. Die Steuerung der Wickelmaschine sowie die gute Austauschbarkeit des Harzsystems ermöglichen einen nahezu randomisierten Versuchsplan.

Zunächst werden die Rohrprofile nach der Wicklung und Aushärtung von der Welle gelöst. Danach werden die einzelnen Proben vom Rohrprofil abgestochen. Alle Proben unterlaufen einem Plandrehen der gewickelten Oberfläche. Anhand ihrer Position auf der Stahlwelle und anhand ihrer Charge werden die Proben kodiert (Beispiel: *C001-1* für die erste Charge und die

Position 1). Außerdem werden die Ringproben im Bereich der Sollbruchstelle mit einer beidseitigen Kerbung versehen, welche zerspanend ausgeführt wird.

*Experimentelle Durchführung.* In Anlehnung an *ASTM D2290* [12] werden Ringzugversuche zur Charakterisierung des mechanischen Strukturverhaltens unter Zugbelastung in Faserlängsrichtung initiiert. Die Versuche werden an einer Universalprüfmaschine des Typs *Zwick Z250* durchgeführt. Die Ringzugproben werden in eine versuchsspezifische, mehrteilige Probenaufnahme in der Universalprüfmaschine eingespannt. Neben der Kraft- und Traversenverschiebungsmessung durch die Maschine erfolgt zusätzlich eine optische Dehnungsmessung nach dem Prinzip der digitalen Bildkorrelation (DIC). Das dafür eingesetzte Messsystem ist vom Typ *GOM ARAMIS 12 M Adjustable*. Als Messsoftware wird *ARAMIS Professional 2020* [13] verwendet. Die DIC ermöglicht die vollflächige Dehnungsmessung an der Probenoberfläche anhand der zeitlichen Erfassung eines stochastischen, kontrastreichen Musters. An der mehrteiligen Probenaufnahme selbst werden Referenzmarken verklebt, um die Relativbewegungen der Aufnahmesegmente während der Versuchsdurchführung erfassen zu können. Die zerstörende Prüfung erfolgt mit einer konstanten Verfahrgeschwindigkeit der Traverse von 1 mm/min. Die Kraft- und Wegsignale (absolute Traversenposition) zeichnet die Software *testXpert III* [14] der Universalprüfmaschine mit einer Aufnahmefrequenz von 10 Hz auf, während die DIC mit einer Aufnahmefrequenz von 1 Hz Bilddaten erfasst. Das Signal der Kraftmessdose in der Universalprüfmaschine wird über eine analoge 0-10 V Gleichstromschnittstelle mit dem Testing Controller des Messsystems verbunden, sodass eine zeitsynchrone Erfassung der Dehnungen und Verschiebungen sowie der Kräfte erfolgt. Abbildung 2 zeigt einen Ausschnitt der Messsoftware im Anschluss an eine Messung des Dehnungsfelds mit DIC. In beiden Teilabbildungen a) und b) wird dieselbe Probe zu unterschiedlichen Zeitpunkten gezeigt. Zu erkennen ist das charakteristische Schadensbild, der jeweilig erfasste Kraftmesswert und das stochastische Muster an der Probenoberfläche.

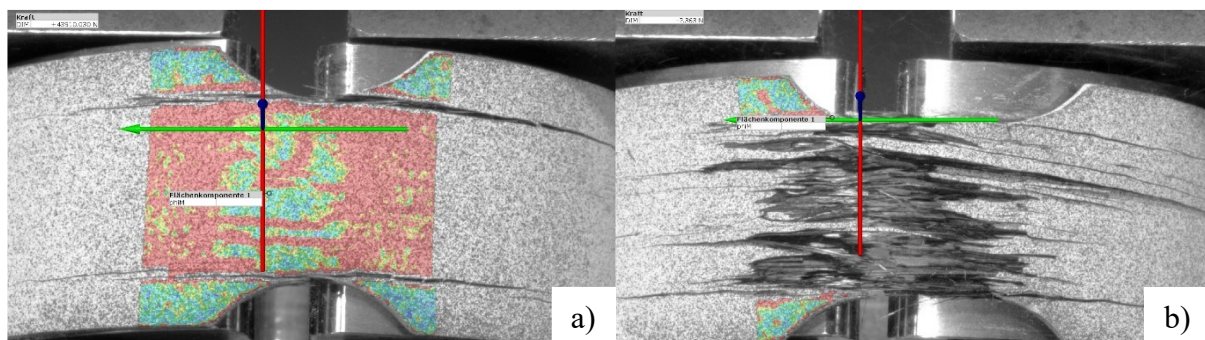


Abbildung 2: Im Ringzugversuch beobachtete Versagensbilder während der DIC Messung. a): Aufbrechen der Matrix und Abscheren der Außenringe. b): Spröder Faserbruch im verbleibenden Restquerschnitt.

Nach Abschluss der Messung werden die erfassten Verzerrungen in die Komponenten des wahren Dehnungstensors sowie die Haupt- und Nebenformänderung umgewandelt. Sowohl das Kraftsignal als auch die Dehnungskomponenten werden im Anschluss in das offene, semistrukturierte Dateiformat *.xml* [15] exportiert. Die Stufendaten enthalten die Facetten der Flächenkomponente des stochastischen Musters, die wahren Dehnungen sowie das Kraftsignal mit dem Zeitstempel der Stufendaten.

*Dehnungsfeldanalyse.* Im Rahmen der Dehnungsfeldanalyse wird der zeitliche Dehnungsverlauf im Bereich der Sollbruchstelle an der Ringprobenoberfläche ermittelt. Dieses ortsabhängige Zeitsignal wird mit dem Dehnungsverlauf in der numerischen Simulation verglichen und für die Kalibrierung der Materialkarte des Simulationsmodells genutzt. Die Materialhauptachse fällt, unter Berücksichtigung der Abweichung durch den Wickelwinkel,

mit der Umfangsrichtung des zylindrischen Probenkoordinatensystems zusammen. Die zuvor ermittelten Dehnungen werden daher aus einem kartesischen in ein zylindrisches Koordinatensystem transformiert. Für die Transformation der Koordinaten und Dehnungen wird eine Auswerteroutine in der Open Source Software *Paraview Version 5.12* des Unternehmens *Kitware Inc.* [16] realisiert. Über eine Best-Fit Ausrichtung der Messpunkte und des digitalen dreidimensionalen (3D) Modells der Ringprobe werden die Zylinderkoordinaten des Koordinatensystemursprungs und die Zylinderachse bestimmt. Die Vorgehensweise wird dafür zunächst händisch in der graphischen Benutzeroberfläche von *Paraview* durchgeführt und anschließend durch eine *Python* Programmierschnittstelle [17] in ein Skript überführt und automatisiert.

In einem ersten Schritt erfolgt die Konvertierung der Messdaten aus der *.xml* Datei in das Format *UnstructuredGrid (.vtu)* des *Visualization Toolkits (VTK)* [18]. In diesem Format werden die Facetten aus der DIC als unstrukturierte Gitter, bestehend aus Zellen und Punkten, repräsentiert. Analog dazu können die Dehnungskomponenten in Punkte- oder Zellarrays geschrieben werden. Diese Formatkonvertierung wird für den Referenzzustand durchgeführt und im Anschluss in *Paraview* visualisiert. Ebenfalls wird das 3D Modell der Ringprobe im *.step* Format eingelesen. Die Ausrichtung beider Komponenten fällt aufgrund der unterschiedlichen Koordinatensysteme nicht zusammen. In *Paraview* wird daher zunächst eine manuelle Rotation und Translation des 3D Modells durchgeführt, sodass es eine ähnliche grobe Vorausrichtung wie die Zellen des unstrukturierten Gitters aufweist. Im Anschluss wird das 3D Modell mithilfe des *Clip-Filters* in *Paraview* in seiner Größe auf den gemessenen Bereich zugeschnitten. Dies ist Grundvoraussetzung für eine Best-Fit-Ausrichtung zwischen 3D Modell und Messdaten. Mithilfe des im *VTK*-Modul enthaltenen *Iterative Closest Point (ICP)*-Algorithmus [19, 20] wird die grobe Vorausrichtung des 3D Modells in eine Best-Fit-Ausrichtung zwischen 3D Modell und Messdaten transformiert. Das Ergebnis dieses Algorithmus ist eine vollständige Transformationsmatrix der Größe 4x4. Diesen Zustand zeigt die Abbildung 3 a).

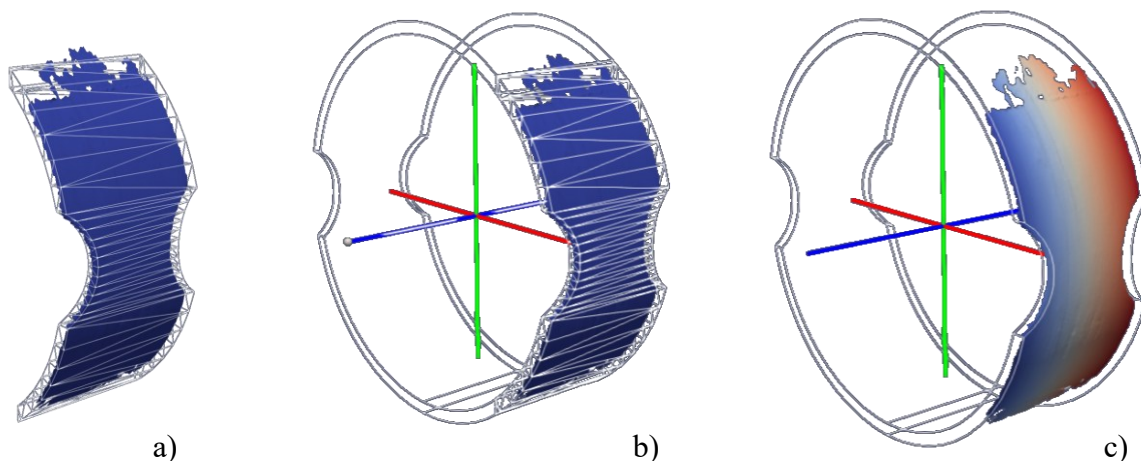


Abbildung 3: a): Best-Fit Ausrichtung zwischen 3D Modell und DIC-Messdaten in *Paraview*. b): Ursprung und Hauptachsen des Zylinderkoordinatensystems nach der Hauptkomponentenanalyse. c): Axiale Zylinderkoordinate als Datenarray mit Falschfarbendarstellung.

Das ursprünglich in *Paraview* importierte 3D Modell kann nun mithilfe der Transformationsfilter unter Angabe der im *ICP*-Algorithmus erzeugten Transformationsmatrix neupositioniert werden. Auf Basis dieser Ausrichtung kann mit einer Hauptkomponentenanalyse der Ursprung und die Zylinderachse des Zylinderkoordinatensystems numerisch ermittelt werden. Das Ergebnis der Hauptkomponentenanalyse ist in der Abbildung 3 b) zu erkennen. Nachdem die

Ursprungskoordinaten und die Hauptachsen des 3D Modells ermittelt worden sind, wird eine Koordinatentransformation an den Messdaten durchgeführt. Die Abbildung 3 c) zeigt diesen Zustand, in welchem die Punktwolke die axiale Zylinderkoordinate in Falschfarben abgebildet sind. Danach werden die Komponenten des wahren Dehnungstensors ebenfalls in Zylinderkoordinaten transformiert. Die verarbeiteten Daten liegen als *pandas.DataFrame*-Objekte [21] vor und werden mithilfe der *Python*-Bibliothek *joblib* [22] gesichert. Für die Visualisierung der verarbeiteten Daten werden sie in *Paraview*-kompatiblen Dateiformaten gespeichert.

Zur Reduktion von Rauschen und Einflüssen aus Inhomogenitäten an der Ringprobenoberfläche werden die Dehnungswerte anschließend über einen definierten Bereich räumlich und zeitlich gefiltert. Die Auswertung der Dehnungen erfolgt nur im Bereich der Sollbruchstelle. Dafür werden die Datenpunkte anhand ihrer Zylinderkoordinaten  $\phi$  und  $h$  selektiert. Über den selektierten Bereich werden anschließend komponentenweise der Mittelwert, die Standardabweichung und der Median pro Zeitpunkt (Stufe) bestimmt und als *.xml* Datei mit Metadaten gesichert.

*Mikrostrukturanalyse.* Zu jeder Wickelparameterkombination wird eine Ringprobe zur Herstellung eines Schliffbilds bereitgestellt. Dafür wird der Ring eingespannt und ein circa 20 mm x 10 mm x 2 mm (Länge, Breite, Dicke) großes Ringsegment aus den dafür bereitgestellten gewickelten Proben mit einer Trennmaschine des Typs *ATM BRILLANT 201* herausgetrennt. Die Ringsegmente werden mit der Faserquerschnittsfläche zur Draufsicht in der Zweikomponenten Einbettmasse des Typs *Demotec 35* platziert. Nach der Aushärtung der Einbettmasse erfolgt ein iteratives Schleifen mit Schleifblättern der Körnung P120 für ca. 60 Sekunden, P320 für ca. 60 Sekunden, P600 für ca. 90 Sekunden, P1200 für ca. 90 Sekunden und P2500 für ca. 90 Sekunden. Ein Polieren der Schiffe ist ebenfalls getestet worden, führt jedoch zu störenden Riefen unter dem Mikroskop. Die Bilderfassung erfolgt anschließend mit einem Mikroskop des Typs *Leica DM2700M* und einer Mikroskopkamera des Typs *Leica Flexacam C3*. Die Bilder des Querschnitts werden bei zehnfacher Vergrößerung mit einem Objektiv des Typs *HC PL FLUOTAR 10x* erfasst. Dabei wird bei manueller Steuerung der x-y-Achsen der gesamte Querschnitt des Ringsegments gerastert. Die Schärfe wird manuell mit der z-Achse am Mikroskop eingestellt. Für jeden Querschliff werden circa 60 bis 80 Bilder unkomprimiert im Graustufenformat gespeichert, welche eine Größe von  $1920 \times 1080$  Pixeln und eine Farbtiefe von 8 Bit pro Pixel aufweisen. Damit ist die Abbildung von 256 Grauwertstufen möglich. Die hohe Anzahl der Bilder schließt eine manuelle Ermittlung des Faservolumenanteils aus. Für jedes Bild soll der Faser-, der Matrix- und der Luftanteil bestimmt werden. Da es sich hierbei um zweidimensionale Aufnahmen handelt, kann hier nicht von einem Volumenanteil gesprochen werden. Außerdem liegen die Fasern je Lage in einem Wickelwinkel von  $\pm 1^\circ$  versetzt. Eine Abweichung der Flächenanteile vom Volumenanteil ist daher grundsätzlich zu erwarten. Um die Auswertung der Bilder reproduzierbar und teilautomatisiert durchführen zu können, wird ein *Python* basiertes Tool zur Objektsegmentierung mit der *Python*-Bibliothek von *OpenCV* [23] erstellt. Dabei durchläuft jedes Bild die Schritte *Gauß*-Filter [24] und *Contrast Limited Adaptive Histogram Equalization (CLAHE)*-Filter [25]. Der *Gauß*-Filter führt zu einem Weichzeichnen der Bilder, in dem  $3 \times 3$ -Pixelsegmente hinsichtlich ihres Grauwerts gemittelt werden. Der *CLAHE*-Filter dagegen erhöht den Kontrast und führt zu einer Scharfzeichnung des Bilds. Der *Gauß*-Filter versucht die zu starke Scharfzeichnung zu verhindern. Abbildung 4 a) zeigt ein Schliffbild nach Anwendung der beiden Filter.

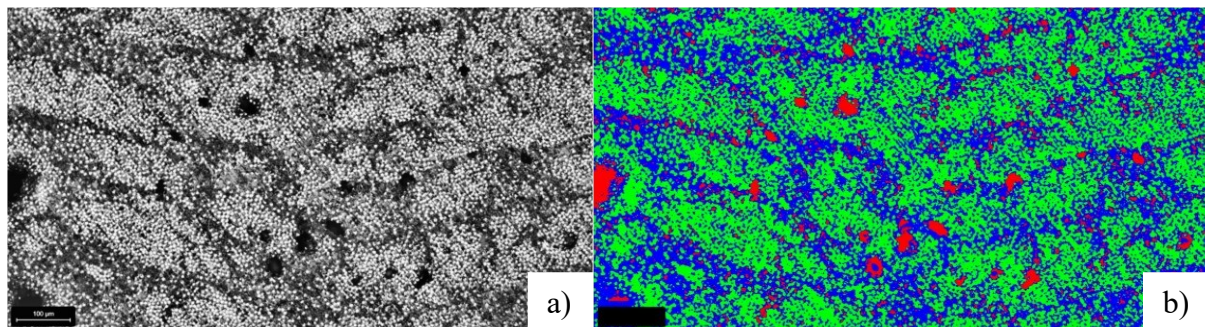


Abbildung 4: Analyse der Mikrostruktur der CFK-Ringsegmente mit *OpenCV*.  
 a): Schlibbild nach Anwendung des *CLAHE*-Filters. b): Abgeschlossene Segmentierung und Falschfarbendarstellung der segmentierten Pixelmengen.

Dann werden über einen Grauwert-Schwellwert-Filter die Faserpixel von der Pixelmenge des Gesamtbilds entnommen und der Pixelmenge *Faser (Fiber)* zugeordnet. Ein weiterer Grauwert-Schwellwertfilter wird bei der reduzierten Pixelmenge des Gesamtbilds für die Bestimmung der Pixelmenge *Lufteneinschluss (Void)* angewendet. Die verbleibenden Bildpixel werden der Pixelmenge *Matrix* zugeordnet. Die Segmentierung in die Pixelmengen *Fiber*, *Void* und *Matrix* wird für jedes Bild in einem Falschfarbenbild visualisiert und kann durch manuelle Polygonzuweisungen bei Bedarf angepasst werden. In Abbildung 4 b) ist die Segmentierung exemplarisch für ein Schlibbild gezeigt. Außerdem können über diese Funktionalität Bereiche von der Segmentierung ausgeschlossen werden. Dies wird für die Maßstabsangabe (vgl. Abbildung 4a) und b) unten links im Bild) und für Bilder, welche die Einbettmasse zeigen, durchgeführt. Die Segmentierung und die dafür verwendeten Parameter bzw. Schwellwerte werden nebst der Pixelmasken in einer *.xml* Datei semistrukturiert gespeichert, sodass die Schritte der Bildanalyse jederzeit nachvollzogen werden können. Die Einzelergebnisse werden nach dem arithmetischen Mittel und der Standardabweichung zusammengefasst und in die Versuchsmatrix eingetragen.

*Numerische Simulation.* Die experimentelle Versuchsdurchführung wird in einem Simulationsmodell mit expliziter Zeitintegration nachgebildet und mit der Software *LS-DYNA* in der Version *ls-dyna\_mpp\_d\_R16\_0\_0\_x64\_centos79\_ifort190\_avx2\_intelmpi-2018* [26] auf dem *OMNI* Rechencluster der Universität Siegen berechnet. Für die Erstellung des geometrischen Modells finden nur die Ringprobe und die Halbscheiben der Probenaufnahme Verwendung. Alle anderen Bauteile werden zur Verringerung der Freiheitsgrade und der Verkürzung der Rechenzeit nicht modelliert. Die räumliche Diskretisierung der Bauteile in finite Elemente erfolgt in der Software *LS-PrePost* [27]. Die Halbschalen werden vollständig mit Hexaedern vernetzt. Dabei variiert die charakteristische Elementkantenlänge zwischen 0,37 mm und 0,85 mm. Die Ringprobe besteht aus dreizehn Lagen, welche der Anzahl der Wicklungen der realen Probe entsprechen. Das Netz wird zunächst als Schalenkörper erstellt und anschließend hieraus mit Hilfe eines Offsets die einzelnen Lagen als Volumenkörper mit einer Dicke von jeweils 0,167 mm versetzt. In dieser Folge entstehen sowohl Hexaeder als auch Pentaeder (Abbildung 5a)). Der Verbund der einzelnen Körper wird dadurch erreicht, dass die Knoten an den anliegenden einzelnen Lagen verschmolzen sind. Auf Kontakte zwischen den einzelnen Lagen wird deshalb verzichtet. Die Interaktion zwischen den beiden Halbschalen und der untersten Lage der Ringzugprobe wird jeweils durch einen Kontakt des Typs *\*CONTACT\_AUTOMATIC\_SURFACE\_TO\_SURFACE* realisiert.

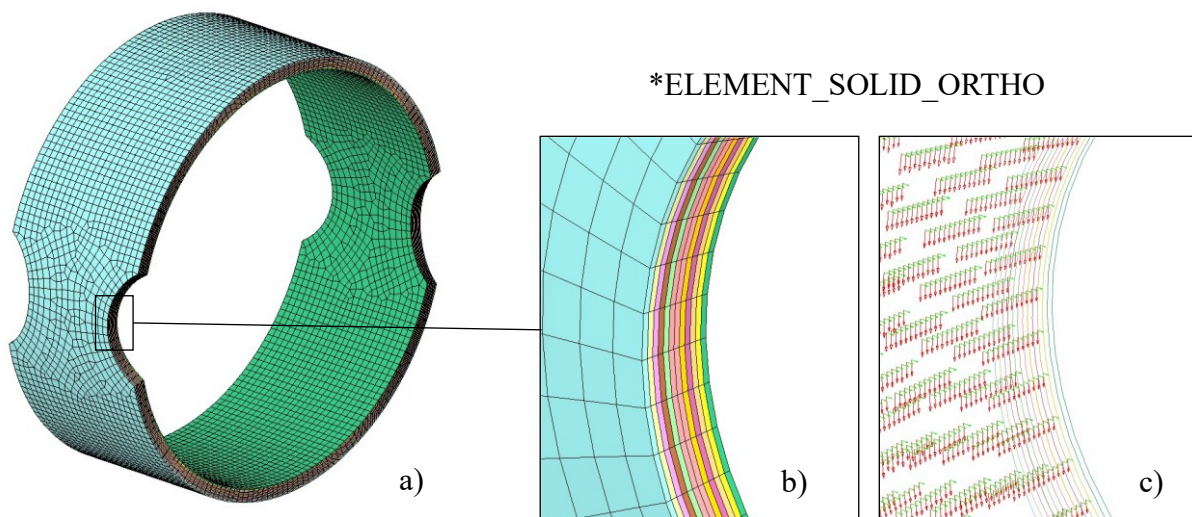


Abbildung 5: Diskretisierung der Ringprobe in *LS-PrePost* als Volumenkörper.  
a): Übersichtsdarstellung der Ringprobe. b): Detailausschnitt einer Kerbe mit Ansicht der Einzellagen. c): Ausrichtung des Materialkoordinatensystems.

Eine Halbscheibe wird als feste Einspannung gelagert, während die andere Halbscheibe Translationen in Lastrichtung erlaubt. Alle anderen Freiheitsgrade werden gesperrt. In der Simulation wird die Zerstörung des Rings infolge einer geschwindigkeitsinduzierten Verschiebung umgesetzt. Sie wird über eine zeitabhängige Lastkurve mithilfe des Keywords *\*BOUNDARY\_PRESCRIBED\_MOTION\_RIGID* erzeugt. Das gewählte Einheitensystem ist *mm-ms-kg*.

Die Halbscheiben aus Baustahl werden mit dem Keyword *\*MAT\_RIGID* als starre Körper definiert. Im Gegensatz dazu sind die einzelnen Lagen der Ringprobe als deformierbare Körper modelliert. Ihr richtungsabhängiges Materialverhalten wird mithilfe des schädigungs-basierten Materialmodells *\*MAT\_ENHANCED\_COMPOSITE\_DAMAGE* (*\*MAT\_054*) abgebildet. Dabei handelt es sich in der verwendeten *LS-DYNA* Version um ein Materialmodell für Verbundwerkstoffe, dessen elastisches Materialverhalten orthotrop beschrieben werden kann. Dies erfordert eine Ausrichtung des Materialkoordinatensystems der finiten Elemente entlang der Faserlängsrichtung, wie in Abbildung 5 c) gezeigt. Hierfür wird in *LS-PrePost* mithilfe des Keywords *\*ELEMENT\_SOLID\_ORTHO* elementweise die Ausrichtung vorgegeben. Die Nachgiebigkeitsmatrix wird durch neun elastische Materialkennwerte, jeweils drei Elastizitätsmoduln, Querkontraktionszahlen und Schubmoduln definiert. In *\*MAT\_054* sind das *Chang-Chang*- und das *Tsai-Wu*-Versagenskriterium für das Versagen der Matrix des Faserverbands implementiert. Als versagensrelevante Parameter werden die Bruchspannungen in Zug- und Druckbelastung in Faserlängsrichtung und senkrecht zur Faser angegeben. Zusätzlich ist die Angabe der Bruchspannung unter Schublast erforderlich.

Die Materialkarte von *\*MAT\_054* ist in Abbildung 6 gezeigt. Sie enthält neben den neun elastischen Kennwerten (in gelb) fünf Bruchspannungen (in grün) und fünf dehnungsbezogene Versagensparameter. Die Bruchspannungen stellen in der Materialkarte den Grenzwert dar, ab wann keine weitere Spannung in der Simulation aufgebaut wird. Die dehnungsbasierten Parameter dagegen steuern, wann ein Integrationspunkt versagt. Versagen alle Integrationspunkte, führt dies zum Löschen des jeweiligen Elements. Um das in Abbildung 1 gezeigte Versagensbild in der Simulation abzubilden, werden die spannungs- und dehnungsbasierten Parameter der Materialkarte *\*MAT\_054* systematisch unter Anwendung der Software *LS-OPT* [28] variiert. Die Untersuchungen in *LS-OPT* sind zweigeteilt. In einem ersten Schritt wird eine Sensitivitätsanalyse einzelner Parameter der Materialkarte *\*MAT\_054* durchgeführt. Im zweiten Schritt werden die Erkenntnisse aus der Sensitivitätsanalyse

verwendet, um zielgerichtet die Parameter der Materialkarte iterativ so anzupassen, dass der Abstand zwischen experimenteller Kraft-Weg-Kurve und numerischer Kraft-Weg-Kurve minimal wird. In diesem Beitrag wird der erste Schritt vorgestellt.

| *MAT_ENHANCED_COMPOSITE_DAMAGE |      |      |      |       |        |        |        |
|--------------------------------|------|------|------|-------|--------|--------|--------|
| MID                            | RO   | EA   | EB   | EC    | PRBA   | PRCA   | PRCB   |
| GAB                            | GBC  | GCA  | Kf   | AOPT  |        |        |        |
| XP                             | YP   | ZP   | A1   | A2    | A3     | MANGLE |        |
| V1                             | V2   | V3   | D1   | D2    | D3     | DFAILM | DFAILS |
| TFAIL                          | ALPH | SOFT | FBRT | YCFAC | DFAILT | DFAILC | EFS    |
| XC                             | XT   | YC   | YT   | SC    | CRIT   | BETA   |        |

Abbildung 6: Materialkarte \*MAT\_054

Dafür wird zunächst die Materialkarte der Ringprobe parametrisiert und ein Versuchsplan in *LS-OPT* entwickelt, um die Sensitivitäten der einzelnen Parameter auf die Ausbildung der Kraft-Weg-Kurve bzw. auf die Maximalkraft in der Simulation zu ermitteln. Es wurden insgesamt acht Parameter für die Sensitivitätsstudie ausgewählt und in einem *D-optimalen* Versuchsplan variiert. Dies beinhaltet die richtungsabhängigen Bruchspannungen *XC*, *XT*, *YC*, *YT* und *SC*, welche einen direkten Einfluss auf die zuvor dargestellten Versagenskriterien nehmen. Außerdem werden die Dehnungsgrenzwerte *DFAILS*, *DFAILT* und *DFAILM* in vorgegebenen Intervallgrenzen variiert, um ihren Einfluss auf die Ausbildung der Kraft-Weg-Kurven zu analysieren. Die Parameterober- und Parameteruntergrenzen sind in Tabelle 1 aufgeführt. Nach Durchführung der Simulationen führt *LS-OPT* eine Varianzanalyse der bereitgestellten Designpunkte und Simulationsergebnisse durch.

Tabelle 1: Untersucher Parameterraum in der Sensitivitätsanalyse der Materialkarte \*MAT\_054 mit der Software *LS-OPT*.

| Parameter | Untere Grenze | Obere Grenze |
|-----------|---------------|--------------|
| DFAILT    | 0,01          | 0,12         |
| DFAILM    | 0,01          | 0,1          |
| DFAILS    | 0,01          | 0,1          |
| XT [GPa]  | 0,84          | 0,9          |
| XC [GPa]  | 0,42          | 0,72         |
| YC [GPa]  | 0,084         | 0,225        |
| YT [GPa]  | 0,0168        | 0,072        |
| SC [GPa]  | 0,0084        | 0,09         |

## Ergebnisse

*Mechanische Eigenschaften.* Für die variierten Wickelparameter *Harzdosierung* und *Harzsystem* werden Ringzugversuche an einer Universalprüfmaschine durchgeführt. Jeder der einzelnen Versuche zeigt ein sprödes Versagensbild und einen linearen Kraft-Traversenweg-Verlauf mit einem ausgeprägten Setzverhalten, welches auf die Steifigkeit der Versuchsvorrichtung zurückführbar sein kann. Die Unterschiede zwischen den Wickelparameterkombinationen zeigen sich in der Abbildung 8 deutlich. Die Wahl des Harzsystems zeigt einen markanten Einfluss auf die erzielbare Bruchkraft, insbesondere für eine mittlere Harzdosierung. Auffällig ist bei Harzsystem *A2* die geringe Streuung in den Einzelversuchen im Vergleich zu den beiden anderen Harzsystemen. Vor allem das Harzsystem *A3* weist eine hohe Streuung der Bruchkräfte bei einer mittleren Harzdosierung auf.

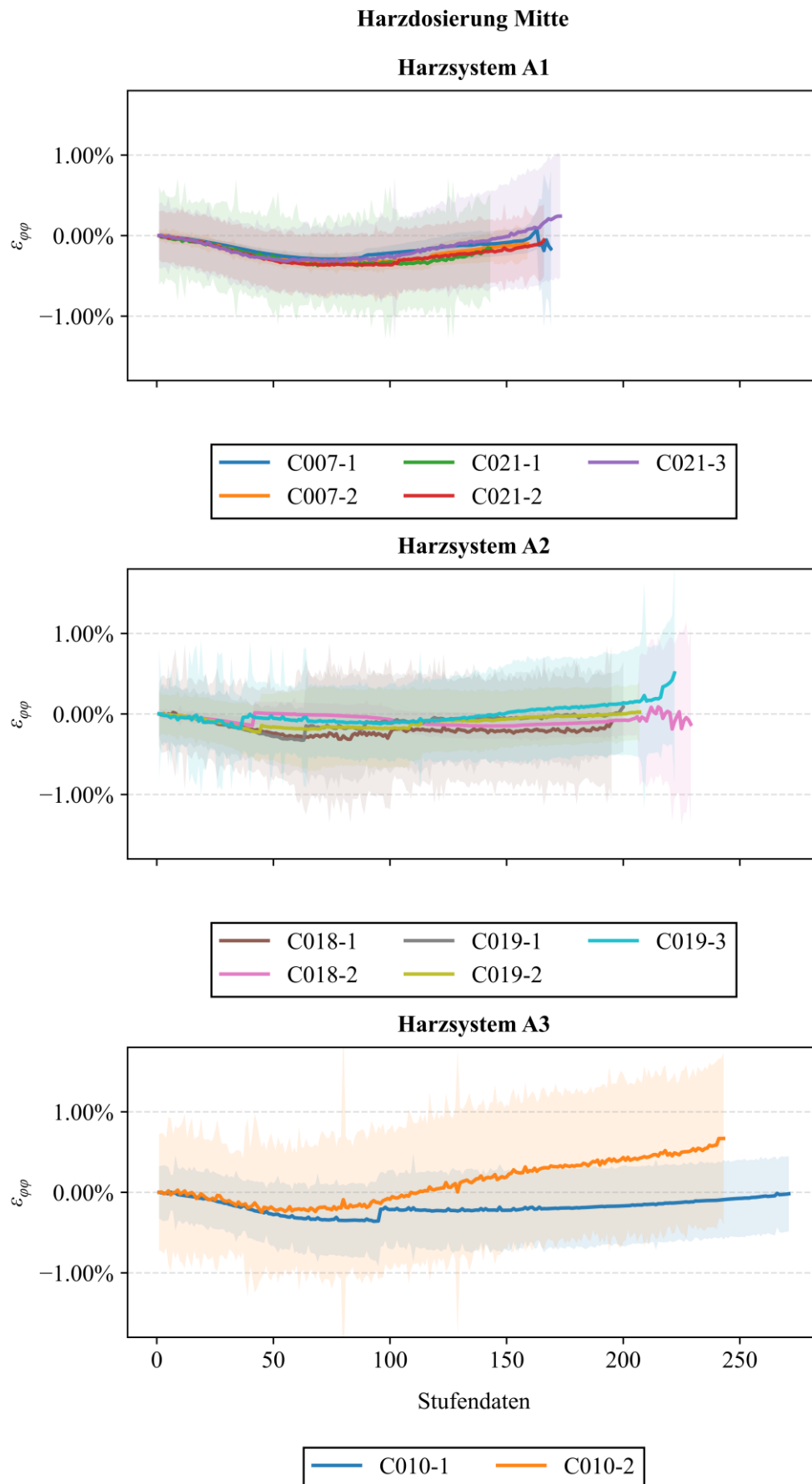


Abbildung 7: Umfangsdehnung  $\varepsilon_{\varphi\varphi}$  im Zylinderkoordinatensystem der Probengeometrie bei variiertem Harzsystem für die Harzdosierung *Mitte*.

Die mittleren Dehnungsverläufe der Einzelversuche sind in Abbildung 7 aufgeteilt nach den Harzsystemen abgebildet und zeigen die wahre Dehnung in Umfangsrichtung. Bei der Analyse der wahren Dehnungen, welche im Bereich der Sollbruchstelle pro Zeitschritt gemittelt wurden, lässt sich der Einfluss der Probengeometrie auf den Dehnungsverlauf beobachten. Zu Beginn des zerstörenden Versuchs findet ein Setzverhalten statt. Diesem folgt eine Ovalisierung der Ringgeometrie, welche in Abbildung 7 durch eine zunächst negativ steigende Dehnung beobachtet werden kann. Danach beginnt ein Riss (vgl. Abbildung 2a) der äußeren Ringe entlang der Matrix, welcher schließlich in einem Abscheren einer der Ringe mündet. Dieser zunehmende Riss führt zu einer Veränderung der Ovalisierung und führt kurz darauf zu einem spontanen Gewaltbruch der Fasern im Bereich der Sollbruchstelle (vgl. Abbildung 2b).

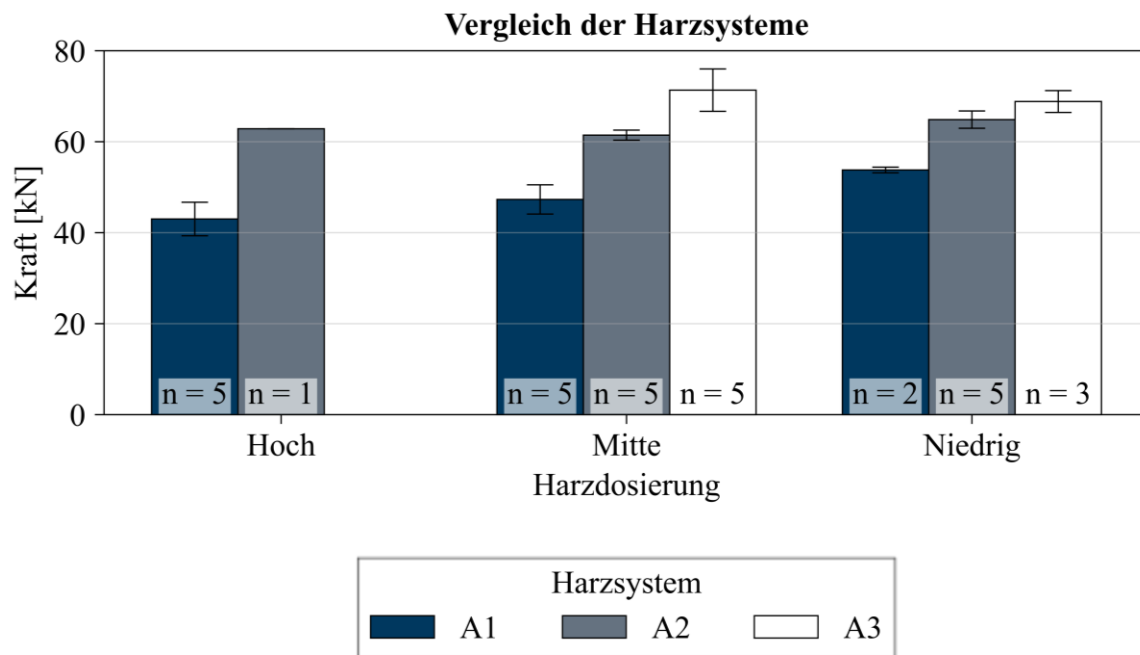


Abbildung 8: Einfluss der Wickelparameter *Harzdosierung* und *Harzsystem* auf die Maximalkraft im Ringzugversuch

**Mikrostrukturkennwerte.** Die Analyse der Mikrostruktur erfolgte auf Basis von Schliffbildern mithilfe einer automatisierten Bildsegmentierung, welche die Bildpixel in die Bereiche *Fiber*, *Matrix* und *Void* einteilte. Die Einteilung erfolgte anhand von Schwellwerten des Grauwerts der einzelnen Pixel. Die Wahl des Schwellenwerts für die Segmentierung der Faserbildpixel ist entscheidend für die Größe des Faserflächenanteils. Eine Unterschätzung des Grauwertintervalls führt zu einer systematischen Unterschätzung des Faserflächenanteils. Daher wurde in der Bildbearbeitungssoftware *Adobe Photoshop 2025* [29] zunächst eine einzelne Faser und ihre unmittelbare Umgebung auf die Grauwertverteilung hin untersucht. Die Abgrenzung war hierbei nicht fließend, sondern abrupt durch eine deutliche Veränderung des Grauwerts erkennbar. Der Einfluss des Schwellwerts der Faser auf die Segmentierung wird bereits bei Betrachtung der Abbildung 9 deutlich. In der Abbildung 9a) wurde ein Grauwertintervall von 190 bis 255 und in der Abbildung 9b) ein Grauwertintervall von 150 bis 255 für die Faser in der Segmentierung vorgegeben. Die Fasern sind hier in grün, die Matrix in blau und Lufteinschlüsse in rot markiert. In den oberen Bildbereichen sind vereinzelt in rot manuell erstellte Polygone zu erkennen.

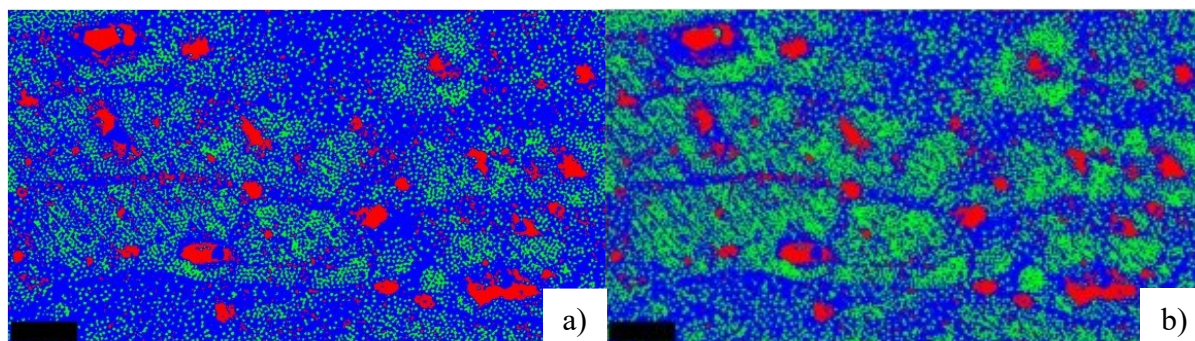


Abbildung 9: Einfluss der Grauwert-Schwellwertfiltereinstellung auf die Segmentierung der Pixel in die Mengen *Fiber*, *Matrix* und *Void*.  
a): Grauwertintervall der Faser [190, 255]. b): Grauwertintervall der Faser [150, 255].

Abbildung 10 zeigt die Auswertung der Flächenanteile für acht Schliffe für unterschiedliche Wickelparameterkombinationen aus *Harzdosierung* und *Harzsystem*. Bei dem *Harzsystem A1* führt eine größere *Harzdosierung* zu einer erkennbaren Vergrößerung des Matrixanteils im Schliffbild, wobei der Übergang von einer niedrigen zu einer mittleren Dosierung prägnanter als der Übergang von der mittleren zur hohen Dosierung ist. Dafür ist bei letzterem Übergang ein reduzierter Anteil an Lufteinschlüssen zu beobachten. Für das *Harzsystem A2* zeigt sich generell ein größerer Faseranteil als bei dem *Harzsystem A1*. Der Übergang von einer niedrigen zu einer mittleren Dosierung führt zu einer Vergrößerung des Matrixanteils. Eine weitere Vergrößerung der *Harzdosierung* äußerte sich im Schliffbild in einer Vergrößerung des Anteils der Lufteinschlüsse. Die Ergebnisse für das *Harzsystem A3* sind sich sehr ähnlich. Bei einer Vergrößerung der *Harzdosierung* ist hier eine Zunahme des Matrixanteils und eine Reduzierung des Anteils an Lufteneinschlüssen beobachtbar.

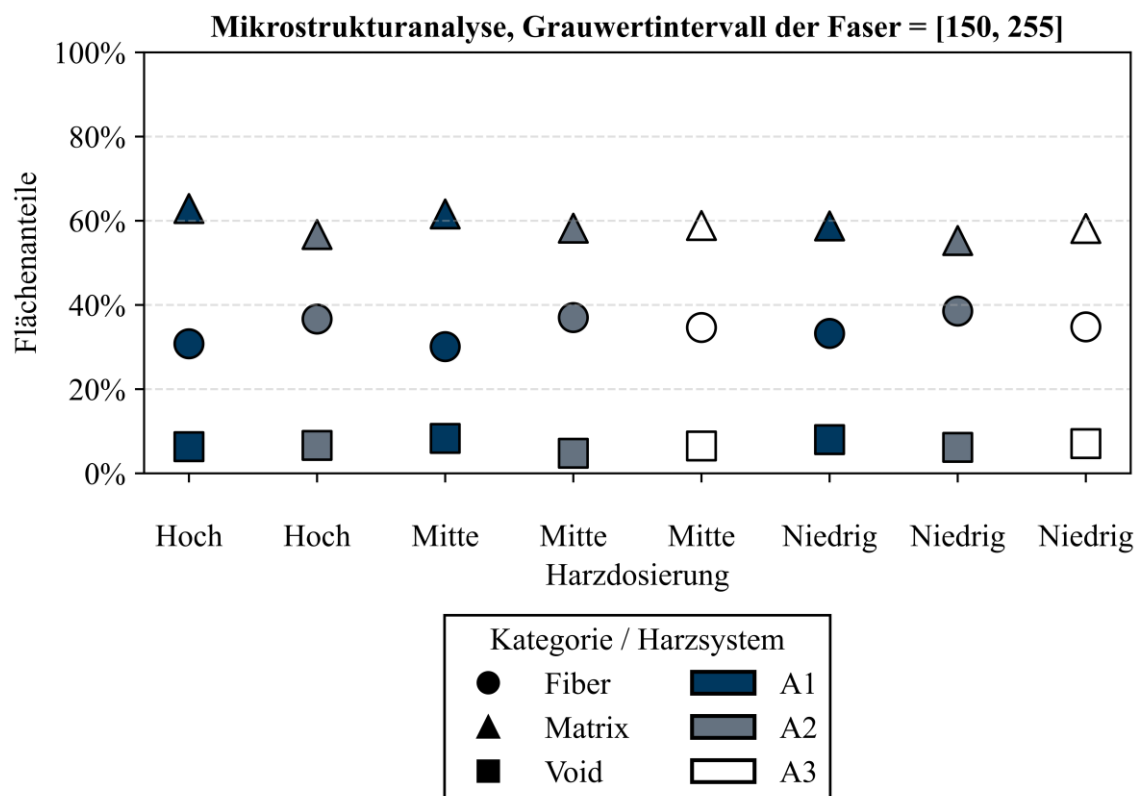


Abbildung 10: Einfluss der Wickelparameter Harzdosierung und Harzsystem auf die Ausbildung der Mikrostrukturanalyse bei einem Grauwertintervall der Faser von [150, 255].

*Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse.* Abbildungen 11 und 12 zeigen die Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse aus *LS-OPT*, in der 56 verschiedene Parameterkombinationen simuliert worden sind.

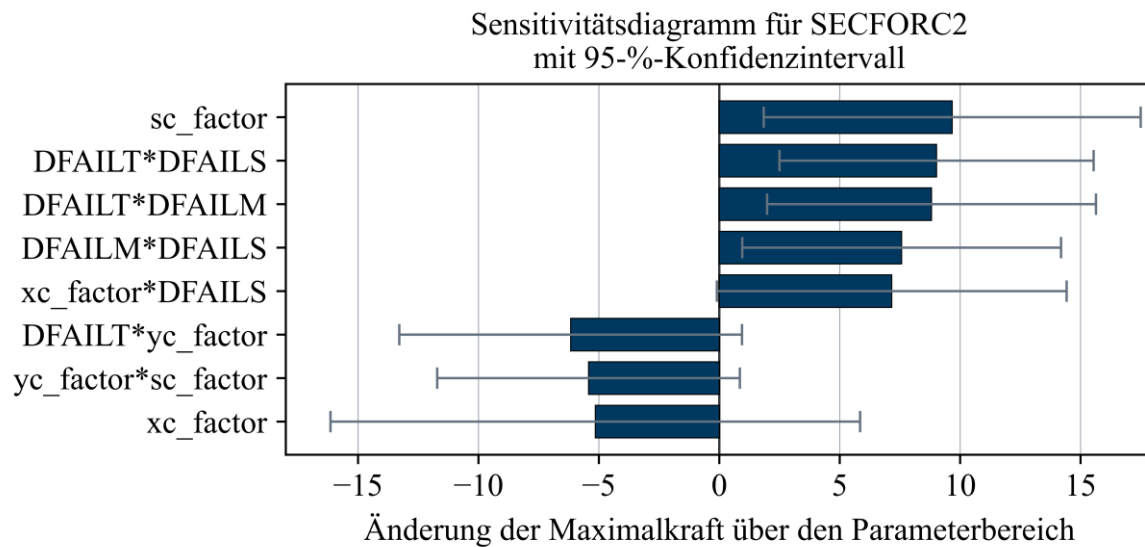


Abbildung 11: Einzelsensitivitäten sowie lineare Kombination der variierten Parameter.

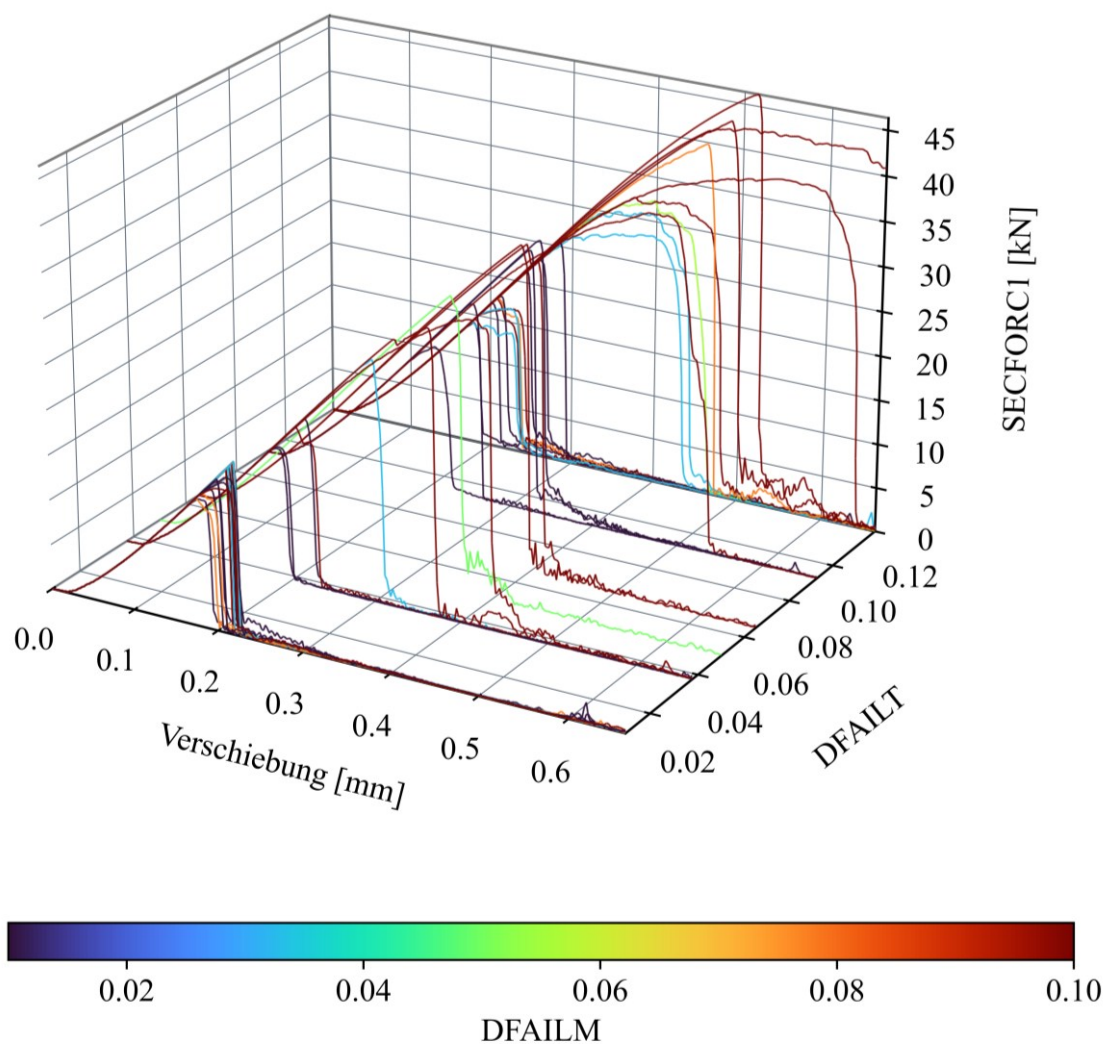


Abbildung 12: Sensitivität der Parameter *DFAILM* und *DFAILT* auf *SECFORC1*.

In Abbildung 11 wird die Einflussnahme der variierten Parameter auf die Maximalkraft *SECFORC2* in der Simulation in der Einheit Kilonewton auf der Abszisse aufgetragen. Anhand der Darstellung lassen sich für den Ringzugversuch wichtige Materialkartenparameter für den gegebenen Parameterraum der variierten Parameter identifizieren. Demnach zeigen die Parameterkombinationen aus *DFAILT\*DFAILS*, *DFAILT\*DFAILM*, *SC\_FACTOR* und *DFAILM\*DFAILS* die größte Einflussnahme auf die Maximalkraft *SECFORC2*. Die Einflussnahme der anderen Parameter, sowohl einzeln als auch in Kombination, werden als nicht signifikant bewertet und können in weitergehenden Analysen des Parameterraums als variierte Parameter vernachlässigt werden.

Die Kraft-Weg-Kurven werden in Abbildung 12 über den Parameterraum aufgetragen. Auf der Ordinate ist die Kraftreaktion *SECFORC1* in Abhängigkeit der Verschiebung dargestellt. Sie bezieht sich auf die Ebene des kleinsten Probenquerschnitts, welcher mithilfe des Keywords *\*DATABASE\_CROSS\_SECTION\_PLANE* definiert wurde. Die Applikate zeigt den Parameter *DFAILT* und die Farbdarstellung zeigt den Parameter *DFAILS*. Aus dieser Darstellung ist ersichtlich, dass für größere *DFAILT*- und größere *DFAILS*-Werte die Maximalkraft tendenziell größer wird, wie bereits im Sensitivitätsplot zu erkennen ist. Wird jedoch einer der beiden Parameter kleiner, sinkt ebenfalls die Maximalkraft.

### Fazit und Ausblick

In dem vorliegenden Beitrag wird eine durchgehende Methode zur Entwicklung von prozesssensitiven Materialkarten von CFK-Rohrstrukturen beginnend bei der statistischen Versuchsplanung der Prozessparameter, über die Versuchsdurchführung und die systematische Datenanalyse unter Einsatz diverser Open Source Software demonstriert. Die technischen Schritte zur Analyse der Mikrostruktur und des optisch gemessenen Dehnungsfelds in *OpenCV* und *Paraview* werden detailliert erläutert und Fallstricke aufgedeckt. Weiterhin zeigt der Beitrag, welche Sensitivitäten die Prozessparameter hinsichtlich der mechanischen Eigenschaften unter Zuglast in Faserlängsrichtung bei umfangsgewickelten CFK-Strukturen zeigen. Auf Basis der experimentell ermittelten Daten wird ein Simulationsmodell aufgebaut, welches in der Lage ist, das experimentell beobachtete Versagensbild in der Simulation abzubilden. Dieses Modell wird in diesem Beitrag dazu verwendet, um im Rahmen der Materialkartenkalibrierung die Sensitivität der Materialkartenparameter auf die Entwicklung der Kraftreaktion im simulativen Experiment zu demonstrieren. Ausgehend hiervon kann ein Optimierungsmodell aufgebaut werden, welches die Materialkartenparameter innerhalb eines vorgegebenen Parameterfensters unter Vergleich der gemessenen und simulierten Dehnungsverläufe und der Maximalkräfte iterativ anpasst.

### Danksagung

Dieses Vorhaben wurde im Rahmen des Zentralen Innovationsprogramms Mittelstand (ZIM) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages unter dem Förderkennzeichen KK5057117 gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autorinnen und Autoren.

### Literaturverzeichnis

- [1] C. Kaynak, E. Salim Erdiller, L. Parnas, and F. Senel, "Use of split-disk tests for the process parameters of filament wound epoxy composite tubes," *Polym. Test.*, vol. 24, no. 5, pp. 648–655, 2005, doi: 10.1016/j.polymertesting.2005.03.012.
- [2] F. Eggers, J. H. S. Almeida, C. B. Azevedo, and S. C. Amico, "Mechanical response of filament wound composite rings under tension and compression," *Polym. Test.*, vol. 78, 2019, doi: 10.1016/j.polymertesting.2019.105951.
- [3] I. A. Jones, V. Middleton, and M. J. Owen, "Roller-assisted variant of the split disc test for filament-wound composites," *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 27, no. 4, pp. 287–294, 1996.

- [4] S. W. Tsai and E. M. Wu, “A general theory of strength for anisotropic materials,” *J. Compos. Mater.*, vol. 5, no. 1, pp. 58–80, 1971, doi: 10.1177/002199837100500106.
- [5] F.-K. Chang and K.-Y. Chang, “A progressive damage model for laminated composites containing stress concentrations,” *J. Compos. Mater.*, vol. 21, no. 9, pp. 834–855, 1987, doi: 10.1177/002199838702100904.
- [6] Z. Hashin, “Failure criteria for unidirectional fiber composites,” *J. Appl. Mech.*, vol. 47, no. 2, pp. 329–334, 1980, doi: 10.1115/1.3153664.
- [7] A. Puck and H. Schürmann, “Failure analysis of FRP laminates by means of physically based phenomenological models,” *Compos. Sci. Technol.*, vol. 58, no. 7, pp. 1045–1067, 1998, doi: 10.1016/S0266-3538(96)00140-6.
- [8] A. Puck and H. Schürmann, “Failure analysis of FRP laminates by means of physically based phenomenological models,” *Compos. Sci. Technol.*, vol. 62, no. 12–13, pp. 1633–1662, 2002, doi: 10.1016/S0266-3538(01)00208-1.
- [9] S. T. Pinho, L. Iannucci, and P. Robinson, “Physically-based failure models and criteria for laminated fibre-reinforced composites with emphasis on fibre kinking: Part I: Development,” *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 37, no. 1, pp. 63–73, 2006, doi: 10.1016/j.compositesa.2005.04.016.
- [10] S. T. Pinho, L. Iannucci, and P. Robinson, “Physically based failure models and criteria for laminated fibre-reinforced composites with emphasis on fibre kinking. Part II: FE implementation,” *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 37, no. 5, pp. 766–777, 2006, doi: 10.1016/j.compositesa.2005.06.008.
- [11] AVK – Industrievereinigung Verstärkte Kunststoffe e. V., Ed., *Handbuch Faserverbundkunststoffe/Composites: Grundlagen, Verarbeitung, Anwendungen*, 4th ed. Wiesbaden, Germany: Springer Vieweg, 2014, doi: 10.1007/978-3-658-02755-1.
- [12] ASTM International, *ASTM D2290-25, Standard Test Method for Apparent Hoop Tensile Strength of Plastic or Reinforced Plastic Pipe*. West Conshohocken, PA, USA: ASTM International, 2025.
- [13] Carl Zeiss GOM Metrology GmbH, *ARAMIS Professional 2020*, software, Braunschweig, Germany, 2020.
- [14] ZwickRoell GmbH & Co. KG, *testXpert III*, software, Ulm, Germany.
- [15] T. Bray, J. Paoli, C. M. Sperberg-McQueen, E. Maler, and F. Yergeau, “Extensible Markup Language (XML) 1.0,” 5th ed., *W3C Recommendation*, 2008. [Online]. Available: <https://www.w3.org/TR/xml/>. Accessed: May 12, 2026.
- [16] Kitware Inc., *ParaView*, version 5.12.0, software, 2024. [Online]. Available: <https://www.paraview.org/>
- [17] Kitware Inc., “simple module,” *ParaView/Python 5.12.0 documentation*, 2024. [Online]. Available: <https://www.paraview.org/paraview-docs/v5.12.0/python/paraview.simple.html>. Accessed: May 12, 2026.
- [18] W. Schroeder, K. Martin, and B. Lorensen, *The Visualization Toolkit: An Object-Oriented Approach to 3D Graphics*, ed. 4.1. Kitware Inc., 2018.
- [19] P. J. Besl and N. D. McKay, “A method for registration of 3-D shapes,” *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, vol. 14, no. 2, pp. 239–256, 1992, doi: 10.1109/34.121791.
- [20] Kitware Inc., “*vtkIterativeClosestPointTransform Class Reference*,” *VTK Documentation*, 2026. [Online]. Available: <https://vtk.org/doc/nightly/html/classvtkIterativeClosestPointTransform.html>. Accessed: May 12, 2026.

- [21] W. McKinney, “Data structures for statistical computing in Python,” in Proc. 9th Python Sci. Conf. (SciPy 2010), 2010, doi: 10.25080/Majora-92bf1922-00a.
- [22] Joblib developers, “Joblib user manual,” 2026. [Online]. Available: <https://joblib.readthedocs.io/en/stable/index.html>. Accessed: May 12, 2026.
- [23] G. Bradski, “The OpenCV library,” Dr. Dobb’s J. Softw. Tools, 2000.
- [24] R. C. Gonzalez and R. E. Woods, Digital Image Processing, 4th global ed. New York, NY, USA: Pearson Education, 2018.
- [25] S. M. Pizer, E. P. Amburn, J. D. Austin, R. Cromartie, A. Geselowitz, T. Greer, et al., “Adaptive histogram equalization and its variations,” Comput. Vis. Graph. Image Process., vol. 39, no. 3, pp. 355–368, 1987, doi: 10.1016/S0734-189X(87)80186-X.
- [26] Ansys, Ansys LS-DYNA, version R16.0.0, software, Ansys, Inc., 2025.
- [27] Ansys, Ansys LS-PrePost, version 2026 R1, software, Ansys, Inc., 2025.
- [28] Livermore Software Technology Corporation, LS-OPT, version 7.0, software, Livermore Software Technology Corporation, 2020.
- [29] Adobe, Adobe Photoshop, version 26.9.0, software, Adobe Inc., 2025.

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages