

Werkstoffermüdung von kurzglasfaserverstärkten technischen Thermoplasten

# Hochfrequentes Ermüden

Kurzglasfaserverstärkte Kunststoffe werden häufig in Struktur- und flächigen Gehäusebauteilen eingesetzt, die dauerhaft Vibrationen im Frequenzbereich bis zu wenigen  $10^3$  Hz ausgesetzt sind. Um eine werkstoffgerechte Dimensionierung gegen hochfrequente Schwinglasten zu ermöglichen, wird in dieser Arbeit der Einfluss der Beanspruchungsfrequenz auf die Werkstoffermüdung untersucht.

Eine aktuelle Untersuchung des Instituts für Kunststoffverarbeitung (IKV) in Industrie und Handwerk an der RWTH Aachen analysiert den Frequenzeinfluss auf die Werkstoffermüdung von kurzglasfaserverstärkten technischen Thermoplasten. Im Fokus der Betriebsfestigkeit stehen bislang vor allem faserverstärkte Trägerstrukturen, die über die gesamte Bauteillebensdauer Wechsellasten mit hohen Amplituden bei Frequenzen unter 1 Hz ertragen müssen. Davon abzugrenzen sind flächige Strukturen wie zum Beispiel Luftführungen, Filter- und Batteriegehäuse im Automobilbereich und Formteile, beispielsweise für Bohrmaschinen und Küchengeräte im Haushaltsbereich [1]. Die Belastungszustände der Bauteile sind durch geringe Lasthöhen, jedoch hoch-

frequente Vibrationen gekennzeichnet. Da die Strukturantwort unter Schwinglast eine Funktion der Anregungsfrequenz (Modalverhalten) ist, erfolgt die Bauteilentwicklung unter vibroakustischen Gesichtspunkten [2].

Das vibroakustische Strukturverhalten ist von den viskoelastischen Werkstoffeigenschaften, der Bauteilgeometrie und den Einspannbedingungen abhängig. Wird das Bauteil im Bereich der charakteristischen Eigenfrequenz angeregt, treten in der Struktur Resonanzüberhöhungen auf, die zu hohen Werkstoffbeanspruchungen führen können [2, 3]. Die Eigenfrequenzen werden im Wesentlichen von der Bauteilsteifigkeit bestimmt. Die Höhe der Strukturantwort hängt dagegen von der Werkstoffdämpfung ab. Häufig wird bei der Bauteilentwicklung die Vermeidung des

Resonanzfalls angestrebt. Dazu wird die Bauteilsteifigkeit so optimiert, dass die Eigenfrequenzen über den Anregungsfrequenzen liegen. Die Vorhersage des Steifigkeitsverhaltens von faserverstärkten Bauteilen wird mit integrativen Berechnungsmethoden durchgeführt und ist im industriellen Umfeld etabliert [1, 4].

In vielen Anwendungen lassen sich jedoch Anregungen im Bereich der Eigenfrequenzen aufgrund der auftretenden komplexen Belastungen (Frequenzen bis  $10^3$  Hz) nicht vollständig vermeiden. In solchen Fällen erfolgt die Bauteilfreigabe anhand von Shaker-Prüfungen an seriennahen Prototypen, da für eine simulative Abschätzung der Schwingfestigkeit die Bemessungsgrundlage fehlt. Für klassische Betriebsfestigkeitssimulationen werden Ermüdungsdaten aus Wöhlerversuchen bei Belastungsfrequenzen bis 10 Hz herangezogen. Diese Ermüdungsdaten lassen sich jedoch nicht auf Belastungen bei hohen Frequenzen übertragen, da das mechanische Verhalten von thermoplastischen Werkstoffen aufgrund der viskoelastischen Eigenschaften stark von der Beanspruchungsart abhängt. Um auch diesen Frequenzbereich zukünftig für eine simulative Auslegung zugänglich zu machen, ist es notwendig, den Einfluss der Frequenz auf die Werkstoffermüdung für kurzglasfaserverstärkte Kunststoffe zu untersuchen.

## Das Zusammenspiel von Belastungsdauer und Höhe der Frequenz

Grundsätzlich wird unter dem Ermüdungsbegriff der fortschreitende Schädigungsprozess im Werkstoff aufgrund von wiederkehrenden Wechsellasten ver-



Ob bei Küchengeräten oder im Automobilbereich: Thermoplaste sind während ihrer Lebensdauer oft Wärme und Schwingungen ausgesetzt.

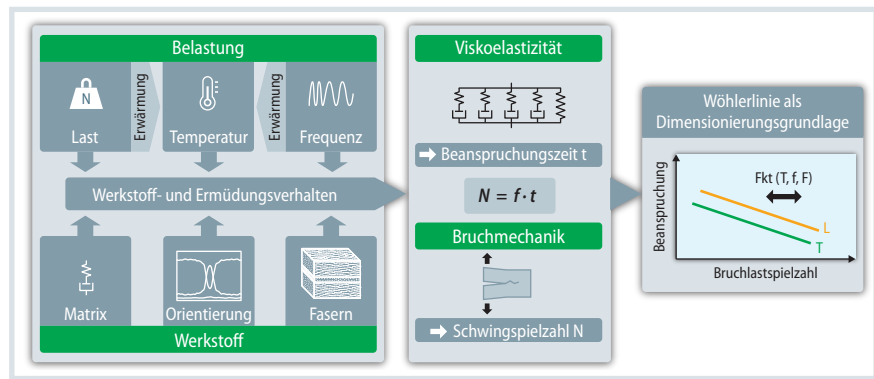
© Adobe Stock, von tan4ikk

standen. Bei kurzglasfaserverstärkten Thermoplasten findet der Schädigungsprozess im Wesentlichen auf der mikro-mechanischen Ebene statt, die durch die Wechselwirkungen zwischen den Fasern und der Matrix geprägt ist (**Bild 1**) [5]. Wird der Werkstoff mit einer äußeren dynamisch-zyklischen Belastung beaufschlagt, ist das Ermüdungsverhalten in der Mikroebene durch zeitabhängige Kriecheffekte aufgrund der Viskoelastizität der Matrix und zyklisches Risswachstum gekennzeichnet. Bei anhaltender Beanspruchung kommt es zu Schadensakkumulation in Form von Rissbildung und -ausbreitung. Sobald eine kritische Risslänge überschritten wird, übersteigt die Beanspruchung die lokale Verbundfestigkeit und schlagartiges Strukturversagen tritt ein [6].

Die Belastungsfrequenz spielt bei der Werkstoffermüdung in zweierlei Hinsicht eine Rolle. Zum einen stellt die Frequenz das Verhältnis zwischen den beiden treibenden Größen, der Belastungsdauer und der Anzahl der Lastwechsel, her. Da das Risswachstum mit der Anzahl der Bruchlastzyklen skaliert, induziert eine höhere Frequenz bei gleichbleibender Belastungszeit somit eine stärkere Werkstoffschädigung. Zum anderen wird mit jedem Lastwechsel ein Teil der eingebrachten kinetischen Energie aufgrund der Werkstoffdämpfung in Wärmeenergie dissipiert (Hysterese) [7, 8]. Mit steigender Frequenz erhöht sich folglich die Verlustleistung im Werkstoff. Aufgrund der geringen Wärmeleitfähigkeit von Kunststoffen kann die Wärmeenergie nur unzureichend abgeführt werden, weshalb sich der Werkstoff bei hohen Lastfrequenzen erwärmt und die Ermüdung dadurch beschleunigt wird.

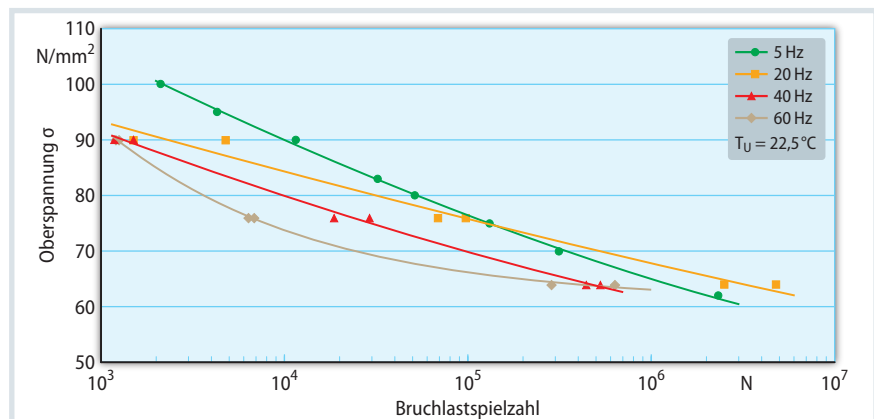
### Frequenzabhängige Ermüdung

Für die Untersuchungen des Frequenzeinflusses wird ein kurzglasfaserverstärktes Polyamid 6 vom Typ B3WG12 HSP der BASF SE verwendet. Die Probekörper entsprechen der 1BA-Geometrie nach DIN ISO 527 und werden spanend spritzgegossenen Probekörpern in Fließrichtung entnommen. Der Frequenzeinfluss auf das Ermüdungsverhalten wird anhand von kraftgeregelten Schwingversuchen im Zugschwellbereich bei den Frequenzen 5 Hz, 20 Hz, 40 Hz und 60 Hz untersucht. Dabei werden die Beanspru-



**Bild 1.** Einflussgrößen auf die Ermüdung von kurzglasfaserverstärkten Thermoplasten.

Quelle: IKV; Grafik © Hanser



**Bild 2.** Frequenzabhängige Ermüdungsdaten aus Wöhlerversuchen. Quelle: IKV; Grafik © Hanser

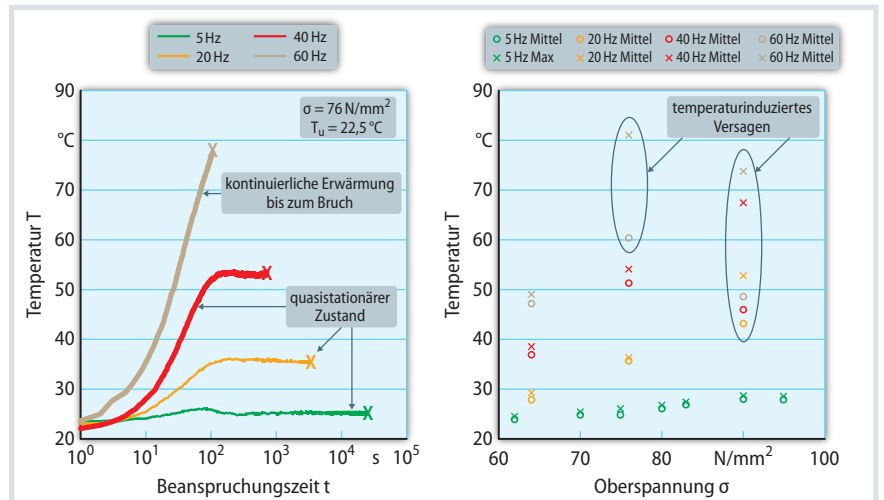
chungenhöhen so ausgewählt, dass der Zeitfestigkeitsbereich von  $10^3$  bis  $10^6$  Lastwechsel abgedeckt wird. Um eine konstante Umgebungstemperatur von  $22,5\text{ °C}$  zu gewährleisten, erfolgen die Prüfungen in einer Temperierkammer. Zusätzlich wird die Entwicklung der Probekörpertemperatur über die gesamte Prüfdauer mittels eines Pyrometers aufgezeichnet.

Die erzielten Ergebnisse aus den Ermüdungsversuchen sind in **Bild 2** dargestellt. Die in den Schwingversuchen generierten Bruchlastspielzahlen weisen eine deutliche Frequenzabhängigkeit auf. In der einfach-logarithmischen Darstellung sind die Daten für 5 Hz bis 40 Hz durch eine nahezu lineare Beziehung zwischen der Lasthöhe und der Bruchlastspielzahl gekennzeichnet. Die 60-Hz-Kurve ist dahingegen durch einen degressiven Verlauf geprägt. Wird der Werkstoff mit höheren Frequenzen beansprucht, reduziert sich die Lebensdauer deutlich. Der Unterschied zur 5 Hz Wöhlerlinie kann bis zu 1,5 Dekaden betragen. Darüber hinaus schneiden sich die Wöhlerlinien für 5 Hz und 20 Hz im

Bruchlastspielbereich von ca. 105. Die höchsten Bruchlastspielzahlen (2,7 Mio. bis 4,8 Mio. Lastwechsel) werden im geprüften Bereich unter Berücksichtigung der Stichprobenanzahl bei einer Prüffrequenz von 20 Hz erreicht.

Da das mechanische Verhalten thermoplastischer Kunststoffe maßgeblich von der vorherrschenden Werkstofftemperatur beeinflusst wird, muss die Bewertung der frequenzabhängigen Bruchlastspielzahlen unter der Berücksichtigung der Temperaturentwicklung im Werkstoff erfolgen. In **Bild 3** sind auf der linken Seite exemplarisch die Temperaturverläufe bei einer Beanspruchung von  $76\text{ N/mm}^2$  für die unterschiedlichen Prüffrequenzen dargestellt. Der Wöhlerversuch bei 5 Hz zeigt keine Erwärmung, so dass die Werkstofftemperatur annäherungsweise der Umgebungstemperatur entspricht. Mit zunehmender Prüffrequenz erhöht sich jedoch die thermische Verlustleistung im Probekörper. Folglich steigt die Werkstofftemperatur so lange, bis ein thermisches Gleichgewicht erreicht wird. Ab diesem Zeitpunkt findet keine weitere Erwärmung

mung statt und ein konstantes Temperaturniveau wird aufrechterhalten. Ist die Verlustleistung im Werkstoff jedoch aufgrund der hohen Prüffrequenz so hoch, dass sich kein thermisches Gleichgewicht mit der Umgebung einstellt, kommt es zu einer kontinuierlichen Erwärmung. Daher kann die Differenz zwischen der über die Prüfdauer gemittelten und der maximal auftretenden Temperatur als Indikator herangezogen werden, ob sich ein quasistatischer thermischer Zustand einstellt oder der Werkstoff temperaturinduziert versagt. Im Fall der 60 Hz-Prüfung bei  $76 \text{ N/mm}^2$  wird so beispielsweise eine Temperaturdifferenz von ca.  $20,6^\circ\text{C}$  erreicht, bevor der Probekörper aufgrund der temperaturbedingten Materialerweichung vorzeitig versagt (**Bild 3, rechts**). Gleichzeitig sticht dieser Versuchspunkt ebenfalls mit der höchsten mittleren Temperatur von ca.  $60,4^\circ\text{C}$  hervor, wodurch sich die



**Bild 3.** Einfluss der Prüffrequenz auf die Entwicklung der Werkstofftemperatur während der Ermüdungsversuche. Quelle: IKV; Grafik © Hanser

Bruchlastspielzahl deutlich von den anderen Prüffrequenzen unterscheidet und der Wöhlerlinienverlauf für die Prüffrequenz von 60 Hz deshalb durch einen degressiven Verlauf gekennzeichnet ist.

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass die Reduktion der Ermüdungslebensdauer bei hohen Frequenzen primär durch die Erhöhung der Werkstofftemperatur aufgrund der gesteigerten Verlustleistung und der damit einhergehenden Festigkeitsminderung resultiert. Zwar wird für die Frequenz von 20 Hz und die Oberspannung von  $64 \text{ N/mm}^2$  eine höhere Bruchlastspielzahl erreicht als für die 5 Hz Schwingversuche, jedoch ist anzunehmen, dass bei hohen Frequenzen der Einfluss der Beanspruchungsdauer dominiert und die Schwinglastspielzahl eine untergeordnete Rolle für die Ermüdung einnimmt. Daher wird für zukünftige Auslegung auf

Schwingfestigkeit vorgeschlagen, nicht die zyklische Lebensdauer, sondern die zeitliche Ermüdungsdauer als Bemessungsgröße zu verwenden (**Bild 4**).

### Fazit

In den Untersuchungen konnte gezeigt werden, dass die Erhöhung der Prüffrequenz zur deutlichen Erhöhung der Werkstofftemperatur führt und so den Ermüdungsprozess von kurzglasfaserverstärkten Thermoplasten beschleunigt. Des Weiteren ist bei Schwingbeanspruchungen zwischen Erwärmungsbruch und einer thermisch quasistationären Ermüdung zu unterscheiden. Die zusätzliche Berücksichtigung der Temperaturentwicklung im Werkstoff könnte die Abbildungsqualität zukünftiger Berechnungsmethoden für hochfrequent schwingende Strukturen verbessern. ■

## Info

### Autoren

**Univ.-Prof. Dr.-Ing. Christian Hopmann** ist seit 2011 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 seit Dezember 2017 mit der Betriebsfestigkeit und Vibroakustik von kurzfaserverstärkten Kunststoffen; hakan.celik@ikv.rwth-aachen.de

### Dank

Das IGF-Forschungsvorhaben 20556 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 aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert. Der untersuchte Werkstoff wurde von der BASF SE bereitgestellt. Allen Institutionen gilt unser Dank.

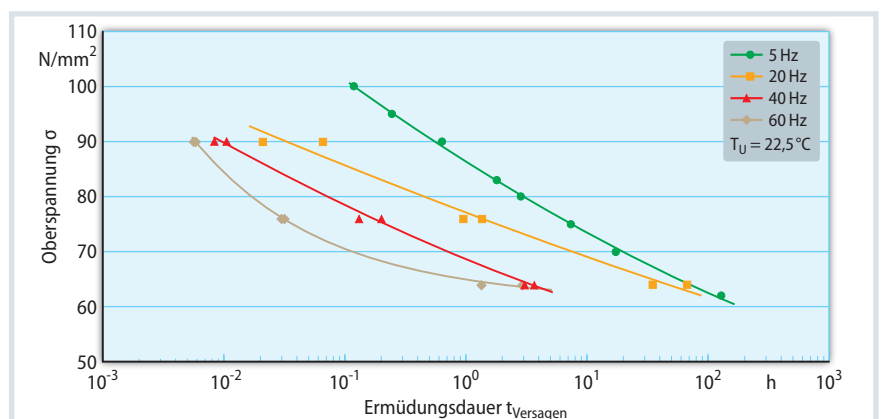
### Literatur & Digitalversion

Das Literaturverzeichnis und ein PDF des Artikels finden Sie unter

[www.kunststoffe.de/onlinearchiv](http://www.kunststoffe.de/onlinearchiv)

### English Version

Read the English version of the article in our magazine *Kunststoffe international* or at [www.kunststoffe-international.com](http://www.kunststoffe-international.com)



**Bild 4.** Einfluss der Beanspruchungsfrequenz auf die zeitabhängige Lebensdauer.

Quelle: IKV; Grafik © Hanser