

Kollektives Versagen vermeiden

Kurzglasfaserverstärkte Thermoplaste im Stresstest

Kurzglasfaserverstärkte Kunststoffe durchlaufen über die Betriebsdauer komplexe Belastungszustände. Daher wird der Einfluss wechselnder Last und Frequenz in Form von Lastkollektiven auf die Werkstoffermüdung untersucht und eine integrative Berechnungsmethodik zur Strukturauslegung vorgestellt. Mit dieser praxisnahen Vorgehensweise ist eine schnelle Lebensdauerabschätzung möglich.

Grundlage für den nachhaltigen Einsatz von kurzglasfaserverstärkten Thermoplaste sind werkstoffgerechte Dimensionierungsmethoden, die das mechanische Verhalten realitätsnah beschreiben und Werkstoffversagen vorhersehen. In der Praxis wird der Betriebsfestigkeitsnachweis durch aufwendige und kostenintensive Prüfungen an seriennahen Bauteilen unter Reallast erbracht. Dies hat den Nachteil, dass der Entwicklungsprozess zum Zeitpunkt der Prüfung weit vorangeschritten ist und Konstruktionsänderungen mit hohen Kosten verbunden sind. Hier schaffen numerische Berechnungsmethoden Abhilfe.

Für die Lebensdauerberechnung werden Ermüdungsmodelle verwendet, die auf Werkstoffwöhlerlinien basieren [1]. Diese Daten werden in Schwingversuchen unter idealisierten und konstanten Prüfbedingungen generiert. Jedoch treten in den realen Anwendungsfeldern

komplexe Belastungsverläufe auf, die sich unter anderem durch zeitlich variierende mechanische Belastung bezüglich Beanspruchungshöhe und -frequenz auszeichnen. Mithilfe von Schadensakkumulationshypothesen ist es möglich, eine Berechnungsmethodik für komplexe Last/Zeit-Verläufe aufzubauen [1].

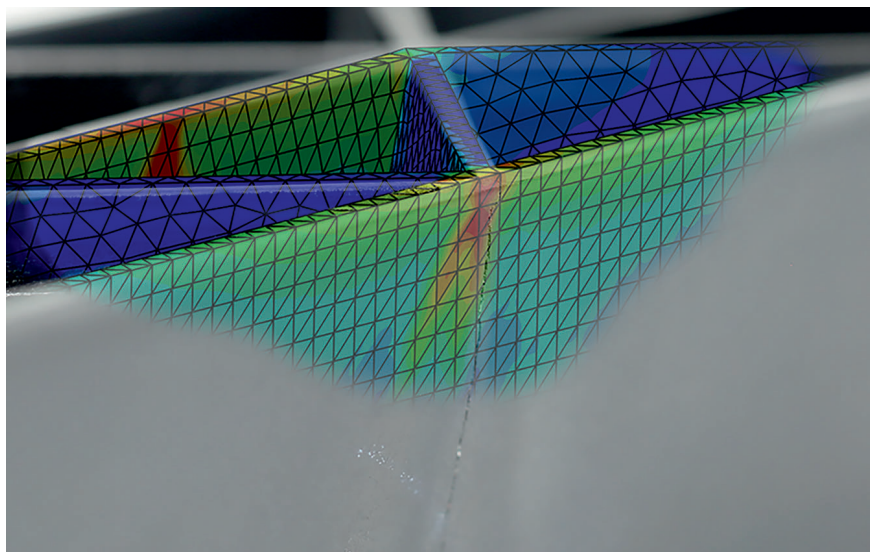
Werkstoffermüdung bei unterschiedlichen Frequenzen

Für die Untersuchungen wird ein kurzglasfaserverstärktes Polyamid 6 (PA 6) vom Typ Zytel 73G15HSL der Firma DuPont de Nemours GmbH verwendet. Die mechanischen Eigenschaften von kurzglasfaserverstärkten Kunststoffen hängen auch von der im Werkstoff vorherrschenden Faserorientierung ab [2–4]. Daher werden Probekörper mit unterschiedlicher Hauptfaserorientierung aus spritzgegossenen Platten herauspräpariert.

Um den Einfluss der Beanspruchungsfrequenz zu ermitteln, werden die Ermüdungsversuche bei 1 Hz, 5 Hz und 15 Hz durchgeführt (Bild 1). Die Verläufe unterscheiden sich in Abhängigkeit der Belastungsfrequenz. So zeigen die Ergebnisse zwischen 1 Hz und 5 Hz einen ähnlichen, idealisiert als linear zu betrachtenden Verlauf. Die Wöhlerlinien divergieren ab einer Bruchlastspielzahl von ca. 10^4 , wodurch für die höhere Frequenz von 5 Hz höhere Bruchlastspielzahlen erzielt werden. Dahingegen ist die Wöhlerlinie für 15 Hz durch einen regressiven Verlauf charakterisiert und die Bruchlastspielzahl fällt für die gleichen Beanspruchungshöhen bis zu maximal zwei Dekaden niedriger aus als für die 1-Hz- und 5-Hz-Versuche. Bei Betrachtung der Ergebnisse für die Querprobekörper ist grundsätzlich der gleiche Trend zu beobachten. Die Wöhlerlinien für 1 Hz und 5 Hz sind durch degressive Verläufe und die Wöhlerlinie für 15 Hz erneut durch einen regressiven Verlauf gekennzeichnet. Im Gegensatz zu den Längsprobekörpern unterscheiden sich die Wöhlerlinien zwischen 1 Hz und 5 Hz stärker voneinander. Ein quer orientierter Probekörper mit einer Belastung von ca. 44 N/mm^2 erträgt bei einer 5-Hz-Belastung ca. 10^3 Schwingspiele und bei 5 Hz ca. $2,8 \cdot 10^4$ Lastwechsel und weist somit eine um über eine Dekade höhere Ermüdungslebensdauer auf.

Was die Lebensdauer beeinflusst

Um die Auswirkung wechselnder Last und Frequenz zu untersuchen, werden Schadensakkumulationsversuche in Form von exemplarischen Lastkollektive durchgeführt. Die Lastkollektive bestehen »



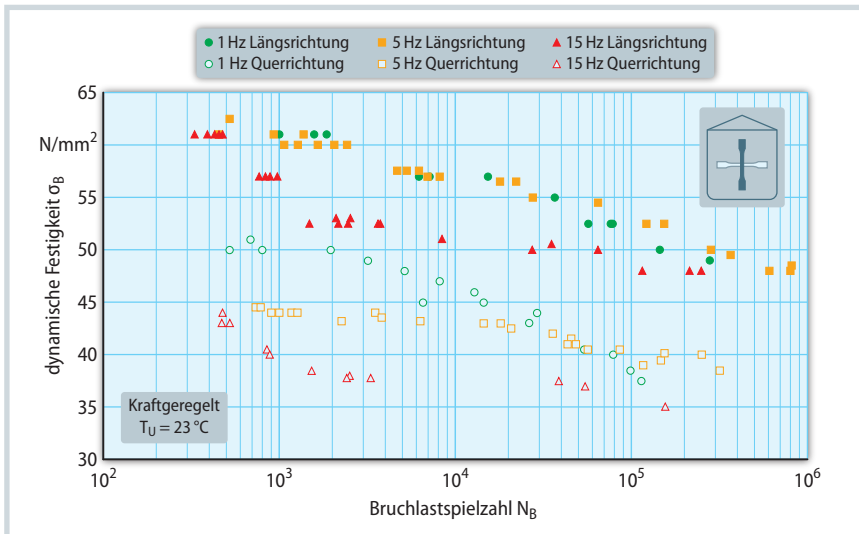


Bild 1. Faserorientierungsabhängige Ermüdungsdaten aus Wöhlerversuchen bei Beanspruchungsfrequenzen von 1 Hz, 5 Hz und 15 Hz Quelle: IKV, Grafik © Hanser

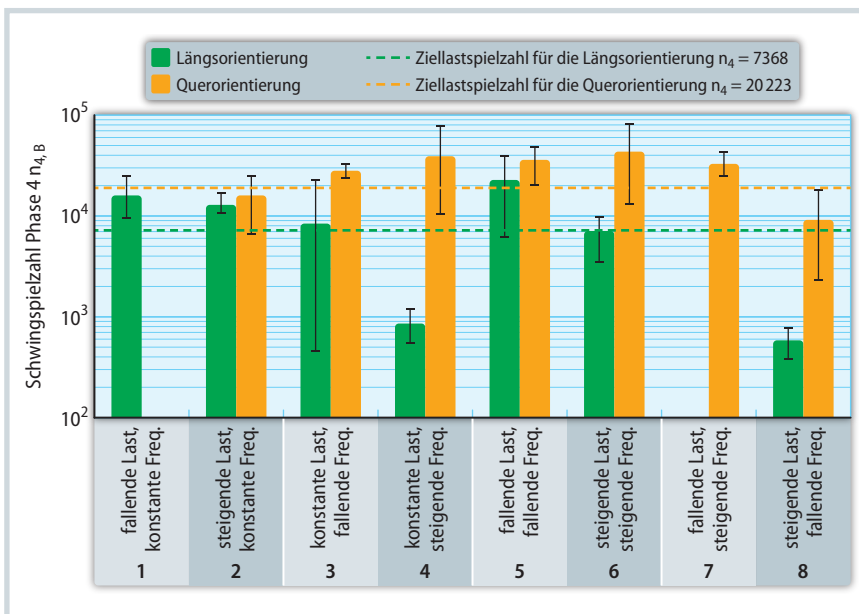


Bild 2. Vergleich der erzielten Schwingungsspielzahlen in der Evaluierungsphase Quelle: IKV, Grafik: © Hanser

aus vier Phasen, wobei die Frequenz f und Beanspruchung F_0 in drei Stufen variiert werden. Die Anzahl der Schwingspiele wird für jede Phase anhand des linearen Schädigungsparameters $d_i = n_i/N_i$ definiert. Dabei ist n_i die in der jeweiligen Phase auf den Probekörper aufgebrachte Schwingungsspielzahl. Die Bruchlastspielzahl kann entsprechend der frequenz- und lastabhängigen Belastung aus den vorangegangenen Ermüdungsergebnissen ermittelt werden. Die erste Phase dient der mechanischen Konditionierung der Probekörper, da gerade die ersten Beanspruchungszyklen Initialschädigungen im Werkstoff hervorrufen können ($d_1 = 0,10$) [5]. In den beiden darauffolgenden Pha-

sen 2 und 3 wird ein identischer Schädigungsparameter von $d_2 = d_3 = 0,25$ definiert. Die vierte und somit letzte Phase dient der Evaluation.

Die Ergebnisse aus den exemplarischen Lastkollektiven für die Evaluierungsphase 4 sind in **Bild 2** dargestellt. Zunächst wird deutlich, dass sowohl für die Längs- als auch für die Querorientierung jeweils Prüfsequenzen (1 und 7) vorhanden sind, bei denen die Evaluierungsphase nicht immer erreicht wird und der Werkstoff verfrüht versagt. Darüber hinaus ist festzustellen, dass die Streuung der Messergebnisse in Abhängigkeit der Versuchsblöcke und der Entnahmerichtung unterschiedlich stark ausgeprägt

ist. Insgesamt übertreffen die Versuche für die Längs- und Querrichtung bei fünf von acht exemplarischen Lastkollektiven die Ziellastspielzahl. Für den Fall mit längsorientierten Proben erreichen die fallenden Prüfsequenzen (1, 3 und 5) höhere Lastspielzahlen. Im Vergleich dazu zeigen die querorientierten Probekörper ein umgekehrtes Bild. Die steigenden Prüfsequenzen sind durch höhere Lastspielzahlen gekennzeichnet.

Abschätzung der Ermüdung anhand von Masterwöhlerlinien

Um eine werkstoffgerechte Lebensdauerdimensionierung von Strukturen aus kurzglasfaserverstärkten Kunststoffen durchführen zu können, muss die Faserorientierung im Formteil und die daraus resultierenden mechanischen Eigenschaften in der numerischen Berechnung berücksichtigt werden [4]. Daher wird eine integrative Simulationskette – bestehend aus einer Prozess- und Struktursimulation – aufgebaut. Als Spritzgießsimulationssoftware kommt Sigmasoft Virtual Molding der Sigma Engineering GmbH zum Einsatz. Diese Software berechnet die lokale Faserorientierung des Formteils und überträgt diese in die Struktursimulation in der Abaqus Umgebung von Dassault Systèmes. Es wird eine quasistatische Simulation durchgeführt und in Abhängigkeit der aufgetragenen Strukturbeanspruchung ein statischer Anstrengungsfaktor r nach Tsai und Hill berechnet [8]. Der resultierende statische Anstrengungsfaktor entspricht der anisotropen Werkstoffbeanspruchung, enthält jedoch keine Orientierungsinformation. Um die Ermüdungslebensdauer abschätzen zu können, werden die zuvor ermittelten faserorientierungsabhängigen Wöhlerkurven entsprechend der jeweiligen Orientierung über quasistatischen Festigkeiten normiert und anschließend gemittelt. Als Resultat steht für jede Beanspruchungsfrequenz eine Masterwöhlerkurve zur Verfügung, die unabhängig von der Faserorientierung ist [6]. Somit wird der Zusammenhang zwischen dem dynamischen Anstrengungsfaktor r_{dyn} und der Bruchlastspielzahl hergestellt (**Bild 3**).

Die gängigen Schadensakkumulationshypothesen zur Berechnung von wechselnden Belastungen während dynamisch-zyklischer Beanspruchung basieren auf dem Verhältnis zwischen

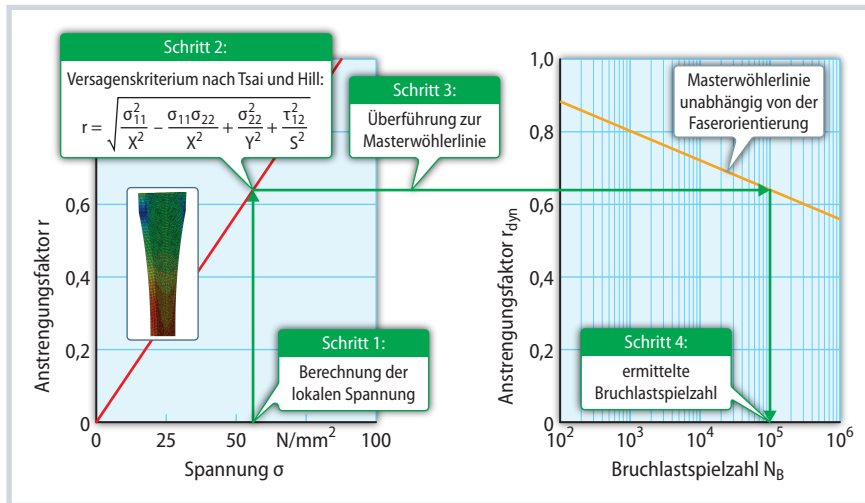


Bild 3. Masterwöhlerlinienkonzept zur Berechnung der Bruchlastspielzahl Quelle: IKV; Grafik: © Hanser

aufgebrachter Lastspielzahl und der Bruchlastspielzahl bei der entsprechenden konstanter Prüffrequenz und -last. Anhand einer Klassifizierungsmethode wie der Rainflow-Analyse kann aus einem realen Last/Zeit-Verlauf ein Lastkollektiv ermittelt werden [1, 7]. Für jede Blocklast aus dem Lastkollektiv wird anschließend eine Struktursimulation bei der entsprechenden Beanspruchungshöhe F_i durchgeführt und die benötigte Bruchlastspielzahl ermittelt. Mit der tatsächlich aufgebrachten Schwingenspielzahl n_i wird mit einer Schadensakkumulationshypothese die Teilschädigung d_i berechnet und aufsummiert. Liegt die Gesamtschädigung D unter 1, gilt das Bauteil als betriebsfest.

Zur Überprüfung der Methode werden drei exemplarische Lastkollektive an einem Bauteil mit Rippen durchgeführt. Das

Modellbauteil wird im 3-Punkt-Biegeversuch geprüft, wodurch die kritischen Bereiche des Bauteils mit einer Zugbeanspruchung beaufschlagt werden. Die Bauteilversuche werden analog zu den Lastkollektivversuchen auf Probekörperebene durchgeführt. In **Bild 4** ist die Abschätzung der Bauteillebensdauer mithilfe der Schadensakkumulationshypothese nach Palmgren und Miner [8, 9] abgebildet, die mit der integrativen Simulation methodik berechnet wurde. Die numerisch ermittelte Ermüdungslebensdauer des Rippenbauteils liegt um ca. 61 bis 103 % unter der realen Bruchlastspielzahl, wodurch die Betriebsfestigkeit zur sicheren Seite abgeschätzt wird. Somit wurde die Simulation methodik exemplarisch auf ein praxisnahes Modellbauteil erfolgreich angewendet und überprüft.

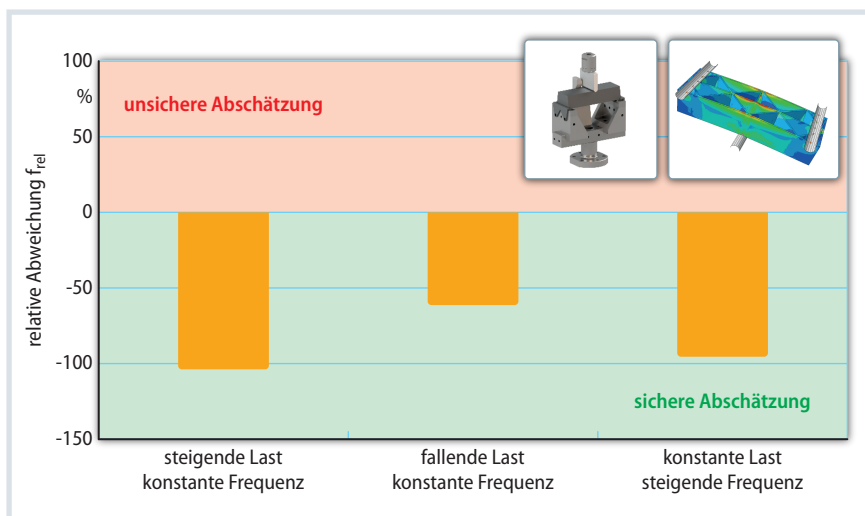


Bild 4. Erprobung der vorgestellten Berechnungsmethodik anhand eines Rippenbauteils im 3-Punkt-Biegeversuch Quelle: IKV; Grafik: © Hanser

Fazit

In den Untersuchungen konnte gezeigt werden, dass die experimentell ermittelten Ermüdungsdaten eine nicht vernachlässigbare Frequenzabhängigkeit für den charakterisierten Werkstoff aufweisen. Darüber hinaus konnte festgestellt werden, dass es zu Lastreihenfolgeeffekten bei wechselnder Beanspruchungshöhe und -frequenz kommen kann, die sich nachteilig auf die Bruchlastspielzahl auswirken kann. Mit der vorgestellten Berechnungsmethodik können anhand von Masterwöhlerlinien und einer quasi-statischen Struktursimulation mit einem anisotropen Materialmodell akzeptable Vorhersagen bezüglich der Bruchlastspielzahl sowohl für eine konstante als auch für exemplarische Lastkollektive getätigt werden. Diese praxisnahe Vorgehensweise ermöglicht eine schnelle Abschätzung der Betriebsfestigkeit auf der Bauteilebene und kann im Entwicklungsprozess von komplexen Strukturbauteilen unterstützend verwendet werden. ■

Die Autoren

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Christian Hopmann ist Inhaber des Lehrstuhls für Kunststoffverarbeitung und Leiter des Instituts für Kunststoffverarbeitung (IKV) in Industrie und Handwerk an der RWTH Aachen.

Hakan Çelik, M.Sc., beschäftigt sich am IKV mit der Betriebsfestigkeit und Vibroakustik von kurzfaserverstärkten Kunststoffen; hakan.celik@ikv.rwth-aachen.de

Dank

Das IGF-Forschungsvorhaben 19419 N der Forschungsvereinigung Kunststoffverarbeitung wird über die AIF im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung und -entwicklung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie gefördert.

Service

Literatur & Digitalversion

➤ Das Literaturverzeichnis und ein PDF des Artikels finden Sie unter www.kunststoffe.de/onlinearchiv

English Version

➤ Read the English version of the article in our magazine *Kunststoffe international* or at www.kunststoffe-international.com