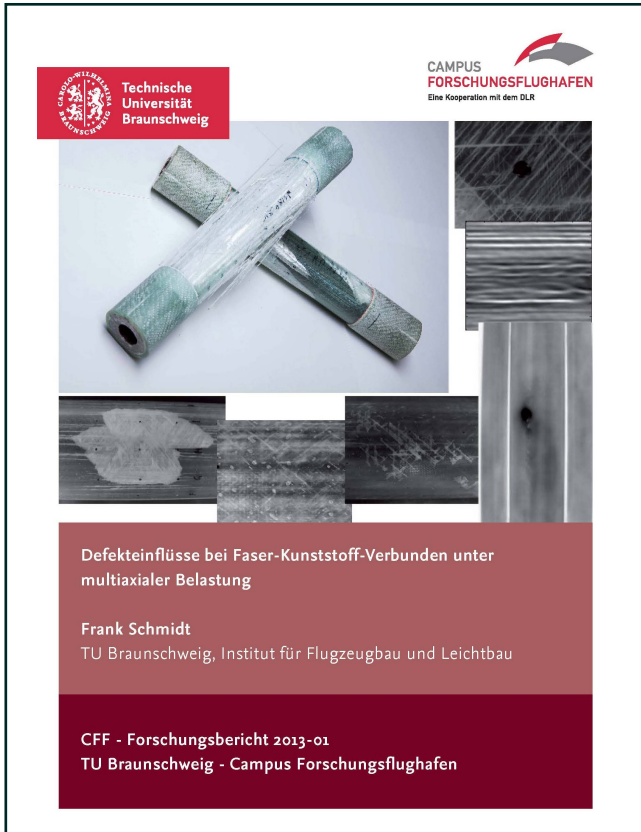




Frank Schmidt (Autor)  
**Defekteinflüsse bei Faser-Kunststoff-Verbunden  
unter multiaxialer Belastung**



<https://cuvillier.de/de/shop/publications/6319>

Copyright:  
Cuvillier Verlag, Inhaberin Annette Jentsch-Cuvillier, Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen,  
Germany  
Telefon: +49 (0)551 54724-0, E-Mail: [info@cuvillier.de](mailto:info@cuvillier.de), Website: <https://cuvillier.de>

# 1 Einleitung

Die zunehmende Nachfrage neuartiger Leichtbaustrukturen in den klassischen Einsatzgebieten, wie der Luft- und Raumfahrt oder der Windenergiebranche aber auch einer branchenübergreifenden Erschließung neuer Anwendungsgebiete, wie z.B. in der Automobilindustrie, erhöhen die Zahl maßgeschneiderter Strukturbauteile aus Faser-Kunststoff-Verbunden (FKV). So werden erstmals in der zivilen Luftfahrt die Boeing 787 als auch der Airbus A350 als Flugzeuge mit über 50 % Faserverbundbauteilen gefertigt [96, 147]. Die Windenergiebranche ist einer der größten wachsenden Märkte der Welt, bei immer höherer Effizienznachfrage und größeren Bauteilen aus Faser-Kunststoff-Verbunden [69]. Weiterentwicklungen spezieller Materialspezifikationen und Fertigungsverfahren bei Faser-Kunststoff-Verbunden führen zu Kostensenkungen und möglichen Einsatzgebieten bei Bauteilen mit sehr hohen Stückzahlen, wie z.B. bei Dach- oder Bodenstrukturen im Automobilbereich [155].

Das Leichtbaupotential bei Faser-Kunststoff-Verbunden ergibt sich aus der hohen spezifischen Steifigkeit und Festigkeit. Möglich sind diese hohen spezifischen Kennwerte durch die Kombination einachsiger hochbelasteter Fasern, die in einer stützenden Matrix eingebettet sind. Die somit entstehende Anisotropie und die Kombination zweier stark unterschiedlicher Grundmaterialien führen aber im Vergleich zu den klassischen isotropen Materialien auch zu herstellungs- und betriebsbedingten Problemstellungen, die eine weitere nachhaltige Entwicklung und Verbesserung der Faser-Kunststoff-Verbunde bzw. deren Berechnungsgrundlagen nach sich zieht.

Ausgehend von der Bauteilbelastung und den damit verbundenen Schäden ergibt sich eine optimale Beanspruchung bei Faser-Kunststoff-Verbunden, die ausschließlich entlang der Fasern aufgenommen werden soll. Quer zu den Fasern sind die erzielten Festigkeiten und Steifigkeiten um ein Vielfaches geringer. Bei einer optimierten Ausrichtung der Fasern entlang der realen aufgeprägten Kräfte und Wirkungsrichtungen ergeben sich somit Mehrschichtverbunde, so dass durch auftretende komplexe äußere Belastungen Schäden in dem Matrixwerkstoff unvermeidbar sind, wenn das hohe Leichtbaupotential von Faserverbundwerkstoffen optimal ausgenutzt werden soll. Entstehende intra- bzw. interlaminare Schäden sind Matrixrisse, Delaminationen und Faserbrüche, die unterschiedlich starke Einflüsse auf das Gesamtverhalten (Steifigkeiten, Festigkeiten, Endversagen) von Faserverbundwerkstoffen zeigen.

Als eine fundamentale analytische Grundlage hat sich die klassische Laminattheorie durchgesetzt, mit deren Hilfe sich die Verbundeigenschaften ungeschädigter Faser-Kunststoff-Verbunde mit einfachen Mitteln berechnen lassen [128]. Ausgehend von einer quasi-statischen Belastung haben sich zusätzlich verschiedenste Versagens- und Berechnungskriterien für eine Beschreibung der auftretenden Schadensentwicklung und der damit verbundenen Kennwertdegradation etabliert. Als besonders geeignet



## 1 Einleitung

gelten die Betrachtungen auf Einzelschichtebene, über die im Weiteren Aussagen bezüglich des Gesamtverhaltens des Faser-Kunststoff-Verbundes möglich sind.

Da nicht nur von einer „einfachen“ quasi-statischen Belastung bei Faser-Kunststoff-Verbunden ausgegangen werden kann, rückt die Ermüdungsbetrachtung immer mehr in den Vordergrund. Bis zum heutigen Zeitpunkt sind komplexe Zusammenhänge der Schadensentwicklung und des Ermüdungslebens experimentell für explizite Fälle zwar nachgewiesen, aber theoretische Berechnungen und Vorhersagen des Ermüdungslebens nur in wenigen Fällen möglich [49, 142, 150, 151]. Ein wichtiger Aspekt bei der Betrachtung des Ermüdungslebens ist eine Unterscheidung von Mikroschäden wie Matrixrisse und endversagensauslösende Schäden wie Delaminationen oder Faserbrüche. Speziell die Mikroschäden könnten während des Ermüdungslebens von mehrlagigen Faser-Kunststoff-Verbunden zunächst toleriert werden und eine Auslegung bezüglich des ersten auftretenden Mikroschadens ist bei der Ermüdung nicht zwingend zweckmäßig. Der bereits erwähnte Mangel an verlässlichen Berechnungsmodellen bzw. auch die Vielzahl an material- und belastungsspezifischen Komponenten führt jedoch dazu, dass speziell bei industriellen Auslegungen von Faser-Kunststoff-Verbunden der Vorteil tolerierbarer Ermüdungsmikroschäden nicht berücksichtigt wird. Somit ist auf Basis weiterer Forschungs- und Berechnungsergebnisse eine Erhöhung des Leichtbaupotentials bei ermüdungsbelasteten Faser-Kunststoff-Verbunden unter der Voraussetzung von akzeptierten Mikroschäden möglich. Gerade bei steigender Komplexität des Faserverbundaufbaus und der äußeren Belastungen (hin zu multiaxialen Belastungen) sind weitere experimentelle Untersuchungen und neue Berechnungsmodelle bzw. Weiterentwicklungen bereits vorhandener Grundlagen notwendig. Diese multiaxialen Belastungen repräsentieren in einer guten Näherung die späteren realitätsnahen Bauteilbelastungen und dienen somit dem tieferen Verständnis des Materialverhaltens zyklisch belasteter Faser-Kunststoff-Verbunde bei industriellen Anwendungen.

Fertigungstechnische Aspekte und die damit verbundene Qualität des Faserverbundwerkstoffes erschweren zusätzlich eine allgemeine Betrachtungsweise. Herstellungsverfahren wie Prepreg-Verfahren, Autoclave-Prozesse, verschiedene Injektionsprozesse, Pressverfahren, usw. zielen immer auf eine sehr gute Zusammenführung der beiden Grundmaterialien ab. Ein dabei fast unvermeidbarer Effekt ist jedoch die Entstehung von mehr oder weniger starken Herstellungsdefekten. Diese Defekte können Poren, Faserfilamentrisse, Faserwelligkeiten, harzreiche Bereiche, etc. sein, die insgesamt die mechanischen Kennwerte der Faserverbundbauteile maßgeblich (im Allgemeinen negativ) beeinflussen und eine breite Streuung verschiedenster Kennwerte erklärt. Auf Grundlage des Wissens auftretender möglicher Herstellungsdefekte erweitern sich die notwendigen experimentellen Nachweis- und theoretischen Berechnungsverfahren um ein Vielfaches.

## 1.1 Zielsetzung und Vorgehensweise

Im Fokus dieser Arbeit steht die Analyse des Materialverhaltens von Faserverbundwerkstoffen bei komplexer äußerer multiaxialer Belastung und die Beurteilung der auslösenden Mechanismen bzw. Kriterien beim Endversagen unter Einbezug möglicher auftretender herstellungs- oder betriebsbedingter Fehlstellen. Aufbauend auf bisherige Forschungsarbeiten [4] werden hierfür spezielle Rohrprobenkörper mittels Wickeltechnik und RTM-Verfahren hergestellt, die neben einem störungsfreien Laminataufbau durch Parametervariationen herstellungs- (verteilte Poren, Porenfelder, Faserwelligkeiten) oder betriebsbedingte Fehlstellen (Impacts) beinhalten können. Durch eine Analyse der auftretenden Fehlstellen, der Schadensakkumulation (Rissdichten und Delaminationsentstehung) und der Materialkennwerte (Steifigkeit und Festigkeit) mittels verschiedener zerstörungsfreier bzw. zerstörender Prüfverfahren sind Rückschlüsse bezüglich der auslösenden Kriterien des Endversagens bei multiaxialer Ermüdungsbelastung zu erzielen. Eine Vielzahl der erarbeiteten experimentellen Zusammenhänge greifen auf die im Rahmen des DFG-Paketantrages 267 erzielten Ergebnisse und auf eine enge Zusammenarbeit mit dem Institut für Kunststofftechnik (IKT, zerstörungsfreie Prüfung, Prof. Busse) der Universität Stuttgart, dem Institut für Leichtbau und Kunststofftechnik (ILK, Prof. Hufenbach) der Technischen Universität Dresden und dem Institut Polymer Composites (Prof. Schulte) der Technischen Universität Hamburg-Harburg zurück [109, 119–123].

Eine systematische Ausarbeitung der Einzelschichtspannungszustände und der durch Steifigkeitsdegradation bedingten Spannungsumlagerungen unter Berücksichtigung von experimentell bestimmten Schadensverläufen (Rissdichten und Delaminationen) schließen diese Arbeit ab.

## 1.2 Stand der Forschung

Faserverbundwerkstoffe und deren Werkstoffeigenschaften werden bereits seit den 70er Jahren untersucht. Dabei werden z. B. Themengebiete wie unterschiedliche Lasttypen (quasi-statisch, zyklisch, uniaxial, multiaxial, ...), unterschiedliche Materialien bzw. Typen der Fasern (Kohlefaser, Glasfaser, Kurz- oder Langfaser, Endlosfasern, ...) oder der Matrix (Thermoplaste, Duroplaste, Elastomere), auftretende Schadenstypen (Mikrorisse, Delaminationen, Faserbrüche) oder auch Einflüsse von Fehlstellen im Faserverbundwerkstoff betrachtet. Nachfolgend sollen in dieser Literaturübersicht zunächst grundlegende Phänomene bei quasi-statischer Belastung und Ermüdungsbelastung unterschieden werden, bevor auf Einflüsse von Fehlstellen (Poren, Faserwelligkeiten, Impacts) und mögliche Anwendungen zerstörungsfreier Prüfmethoden zur Lokalisierung von Fehlstellen oder ermüdungsbedingter Schäden eingegangen wird. Eine Auflistung prinzipieller Schadens-, Versagens- und Materialentwicklungen dient im weiteren Verlauf dieser Arbeit für ein besseres Verständnis bzw. für einen Vergleich mit den hier durchgeführten Versuchen.

## 1 Einleitung

### 1.2.1 Quasi-statische Belastung - Versagenskriterien

Untersuchungen unter monoton steigender Zugbelastung zeigen an  $[0^\circ/90^\circ/0^\circ]$ -Kreuzlaminaten bzw. einfachen Winkelverbunden ( $\pm 45^\circ$ ,  $\pm 30^\circ$ ) charakteristische Versagensformen und Werkstoffeigenschaften (vergleiche z.B. [44, 86, 115, 149]), die so in ähnlicher Form auch bei der Ermüdung von Faser-Kunststoff-Verbunden auftreten können.

So können bei E-Glas-Laminaten Mikrorissentstehungen mittels Durchlichtfotographie bei verschiedenen Dehnungen ausgewertet werden und es zeigt sich, dass entstehende Querrisse in einer  $90^\circ$ -Schicht in Querrichtung sehr schnell wachsen und einen gleichmäßigen Abstand aufweisen. Eine Auswertung der Rissabstände bzw. die Berechnung einer Rissdichte (Anzahl der Risse bezogen auf Einheitslänge von 1 mm) zeigt die Abhängigkeit der Rissabstände von der jeweiligen Schichtdicke [44]. Theoretisch wird diese Abhängigkeit z.B. von Berthelot [12] betrachtet, der eine Veränderung der Rissentstehung auf veränderte Spannungsverteilungen in der gerissenen Schicht zurückführt. Erst in der späteren Phase monoton steigender Zugbelastung bzw. bei hoher Dehnung ist eine Längsrissentstehung bei den Kreuzlaminaten zu beobachten [86]. Die Mikrorissbildung führt zu einem nicht-linearen Steifigkeitsverlauf bzw. einer Abnahme der Materialsteifigkeiten. Besonders bei Winkelverbunden mit ausschließlich  $\pm 45^\circ$ -Schichten ist dieses Verhalten sehr stark ausgeprägt [115]. Ein weiteres grundlegendes Phänomen ist die Entstehung von Delaminationen entlang der Querrisse, die dann zusätzlich einen starken Einfluss auf die Materialsteifigkeiten und das Endversagen haben [64, 65].

Neben den reinen Zugbelastungen lassen Untersuchungen bei multiaxialer Belastung erkennen, wie stark eine Mikrorissbildung von den äußeren Belastungen bzw. einzelschichtbezogenen Beanspruchungen abhängt [5]. Auch die Kombination der Versagensformen ist bei multiaxialer Belastung stark belastungsabhängig.

Zur Beschreibung des Versagensverhaltens haben sich unterschiedliche Konzepte entwickelt. So werden maximale Spannungs- bzw. Dehnungskriterien, globale Bruchkriterien z.B. nach Tsai-Wu, bei denen das gesamte Verhalten einer UD-Schicht mit einem einzigen Polynom beschrieben wird, und wirkebenen-bezogene Bruchkriterien (physikalisch basierte Versagenskriterien) unterschieden [26, 100, 101, 128, 146]. Ein Vergleich von insgesamt 19 verschiedenen Versagenstheorien für Faser-Kunststoff-Verbunde werden in der *World Wide Failure Exercise* bzw. deren Erweiterungen durchgeführt [53, 62, 134, 135]. Gerade das wirkebenen-bezogene Kriterium nach Puck [100, 101] zeigt seine Plausibilität und wird daher im Weiteren dort angewendet, wo eine einzelschichtbezogene Betrachtungsweise der Versagensmechanismen möglich ist. Die theoretischen Grundlagen der phänomenologischen Vorstellung nach Puck sind in Kapitel 2.3 detaillierter aufgeführt.

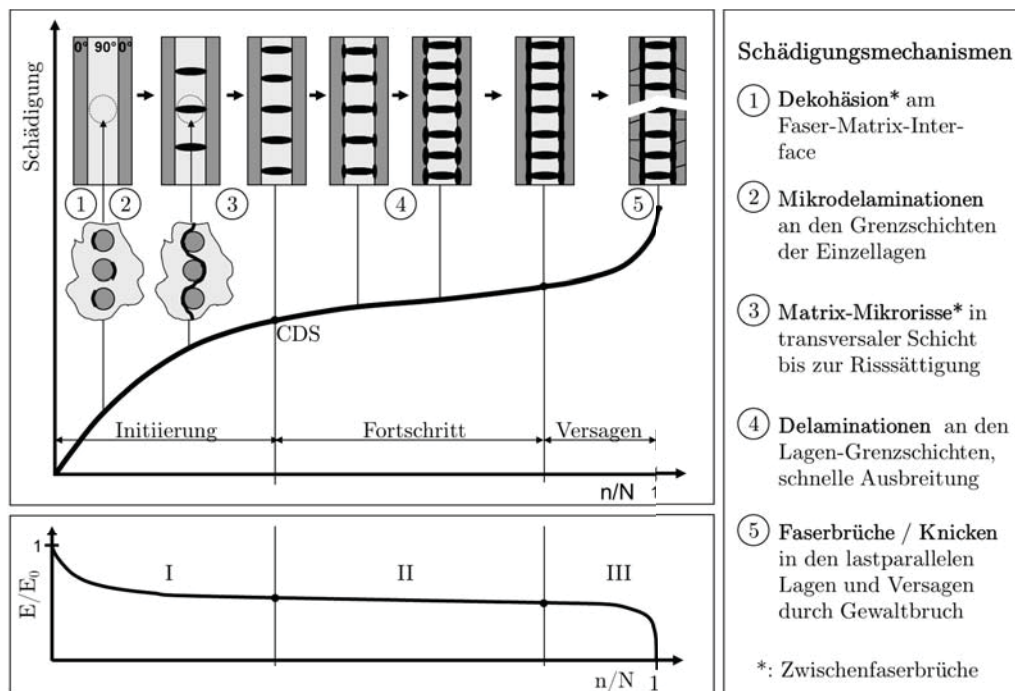
### 1.2.2 Phänomenologie bei Ermüdungsbelastungen

Ähnlich wie bei den quasi-statischen Belastungen zeigen sich bei Ermüdungsbelastungen charakteristische Schadens- und Materialentwicklungen, die im Folgenden

für uniaxiale, multiaxiale und sequentielle Belastungen näher quantifiziert werden. Aktuelle Zusammenfassungen verschiedenster auftretender Ermüdungsphänomene und möglicher Modellierungs- bzw. Berechnungsmethoden werden von Vassilopoulos et. al. [150, 151] gezeigt. Die Autoren stellen dabei phänomenologische Ansätze (messbarer Defekt bzw. das Phänomen wird als eine Bezugsgröße verwendet), Restfestigkeitstheorien, probabilistische Ansätze oder auch progressive Schadensmodelle, bei denen ein eingeführter Schädigungsparameter mit einer Steifigkeitsänderung korreliert, heraus. Als Grundlage für diese Werke dienen z. T. auch die im Weiteren näher dargestellten Publikationen diverser Autoren.

### Uniaxiale Belastung

Grundlegende Schadensentwicklungen und Ermüdungseigenschaften von Faser-Kunststoff-Verbunden (FKV) insbesondere bei Kreuzlaminaten und reiner uniaxialer Belastung werden sehr gut verstanden [49, 76, 89, 106–108, 125, 127, 139, 142].



**Abbildung 1.1:** Schematische Darstellung des Schadensakkumulationsprozesses und der Steifigkeitsdegradation unter Ermüdungbelastung [3, 107, 127, 139]

Untersuchungen werden an Flachprobenkörpern vorgenommen und es zeigt sich ein komplexes Ermüdungsverhalten, was auf der Inhomogenität der Materialien, der Anisotropie des Laminates und den verschiedenen Schädigungsmechanismen basiert. Zu beobachtende Schädigungsmechanismen sind Matrixrisse (Zwischenfaserbrüche), Delaminationen und Faserbrüche, die zu korrelierender Steifigkeitsdegra-

## 1 Einleitung

dation führen (Abbildung 1.1). Allgemein lassen sich drei charakteristische Bereiche während des Ermüdungslebens von FKV einteilen. Während Phase I entstehen Matrix-Mikrorisse in Schichten, die einer Querkzug- und/oder Schubbeanspruchung ausgesetzt sind. Matrix-Mikrorisse führen zu einer starken Steifigkeitsdegradation während Phase I. Am Ende von Phase I bildet sich ein so genannter „critical damage state“ (CDS) aus, bei dem eine Rissättigung eingetreten ist. Durch einen geringen quasi-linearen Steifigkeitsabfall und die Ausbildung von kleinen lokalen Delaminationen aufgrund der vorhandenen Matrixrisse ist die Phase II des Ermüdungslebens charakterisierbar. Die Phase III beinhaltet das schnelle Zusammenwachsen kleiner lokaler Delaminationen zu großen kritischen Delaminationen und Faserbrüche, die letztendlich zu einem Totalversagen des FKV führen. Diese Schäden führen zu einer starken Steifigkeitsdegradation während der letzten Schwingungszahlen.

Auch die Modellierung des Zusammenhangs zwischen der Schadensentwicklung und dem Ermüdungsverhalten ist durch verschiedenste Ansätze, wie progressive Schädigungsmodelle oder phänomenologische Annahmen, von diversen Autoren umgesetzt [30, 49, 51, 87, 89, 150]. Im Weiteren wird auf einen progressiven Modellierungsansatz, bei dem eine Steifigkeitsänderung einem definierten Schädigungsparameter zugrunde liegt, für die einzelschichtbezogene Steifigkeitsberechnung zurückgegriffen [4].

### **Multiaxiale Belastung und Reihenfolgeeffekte**

Bei multiaxialer Ermüdungsbelastung (z.B. Kombination aus Zug/Druck- und Schubanteilen bei konstanten Schwingamplituden) und Reihenfolgeeffekten (sequentielle Änderung der äußeren Belastung) bleiben die grundlegenden Schadens- und Steifigkeitsentwicklung ähnlich zu den uniaxialen Ermüdungsergebnissen. So treten Matrixrisse in den querkzug- oder schubbelasteten Schichten zu Beginn des Ermüdungslebens auf, was eine Abnahme der Steifigkeit zur Folge hat (Phase I). Nach einer vorhandenen Phase II mit der Entstehung von lokalen Delaminationen und nur geringer Steifigkeitsdegradation schließt sich Phase III mit dem eintretenden Endversagen an.

Unterschiede zu uniaxialen Belastungsversuchen liegen neben der experimentellen Probenform (Kreuz- oder Rohrproben) darin, dass verschiedene multiaxiale Belastungen zu starken Änderungen der Schichtbeanspruchungen und damit der Schadensakkumulation führen. Somit entstehen unterschiedliche Rissdichtenverläufe, Steifigkeitsdegradationen oder auch Wöhlerkurven bei Änderung der Belastungsverhältnisse aber gleich bleibenden Laminataufbauten [4, 102, 103]. Eine Beschreibung dieses Verhaltens anhand von Hauptdesignparametern (Biaxialitätsverhältnis, Lagenwinkel, Schädigungsparameter, ...) wird genauso durchgeführt [37, 102, 103], wie eine Modellierung mittels bekannter Einzelschichtverhaltensweisen [6, 48, 131, 132]. Ziel ist es die Komplexität des Materialverhaltens bei multiaxialer Belastung mit wenigen Parametern oder mit Erfahrungen bei uniaxialer Belastung bzw. auf Einzelschichtebene zu berechnen. Der Ansatz der phänomenologischen Betrachtung auf Einzelschichtebene wird im Weiteren aufgegriffen und dient als Basisidee für die in Kapitel 5 dargestellten Ergebnisse.

Weiterführende Untersuchungen an Block- und Spektrumsbelastungen, die spätere Betriebsbelastungen repräsentieren sollen, zeigen komplexe Werkstoffeigenschaften [2, 9, 38, 39, 42, 52, 94, 95, 97, 148]. Durch große Variationsmöglichkeiten der Lasthöhen, Lastrichtungen oder auch der Spannungsverhältnisse bei Block- und Spektrumsbelastungen sind bisher kaum allgemein gültige Erkenntnisse zu erzielen. Es bleibt bei der prinzipiellen Einteilung des Ermüdungslebens in Phase I-III, aber eine klare Festlegung, welche Reihenfolgenbelastungen (erst hohe dann niedrige Belastung oder umgekehrt) ungünstiger für das Ermüdungsleben von Faser-Kunststoff-Verbunden ist, ist zum Teil widersprüchlich. Auch der Einfluss von Parametern wie Materialien, Schichtaufbauten, Schädigungsverlauf und Versagensarten kann nicht abschließend bewertet werden.

Eine mögliche Beurteilung der Schadensentwicklung und deren Auswirkungen werden durch verschiedene Akkumulationsansätze (Palmgren-Miner, Hashin-Rotem, Owen-Howe, Marco-Starkey, Bond-Farrow, ...) auf Basis von Schädigungsparametern, Lasthöhenverhältnissen oder auch spezifischen Materialkennwerten vorgenommen [2, 52, 97].

### **Delaminationen**

Delaminationen sind großflächige interlaminaire Schäden (zwischen zwei Schichten) und aufgrund ihres versagenskritischen Verhaltens bei Druck- und Schubbelastungen von besonderem Interesse [137, 144]. Sie entstehen zum Beispiel durch Herstellungsfehler, durch Impactbelastungen (out-of-plane-Schlagbelastung) oder aufgrund von Ermüdungsbelastungen während Phase II des Ermüdungslebens.

Experimentell können so genannte DCB- (double cantilever beam) oder auch ENF-Proben (end notched flexure) für eine genaue Ermittlung des Delaminationswachstums verwendet werden. Es werden meist künstliche Delaminationen in die Probenkörper eingebracht und ein wesentlicher Vorteil bei diesen Versuchen ist, dass eine gute Unterscheidung der aus der Bruchmechanik bekannten Bruchmoden (Mode I, Mode II und Mode III) möglich ist. Bestimmt werden letztendlich die kritischen Energiefreisetzungsraten, was einen Rückschluss auf das Wachstum und kritischwerden der Delamination zulässt. Bei der Modellierung der Delaminationsentstehung (z.B. entlang von Querrissen) oder der Berechnung des Delaminationswachstums wird in den letzten Jahren viel auf numerische Verfahren der Finiten Elemente Methode mit dem Auswerteverfahren der VCCT (virtuell crack closure technique) und die Berechnung der Energiefreisetzungsraten zurückgegriffen [105, 129, 137, 143, 144]. Verschiedene Aspekte, wie die Delaminationsgröße, die Art und Höhe der äußeren Belastung oder auch die Delaminationsposition in Dickenrichtung sind ausschlaggebend, ob eine Delamination ein reines Wachstum aufweist oder ein Endversagen des Faser-Kunststoff-Verbundes auslöst. Speziell bei eingebetteten Delaminationen, wie sie z.B. bei Ermüdungsbelastungen verschiedener Lamine auftreten, kann ein so genanntes Sublaminatbeulen eintreten. Das Sublaminatbeulen ist eher bei Delaminationen, die weit von der Mittelebene des Laminates entfernt sind, zu beobachten. Weiterhin wird die versagenskritische Druckbelastung, bei der ein Ausbeulen



## 1 Einleitung

der Delamination auftritt, maßgeblich von der Lagenorientierung des ausbeulenden Sublaminates beeinflusst und nimmt zusätzlich mit zunehmender Delaminationsgröße ab [57]. Eine Überprüfung der letztgenannten Punkte soll im Weiteren bei Rohrproben unter Zug/Druck- und Schubkombination erfolgen.

### 1.2.3 Einflüsse von Fehlstellen

Neben den werkstoffabhängigen Kenngrößen beeinflussen auftretende Fehlstellen die Eigenschaften von Faser-Kunststoff-Verbunden. Fehlstellen können während der Fertigung im FKV auftreten. Im Folgenden wird ausschließlich auf mögliche Fehlerursachen während eines Injektionsprozesses (resin transfer moulding) eingegangen. Weitere Fehlstellen können dann während des Betriebes des Bauteils entstehen. Unterschieden werden sollen die für diese Arbeit relevanten Fehlstellen: herstellungsbedingte Fehlstellen wie Poren, Faserwelligkeiten und betriebsbedingte Fehlstellen wie Impacts.

#### Poren

Die Entstehung von Poren während eines Injektionsprozesses ist nur durch eine enge Einhaltung verschiedener Fertigungsparameter (Viskosität des Harzes, anliegendes/r Vakuum bzw. Druck, Fließgeschwindigkeiten, ...) zu minimieren. Optimierungen der Parameter werden in verschiedenen Studien vorgenommen [17, 79, 82, 113], wobei eine Erhöhung des anliegenden Vakuums zu einer geringen Anzahl größerer Poren und einer Minimierung des Porengehaltes führen [82]. Das anliegende Vakuum bzw. der anliegende Druck am Harz-Druck-Behälter haben einen großen Einfluss auf die Fließgeschwindigkeiten des Harzes und Veränderungen führen zu einem so genannten gesättigten oder ungesättigten Fließen einer Flüssigkeit in porösen Feststoffen [17]. Bei einem ungesättigten Fließen eilt das Harz entweder entlang der Faserrovings oder in den Räumen zwischen den Rovings schneller voran, was durch ein Umschlagen der Fließfronten zu Makro- oder Mikroporen führt [17, 79, 113]. Aufgrund dieser Studien ist im Weiteren dieser Arbeit ein Einbringen von verteilten Poren durch gezielte Parameteranpassung möglich.

Herstellungsbedingte Porenbildung ist bei größeren Strukturen ein kaum vermeidbarer Effekt, da dort eine gleichmäßige Fließgeschwindigkeit des Harzes in der gesamten Struktur schwer zu realisieren ist. Aufgrund dessen werden in vielen Studien (z.B. in [8, 23, 45, 60, 92]) die Einflüsse der Poren auf die mechanischen Kennwerte von FKV untersucht. Es werden dabei Proben mit einem charakteristischen Porengehalt von bis zu 12 % untersucht. Ziel ist es Aussagen bezüglich eines kritischen Porengehaltes anstellen zu können, ab dem ein negativer Einfluss auf die statische Festigkeit, Schubfestigkeiten, Biegefestigkeiten oder auch das Ermüdungsleben messbar ist. Abhängig vom gemessenen mechanischen Kennwert werden so kritische Porengehalte von 1 bis 4 % angegeben [23, 60, 92]. Eine andere Studie zeigt, dass gemessene Lebensdauern bei zyklischer Biegebelastung nicht von Porengehalten bis zu 6 % beeinflusst werden [8]. Eine Angabe über einen festen Wert für einen kritischen Porengehalt, der

unabhängig für sämtliche mechanischen Kennwerte gilt, ist nicht möglich. Grund hierfür ist, dass nicht nur der Porengehalt sondern auch die Porengeometrie [60] und die Größenverteilung [23] berücksichtigt werden muss. So zeigen Lambert et. al [78] für poröse multidirektionale Lamine unter Ermüdungsbelastung, dass eine starke Abhängigkeit zwischen der lokal größten Pore und dem Ort des Endversagens besteht.

Um die in der Literatur gefunden Einflüsse von Poren mit geringen Porengehalten und Einflüsse von größeren Poren auf das multiaxiale Ermüdungsleben von FKV zu untersuchen, wird im Weiteren zwischen verteilten Poren mit einem Porengehalt zwischen 1 bis 2 % und akkumulierten örtlich begrenzten Porenfeldern unterschieden.

### **Faserwelligkeiten**

Unter Faserwelligkeit (oder Faserondulation) versteht man einen in-plane oder out-of-plane wellenförmigen Versatz von Rovings, der aufgrund von Designvorgaben (z.B. gestufte Aufdoppler) oder während des Herstellungsprozesses entstehen kann [25, 55, 56, 61, 98]. Die während eines Injektionsprozesses oder Drapiervorganges entstehenden Faserwelligkeiten können über 45° von der Ursprungslagenausrichtung abweichen und führen somit zu starken Abfällen der Zug- und Druckfestigkeiten [98]. Vergleiche zwischen gleichmäßig, gestuften und lokalen Faserwelligkeiten (sinusförmige Wellenform) und deren Einflüsse auf Steifigkeits- und Festigkeitsreduktionen unter Zug- und Druckbelastungen werden zusätzlich vorgenommen und zeigen wie negativ eine ungewollte bzw. vom Design vorgegebene Faserwelligkeit sein kann [25, 55, 56]. Dadurch dass die lasttragenden Fasern nicht mehr in einer UD-Lage in Belastungsrichtung ausgerichtet sind, tritt das so genannte Faserausknicken bei quasi-statischen Drucktests und damit ein Endversagen des Prüfkörpers frühzeitig auf.

Der Aspekt einzelner lokaler Faserwelligkeiten in einer Lage (in-plane wellenförmiger Versatz) und Bestimmung des Einflusses dieser Welligkeiten bei zyklischer multiaxialer Belastung wird im Weiteren aufgegriffen.

### **Impacts**

Ein Impact ist eine out-of-plane Schlagbelastung auf ein beliebiges Material, wobei Faser-Kunststoff-Verbunde einen Großteil der so verursachten Energie durch spröde Versagensmechanismen wie Matrixrisse, Delaminationen und Faserbruch dissipieren. Das Laminat wird dabei in einem sehr lokalen Bereich stark geschädigt, wobei die Schäden auf der zum Schlag abgewandten Seite bzw. in Dickenrichtung im Allgemeinen größer werden [1, 20, 111, 128].

Das Ausmaß der Schäden aufgrund eines Impacts hängt von verschiedenen Faktoren, wie der Impactenergie, der Impactgeschwindigkeit, der Impactform, der Probengeometrie oder den Materialkennwerten ab. Die Impactenergie lässt sich anhand der kinetischen Energie des Impactors berechnen, wobei eine Ermittlung der von der

## 1 Einleitung

Probe absorbierten Energie sinnvoll ist [24, 133]. Werden ausschließlich die theoretisch berechenbaren kinetischen Energien des Impactors ermittelt und angegeben, so ist ein Vergleich verschiedener Studien schwierig, da die Probengeometrie maßgeblich Einfluss auf die elastische und dissipierte Energie nimmt [20].

Bei der Impactgeschwindigkeit wird zwischen „low-velocity“ und „high-velocity“ unterschieden, die zu einem unterschiedlichen elastischen Verhalten und damit verschiedenen Schadensausbreitungen führen [20]. „Low-velocity“-Impacts erreichen eine maximale Geschwindigkeit von bis zu 10-20 m/s [11, 111, 114]. Bleiben Impactorgeometrie, Impactgeschwindigkeit, Prüfkörpergeometrie und Materialkennwerte gleich, so können unterschiedliche Impactschäden bzw. deren Auswirkungen auf mechanische Kennwerte des FKV anhand der berechneten Impactenergien charakterisiert werden. Diese Unterscheidung anhand von Impactenergien wird im Weiteren dieser Arbeit übernommen, da konstante Rahmenbedingungen während der Impacteinbringung gewährleistet sind.

Da Schlagbelastungen während des Betriebs von Bauteilen möglich sind, werden verschiedenste Versuche („compression after impact“, Ermüdungstests, ...) oder Berechnungen (Modellierung von Hageleinschlägen, Delaminationswachstum, Ermüdungsleben, ...) an Proben mit Impactschäden vorgenommen [1, 63, 66, 70, 83, 117]. Bisherige Studien bei uniaxialen zyklischen Zugbelastungen belegen den negativen Einfluss von Impacts auf das Ermüdungsleben [70, 83], was im Weiteren bei multiaxialen Belastungen untersucht werden soll.

### 1.2.4 Einsatz zerstörungsfreier Prüfmethoden

Für die Lokalisierung von Fehlstellen und Schäden in Faser-Kunststoff-Verbunden können verschiedenste zerstörungsfreie Prüfverfahren („non destructive testing“, NDT) eingesetzt werden. Mögliche Verfahren sind z.B. optische Analysen, Ultraschallmessungen, Thermographie, Messungen des elektrischen Widerstandes, akustische Emission und Computer-Tomographie. Eingesetzte Prüfverfahren unterscheiden sich stark im Aufwand bzw. Kosten und einzelne Kennwerte wie Steifigkeiten, Festigkeiten und Schadensentwicklungen können nur durch Anwendungen verschiedener Messsysteme verlässlich bestimmt werden [16].

Unter die optischen Analysen fällt die bekannte Sichtprüfung eines Bauteils und die bereits erwähnte Aufnahme der Rissdichten mittels Lichtmikroskop oder anderen optischen Kamerasystemen [4, 6, 40, 41, 44, 86]. So können herstellungsbedingte Poreneinschlüsse und einzelne Mikrorisse oder Delaminationen bzw. deren Wachstum bei quasi-durchsichtigen Proben (GFK-Materialien) detektiert werden. Auch die Bestimmung von Faserwelligkeiten in äußeren Schichten bzw. Probenquerschnittsaufnahmen bei CFK-Laminaten ist somit möglich [61, 98].

Ultraschallverfahren werden in verschiedenen Konfigurationen (Kontaktultraschall, kontaktfrei mit und ohne Kontaktmittel, Wechsel der Prüfköpfe, ...) eingesetzt [7, 13, 19, 21, 22]. Lokalisierbar sind größere Fehlstellen wie Poren (hoher Porengehalt über 2-3 % vorausgesetzt) und großflächige Delaminationen aufgrund von Impacts oder Ermüdung mittels Flächenscans und Messung unterschiedlicher Signalamplituden

der ungestörten und fehlerbehafteten Bereiche [13, 19, 27, 91]. Veränderungen in der Laufzeit eines ausgesendeten Ultraschallsignals lässt Rückschlüsse auf Steifigkeitsveränderungen zu [7, 19].

Verschiedene aktive Thermographieverfahren, wie z.B. optisch-angeregte oder ultraschall-angeregte Lock-In-Thermographie zeigen gute Ergebnisse beim Auffinden von Delaminationen [19, 29, 136] und mittels Messungen der thermischen Diffusion von Proben mit und ohne Poren können Rückschlüsse auf den Porengehalt gezogen werden [88]. Thermische Aufnahmen während Ermüdungsbelastungen zeigen nach der Bildung von lokalen Delaminationen die Ausbildung von thermisch aktiveren Bereichen (Hot-Spots), die somit frühzeitig ein Endversagen des FKV's anzeigen [19, 40, 41, 138]. Kleine Mikroschäden (Matrixrisse) sind explizit nicht detektierbar.

Ein mögliches zerstörungsfreies Prüfverfahren bei elektrisch leitfähigen Materialien (CFK oder modifizierte Harzsysteme mittels Carbon Nanotubes) stellt die Messung des elektrischen Widerstandes dar, der während des Versuches eine Änderung aufgrund von Matrixrissen und Faserbrüchen zeigt [14, 75, 126, 152]. Indirekt sind somit Aussagen über die Anzahl der auftretenden Schäden zu treffen, aber nicht über den genauen Versagensort.

Weitere Verfahren, die nicht in dieser Arbeit zum Einsatz kommen aber der Vollständigkeit halber kurz erwähnt werden sollten, ist die Messung der akustischen Emission und die Computer-Tomographie. Mittels akustischer Emissionsmessungen können indirekt Rückschlüsse auf den Zeitpunkt der Schadensentstehung und die Art des Schadens gezogen werden [16, 67, 68, 99]. Eine örtliche Eingrenzung des Schadens ist nur bedingt möglich. Die Computer-Tomographie führt zu hochauflösenden Bildern von Mikroschäden und eine genaue Quantifizierung von Fehlstellen wie Poren (Größen und Verteilungen) kann durchgeführt werden [78, 88].