

ENTWICKLUNG EINES PHÄNOMENOLOGISCHEN VERSCHIEBUNGSPRINZIPS ZUR ERMITTLUNG DER ERMÜDUNGSEIGENSCHAFTEN KURZGLASFASERVERSTÄRKTER THERMOPLASTE BEI HOHEN BEANSPRUCHUNGSFREQUENZEN

Daniel Fritsche

Institut für Kunststoffverarbeitung an der RWTH Aachen
daniel.fritsche@rwth-aachen.de

21. Dezember 2021

I. EINLEITUNG

Die Kenntnis über die Ermüdungseigenschaften von zyklisch belasteten Thermoplasten ist in vielen Anwendungsbereichen essenziell zur Abschätzung der Lebensdauer von Bauteilen unter dynamischer Beanspruchung. Nur eine zeitaufwendige Versuchsreihe gibt Aufschluss über das Versagen des Werkstoffs unter bestimmten Versuchsbedingungen. In Realität treten jedoch unterschiedliche Belastungsniveaus, -geschwindigkeiten und Temperaturen auf, womit eine Wöhlerkurve nur eine beschränkte Vorhersagegenauigkeit bietet. Der Einfluss der Dehnraten des zeitabhängigen Materialverhaltens bei einer Wechselbelastung auf die Lebensdauer, mit anderen Worten der Belastungsfrequenz, ist nur selektiv erforscht. Durch die Viskoelastizität kommt es gerade bei hohen Frequenzen zur Eigenerwärmung und der indizierte Temperatureinfluss kann nicht unabhängig von der Dehnrates untersucht werden. Um diesen zu vermeiden, ist die Kombination von hohen Lastniveaus bei hohen Frequenzen nicht Teil herkömmlicher Lebensdaueruntersuchungen.

II. PROBLEMSTELLUNG

Zur Bestimmung des isothermen Ermüdungsverhaltens sind dynamische Prüfungen bei niedrigen Lasten und hohen Frequenzen durch die hohe Versuchsdauer nicht praktikabel. Da die Eigenerwärmung geometrieabhängig ist, ist zudem eine Beschreibung dieser durch eine thermische Simulation zielführend. Mithilfe dieser ist eine Bestimmung der volumetrischen Temperaturverteilung möglich.

III. UNTERSUCHUNGEN UND ERGEBNISSE

Am IKV wird die Eigenerwärmung im viskoelastischen Werkstoff bei variierenden Versuchsparametern untersucht, um deren Einfluss auf die Lebensdauer zu bestimmen. Zur Extraktion des simultanen Frequenzeinflusses ist eine Temperaturänderung weitestgehend zu

vermeiden. Mithilfe von isothermen Ermüdungsversuchen durch geregelte Konvektion kann der Zusammenhang von Lebensdauer, Frequenz und Temperatur getrennt ermittelt werden. Im Messaufbau wird ein Zugprüfkörper des Typs IBA in einer Temperierkammer belastet und dessen Oberflächentemperatur im prüfparallelen Bereich mit einem Pyrometer gemessen. Der Messwert gibt über einen Zweipunktregler die Leistung der Ventilatoren vor (Abb. 1). Die mittlere Konvektion wird somit über die Lüfterleistung und die Umgebungstemperatur eingestellt.

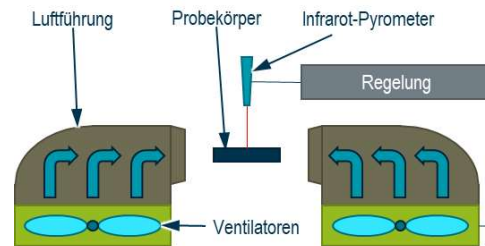


Abb. 1: Versuchsaufbau für isotherme Ermüdungsversuche

Es wurden konventionelle und quasi-isotherme Lebensdauerversuche durchgeführt und die Temperaturstabilität und -homogenität simulativ sowie messtechnisch mit Thermografieaufnahmen validiert.

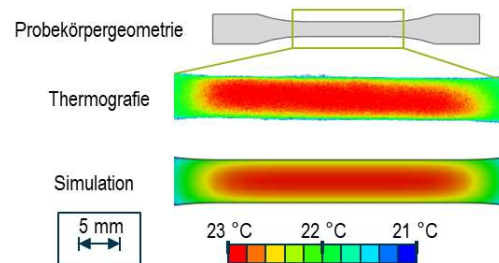


Abb. 2: Simulierte und thermografisch gemessene Temperaturverteilung des zyklisch belasteten Prüfkörpers

Für die thermische Simulation wird die aus der gemessenen Spannung und Dehnung berechneten Verlustenergie als Wärmequelle in Abhängigkeit von der lokalen Dehnung modelliert. Sowohl der simulierte Temperaturverlauf der Eigenerwärmung als auch die Temperaturverteilung auf der

**ENTWICKLUNG EINES PHÄNOMENOLOGISCHEN VERSCHIEBUNGSPRINZIPS ZUR ERMITTLUNG DER
ERMÜDUNGSEIGENSCHAFTEN KURZGLASFASERVERSTÄRKTER THERMOPLASTE BEI HOHEN
BEANSPRUCHUNGSFREQENZEN**

Oberfläche (Abb. 2) zeigen eine hohe Übereinstimmung mit den experimentellen Messungen. Daher lässt sich ebenfalls eine korrekte Temperaturverteilung im Probekörper annehmen. Die berechnete durchschnittliche Temperatur stimmt bei verschiedenen Belastungsfrequenzen sehr gut mit der Regeltemperatur des Pyrometers überein.

Für Frequenzen bis zu 90 Hz konnte die Lebensdauer für ein Polybutylenterephthalat (PBT) mit 30 Gew.-% Glasfaserverstärkung ohne Eigenerwärmung und dem daraus resultierenden verfrühten Erwärmungsbruch ermittelt werden. Bei niedrigen Frequenzen f zeigt sich ein Frequenzeinfluss in der Bruchlastspielzahl N_f der auch mit konventionellen Versuchen mit vernachlässigbarer Eigenerwärmung verzeichnet wird. In diesem Frequenzbereich wird der Schädigungsfortschritt überwiegend durch plastische Dehnung erzielt und ein Abfall der Bruchlastspielzahl bei niedrigeren Frequenzen ist zu verzeichnen (Abb. 3). Weiterhin deutet die Lebensdauer eine Unabhängigkeit vom Frequenzeinfluss bei hohen Frequenzen im Bereich der risswachstumsgesteuerten Schädigung an. Hier liegen deutlich höhere Bruchlastspielzahlen vor als bei konventionellen Versuchen, die sich in derselben Größenordnung befinden. Eine niedrigere Lastspielzahl bei 90 Hz lässt sich mit der instabilen Belastungsrichtung bei dieser maximalen Frequenz erklären. Hier kommt es anstatt einer uniaxialen Belastung zu einer oszillierenden Bewegung der Einspannung.

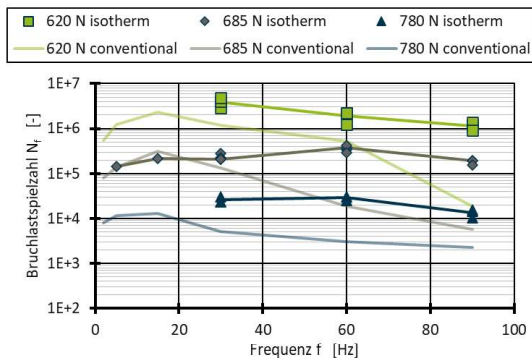


Abb. 3: Vergleich der konventionellen und isothermen Lebensdauer über die Frequenz

Die Hypothese einer Frequenzunabhängigkeit der zyklischen Lebensdauer bei hohen Frequenzen wird zusätzlich durch die Betrachtung des Abfalls der dynamischen Steifigkeit E_{dyn} über die Lastspielzahl N durch

Schädigung und Retardation gestützt. Die Steifigkeit sinkt zu niedrigen Frequenzen hin schneller, wobei bei hohen Frequenzen ein ähnlicher Abfall zu verzeichnen ist. Anstatt eines zeitabhängigen Einflusses der Retardation schreitet die Schädigung gleichwertig mit der Lastspielzahl voran (Abb. 4). Nur bei Frequenzen unter 30 Hz ist ein zusätzlicher zeitlicher Einfluss und somit über die Lastspielzahl stärkerer Abfall der Steifigkeit sichtbar.

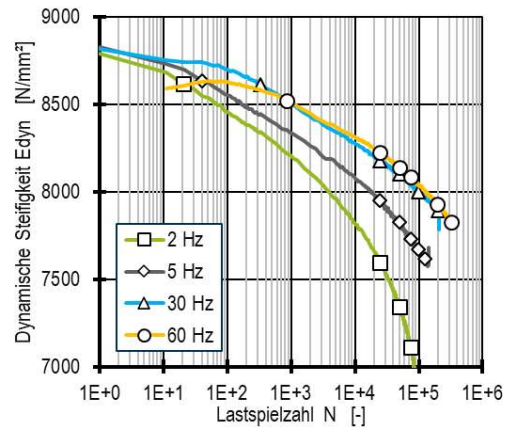


Abb. 4: Verlauf der dynamischen Steifigkeit isothermer Ermüdungsprüfungen bei verschiedenen Frequenzen und 685 N

IV. FAZIT

Die Analyse der Ermüdungseigenschaften eines faserverstärkten Thermoplasts trägt einen bedeutenden Teil zum Verständnis des Frequenzeinflusses über einen weiten Frequenzbereich bei, der auf weitere Kunststoffe übertragen werden kann. Die gezeigte Machbarkeit der Abbildung thermischer und dissipativer Vorgänge in der Simulation sind ein weiterer Schritt hin zur Digitalisierung der Auslegung von Werkstoffen und Bauteilen bezüglich der Lebensdauer unter verschiedenen Belastungsbedingungen. Im Hinblick auf die Hypothese der Frequenzunabhängigkeit können weitere Ermüdungsversuche mit verschiedenen Materialien durchgeführt werden. Materialien mit anderen Glasübergangstemperaturen können den Einfluss eines risswachstumskontrollierten und plastizitätskontrollierten Schädigungsmechanismus validieren.