

## Zur Notwendigkeit eines konstruktionsmethodischen Ansatzes für die zeitfeste Auslegung endlosfaserverstärkter Kunststoffbauteile

Tobias S. Hartwich<sup>1</sup>, Harald Völkl<sup>2</sup>, Michael Franz<sup>2</sup>, Christian Witzgall<sup>2</sup>, Dieter Krause<sup>1</sup>, Sandro Wartzack<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *Institute of Product Development and Mechanical Engineering Design (PKT), Hamburg University of Technology (TUHH), Germany*

<sup>2</sup> *Engineering Design (KTmfk) Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg (FAU), Germany*

### Abstract

Efficient and systematic design methods are indispensable aids on the way to effective lightweight solutions. In this article, the necessity of providing the product developer with a design method for the design of endless fibre-reinforced plastic (FRP) components to fulfil fatigue requirements is highlighted. Existing damage models and test methods could be used and extended within such approaches. A suitable method should take into account particularly the variety of requirements for FRP components and consider other influences, e.g. from multi-layer composite design or load introduction, preferably supported by CAE tools. The simple applicability of an effective approach should be demonstrated both on test specimens and on demonstrator components.

*Keywords: Lightweight Design, Fibre-reinforced plastics, Fatigue, Design methods*

---

## 1 Einleitung

Faserverstärkte Kunststoffe (FVK) weisen aufgrund ihrer hohen spezifischen Steifigkeit und Festigkeit ein großes Leichtbaupotential auf, was durch geeignete konstruktive Maßnahmen, z. B. lastpfadgerechte Materialorientierung, ausgeschöpft werden kann [1]. Die Berücksichtigung von Zeitfestigkeitseigenschaften gestaltet sich jedoch kompliziert, was beispielsweise im Flugzeugbau zu hohen Sicherheitsfaktoren in der Auslegung führt [2] und damit dem Leichtbau entgegensteht. Eine genaue und zuverlässigkeitsbasierte Auslegungsmethode für FVK-Bauteile mit komplizierten Geometrien unter diversen Lastfällen auf Zeitfestigkeit würde hingegen geringere Sicherheitsfaktoren und damit Materialersparnis erlauben, was sich sowohl auf Kosten, gerade bei dem noch immer teuren Werkstoff [3], als auch beispielsweise auf das Trägheitsverhalten des Gesamtsystems positiv auswirkt.

## 2 Stand der Technik

Untersuchungen zyklisch belasteter Bauteile aus isotropen Werkstoffen, wie Stahl, bezüglich ihrer Festigkeit wurden schon im 19. Jahrhundert durchgeführt, woraus die sogenannten Wöhler-Kurven entstanden [4]. Eine Unterteilung der Wöhler-Kurven führte zur Definition verschiedener Festigkeitsbereiche: Bis zu einer Schwingspielzahl von circa  $N = 10^4$  wird von Kurzzeitfestigkeit gesprochen. Bei Schwingspielzahlen von  $N = 10^6 - 10^7$  beginnt der Übergang zur Dauerfestigkeit. Der Zwischenbereich wird als Zeitfestigkeit definiert. [4] Diese Einteilung wird weitestgehend auch für Faserverbundwerkstoffe beibehalten, wenngleich sich das Verhalten dieser zu dem von Metallen unterscheidet [5; 6]. Das Verhalten zyklisch belasteter Faserverbundkunststoffe (FVK) wird deshalb im Weiteren detaillierter betrachtet.

### 2.1 Ermüdungsverhalten faserverstärkter Kunststoffe und deren Schädigungsmodelle

Bereits seit Beginn der 1980er-Jahre wurde das mechanische Langzeitverhalten faserverstärkter Kunststoffe analysiert [7]. Das Ermüdungsverhalten der FVK wird dabei in drei Hauptbereiche eingeteilt: Im ersten Bereich (I) führen erste Matrixrisse zu einer hohen Schadensfortschrittsrate, die in der zweiten Phase (II) abfällt und in der letzten Lebensphase (III) infolge Faserbrüchen erneut stark ansteigt und bis zum Versagen führt (Bild 1).

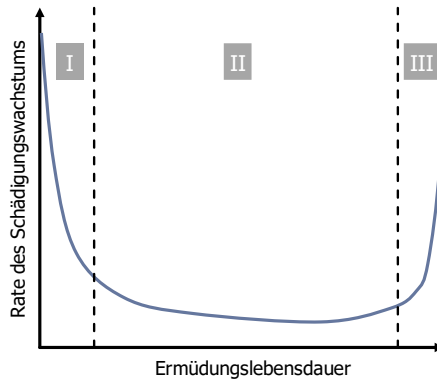


Bild 1: Qualitative Darstellung der Rate des Schadenswachstums über die Lebensdauer nach [8]

Als Folge dieser Schädigung nimmt die Steifigkeit und Restfestigkeit des Materials ab. Ein Überblick über Ansätze zur Quantifizierung dieser Materialdegradation findet sich in [9]. Häufig wird die Schädigung  $D$  über den Steifigkeitsverlust definiert, wie beispielsweise von WU und YAO [8]:

$$D(n) = \frac{E_0 - E(n)}{E_0 - E_f}$$

Zur Berechnung der Schädigung nach  $n$  Schwingungen wird der initiale E-Modul  $E_0$ , der E-Modul zum Zeitpunkt des Versagens  $E_f$ , sowie der E-Modul zum Zeitpunkt der ausgewerteten Schwingung  $E(n)$  benötigt. Dieser Ansatz wird für alle Formen der faserverstärkten Kunststoffe analog eingesetzt: für kurzfaserverstärkte [10], für uni- [11; 12] und multidirektional [8; 11; 13] endlosfaserverstärkte Kunststoffe.

Um die ausgeprägte Anisotropie der endlosfaserverstärkten Kunststoffe zu berücksichtigen, wurde von Hohe et al. [14] der zuvor skalar definierte Schädigungsparameter als tensorielle Größe eingeführt, d.h. mit unterschiedlichen Schadensgrößen für die verschiedenen Materialrichtungen. Die Schädigung wird hierbei nach der Interpretation von Lemaitre [15] als Flächenverlust am infinitesimalen Element infolge Rissbildungen betrachtet, der in den verschiedenen Richtungen unterschiedlich ausgeprägt sein kann (Bild 2). [14]

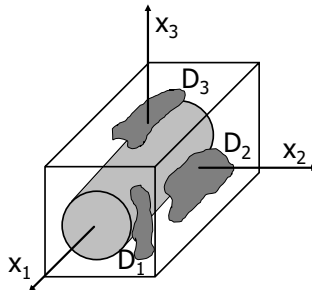


Bild 2: Richtungsabhängige Schädigungsparameter  $D_i$  nach [14]

Die zuvor vorgestellten Verfahren erlauben bereits eine recht detaillierte Analyse der Bauteilfestigkeit, jedoch haben sie keine hinreichende Berücksichtigung in konstruktionsmethodischen Auslegungsprozessen für faserverstärkte Kunststoffe gefunden, die die Phase der Synthese unterstützen sollen. Die dabei häufig herangezogene Richtlinie VDI 2014-Blatt 3 rät ausdrücklich von einer rein rechnerisch begründeten Laminatauslegung ab, sofern schwingende Beanspruchungen vorliegen. Stattdessen sollen im Versuch, gegebenenfalls im verkleinerten Maßstab, Bauteile bis zum Versagen geprüft werden. Auf Verfahren der numerischen Simulation wird in der Richtlinie von 2006 nicht eingegangen. Dies steht dem modernen Trend der rechnerunterstützten Produktentwicklung entschieden entgegen und muss daher durch einen effizienten, validierten Auslegungsprozess ergänzt werden. Besonders bei einer gezielten Auslegung auf eine bestimmte, geforderte Lebensdauer können rechnerunterstützte Methoden eine Überdimensionierung vermeiden und somit eine optimale Ausschöpfung des Leichtbaupotentials ermöglichen. Weiterhin ist zu berücksichtigen, dass die gebräuchlichen Festigkeitskriterien für Faserverbundwerkstoffe für den statischen Lastfall gelten. Eine Anpassung der Kriterien an die zeitliche Entwicklung der Festigkeit, wie sie durch Wöhlerkurven beschrieben werden kann, ist für den praktischen Einsatz in der Konstruktion unerlässlich. Wenngleich ein abschließender, qualifizierender Versuch dadurch nicht ersetzt werden kann und soll, so können auf diese Weise dennoch zeit- und kostenintensive Iterationen vermieden werden.

## 2.2 Testing im Zeit-/Dauerfestigkeitsbereich: Methoden und Herausforderungen

Da Versuche bisher unerlässlich zur Charakterisierung von FVK sind, wird in diesem Abschnitt tiefer auf verschiedene Methoden und Herausforderungen beim Testing eingegangen.

## 2.2.1 Testmethoden

Aufgrund der komplizierten Werkstoffeigenschaften von FVK existieren viele verschiedene Testmethoden für deren Ermüdungsverhalten. Generell wird untergliedert in Testing von unidirektionalen (UD) Kompositmaterialien und Testing von Laminaten, d. h. Mehrschichtverbunden (MSV) [1], die aus mehreren unterschiedlich gerichteten UD-Schichten aufgebaut sind. Häufig wird auf sogenannte Coupon-Tests zurückgegriffen, wobei ein Probekörper (Coupon) möglichst ähnlich versagen sollte wie das Faserverbundbauteil, auf welches dann Rückschlüsse gezogen werden. Die Geometrie des Coupons besitzt einen hohen Einfluss auf die Testergebnisse, einerseits aufgrund von geometriebedingten lokalen Stresskonzentrationen, z. B. bei verjüngten Coupons, andererseits aufgrund der Länge. Während lange Coupons unter Druck zum Beulen neigen und daher eine zusätzliche Stabilisierung im Versuch benötigen, sind diese weniger anfällig für Einflüsse der Probekörpereinspannung. Hingegen sind kurze Coupons weniger vom Beulen betroffen, dafür hat die Einspannung in der Prüfmaschine einen größeren Einfluss. [16] Bild 3 gibt eine Übersicht über die Testmethoden für unidirektionale- und Mehrschicht-Coupons.

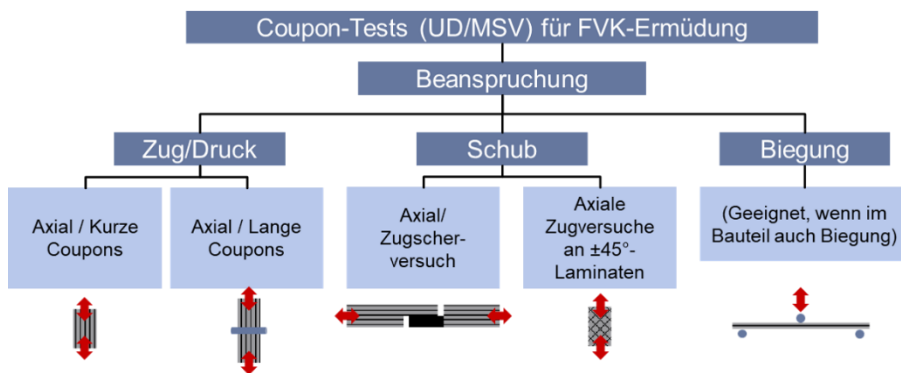


Bild 3: Übersicht über Testmethoden für UD- und Mehrschicht-Coupons in Anlehnung an [16]

Axiale Zugversuche an CFK-Laminaten (teils mit Geweben) wurden vielfach durchgeführt, z. B. an unidirektionalen Laminaten [17], unter wechselnder Belastung [18] oder im Vergleich bzw. hybrid mit anderen Fasern [19]. Unter axiale Zugversuche an  $\pm 45^\circ$ -Laminaten zur Ermittlung der zyklischen Schubfestigkeit fallen die Arbeiten von BEVAN [20] (unter Einfluss von höheren Temperaturen). Biegung, jedoch an einem Hutprofil wird beispielsweise untersucht in HAEFELE [21].

---

## 2.2.2 Herausforderungen beim Testing

FVK weisen sehr komplizierte Versagensmoden auf. Bereits das Testing von UD-Coupons gestaltet sich z. B. aufgrund der statistischen Festigkeitsverteilung und möglicher Fehlorientierung der Fasern sowie Fehlstellen in der Matrix schwierig. [16] Dazu kommen insbesondere bei High Cycle Fatigue (in der Größenordnung von  $10^8$  Lastzyklen) Schwierigkeiten im Prüfaufbau, etwa durch Ermüdung der Prüfausrüstung, Veränderungen in der Lasteinleitung und die Untauglichkeit konventioneller Dehnungsmessstreifen [22].

Generell ist die Zeitfestigkeit bei UD-FVK hauptsächlich von der Dehnung der Matrix beeinflusst, da üblicherweise die Ermüdungsgrenze der Matrix geringer ist als die der Fasern. Bei MSV steigt die Kompliziertheit weiter, da zum einen ein geringerer Anteil der Schichten in maximale Beanspruchungsrichtung zu niedrigerer Dauerfestigkeit führt, zum anderen Risse auch Delamination, Lastumlagerungen und damit einen Festigkeitsabfall verursachen können. Auch Umwelteinflüsse, insbesondere Feuchtigkeitsaufnahme oder Austrocknen des Laminats, und Stresskonzentrationen, z. B. an Bohrungen oder Kerben, sollten berücksichtigt werden. [7; 16] Diesen Herausforderungen wird beispielsweise durch kombinierte Versuch-Mikromechanik-Ansätze begegnet [23].

## 2.3 Versuchsaufbauten zur Ermittlung der Zeitfestigkeit von CFK-Bauteilen

Die Bestimmung der Zeitfestigkeit faserverstärkter Kunststoffe erfolgt wie oben beschrieben gewöhnlich auf Couponebene. Die eingespannten Proben werden unter zyklischer Belastung in einem entsprechenden Versuchsaufbau (Zugversuch, Biegeversuch) verformt. Hierfür liegen verschiedenste kommerzielle Lösungen bereits vor. Die maximal möglichen Kräfte reichen von einigen kN bis hin zu etwa 2500 kN. Unter den zyklischen Prüfmaschinen stehen elektrisch betriebene Resonanzprüfmaschinen sowie servohydraulische Pulser zur Auswahl. Resonanzprüfmaschinen zeichnen sich vor allem durch die hohen erreichbaren Prüffrequenzen von mehreren 100 Hz aus. Die bei hohen Prüffrequenzen auftretenden Reibungs- und Hystereseeffekte führen jedoch bei den fokussierten Verbundwerkstoffen, welche häufig eine Kunststoffmatrix aufweisen, zu einer kritischen Probekörpererwärmung. Da der Großteil der zyklischen Belastungsversuche lediglich bei geringen Prüffrequenzen von höchstens 5 - 10 Hz ausgeführt werden kann, muss vom Einsatz einer Resonanzprüfmaschine abgesehen werden. Der anvisierte Frequenzbereich kann durch servohydraulische Prüfmaschinen angemessen abgedeckt werden, wobei die Prüfkörpertemperatur während des Versuchs aufgezeichnet werden soll. Ein schematischer Aufbau eines solchen Versuchsaufbaus ist Bild 4 zu entnehmen. Die Probe wird

zwischen zwei Aufspannungen befestigt. Eine Einspannung ist über eine Kraftmessdose mit dem Fundament der Maschine verbunden, die andere mit einem Hydraulikzylinder, welcher in seiner Ruheposition über verstellbare Traverse justierbar ist und die dynamische Kraft einbringt.

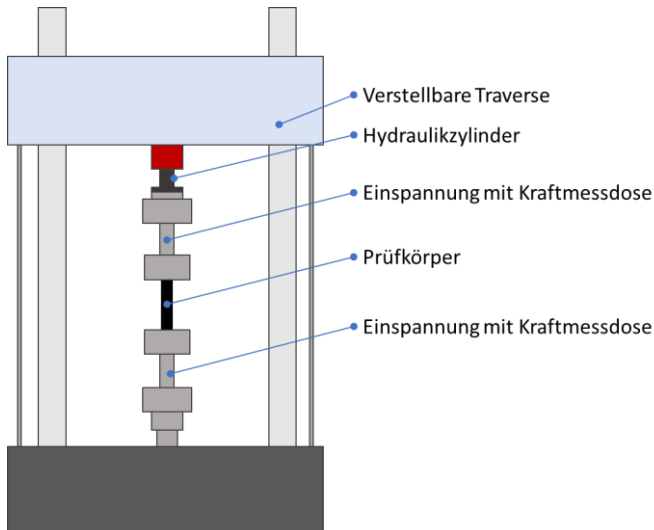


Bild 4: Schematischer Aufbau einer Prüfanlage zur Bestimmung des zeitfesten Verhaltens von Werkstoffen

Da eine ganzheitliche Betrachtung der zu analysierenden Leichtbaustrukturen erfolgen soll, werden mehrachsige Prüfzylinder favorisiert. Diese erlauben neben der einachsigen Zug-Druck-Belastung auch Torsionsbeanspruchungen sowie eine Überlagerung beider Lastfallszenarien. Die Dehnung der Prüfkörper sollte lokal, etwa mit Dehnungsmessstreifen oder idealerweise über optische, berührungslose Messsysteme, erfasst werden, um Verfälschungen durch die Wegmessung in der Maschinentraverse zu vermeiden.

### 3 Entwicklung eines Vorgehens zur Auslegung von FVK-Bauteilen

Zur Berücksichtigung der Zeitfestigkeit bei komplizierten Geometrien wird im Folgenden die Entwicklung eines Vorgehens vorgestellt, welches als Ziel hat, dem Produktentwickler eine durchgängige und robuste Auslegung von realitätsnahen komplizierten Geometrien zu ermöglichen. Diese Entwicklung untergliedert sich in sieben Schritte, welche in Bild 5 veranschaulicht sind.

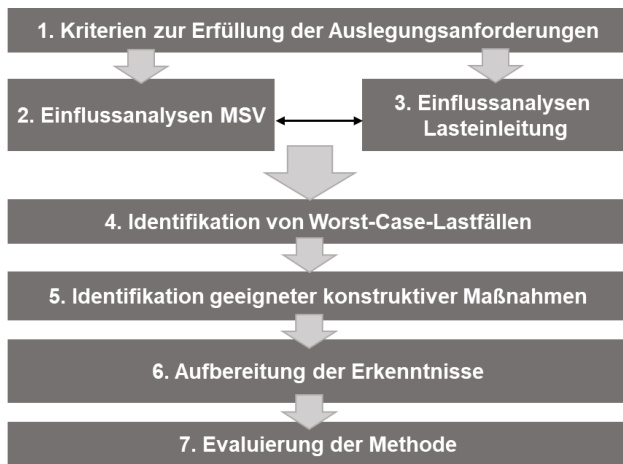


Bild 5: Vorgestelltes Schema zur Entwicklung eines Vorgehens zur zeitfesten Auslegung von CFK-Bauteilen

### 3.1 Kriterien zur Erfüllung der Auslegungsanforderungen

Eingangs gilt es die Bemessungsgrenzen zu definieren, welche zur übergeordneten Anforderungserfüllung, wie beispielweise die Tragfähigkeit oder die Verformung eines Bauteils über die Lebensdauer, notwendig sind. Dabei ist zwischen einfachen Bemessungskriterien, welche sich direkt aus den Anforderungen ableiten, z. B. maximale Durchbiegung, und aufwendigen Bemessungskriterien, welche sich nur indirekt von den Anforderungen ableiten lassen, zu unterscheiden. Die aufwendigeren Kriterien werden fokussiert. Dazu zählen unter anderem lokale Versagenseffekte, welche zu einem Bauteilversagen führen können. Für diese gilt es lokale Bemessungsgrenzen zu identifizieren. Hierfür ist die Entwicklung von Versagenskriterien unter Berücksichtigung der Zeitfestigkeit denkbar. Dies kann beispielsweise durch die Erweiterung bestehender Festigkeitskriterien erfolgen. Ergebnis dieses Schrittes sind geeignete lokale Kriterien, welche für eine zeitfeste Auslegung herangezogen werden können. Diese gilt es mit Simulationen und ausgewählten Versuchen einzugrenzen.

### 3.2 Einflussanalyse bei Mehrschichtverbund

Im darauffolgenden zweiten Schritt gilt es die Einflussfaktoren auf die im ersten Schritt festgelegten Bemessungskriterien am Beispiel lokalverstärkter Mehrschichtverbunde (MSV) zu identifizieren. Um Aussagen über eine spätere Zuverlässigkeit eines Bauteils treffen zu können wird die Streuung einzelner Einflussfaktoren aufgenommen und in späteren Betrachtungen berücksichtigt.



---

Mögliche Einflussfaktoren sind u. a. die Abfolge der Laminatschichten, Sprünge in der Laminatdicke oder auch Abweichungen in der Faserorientierung. Die Einflussanalyse erfolgt sowohl virtuell als auch durch Versuche an einfachen/einfachen Probekörpern. Bei der Durchführung der Versuche wird, neben der gezielt eingebrachten Streuung, die fertigungs- und versuchsbedingte Streuung aufgenommen, sodass diese später für die Robustheitsuntersuchungen während der Auslegung hinzugezogen werden kann. Um valide Materialparameter für die Simulationen nutzen zu können, werden zuvor die verwendeten Materialien mittels Versuchen auf Couponebene charakterisiert. Abschließendes Ziel dieses Schrittes ist eine Liste priorisierter Einflussfaktoren auf die Zeitfestigkeit. Ferner wird bestimmt, in welchen Toleranzbereichen sich die Faktoren zu befinden haben, damit eine robuste Auslegung garantiert werden kann.

### 3.3 Einflussanalyse der Lasteinleitung

Parallel zum zweiten Schritt kann der dritte Schritt durchgeführt werden, wobei ein kontinuierlicher Abgleich zwischen beiden Schritten zum Nutzen von Synergien führt. Ziel des dritten Schrittes ist die Analyse von Einflüssen der Lasteinleitung auf die Zeitfestigkeit. Die erwarteten Erkenntnisse sollen zu einer zeitfesten und robusten Gestaltung von Lasteinleitungen unter Berücksichtigung des Leichtbaugedankens beitragen. Im Bereich der Sandwichbauweise, welche in der Flugzeugkabine Anwendung findet und üblicherweise auf einem harzgetränkten Papierhonigwabenkern und faserverstärkten Decklagen basieren, konnte in [24] an einem vereinfachten Beispiel gezeigt werden, wie durch Formänderungen der Krafteinleitung (Inserts) die Tragfähigkeit einer Krafteinleitung deutlich erhöht wird. Dies gilt es auf den MSV zu übertragen und gleichzeitig um die Aspekte der Zeitfestigkeit und Robustheit zu erweitern.

### 3.4 Identifikation von Worst-Case-Lastfällen

Aufbauend auf den Erkenntnissen der vorangegangenen Schritte werden sogenannte Worst-Case Lastfälle herausgearbeitet. Es wird untersucht, ob eine Auslegung auf die Worst-Case-Lastfälle ausreicht, sodass Bemessungen der Bauteile für die verbleibenden Lastfälle nicht durchgeführt werden müssen. Beispielsweise wird bei der Auslegung von Inserts in Sandwichstrukturen häufig nur der Pull-Out-Test durchgeführt, da dieser einen Worst-Case darstellt und andere Lastfälle mit abdeckt [25; 24]. Ziel ist es solche Analogien auf die Zeitfestigkeit einzelner Bauteile zu übertragen.

---

### 3.5 Identifikation geeigneter konstruktiver Maßnahmen und Aufbereitung der Erkenntnisse

Basierend auf den Ergebnissen werden konstruktive Maßnahmen zur Verbesserung der Zeitfestigkeit und Zuverlässigkeit erarbeitet und bewertet. Hierzu gehören u. a. eine gezielte Erhöhung der Laminatdicke oder auch Änderungen der Faserrichtung. Zusätzlich wird erarbeitet, welche Maßnahmen die Robustheit bei Abweichungen von der Sollgeometrie beispielsweise durch Fertigungsfehler oder Materialunsicherheiten sowie bei Lastvariationen verbessern. Die wirkungsvollsten Maßnahmen werden in Form von Leitlinien zusammengefasst.

Abschließend werden die Ergebnisse der vorangegangenen Schritte in einem Vorgehen zusammengefasst und eine Methode zur zeitfesten und robusten Auslegung faserverstärkter Geometrien formuliert. Hierzu sollen u. a. einzelne Designparameter beispielsweise durch das Axiomatic Design voneinander entkoppelt werden. Zusätzlich werden die gewonnenen Erkenntnisse in Form einer Wissensbasis aufbereitet, um diese rechnergestützt und automatisiert dem Konstrukteur bereitzustellen.

## 4 Fallbeispiel

Das in Kapitel 3 vorgestellte Vorgehen wird abschließend an einem Beispiel validiert. Geeignet erscheinen hierfür verschiedenste Halbzeuggeometrien, wie beispielsweise ein Vierkantprofil. In Bild 6 ist eine Darstellung eines möglichen Demonstrators gezeigt. Diesen Demonstrator gilt es für möglichst verschiedene Lastfälle, wie hier beispielsweise bei einem Dreipunktbiegeversuch mit zyklischer Last gezeigt, zeitfest auszulegen. Neben der angestrebten Zeitfestigkeit gilt es durch Materialeinsparungen das Leichtbaupotential aufzuzeigen. Dies wird in Bild 6 beispielsweise durch mögliche Aussparungen angedeutet. Neben der Materialeinsparung wird zusätzlich auch eine gezielte Verstärkung durch die Verwendung von CFK-Patches ermöglicht, um ein frühzeitiges Versagen oder übermäßige Steifigkeitseinbrüche an besonders beanspruchten Stellen zu vermeiden. Die Gebiete der Materialeinsparungen und Verstärkungen resultieren dabei aus den abgeleiteten konstruktiven Maßnahmen des entwickelten Vorgehens wie auch aus unterstützend durchgeführten Simulationen.

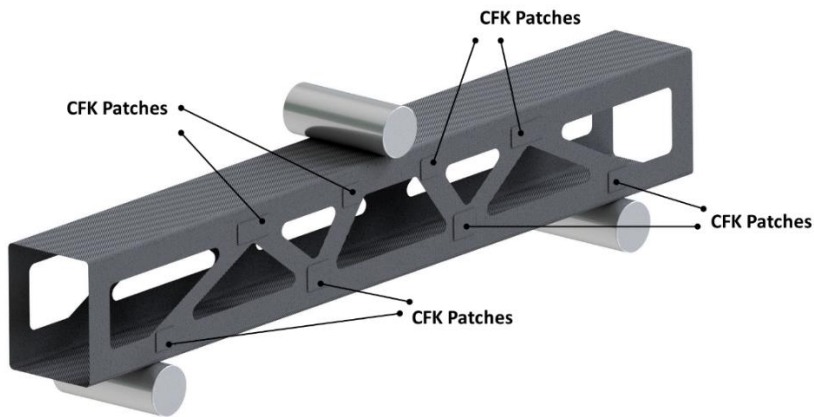


Bild 6: Demonstrator

Der Demonstrator wird unter den definierten Belastungen getestet. Je nach Größe des Bauteils kann dies am servohydraulischen Pulser des KTMfk oder am Hexapodprüfstand der TUHH durchgeführt werden.

## 5 Zusammenfassung und Ausblick

Effiziente und systematische Auslegungsmethoden sind unverzichtbare Hilfsmittel auf dem Weg zu wirkungsvollen Leichtbaulösungen [26]. Im vorliegenden Beitrag wurde die Notwendigkeit aufgezeigt, dem Produktentwickler einen konstruktionsmethodischen Ansatz zur zeitfesten Auslegung endlosfaserverstärkter Kunststoffbauteile bereitzustellen. Bestehende Schädigungsmodelle und Testmethoden können hierzu herangezogen und erweitert werden. Ein geeigneter Ansatz sollte dabei besonders der Anforderungsvielfalt an FVK-Bauteile Rechnung tragen und Einflüsse, z. B. aus der Gestaltung des Mehrschichtverbunds oder der Lasteinleitungen, möglichst rechnergestützt berücksichtigen. Die einfache Anwendbarkeit eines effektiven Ansatzes sollte sowohl an Prüfkörpern als auch an Demonstratorbauteilen gezeigt werden.

---

## Literaturverzeichnis

- [1] SCHÜRMAN, H.: "Konstruieren mit Faser-Kunststoff-Verbunden", Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2007.
- [2] Klammer, J. H. A. H.: "Strukturmechanik und Vibroakustik von CFK-Flugzeugrümpfen. Technische Universität München. Dissertation 2009.
- [3] REDEN, T. v.; SCHUEPPEL, D.; HOHMANN, A.: "Development of production costs of CFRP parts" in: (Hrsg.): ECCM18 - 18th European Conference on Composite Materials, 2018.
- [4] RADAJ, D.; VORMWALD, M.: "Ermüdungsfestigkeit, Grundlagen für Ingenieure", Springer, Berlin, Heidelberg, 2007.
- [5] HARRIS, B.: "Fatigue in composites, Science and technology of the fatigue response of fibre-reinforced plastics", Woodhead Publishing Limited, Cambridge, England, 2003.
- [6] BATHIAS, C.: "An engineering point of view about fatigue of polymer matrix composite materials", International Journal of Fatigue, Nr. 10, (2006), S. 1094–1099.
- [7] REIFSNIDER, K. L.; HENNEKE, E. G.; STINCHCOMB, W. W.; DUKE, J. C., et al.: "Damage mechanics and NDE of composite laminates" in: (Hrsg.): Mechanics of Composite Materials, Elsevier, 1983, S. 399–420.
- [8] WU, F.; YAO, W.: "A fatigue damage model of composite materials", International Journal of Fatigue, 1, (2010), S. 134–138.
- [9] CARRARO, P. A.; MARAGONI, L.; QUARESIMIN, M.: "Prediction of the crack density evolution in multidirectional laminates under fatigue loadings", Composites Science and Technology, (2017), S. 24–39.
- [10] WITZGALL, C.; WARTZACK, S.: "Experimental and simulative assessment of crashworthiness of mechanically aged short-fibre reinforced thermoplastics" in: Anja Maier; Stanko Škec; Harrison Kim; Michael Kokkolaras; Josef Oehmen; Georges Fadel; Filippo Salustri; Mike Van der Loos (Hrsg.): Proceedings of the International Conference on Engineering Design, ICEDVolume 1, Issue DS87-1, 2017, S. 279–287.

- 
- [11] LIAN, W.; YAO, W.: "Fatigue life prediction of composite laminates by FEA simulation method", *International Journal of Fatigue*, 1, (2010), S. 123–133.
- [12] FLORE, D.: "Experimentelle Untersuchung und Modellierung des Schädigungsverhaltens faserverstärkter Kunststoffe unter thermomechanischer Langzeitbeanspruchung", ETH Zurich, 2017.
- [13] MAO, H.; MAHADEVAN, S.: "Fatigue damage modelling of composite materials", *Composite Structures*, Nr. 4, (2002), S. 405–410.
- [14] HOHE, J.; GALL, M.; GAUCH, H.; FLIEGENER, S., et al.: "A Material Model for Prediction of Fatigue Damage and Degradation of CFRP Materials", *Key Engineering Materials*, (2017), S. 740–744.
- [15] LEMAITRE, J.: "Coupled elasto-plasticity and damage constitutive equations", *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 1-3, (1985), S. 31–49.
- [16] CURTIS, P. T.: "The fatigue behaviour of fibrous composite materials", *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, Nr. 4, (1989), S. 235–244.
- [17] GAMSTEDT, E. K.; TALREJA, R.: "Fatigue damage mechanisms in unidirectional carbon-fibre-reinforced plastics", *Journal of Materials Science*, Nr. 11, (1999), S. 2535–2546.
- [18] Curtis, P., Moore, B.: "A comparison of the fatigue performance of woven and non-woven CFRP laminates in reversed axial loading", *International Journal of Fatigue*, Nr. 2, (1987), S. 67–78.
- [19] WU, Z.; WANG, X.; IWASHITA, K.; SASAKI, T., et al.: "Tensile fatigue behaviour of FRP and hybrid FRP sheets", *Composites Part B: Engineering*, Nr. 5, (2010), S. 396–402.
- [20] BEVAN, L. G.: "Axial and short beam shear fatigue properties of cfrp laminates", *Composites*, Nr. 4, (1977), S. 227–232.
- [21] HAEFELE, P.; HERRERA, O.: "Strength and Stiffness Degradation of Carbon Fiber Reinforced Plastic under Cyclic Loading under Membran-, Shear- and Bending Loading", *Materials Science Forum*, (2015), S. 968–975.

- 
- [22] HORST, P.; ADAM, T. J.; LEWANDROWSKI, M.; BEGEMANN, B., et al.: "Very High Cycle Fatigue - Testing Methods", IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, (2018), S. 12004.
- [23] Hongneng Cai; MIYANO, Y.; NAKADA, M.; Sung Kyu Ha, et al.: "Long-term Fatigue Strength Prediction of CFRP Structure Based on Micromechanics of Failure", Journal of Composite Materials, Nr. 8, (2008), S. 825–844.
- [24] SCHWENKE, J.; HARTWICH, T.; KRAUSE, D.: "Optimierung von Inserts in Sandwichstrukturen durch additive Fertigung" in: Lachmayer, R.; Lippert, R. Bastian; Kaierle, S. (Hrsg.): Konstruktion für die Additive Fertigung, Berlin, Springer Berlin; Springer Vieweg, 2019.
- [25] Semann, R., Krause, D.: "Experimental and numerical analysis of nomex honeycomb sandwich panel inserts parallel to the face sheets" in: (Hrsg.): 17th European Conference on Composite Materials, 2016.
- [26] KLEIN, B.: "Leichtbau-Konstruktion, Berechnungsgrundlagen und Gestaltung", Vieweg+Teubner Verlag / Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH Wiesbaden, Wiesbaden, 2012.