

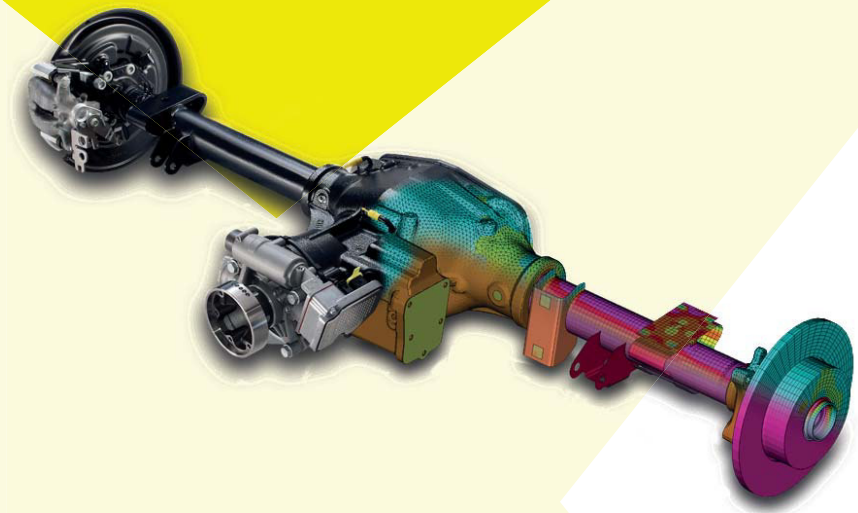


DVM

Deutscher Verband für
Materialforschung und -prüfung e.V.

43. Tagung des
DVM-Arbeitskreises Betriebsfestigkeit

Potenziale im Zusammenspiel von Versuch und Berechnung in der Betriebsfestigkeit



- ◆ Festigkeitsnachweis
- ◆ Auslegungs- und Absicherungsprozess
- ◆ Validierung von Berechnungsmodellen
- ◆ Neue Methoden für die Auslegung und Absicherung

SCHICHTWEISE BEWERTUNG DER LEBENSDAUER VON MULTIDIREKTIONALEN FASER-KUNSTSTOFF- VERBUNDEN

M. Neumeister*, M. Wagner*, I. Becker*, M. Decker*

*) IABG mbH, Ottobrunn

Zusammenfassung:

Der vorliegende Beitrag stellt eine Vorgehensweise zur Bewertung der Lebensdauer von multidirektionalen Faser-Kunststoff-Verbunden vor. Das bei der IABG entwickelte Verfahren FatiLaminat zur Bewertung der Betriebsfestigkeit von Faser-Kunststoff-Verbunden unter zyklischer Beanspruchung wurde hierzu im Rahmen des Projektes „HyMod“ erweitert und optimiert. Das Projekt wurde durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) gefördert. Basierend auf den Grundgrößen der unidirektionalen Einzelschichten, wie beispielsweise Steifigkeiten und quasistatische sowie zyklische Festigkeiten, erfolgt eine schichtweise Bewertung der Lebensdauer des multidirektionalen Faser-Kunststoff-Verbunds. Berücksichtigt werden hierbei insbesondere die Degradation der Steifigkeiten und Festigkeiten sowie die damit verbundenen Spannungsumlagerungen zwischen den unidirektionalen Einzelschichten und im Bauteil. Nach ersten Kontrollrechnungen mittels analytischer Strukturberechnungsmethoden wird das Betriebsfestigkeitskonzept in Form eines benutzerdefinierten Materialmodells UMAT in das Finite-Elemente Programmsystem ABAQUS implementiert. An ausgewählten Beispielen werden das grundlegende Verhalten unter zyklischer Beanspruchung sowie der Einfluss der Berücksichtigung der Steifigkeitsdegradation dargestellt und bewertet.

Stichwörter:

Betriebsfestigkeit, Lebensdauerbewertung, Faser-Kunststoff-Verbund, Wöhlerlinie, Steifigkeitsdegradation

LAYERWISE FATIGUE LIFE PREDICTION OF MULTIAXIAL COMPOSITE MATERIALS

Abstract:

This paper presents a procedure for evaluating the lifetime of multi-directional fiber-reinforced composites. Within the framework of the project “HyMod” funded by the Federal Ministry for Economic Affairs and Energy (BMWi) a concept for evaluating the fatigue strength of fiber-reinforced composites under cyclic loading is developed at IABG. The lifetime of multi-directional fiber-reinforced composites is evaluated layer by layer based on the significant parameters of unidirectional single layers, such as the stiffness and the quasi-static and cyclic strength. Particularly, the

degradation of stiffness and strength is considered. Additionally there are associated stress redistributions between the unidirectional single layers and in the component. In a first step check calculations are performed by analytical structure calculation methods. Subsequently, the fatigue strength concept is implemented to the finite element program system ABAQUS in form of a user-defined material model UMAT. The behavior under cyclic loading as well as the influence of the stiffness degradation are presented and evaluated by specific examples.

Keywords:

Fatigue strength, lifetime evaluation, fiber-reinforced composite, S/N curve, stiffness degradation

Einleitung

Unter dem Gesichtspunkt des Leichtbaus lassen sich mit Hilfe von Faser-Kunststoff-Verbunden leichte Strukturen mit sehr hohen Steifigkeiten und Festigkeiten realisieren. Zur Gewährleistung der Funktionalität und Sicherheit im Betrieb sind entsprechende Festigkeitsnachweise erforderlich. Neben der Bewertung der quasistatischen Festigkeit ist insbesondere die Bewertung der Lebensdauer von Bedeutung. Während dies für metallische Werkstoffe gängige Praxis ist, lassen sich die zur Verfügung stehenden Methoden nur bedingt auf Faser-Kunststoff-Verbunde anwenden. Dies ist vor allem dem komplexen Degradations- und Versagensverhalten der Faser-Kunststoff-Verbunde geschuldet. Mangels ausreichender Erkenntnisse über die rechnerische Modellierung des Verhaltens über der Lebensdauer ist eine Vielzahl von Versuchen nötig, was mit einem entsprechenden zeit- und kostenmäßigen Mehraufwand verbunden ist. Um diesen Mehraufwand zu vermeiden, werden entsprechende Konzepte zur Bewertung der Betriebsfestigkeit benötigt, die in gängige Finite-Elemente Programmsysteme integriert werden können. Diese Konzepte sollen einfach anwendbar sein und den Konstrukteur bereits zu Beginn der Auslegungsphase von Strukturen unterstützen.

Während in der Literatur zur Bewertung der Lebensdauer von Faser-Kunststoff-Verbunden unterschiedliche Ansätze vorgestellt werden [1-15], stehen auf dem freien Markt nur sehr eingeschränkt geeignete Berechnungswerkzeuge zur Verfügung. Im Rahmen des durch das BMWi geförderten Projekts „HyMod“ wird deshalb bei der IABG ein bestehendes Konzept zur Bewertung der Betriebsfestigkeit von Faser-Kunststoff-Verbunden (*FatiLaminate*) weiterentwickelt. Basierend auf den Grundgrößen der unidirektionalen Einzelschichten, wie beispielsweise Steifigkeiten und quasistatische sowie zyklische Festigkeiten, erfolgt eine schichtweise Bewertung der Lebensdauer der unidirektionalen Einzelschichten. Berücksichtigt werden hierbei insbesondere die Degradationen der Steifigkeiten und Festigkeiten aufgrund der voranschreitenden Schädigung in den Einzelschichten sowie die damit verbundenen Spannungsumlagerungen zwischen den unidirektionalen Einzelschichten und im Bauteil. Nach ersten Kontrollrechnungen mittels analytischer Strukturberechnungsmethoden wird das Betriebsfestigkeitskonzept in das Finite-Elemente Programmsystem ABAQUS implementiert. An ausgewählten Beispielen werden das grundl-

egende Verhalten unter zyklischer Beanspruchung sowie der Einfluss der Berücksichtigung der Steifigkeitsdegradation dargestellt und bewertet.

Konzept zur schichtweisen Bewertung der Lebensdauer

Eine Besonderheit der Faser-Kunststoff-Verbunde ist die Steifigkeitsdegradation mit zunehmender Schwingspielzahl. Innerhalb des Laminates sorgt die Steifigkeitsdegradation unter zyklischer Belastung in den Einzelschichten für eine Umverteilung der Beanspruchung zwischen den einzelnen Schichten. Damit verbunden ist eine Steifigkeitsänderung des gesamten Laminates. Die Ursachen für die Steifigkeitsdegradation sind

- Mikrorisse (in der Matrix zwischen den Fasern, Ablösungen Faser-Matrix, ...)
- Versagen einzelner Fasern.

Die experimentell ermittelte Steifigkeitsdegradation einer unidirektionalen Einzelschicht beinhaltet damit bereits alle lokal auftretenden Schädigungseffekte.

Die Beanspruchungen der Einzelschichten hängen von deren Steifigkeiten ab. Die Steifigkeiten der Einzelschichten hängen aufgrund der Degradation wiederum von den bereits erfahrenen Beanspruchungen ab. Dieser nichtlineare Zusammenhang erfordert eine schwingspielweise Betrachtung, die zur handhabbaren Reduktion der Rechenzeiten in eine abschnittsweise iterative Lösung für Schwingspielpakete n mit konstanter globaler Beanspruchung überführt wird. Eine vergleichbare Vorgehensweise wurde bereits in [11,15] vorgestellt. Abbildung 1 zeigt eine schematische Darstellung der Berechnung.

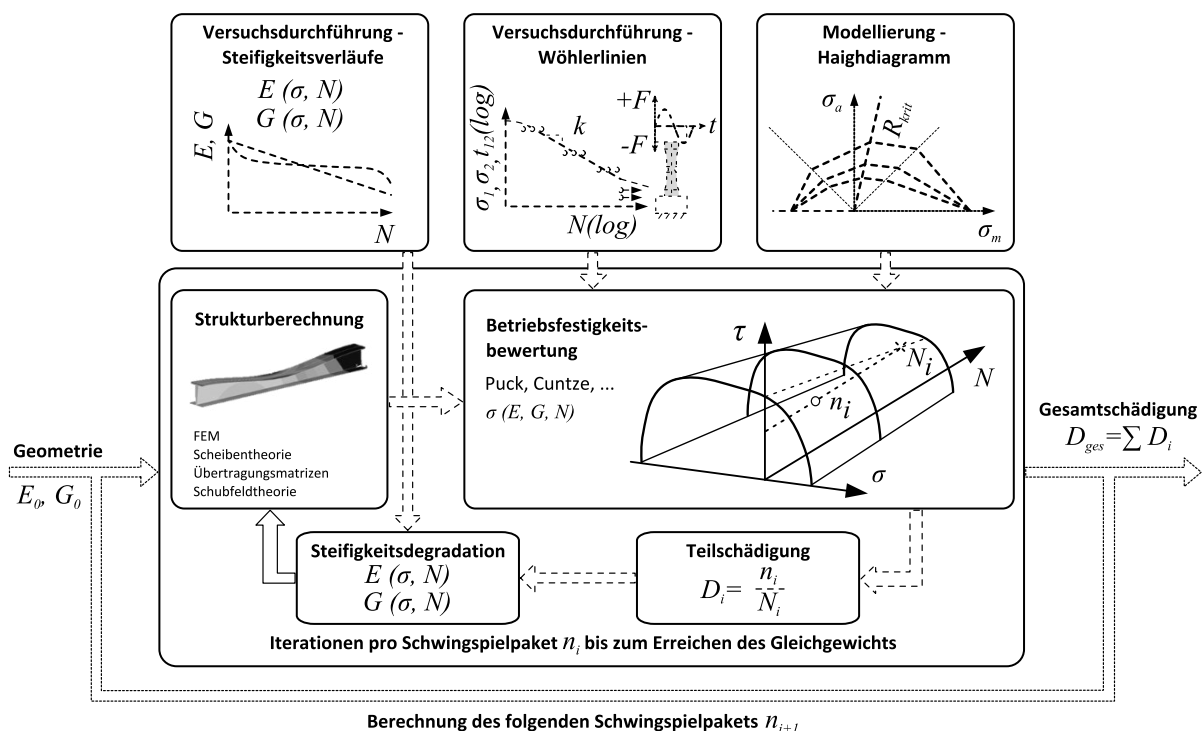


Abbildung 1: Schematische Darstellung der Berechnung der Schädigung unter Berücksichtigung einer Steifigkeitsdegradation (FatiLaminate)

Die Berechnung gliedert sich in folgende Abschnitte:

- Start der Berechnung mit quasistatischen Kenngrößen
- Bewertung der Spannungen auf Basis eines Bruchkörpers. Für den aktuellen Spannungszustand im aktuellen Schwingspielpaket n wird unter Berücksichtigung entsprechender Wöhlerlinien die Schwingspielzahl N ermittelt, bei der Totalversagen eintritt
- Bereitstellung der jeweils aktuell benötigten Werkstoffkenngrößen (Wöhlerlinien und Steifigkeitsdegradation)
- Berechnung der Teilschädigung für das aktuelle Schwingspielpaket und der daraus resultierenden Steifigkeit für den nächsten Rechenschritt
- Die vorherigen Schritte werden je Schwingspielpaket n so oft durchgeführt, bis sich Gleichgewicht einstellt.
- Nach jedem Schwingspielpaket wird immer auch die aktuelle Steifigkeit für den nächsten Rechenschritt bereitgestellt. Weiterhin wird die jeweils aktuelle Teilschädigung zur Gesamtschädigung aufsummiert.

Sobald in einem Element eine definierte Schädigung D erreicht ist (z. B. $D = 1$), werden die betroffenen Steifigkeiten auf einen definierten Restwert (z. B. 10 Prozent der Ausgangssteifigkeit) reduziert. Die Berechnung kann nun trotz des Versagens in einem oder mehrerer Elemente fortgeführt werden, sofern der intakte Teil der Struktur die äußere Last noch übertragen kann. Sollten weitere Elemente versagen und die Struktur kann die Last nicht mehr übertragen, wird die Berechnung gestoppt.

Das vorgestellte Vorgehen bezieht sich auf die Implementierung in ein FE-Programm. In diesem Fall werden durch das FE-Programm die einzelnen Dehnungskomponenten der unidirektionalen Einzelschichten direkt zur Verfügung gestellt und auch die entsprechenden Steifigkeitsgrößen direkt berücksichtigt. Für die Anwendung auf analytische Berechnungsmethoden, muss zur Bestimmung der Spannungskomponenten und der Laminatsteifigkeiten noch die klassische Laminattheorie CLT zwischengeschaltet werden [16,17].

Zur Anwendung der vorgestellten Berechnungsmethode sind unter anderem folgende Annahmen notwendig:

- linear elastisches Werkstoffverhalten
- Gültigkeit der verwendeten Bruchkörper sowohl für statische als auch zyklische Beanspruchungen
- Kein Frequenzeinfluss

Temperaturänderungen können Eigenspannungen und verändertes Materialverhalten bewirken und sind ggf. zu berücksichtigen.

Alle genannten Spannungen werden in Form von Spannungsamplituden eingegeben, da üblicherweise auch die Wöhlerlinien mit Spannungsamplituden und dem dazugehörigen Spannungsverhältnis R angegeben werden. Dies gilt sowohl für die Strukturberechnung (Analytik, FEM, CLT) als auch für die Bewertung der Lebensdauer.

Spannungsbewertung auf Basis eines Bruchkörpers

Die Bewertung der Spannungen für den jeweils aktuellen Beanspruchungszustand je Schwingspielpaket erfolgt im vorgestellten Beispiel basierend auf dem Versagenskriterium nach *Cuntze*. Alternative Versagenskriterien sind ebenfalls anwendbar. Dieses berücksichtigt die in Abbildung 2 dargestellten Versagensformen der unidirektionalen Einzelschicht.

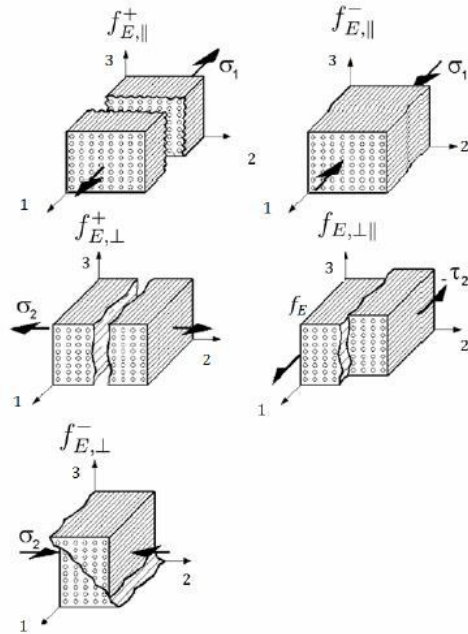


Abbildung 2: Versagensformen einer UD-Schicht nach [19]

Gleichung (1) beschreibt das Versagen einer unidirektionalen Einzelschicht für den ebenen Spannungszustand nach *Cuntze* mit quasistatischen Festigkeiten [7,18,19]. Versagen tritt ein, wenn die Werkstoffanstrengung Eff den Wert 1 erreicht.

$$EFF = 1 = \sqrt[m]{\left(\frac{\varepsilon_1 E_1}{R_1^z}\right)^m + \left(\frac{-\varepsilon_1 E_1}{R_1^d}\right)^m + \left(\frac{\sigma_2}{R_2^z}\right)^m + \left(\frac{-\sigma_2}{R_2^d}\right)^m + \left(\frac{|\tau_{12}|}{R_{12} - \mu_{12} \sigma_2}\right)^m} \quad (1)$$

Neben der Beanspruchung der Einzelschicht (Dehnung ε_1 in Faserrichtung, Spannung σ_2 quer zur Faserrichtung und der Schubspannung τ_{12}) werden der Elastizitätsmodul E_1 in Faserrichtung sowie die Beiwerte m und μ benötigt. Hierbei wird zwischen Zug z , Druck d , und den Spannungskomponenten 1, 2 und 12 gemäß Abbildung 2 unterschieden.

Die Anwendung quasistatischer Bruchkörper wurde bereits in der Vergangenheit in der Literatur vorgestellt [8, 9]. Die quasistatischen Festigkeiten R in Gleichung (1), die zur Bewertung eines Spannungszustandes notwendig sind, werden durch die Beschreibung der Wöhlerlinien ersetzt:

$$R \leftrightarrow \sigma_D \left(\frac{N}{N_D}\right)^{-\frac{1}{k}} \quad (2)$$

In Gleichung (2) steht N für die Versagensschwingspielzahl, die iterativ für $Eff = 1$ berechnet wird. Weiterhin enthält die Formulierung die Kenngrößen der Wöhlerlinie

(Wöhlerlinienneigung k , Grenzschwingspielzahl N_D sowie die Festigkeit bei der Grenzschwingspielzahl σ_D).

Damit ist eine Formulierung des Bruchkörpers abhängig von der Schwingspielzahl aufgestellt, der sich entsprechend der zu Grunde gelegten Kenngrößen der Wöhlerlinien in Abhängigkeit der Schwingspielzahl verkleinert (Abbildung 3).

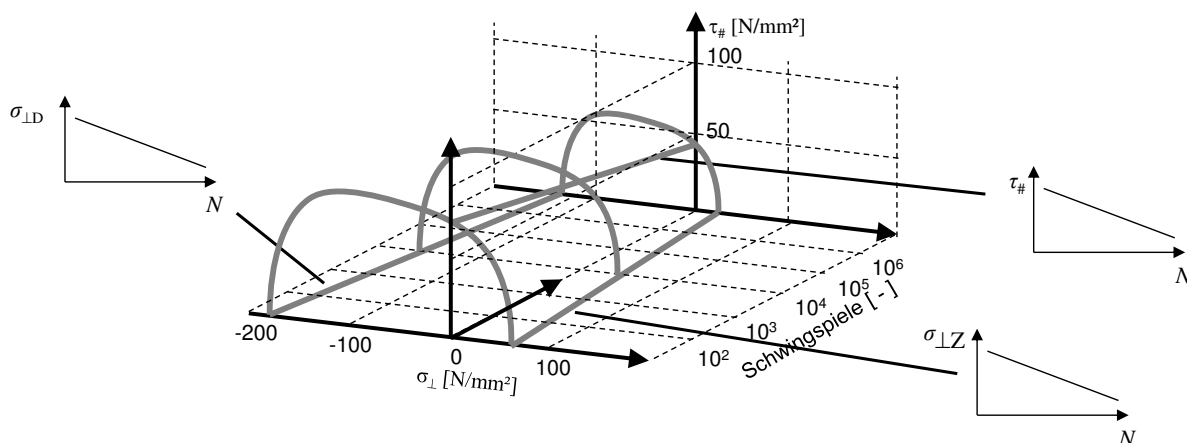


Abbildung 3: Bruchkörper zur Berücksichtigung des Zwischenfaserbruches in Abhängigkeit der Schwingspielzahl

Der hier vorgestellte Fall zeigt das prinzipielle Vorgehen für den ebenen Spannungszustand. Die im weiteren Verlauf vorgestellte Vorgehensweise erlaubt weiterhin die Spannungsbewertungen mittels des dreidimensionalen Bruchkörpers nach *Cuntze* sowie eines zweidimensionalen Bruchkörpers nach *Tsai-Wu*. Aufgrund des modularen Aufbaus der Methode *FatiLaminate* ist auch die Integration weiterer Bruchkörper möglich. Auch können geeignete Kriterien zur Bewertung der Delamination eingeführt werden, die unabhängig vom bereits integrierten dreidimensionalen Bruchkörper nach *Cuntze* formuliert werden können.

Steifigkeitsdegradation

Die Steifigkeitsdegradation der Einzelschichten entsteht durch Mikrorisse in der Matrix und das Versagen einzelner Fasern. In Abhängigkeit der Werkstoffkomponenten (Faser- und Matrixwerkstoffe), Faserhalbzeuge, Fertigungsprozess und weiterer Einflüsse können der Verlauf und die Größe der Steifigkeitsdegradation in Abhängigkeit der Schwingspielzahl unterschiedliche Formen annehmen. In der Literatur werden hierzu unterschiedliche Verläufe dargestellt [20, 21]. Damit die charakterisierten unidirektionalen Einzelschichten möglichst genau in der Berechnung abgebildet werden können, wird hier ein nichtlinearer Steifigkeitsverlauf verwendet, der sich mittels Parametervariation flexibel vom linearen Verlauf bis hin zum ausgeprägt nichtlinearen Verlauf anpassen lässt (Abbildung 4).

Basierend auf den in [11] geschilderten Informationen wurde für diesen Zweck der nachfolgende Zusammenhang abgeleitet.

$$C_j = \left[1 - \left(D_{j-1} + \frac{n}{N_j} \right)^{\beta} \right]^{\frac{1}{\alpha}} \cdot (C_0 - C_{min}) + C_{min} \quad (3)$$

Hierbei beschreibt C_j die Steifigkeit im aktuellen zu berechnenden Schwingspielpaket. Weiterhin wird die Anfangssteifigkeit C_0 und die Steifigkeiten bei Totalversagen C_{\min} benötigt, wobei auch alternative Definitionen möglich sind. D_{j-1} entspricht der akkumulierten Schädigung der bisher abgeschlossenen Rechenschritte. Auf diese wird die Schädigung im aktuell zu berechnenden Schwingspielpaket mit n Schwingspielen und der für den aktuellen Spannungszustand ermittelten Versagensschwingspielzahl N addiert. Die Größen a und β sind Formparameter, die mittels Parameteroptimierung an die Versuchsergebnisse angepasst werden. Hierbei wird aus mehreren Steifigkeitsverläufen zu einer Wöhlerlinie mittels „Parameterfit“ ein mittlerer repräsentativer Steifigkeitsverlauf ermittelt.

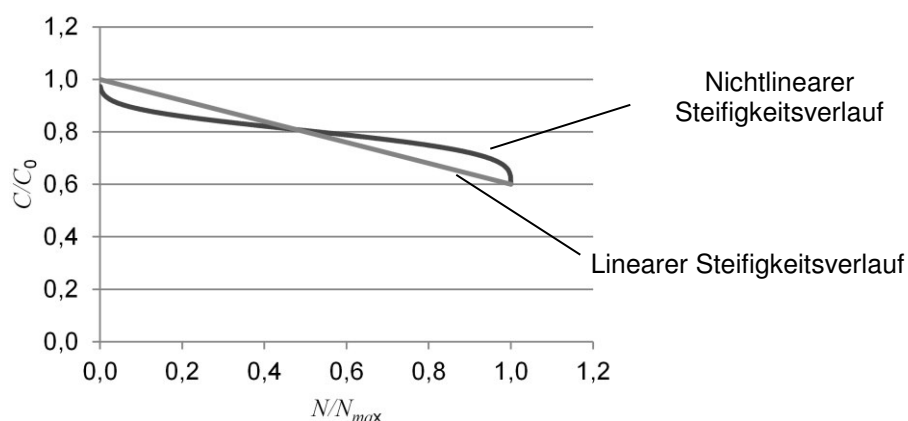


Abbildung 4: Beispiele für normierte lineare und nichtlineare Steifigkeitsverläufe

Berücksichtigung unterschiedlicher Spannungsverhältnisse

Zur Berücksichtigung unterschiedlicher Spannungsverhältnisse bietet sich das Haigh-Diagramm an. In der Literatur existieren verschiedene Vorschläge unter anderem unter Berücksichtigung unterschiedlicher Bruchmoden [14, 22 - 27].

Basierend auf den bisherigen Erfahrungen hat sich das Haigh-Diagramm nach *Kawai* [23] als sinnvoll erwiesen. Mit drei Wöhlerlinien sowie den quasistatischen Festigkeiten ist das Laminat für beliebige Spannungsverhältnisse R definiert, wobei jedem Spannungsverhältnis ein Winkel γ im Haigh-Diagramm zugeordnet ist (Abbildung 5).

Der kritische Winkel γ_{krit} im Haigh-Diagramm wird aus dem Verhältnis der quasistatischen Druckfestigkeit σ_d zur Zugfestigkeit σ_z ermittelt.

Unter zyklischer Beanspruchung treten im Falle einer wechselnden Beanspruchung sowohl Zug- als auch Druckkomponenten in einem Zyklus auf. Da für die Anwendung eines Bruchkörpers klar zwischen Zug- und Druckversagen zu unterscheiden ist, wird die Annahme getroffen, dass bei Spannungsverhältnissen im Haigh-Diagramm „links“ von γ_{krit} Druckversagen auftritt, und „rechts“ davon Zugversagen. Diese Vorgehensweise wird auch in [23, 25] beschrieben.

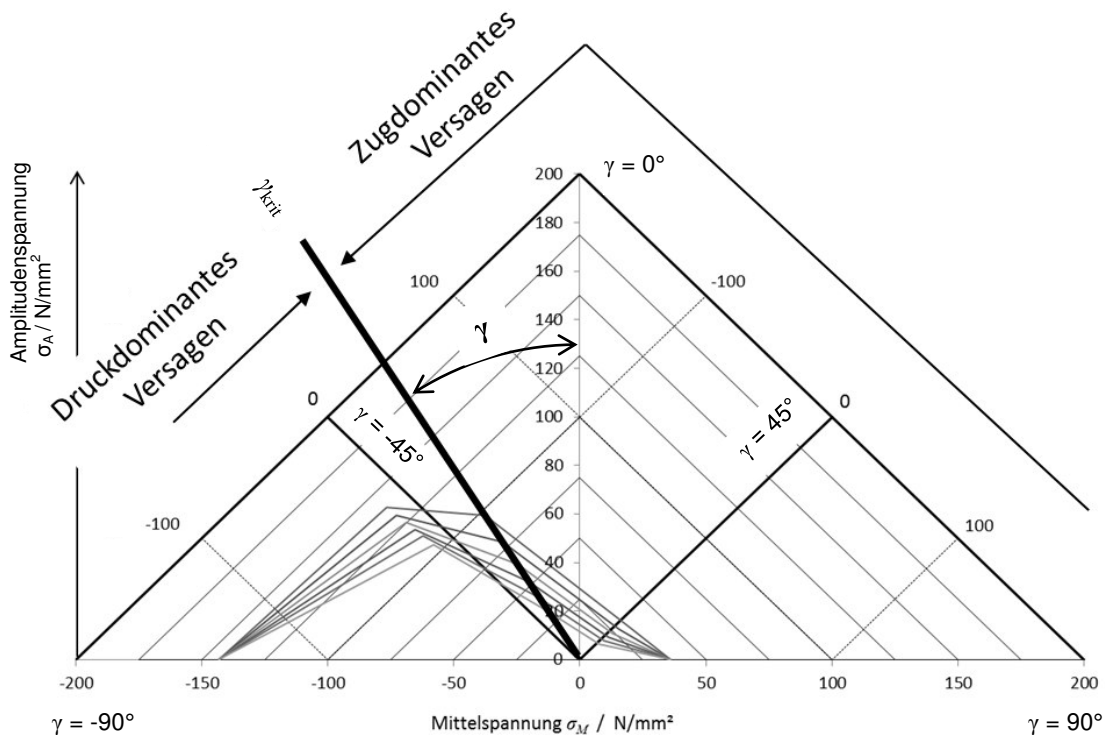


Abbildung 5: Haigh-Diagramm und die Aufteilung in Druck- und Zugversagen am Beispiel der Spannungskomponente quer zur Faserrichtung (z.B. Laminat UD 90°)

Implementierung in das Finite Elemente Programmsystem **ABAQUS**

Die zuvor beschriebene Methode zur Bewertung der Betriebsfestigkeit wird in Form eines Benutzerdefinierten Materialmodells (user-defined material UMAT) in das Programmsystem **ABAQUS** implementiert [28]. Die Berechnung erfolgt durch einen laufzeitoptimierten Algorithmus. Dieser ermöglicht die Analyse von Schwingspielpaketen, sodass nicht jeder Zyklus einzeln berechnet wird, sondern ein ganzes Schwingspielpaket bestehend aus einer Vielzahl von Schwingspielen.

Die Strukturantwort wird für jedes Schwingspielpaket inkrementweise berechnet (Abbildung 6). Dabei werden für jeden Integrationspunkt im Modell in jedem Inkrement die von Abaqus berechneten Dehnungsinkremente an eine User Subroutine (UMAT) übergeben, in der dann der aktuelle Spannungszustand aus den aktuellen Steifigkeiten berechnet wird.

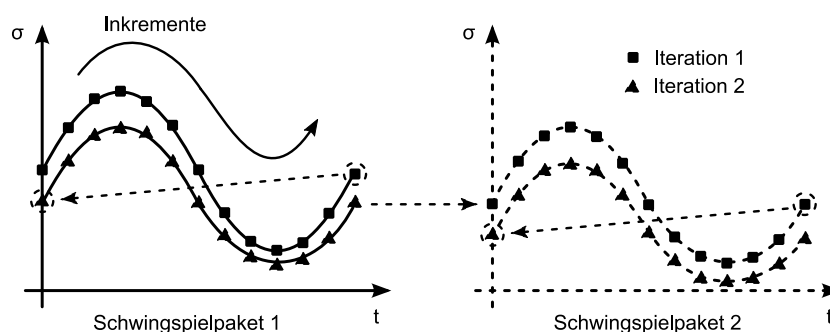


Abbildung 6: Direct Cyclic Berechnungsablauf (schematisch)

Nach dem letzten berechneten Inkrement des Schwingenspiels werden aus den zuvor berechneten Spannungen die Spannungsamplituden und Spannungsverhältnisse des aktuellen Schwingenspiels berechnet. Es folgen die Ermittlung der Wöhlerlinienkennwerte für die aktuellen Spannungsverhältnisse mit Hilfe des Haigh-Diagramms sowie die Berechnung der Schwingenspielzahl bei Totalversagen N_j für den aktuellen Spannungszustand aus Gleichung (1) und (2). Ein typischer Verlauf der Werkstoffanstrengung über der logarithmierten Schwingenspielzahl ist in Abbildung 7 dargestellt.

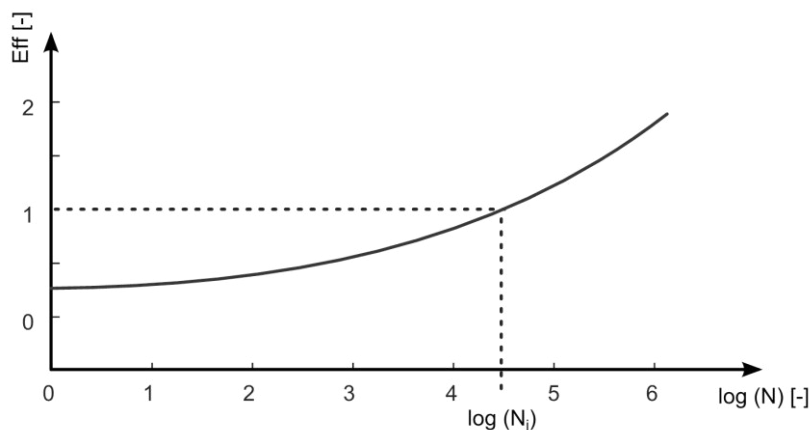


Abbildung 7: Beispiel für den Verlauf der Werkstoffanstrengung Eff über der logarithmierten Schwingenspielzahl

Im Anschluss wird die Teilschädigung für das aktuelle Schwingenspielpaket aus dem Schwingenspielpaket n und der Schwingenspielzahl bei Totalversagen N_j berechnet:

$$D_j = \frac{n}{N_j} \quad (4)$$

Daraus werden nach Gleichung (3) die aktuellen Steifigkeiten berechnet. In der darauffolgenden Iteration werden die Spannungen mit den neu berechneten Steifigkeitswerten berechnet, bevor nach dem letzten Inkrement des Schwingenspielpakets wiederum die aktuelle Steifigkeitsdegradation berechnet wird. Sobald sich ein Gleichgewicht zwischen Spannungen und Steifigkeiten einstellt, werden die Spannungen des nächsten Schwingenspielpakets berechnet.

Beispiele

Zur Kontrolle der zuvor vorgestellten schichtweisen Bewertung der Betriebsfestigkeit erfolgt die Bewertung an zwei ausgewählten Beispielen. Basierend auf dem zuvor vorgestellten Vorgehen werden die Spannungs- und Lastumlagerungen, die Steifigkeitsdegradationen und die Versagensschwingspielzahlen an den beiden Beispielen der Lasteinleitung in eine Platte und einer Zugprobe dargestellt.

Soweit Kenngrößen aus experimentellen Untersuchungen zur Verfügung stehen, werden diese genutzt. Fehlende Kenngrößen werden der gängigen Literatur entnommen.

Lasteinleitung in eine Platte

Bei komplexen Strukturen hat die Steifigkeitsdegradation zur Folge, dass sich dadurch auch lokal der Beanspruchungszustand in der Struktur ändert. Dieses Verhalten soll im Folgenden am Beispiel der analytischen Berechnung einer

Lastumlagerung in einer ebenen Platte dargestellt werden. Bei diesem Beispiel wird nur über eine Schubbeanspruchung n_{xy} des Laminates in den „Schubfeldern“ die Last F von dem mittleren Gurt in die beiden äußeren Gurte und die Lagerung übertragen.

Die analytischen Strukturberechnungen werden basierend auf der sogenannten „Schubfeldtheorie“ und der „Kraftgrößenmethode“ mittels der Methode der Übertragungsmatrix einer Mehrgurtscheibe [29] durchgeführt.

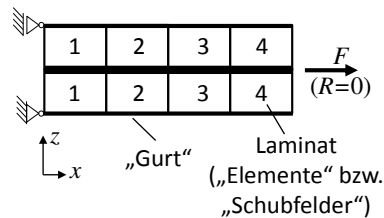


Abbildung 8: Berechnungsbeispiel zur Darstellung des Effektes der Lastumlagerung in einer Struktur. Jedes „Schubfeld“ entspricht dabei einem Übertragungsabschnitt. Die folgende Gleichung zeigt hierzu die Grundlage dieser Berechnungsmethode.

$$\{z\}_{i+1} = [T] \cdot \{z\}_i \quad (5)$$

Bei dieser Berechnungsmethode werden die Zustandsgrößen $\{z\}$ von einem Rand i eines Übertragungsabschnittes mittels der Übertragungsmatrix $[T]$ auf den anderen Rand $i+1$ übertragen. Weitere Informationen hierzu können der Literatur entnommen werden [29, 30].

Die zur Kombination mit der Methode *FatLaminate* zur Bewertung der Lebensdauer notwendigen Schnittstellen sind:

- Übergabe der Schnittlasten der Scheibe (n_x, n_y, n_{xy}) aus dem analytischen Berechnungsmodell an das „Lebensdauermodell“
- Berechnung der Steifigkeitsgrößen (E_1, E_2, G_{12}) im „Lebensdauermodell“

Untersucht wird beispielhaft das Verhalten eines glasfaserverstärkten Epoxidharzes ($\pm 17^\circ / 90^\circ |_{sym}$) unter zugschwellender Beanspruchung. Die folgenden Diagramme zeigen in normierter Form die Umlagerungen der Schubbeanspruchung der Elemente 1 & 4 in die Elemente 2 & 3 (die Elemente 1 & 4 werden am höchsten beansprucht) über die Lebensdauer.

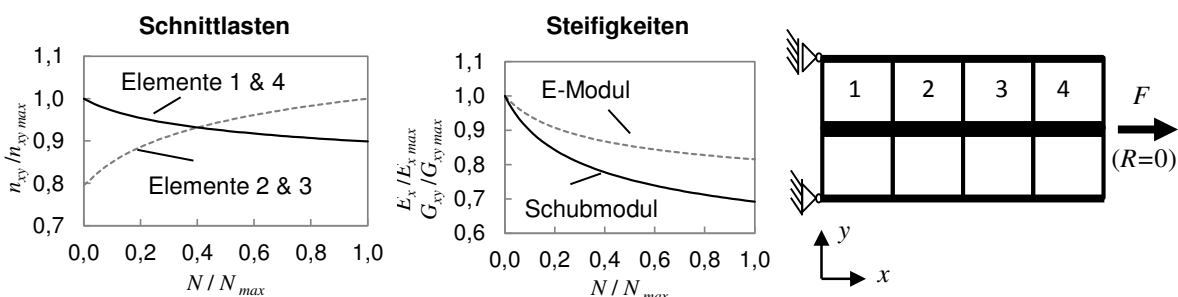


Abbildung 9: Lastumlagerungen in Berechnungsbeispiel der Lasteinleitung in eine Platte

Weiterhin ist deutlich sichtbar, dass auch die Steifigkeiten des Laminates in den hoch beanspruchten Elementen deutlich degradieren.

Zugprobe unter zyklischer Beanspruchung

Im nächsten Schritt wird die vorher beschriebene Lebensdauerberechnung mit Hilfe einer eigenen Materialroutine in *ABAQUS* auf ein einfaches Beispiel angewandt, das die wesentlichen Komponenten eines komplexeren Bauteils enthält. Hierzu wird eine eingespannte taillierte Streifenprobe unter zugschwellender Belastung gewählt (Abbildung 10).

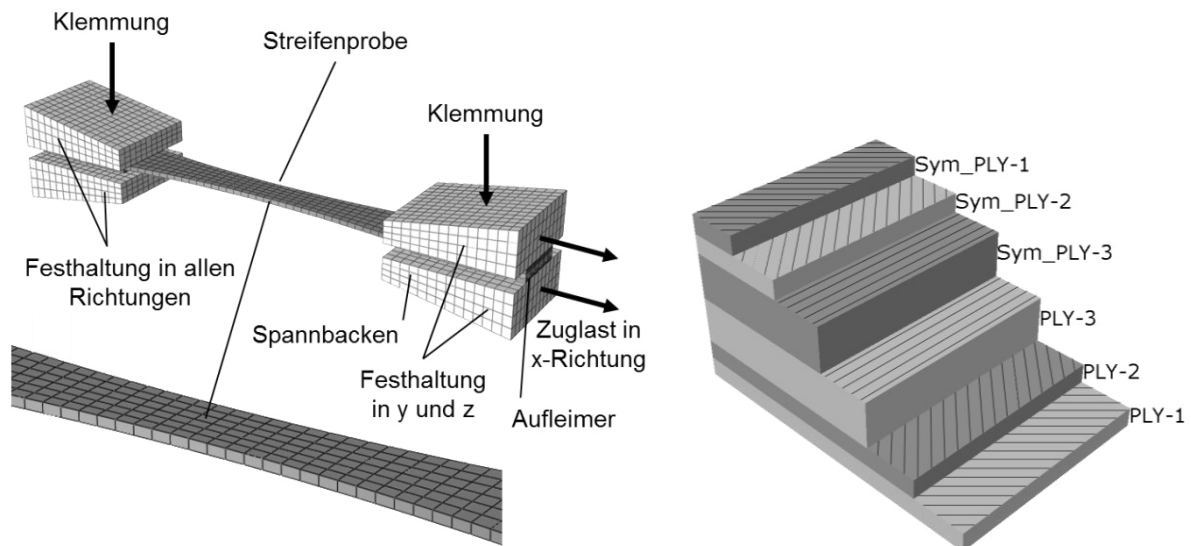


Abbildung 10: Taillierte Streifenprobe mit Lasteinleitung unter zugschwellender Belastung

Die Streifenprobe besteht aus einem Laminataufbau aus 6 unidirektionalen Einzelschichten ($\pm 45^\circ / 90^\circ |_{\text{sym}}$). An den Enden sind Aufleimer aufgebracht, an denen die Streifenprobe zwischen zwei Spannbacken geklemmt wird. Über die Spannbacken wird die Zuglast in die Streifenprobe eingebracht.

Abbildung 11 zeigt die Verteilung der Gesamtschädigung sowie die Steifigkeitsdegradation (Elastizitätsmodul senkrecht zur Faserrichtung) in der 90° Schicht nach 5000 Lastzyklen.

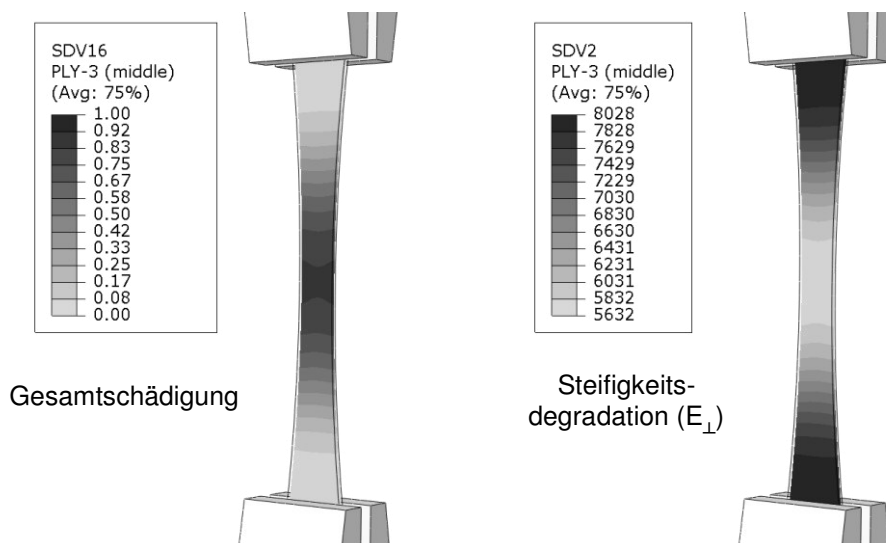


Abbildung 11: Gesamtschädigung und Steifigkeitsdegradation in der 90° Lage der Streifenprobe nach 5000 Lastzyklen

Die Schädigung ist am Rand des mittleren Bereichs am größten, von dieser Stelle wird aller Wahrscheinlichkeit nach das Versagen ausgehen.

Weiterhin lässt sich der zeitliche Verlauf der Ergebnisgrößen darstellen. Abbildung 12 zeigt den zeitlichen Verlauf der Gesamtschädigung und der Steifigkeitsdegradation an der Stelle der maximalen Schädigung in der 90° und der +45°/-45° Schicht.

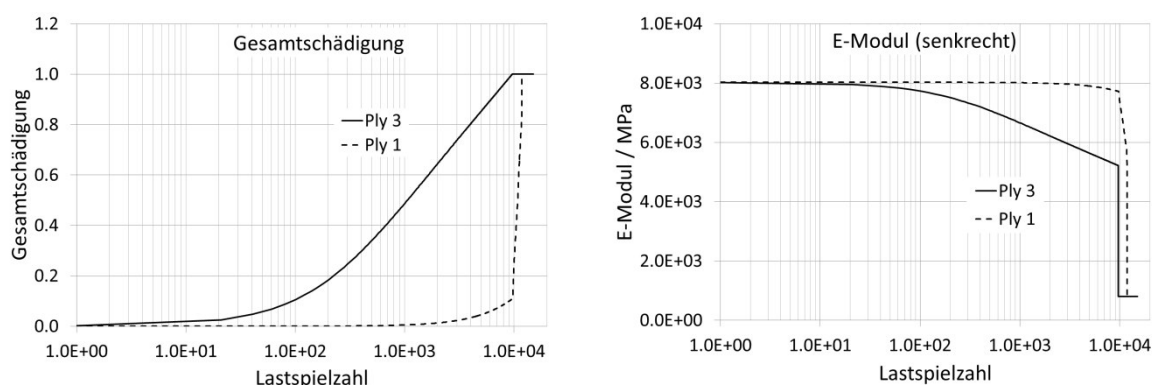


Abbildung 12: Gesamtschädigung (links) und Steifigkeitsdegradation (rechts) an der Stelle der maximalen Schädigung

Man erkennt deutlich, dass zuerst die 90° Schicht (Ply 3) geschädigt wird. Mit zunehmender Schädigung müssen die +45°/-45° Schichten die Lasten übernehmen, so dass auch in diesen Schichten die Schädigung zunimmt. Nach dem Versagen der 90° Schicht steigt die Schädigung in den +45°/-45° Schichten sprunghaft an bis auch diese Schichten schließlich versagen und das Laminat bricht. Die Berechnung läuft in diesem Fall trotz versagter Elemente unter Reduzierung der betroffenen Steifigkeiten auf einen definierten Restwert weiter.

Ein Bezug zu Messungen lässt sich aus dem zeitlichen Verlauf der Gesamtsteifigkeit herstellen. Der normierte Verlauf aus der FE Rechnung in Abbildung 13 zeigt ein Verhalten, welches bei vielen Versuchen an vergleichbaren Laminaten beobachtet werden konnte.

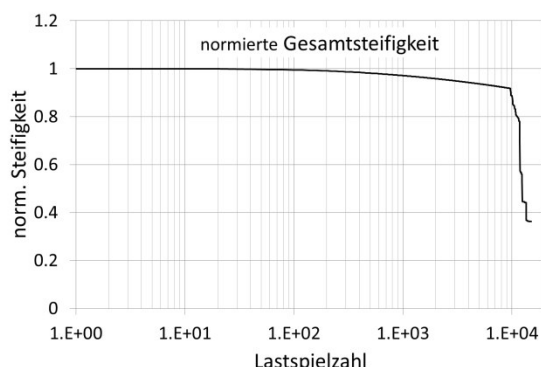


Abbildung 13: Zeitlicher Verlauf der Gesamtsteifigkeit

Das dargestellte Diagramm zeigt die Gesamtsteifigkeit des Laminates und ist damit den mittels Extensometer ermittelten Steifigkeitsverläufen vergleichbar.

Kennwertermittlung

Die für die Lebensdauerbewertung benötigten Kennwerte werden durch Zug-/Druck-Versuche an Flach- und Rundproben sowie Torsionsversuche an rohrförmigen Prüfkörpern auf servohydraulischen Prüfsystemen ermittelt. Sowohl die Geometrie und Vorbereitung der Probekörper als auch die Einspannvorrichtungen müssen so gewählt werden, daß artefaktfreie Versuchsergebnisse ermittelt werden können, die im Sinne einer exakten Kennwertermittlung ausgewertet werden.

Einspannungen und Messtechnik

Neben gängigen Einspannvorrichtungen für Flachproben unter Zugbeanspruchung werden auch spezielle Einspannvorrichtungen für die zuverlässige Ermittlung der Kennwerte unter wechselnder und druckschwelliger Beanspruchung genutzt. Abbildung 14 zeigt einzelne Beispiele mit den eingesetzten Messinstrumenten zur Ermittlung der Steifigkeitsdegradation.

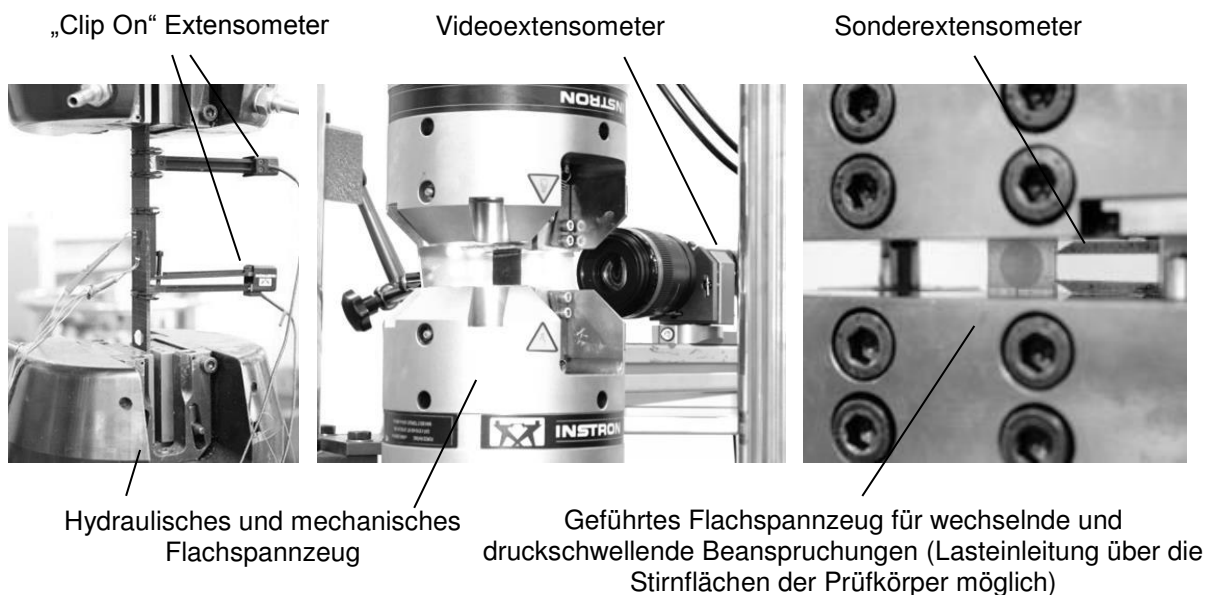


Abbildung 14: Spannzeuge mit unterschiedlicher freier Länge zur Ermittlung der Werkstoffkenngrößen an Flachproben unter zyklischer Beanspruchung mit unterschiedlichen Spannungsverhältnissen

Die zu Beginn vorgestellte Bewertungsmethode soll in Zukunft auch zur Beurteilung des Delaminationsverhaltens eingesetzt werden können. Für diesen Zweck werden neben Flachproben in Sonderfällen auch sogenannte Würfelproben unter Beanspruchung in Laminatdickenrichtung untersucht. Abbildung 15 zeigt einen Versuchsaufbau zur Kennwertermittlung unter wechselnder Beanspruchung.

Mittels geeigneter Clip-On- und Video-Extensometer wird die Steifigkeitsdegradation ermittelt, die in die Lebensdauerberechnung einfließt.

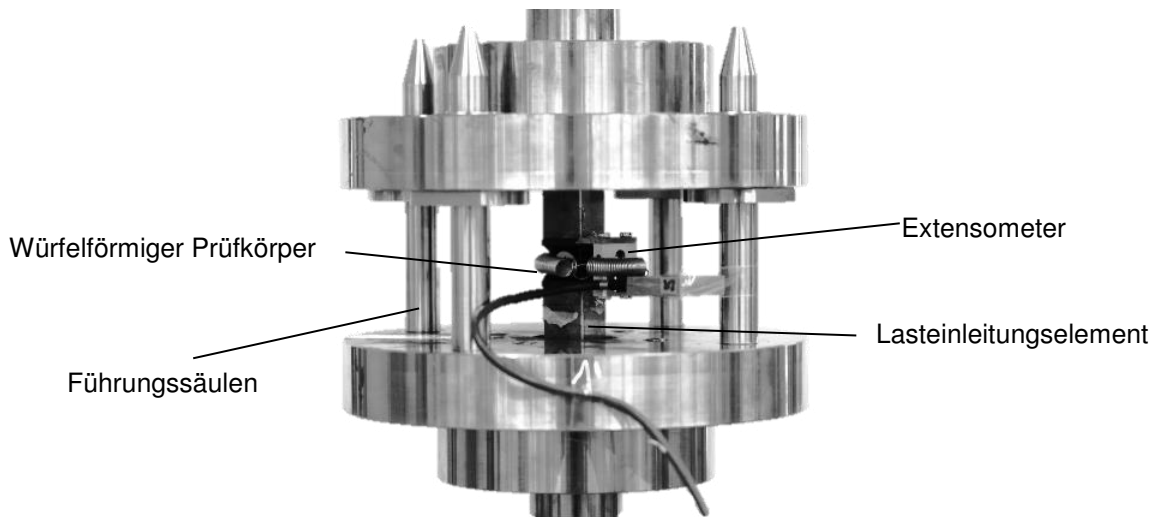


Abbildung 15: Würfelförmiger Prüfkörper unter Beanspruchung in Laminatdickenrichtung

Prüfkörper und Ergebnisse

Zur Kennwertermittlungen (insbesondere Wöhlerlinien und Steifigkeitsdegradationen) der Einzelschichten kommen sowohl Standard- als auch Sonderprüfkörper zum Einsatz [31]. Wichtig ist hierbei, dass die Degradation und das anschließende Materialversagen im Messbereich des Prüfkörpers auftreten und die Kennwerte nicht durch beispielsweise Brüche im Einspannbereich verfälscht werden. Gestaltungsmaßnahmen von Prüfkörpern zur Verbesserung der Aussagekraft der ermittelten Kennwerte sind [5, 6, 31, 32, 33]:

- Breitentaillierung von Laminaten mit multidirektionalem Aufbau
- Dickentaillierung von Prüfkörpern mit unidirektionalem Aufbau
- Rohrproben zur Ermittlung der Kennwerte quer zur Faserrichtung.

Abbildung 16 zeigt hierzu einige Beispiele optimierter Prüfkörper für unidirektionale Laminat.

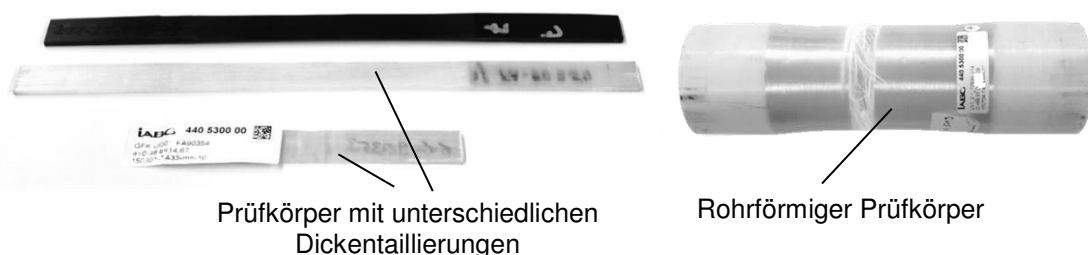


Abbildung 16: Beispiel für optimierte Prüfkörper

Abbildung 17 zeigt beispielhaft eine Wöhlerlinie sowie einen repräsentativen Steifigkeitsverlauf eines in Prüfkörperlängsrichtung unidirektional glasfaserverstärkten Epoxidharzes (GFK UD 0°). Die dickentaillierten Prüfkörper wurden zugschwellend beansprucht.

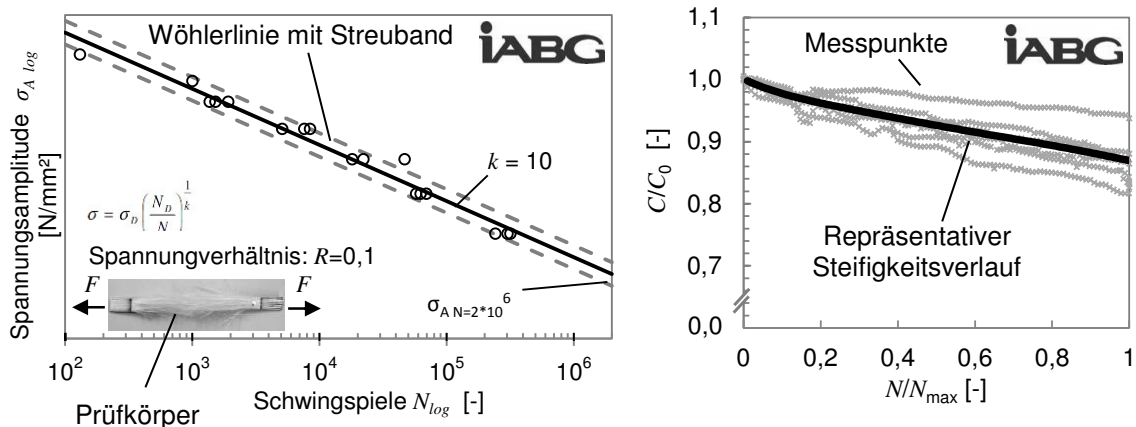


Abbildung 17: Beispiel einer Wöhlerlinie und eines repräsentativen Steifigkeitsverlaufes für das Laminat GFK UD 0° des Forschungsprojektes HyMod

Der repräsentative Steifigkeitsverlauf wurde basierend auf den normierten Messpunkten aus insgesamt 5 Versuchsreihen mittels Minimierung der Fehlerquadrate an die Versuchsergebnisse angepasst.

Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen des durch das BMWi geförderten Projekts „HyMod“ wird bei der IABG das Konzept *FatiLaminate* zur Bewertung der Betriebsfestigkeit von Faser-Kunststoff-Verbunden unter zyklischer Beanspruchung weiterentwickelt. Mit diesem Konzept wird dem Anwender eine Methode zur rechnerischen Bewertung von Bauteilen zur Verfügung gestellt, bei denen trotz lokaler Schädigungen durch Spannungsumlagerungen ein positiver Effekt auf die Lebensdauer entsteht.

Basierend auf den Grundgrößen der unidirektionalen Einzelschichten (Steifigkeiten und Festigkeiten) erfolgt eine schichtweise Bewertung der Lebensdauer der unidirektionalen Einzelschichten und daraus die Bewertung der lokalen und globalen Steifigkeitsdegradation und Lebensdauer des Laminats. Das vorgestellte Vorgehen erlaubt die Berücksichtigung unterschiedlicher Bruchkörper sowie eine Anpassung der Steifigkeitsverläufe an die experimentell ermittelten Daten. Das Betriebsfestigkeitskonzept ist in Form eines benutzerdefinierten Materialmodells UMAT in das Finite-Elemente Programmsystem ABAQUS implementiert. An ausgewählten Beispielen wurde das grundlegende Verhalten unter zyklischer Beanspruchung sowie der Einfluss der Berücksichtigung der Steifigkeitsdegradation dargestellt und bewertet.

Im Rahmen der weiteren Entwicklung des vorgestellten Konzeptes sollen neben dem dreidimensionalen Bruchkörper auch Delaminationen separat berücksichtigt werden können. Darüber hinaus wird die in ABAQUS implementierte UMAT mit dem Ziel einer möglichst geringen Rechenzeit stetig optimiert.

Literatur

- [1] K. L. Reifsnider; *Damage in composite materials*, ASTM, 1982
- [2] B. Harries; *Fatigue in composites*, Woodhead Publishing Ltd and CRC Press LLC, Cambridge, 2003
- [3] A. P. Vassilopoulos, T. Keller; *Fatigue of Fiber-reinforced Composites*, Springer Verlag, London, 2011
- [4] R. Talreja; *Damage and Failure of Composite Materials*, Cambridge University Press, New York, 2012
- [5] H. Bansemir; *Messen, Testen, Inspizieren – Prüfmethode und Prüflinggestaltung für die Dimensionierung von Faserverbundstrukturen*, Technisch-wissenschaftliches Seminar, Hochleistungsstrukturen im Leichtbau, Universität der Bundeswehr München, Neubiberg, 10.12.2008
- [6] V. Trappe; *Beschreibung des intralaminaren Ermüdungsverhaltens von CFK mit Hilfe innerer Zustandsvariablen*, Fortschritt-Berichte VDI Reihe 5 Nr. 646, VDI Verlag, Düsseldorf, 2002
- [7] R. Cuntze; *Auch Composites können ermüden*, Vortrag im Rahmen der UAG Composites Fatigue, Carbon Composites e.V. Augsburg, April 2013
- [8] I. Koch; *Life time prediction of composite materials*, Vortrag im Rahmen des Thementages "Composite Fatigue" des CC e.V. Augsburg, Augsburg, Februar 20014
- [9] W. Hufenbach, V. Lustig, M. Gude, I. Koch; *Ermüdungsverhalten von faserverstärkten Verbundstrukturen unter mehrachsiger Zug/Druck-Torsionsbelastung*, Technische Universität Dresden
- [10] J. Degrieck, W. V. Paepegem; *Fatigue Damage Modelling of Fibre-reinforced Composite Materials: Review*, Applied Mechanics Reviews, 54 (4), 2001
- [11] M. M. Shokrieh, L. B. Lesard; *Fatigue under multiaxial stress systems*, Fatigue in composites - Science and technology of the fatigue response of fibre-reinforced plastics, Part I - Nr. 3, Bryan Harris, 2003
- [12] J. Fröschl, M. Decker, H. Oppermann, M. Metschkoll: *Betriebsfestigkeitsbewertung von Bauteilen aus Faserverbundwerkstoffen – Festigkeitsrelevante Phänomene und Herausforderungen*, DVM-Bericht 139, 39. DVM Tagung des Arbeitskreises Betriebsfestigkeit, Paderborn, 2012, S.43 – 56
- [13] M. Orth, M. Butz, C. Gaier; *Entwicklung einer Methode der Betriebsfestigkeitsanalyse von Strukturbauteilen aus Cfk unter zuhelfenahme verschiedener statischer Versagenskriterien*, DVM-Bericht 140, 40. DVM Tagung des Arbeitskreises Betriebsfestigkeit, Herzogenaurach, 2013, S. 15-32
- [14] C. Hahne, U. Knaust, H. Schürmann; *Beitrag zur Festigkeitsbewertung von CFK Strukturen unter PKW Betriebslasten*, DVM-Bericht 140, 40. DVM Tagung des Arbeitskreises Betriebsfestigkeit, Herzogenaurach, 2013, S. 33-48
- [15] M. Magin, N. Himmel; *Physical non-linearity of unidirectional polymer matrix composites in cyclic fatigue life analyses*; Institut für Verbundwerkstoffe GmbH – University Kaiserslautern, ICCM17, 27-31 July 2009, Edinburgh, UK
- [16] H. Schürmann; *Konstruieren mit Faser-Kunststoff-Verbunden*, 2. Auflage, Springer Verlag, Heidelberg, 2007
- [17] N. N.; *Entwicklung von Bauteilen aus Faser-Kunststoff-Verbund BERECHNUNGEN*, VDI 2014, Beuth Verlag, Berlin, September 2006
- [18] R. Cuntze; *The predictive capability of failure mode concept-based strength criteria for multidirectional laminates*; In: Composites Science and Technology

- 64 (2004), S. 343_377
- [19] R. Cuntze; *Failure Conditions for Isotropic Materials, Unidirectional Composites, Woven Fabrics and their Visualization and Links* -. 2006
 - [20] R. P. L. Nijssen; *Fatigue Life Prediction and Strength Degradation of Wind Turbine Rotor Blade Composites*, Delft, 2006
 - [21] T.P. Philippidis, A.P. Vassilopoulos; *Fatigue of composite laminates under off-axis loading*, International Journal of Fatigue 21 (1999) 253–262, Elsevier 1999
 - [22] T. Park, M. Kim, B. Jang, J. Lee, J. Park; *Nonlinear constant life model for fatigue life prediction of composite materials*, 18th Intl. Convergence on Composite Materials, Jeju, Korea, 2011
 - [23] M. Kawai, N. Itoh; *A failure-mode based anisomorphic constant life diagram for a unidirectional carbon/epoxy laminate under off-axis fatigue loading at room temperature*, Journal of Composite Materials published online 20 February 2013
 - [24] M. Kawai, T. Murata; *A three-segment anisomorphic constant life diagram for the fatigue of symmetric angle-ply carbon/epoxy laminates at room temperature*, Composites: Part A 41 (2010) 1498–1510, Elsevier, 2010
 - [25] M. Kawai, T. Teranuma; *Principal master diagrams approach to fatigue life prediction of composite laminates*, 18th Intl. Convergence on Composite Materials, Jeju, Korea, 2011
 - [26] A. P. Vassilopoulos, B. D. Manshadi, T. Keller; *Influence of the constant life diagram formulation on the fatigue life prediction of composite materials*, International Journal of Fatigue 32 (2010) 659–669, Elsevier, 2010
 - [27] A. Weinert, P. Gergely; *Wöhlerflächen- Grundlage für die Verbesserung der Strukturzuverlässigkeit*, Technisch wissenschaftliches Seminar an der UniBw München, Neubiberg, 2010
 - [28] Abaqus Analysis Users` s Manual, Section 26.7, Version 6.14, Dassault Systemes, 2014
 - [29] H. Rapp, M. Neumeister, M. Grafen, J. Birkel; *CFK-Strukturen – Verfahren zur Auslegung und zum Nachweis*, Vortragsreihe im Rahmen der 40 Jahre Jubiläumsfeier der Universität der Bundeswehr München, November 2013
 - [30] O. Volkersen; *Translation of "Neuere Untersuchungen zur Theorie der Klebverbindungen."* Wissenschaftliche Gesellschaft für Luft- und Raumfahrt, Gologne , pp . 1-28, 1963.
 - [31] L. A. Carlsson, R. B. Pipes; *Hochleistungsfaserverbundwerkstoffe – Herstellung und experimentelle Charakterisierung*, Teubner Verlag, Stuttgart 1989
 - [32] N. N.; *LTH Faserverbund-Leichtbau*, Januar 2008
 - [33] D. F. Adams, G. A. Finley; *Analysis of Thickness-Tapered Unidirectional Composite Compression Specimens*, Journal of Composite Materials, Vol. 31, No. 22, 1997