
Eine Untersuchung mechanisch gealterter kurzfaserverstärkter Thermoplaste unter hochdynamischen Lasten

Christian Witzgall, Sandro Wartzack

*Lehrstuhl für Konstruktionstechnik
Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg*

Abstract

Short-fibre reinforced thermoplastics (SFRT) are increasingly being used in 21st century's automotive construction. Besides statically loaded parts, SFRT are also used for safety-relevant components such as door modules and crash absorbers. Temperature, chemically aggressive media as well as mechanical loading lead to aging effects within the plastic, which generally, weakens the material's mechanical properties. Thus, within the present paper, a series of tests is introduced in order to investigate the effect of mechanical aging on the material's crashworthiness behaviour.

Keywords: composite, testing, fatigue, crashworthiness

1 Einführung

Bereits seit Beginn des 21. Jahrhunderts werden kurzfaserverstärkte, thermoplastische Kunststoffe (KVTP) zunehmend im Fahrzeugbau eingesetzt. Neben statisch beanspruchten Teilen wie Frontschürzen werden auch sicher-

heitsrelevante Bauteile wie Motorträger, Türmodule und Crashabsorber daraus gefertigt. [1, 2] In [3] wird eine Untersuchung der Crashesicherheit von Gebrauchtfahrzeugen vorgestellt. Dazu wurden Gebrauchtfahrzeuge im Frontalaufprall unter gleichen Versuchsbedingungen wie vor ihrer Markteinführung (55 km/h Aufprallgeschwindigkeit, 50% Überdeckung) getestet. Beim Modell Toyota Corolla 1.6 Si zeigten sich dabei gegenüber dem Neufahrzeug deutlich gesteigerte Werte für die auf den Fahrer einwirkenden Belastungen. Bild 1 zeigt den Verlauf der resultierenden Kopfbeschleunigung. Sie ist im Altfahrzeug um rund 20% erhöht und überschreitet damit das zulässige Head Injury Criterion. Die Untersuchung kommt zu dem Ergebnis, die erhöhten Belastungen seien „auf die Alterung des gesamten Fahrzeugs zurückzuführen“. [3]

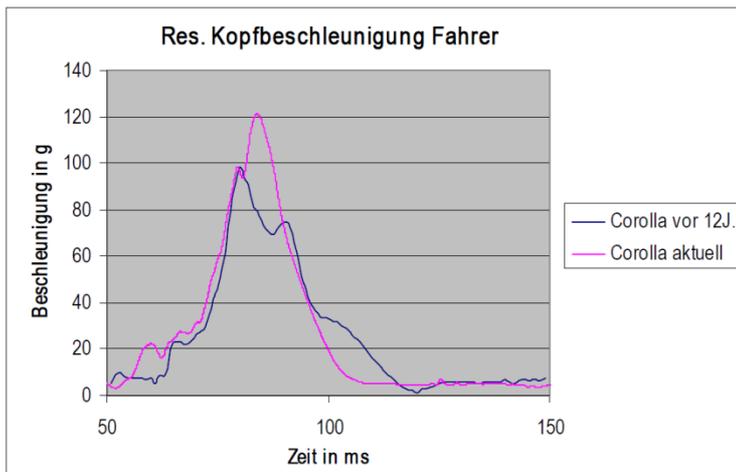


Bild 1: resultierende Kopfbeschleunigung in Alt- und Neufahrzeug [3]

Im Fall von Kunststoffen führen Faktoren wie Temperatur, Medien- oder Strahlungsbelastung, aber auch mechanische Beanspruchungen zu einer Alterung, die im Allgemeinen eine Verschlechterung der mechanischen Materialeigenschaften mit sich bringt [4]. Im Rahmen des vorliegenden Beitrags wird die Alterung kurzfaserverstärkter Thermoplaste in Folge mechanischer Beanspruchungen und ihr Einfluss auf das Materialverhalten unter schlagdynamischer Beanspruchung näher untersucht. Es soll gezeigt werden, dass die mechanische Vorschädigung einen deutlichen Einfluss auf die Beanspruchbarkeit des Materials unter hochdynamischen Bedingungen hat.

2 Versuchsbedingungen und -durchführung

Für die nachfolgend beschriebenen Versuche wird ein zu 30 % kurzglasfasergefüllter Polybutylenterephthalat-Blend (PBT) verwendet. Alle Versuche werden bei Raumtemperatur durchgeführt, alle verwendeten Proben sind gleich alt und wurden unter gleichen Bedingungen gelagert und verarbeitet. Auf diese Weise sollen die Alterungseffekte infolge Temperatur, Strahlung oder Medienbelastung möglichst gering gehalten werden.

Bild 2 zeigt schematisch die Vorgehensschritte dieser Versuchsreihe. Zunächst wurde in quasistatischen Zugversuchen die Festigkeit, Steifigkeit und Bruchdehnung an neuen Proben bestimmt. Anhand der daraus gewonnenen Informationen werden die Lastbedingungen für die Ermittlung der Maximal ertragbaren Schwingenspielzahlen festgelegt. Mehrere Proben werden dazu bei 1/3 bzw. 2/3 der quasistatisch ermittelten maximalen Spannung zugschwellend bis zum Bruch beansprucht. Dieselben Lastniveaus werden ebenfalls im Rahmen der Vorschädigung verwendet, jedoch liegen die gewählten Schwingenspielzahlen deutlich unterhalb der in den Vorversuchen mindestens ertragenen. Aus den zwei Lastniveaus mit unterschiedlich fortgeschrittener Vorschädigung und den ungeschädigten Proben ergeben sich drei Serien, 0, 1 und 2, die in Hochgeschwindigkeitszugversuchen bei 2,0 m/s miteinander verglichen werden.

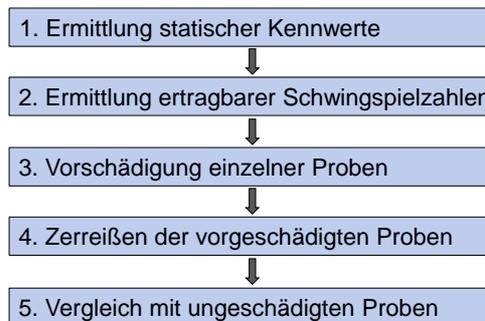


Bild 2: Vorgehensschritte der Versuchsreihe

Für alle Versuche werden wie in Bild 3 dargestellte Probekörper der Stärke 3,5 mm nach Becker, [5], verwendet, die eine besonders günstige Geometrie für die durchzuführenden Hochgeschwindigkeitszugversuche bieten. Die Probenform zeichnet sich dadurch aus, dass durch die sehr kurz gehaltene Ausgangslänge hohe Dehnraten bereits bei moderaten Geschwindigkeiten erreicht werden und ein möglichst uniaxialer Spannungszustand im parallelen

Bereich der Probe entsteht. Zudem bietet sie mit der relativ breiten Oberfläche gute Voraussetzungen für eine zuverlässige und reproduzierbare optische Dehnungsauswertung. [5]

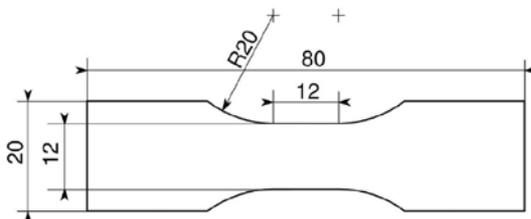


Bild 3: verwendete Probenform nach Becker [5]

Um eine Beeinflussung der ermittelten Ergebnisse durch die Probenform zu vermeiden, wird diese auch für die quasistatisch und zyklisch durchgeführten Versuche herangezogen.

Im Folgenden soll die Durchführung der einzelnen Versuchsschritte beschrieben werden; der Vorstellung der Ergebnisse der hochdynamischen Zugversuche und dem Vergleich geschädigter und ungeschädigter Proben sei ein eigenes Kapitel gewidmet.

2.1 Ermittlung statischer Kennwerte

Zur Charakterisierung des Materials im statischen Fall werden uniaxiale Zugversuche mit einer Zuggeschwindigkeit von 0,001 m/s durchgeführt. Bezogen auf die Länge des parallelen Bereichs im Zugstab ergibt sich daraus eine nominelle Dehnrates von 0,08 s⁻¹, was dem quasistatischen Bereich zuzuordnen ist [6]. Zur besseren statistischen Absicherung werden die durchgeführten Versuche zehnfach wiederholt; die Ergebnisse sind gemittelt und mit Standardabweichung in Tabelle 1 aufgeführt.

Tabelle 1: statisch ermittelte Kennwerte des Prüfmaterals

Zugsteifigkeit $E_{0,2\%}$	Maximalspannung σ_{\max}	Bruchdehnung ε_{\max}
10.300 ± 480 MPa	113 ± 3,4 MPa	1,8 ± 0,08 %

Anhand der im Mittel maximal ertragenen Zugspannungen werden zwei Spannungsniveaus festgelegt:

$$k_{\sigma} = \frac{\sigma_o}{\sigma_{\max}}; \quad k_1 = 0,33; \quad k_2 = 0,66$$

Diese bestimmen die angelegte Last im Schwingversuch.

2.2 Ermittlung ertragbarer Schwingspielzahlen

In zyklischen Pulserversuchen soll zunächst die maximal ertragbare Schwingspielzahl der Proben auf den jeweiligen Lastniveaus k_1 und k_2 ermittelt werden. Dies geschieht auf einem servohydraulischen Pulser, der mit einer Prüffrequenz von 5 Hz betrieben wird. Eine höhere Prüffrequenz ist aufgrund der ausgeprägten Be- und Entlastungshysterese („innere Reibung“) des Probenmaterials nicht einsetzbar, da der dadurch verursachte Wärmestrom eine zu hohe Temperatursteigerung und damit Aufweichung des Materials bedingt. Alle durchgeführten Versuche werden kraftgeregelt und im zugschwellenden Bereich durchgeführt, d.h. es gilt für das Spannungsverhältnis aus Unter- und Oberspannung:

$$R = \frac{\sigma_u}{\sigma_o} \approx 0$$

Bild 4 zeigt die bis zum Bruch ertragenen Schwingspielzahlen. Sie liegen für das Lastniveau $k_1 = 0,33$ im Bereich $5,5 \dots 7,2 \cdot 10^5$ bzw. für $k_2 = 0,66$ im Bereich $2,1 \dots 3,4 \cdot 10^5$.

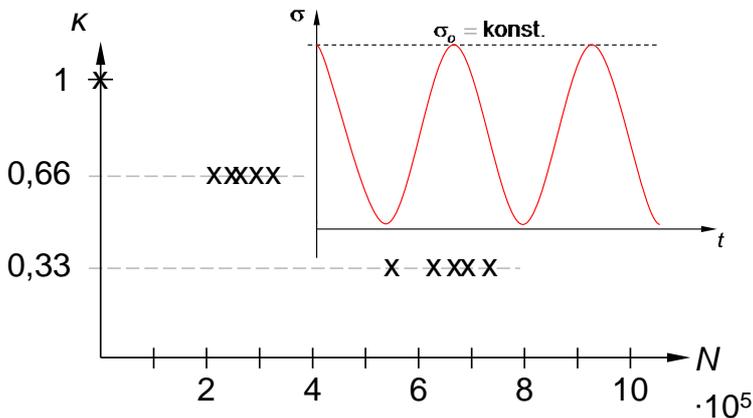


Bild 4: ertragene Schwingenspiele bis zum Bruch

Auf eine Berechnung von Überlebenswahrscheinlichkeiten oder anderen statistischen Auswertungen wird an dieser Stelle aufgrund der geringen zugrundeliegenden Versuchszahl von nur 5 Proben verzichtet. Stattdessen wird die mindestens ertragene Schwingenspielzahl als Bezugsgröße für die folgenden Versuche herangezogen, d.h.:

$$N_1(k_1 = 0,66) = 2,1 \cdot 10^5$$

$$N_2(k_2 = 0,33) = 5,5 \cdot 10^5$$

2.3 Vorschädigung einzelner Proben

Wie bereits bei den zyklischen Charakterisierungsversuchen wird auch zur mechanischen Vorschädigung der Proben ein servohydraulischer Pulser verwendet. Wesentliche Maßgabe ist hierbei jedoch, dass die Proben nicht bereits im zyklischen Versuch bis zum Bruch beansprucht werden. Zudem soll vermieden werden, dass trotz verschieden hoher Lastniveaus eine gleich stark ausgeprägte Vorschädigung der beiden Probenserien erreicht wird.

Zur quantitativen Abschätzung der Vorschädigung wird daher das Prinzip der Schadensakkumulation herangezogen, in diesem Fall das erste und einfachste Verfahren der linearen Schadensakkumulation nach Palmgren und Miner [7], [8]. Es beschreibt ein Schadensmaß D durch Summation der Quoti-

enten aus Teilschwingzahl n_i und ertragbarer Schwingzahl N_i auf jeweils gleichem Lastniveau:

$$D = \sum_i \frac{n_i}{N_i}$$

Sogenannte Reihenfolgeeffekte der Beanspruchung oder nichtlineares Verhalten – wie es für Faserverbundwerkstoffe nach [9] zu erwarten ist – können durch die lineare Schadensakkumulation nicht beschrieben werden. Im vorliegenden Fall liegt die Zielsetzung jedoch einerseits auf einer einstufigen Beanspruchung und andererseits auf einem Vergleich der beiden Probenreihen, was die Methode nach Palmgren und Miner gestattet.

Die Definition der Probenreihen und ihrer Schadensmaße ist aufgeführt in Tabelle 2. Daraus ergibt sich für die Serie 1 trotz eines höheren Lastniveaus aufgrund der geringeren Teilschwingzahl ein niedrigeres Schadensmaß als bei der geringeren, aber häufiger beanspruchten Serie 2. Die Serie 0 stellt die ungeschädigte Kontrollgruppe dar.

Tabelle 2: Versuchparameter der Probenreihen

Serie	Lastniveau	Teilschwingzahl	ert. Schwingzahl	Schadensmaß
0	keine Vorschädigung			
1	$k_1 = 0,66$	$n_1 = 81.000$	$N_1 = 213.000$	$D_1 \approx 0,40$
2	$k_2 = 0,33$	$n_2 = 324.000$	$N_2 = 550.000$	$D_2 \approx 0,60$

2.4 Zerreißen der vorgeschädigten Proben

Zum endgültigen Zerreißen der drei Probenreihen wird eine servohydraulische Hochgeschwindigkeitsprüfanlage eingesetzt, auf der uniaxiale Zugversuche mit einer Abzugsgeschwindigkeit von 2,0 m/s durchgeführt werden. Es werden jeweils fünf Proben der Serien 1 und 2 und zehn Proben der Serie 0 geprüft. Alle Versuche werden bei Raumtemperatur und in zufälliger Reihenfolge durchgeführt.

3 Vergleich geschädigter und ungeschädigter Proben im hochdynamischen Zugversuch

In Tabelle 3 sind die ertragenen Spannungen und Dehnungen der jeweiligen Probenserien im Zerreiversuch gegenübergestellt. Es zeigt sich, dass die maximal ertragene Spannung der Proben mit zunehmender Schädigung abnimmt: während die ungeschädigte Serie 0 eine gemittelte Maximalspannung von 119 MPa zeigt, liegt diese in der Serie 1 mit 91 MPa und der Serie 2 mit 84 MPa bereits um 23 bzw. 30 % darunter. Eine vergleichbare Entwicklung kann auch bei der Bruchdehnung beobachtet werden: auch sie nimmt mit fortschreitender mechanischer Alterung ab. Folglich verringert sich die bis zum Bruch absorbierte Energie der Proben ebenfalls; sie wurde durch numerische Integration der aufgezeichneten Kraft-Verschiebungs-Kurven ermittelt.

Tabelle 3: Ertragene Spannungen und Dehnungen der Probenserien

	Serie 0	Serie 1 (D = 0,40)	Serie 2 (D = 0,60)
σ_{\max}	119 ± 3,2 MPa	91 ± 5,4 MPa (-23 %)	84 ± 4,1 MPa (-30 %)
ϵ_{\max}	1,61 %	1,25 % (-22 %)	0,76 % (-43%)
E_{abs}	855 Nmm	469 Nmm (-55%)	174 Nmm (-79%)

Bild 5 zeigt die ermittelten Spannungs-Dehnungs-Diagramme der drei beschriebenen Probenserien. Anhand der Abbildung kann auch das Energieabsorptionsvermögen des Materials eingeschätzt werden; die zum Zerreißen aufgebrauchte Energie entspricht der Fläche unter einer Kraft-Weg-Kurve. Die Verhältnismäßigkeit der Verringerung der Energieabsorption kann jedoch auch im Spannungs-Dehnungs-Diagramm abgelesen werden.

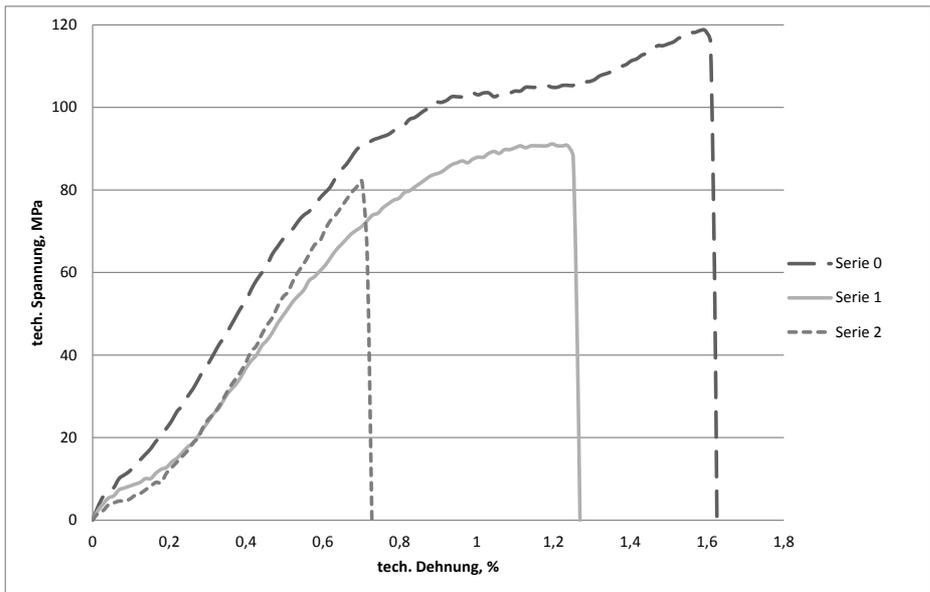


Bild 5: Spannungs-Dehnungs-Diagramme (gemittelt) der Serien 0, 1, 2

Bild 6 zeigt Mikroskopaufnahmen der Bruchflächen der Proben in 10- bzw. 25-facher Vergrößerung. In der linken Bildhälfte ist die bereits mit bloßem Auge sichtbar zerklüftete Oberfläche des Bruchs einer ungeschädigt zerrissenen Probe dargestellt. Die rechte Bildhälfte zeigt die Bruchfläche einer vorgeschädigten Probe der Serie 2. Auch auf ihr ist die makroskopische Zerklüftung bereits mit bloßem Auge zu erkennen; darüber hinaus zeigen sich unter dem Lichtmikroskop herausstehende, aus der Matrix gezogene Kurzfasern. Die Bruchbilder treten über verschiedene Proben jeweils reproduzierbar auf.

Die anhand der Bruchbilder gemachten Beobachtungen lassen mögliche Rückschlüsse auf die Versagensvorgänge im Material zu. Den Ausführungen von [10] und [11] folgend ist auch hier ein sogenannter Faser-Pullout zu beobachten, der typischerweise für kurzfaserverstärkte Thermoplaste auftritt, nachdem die Verbindung zwischen Faser- und Matrixmaterial abgelöst ist.

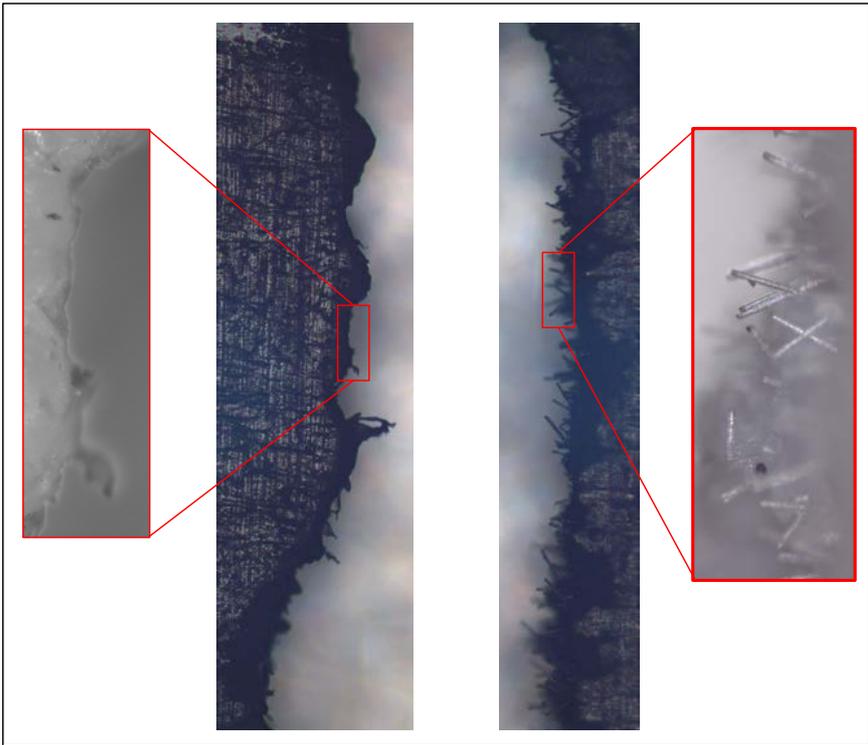


Bild 6: Mikroskopaufnahmen der ungeschädigten (links) und vorgeschädigten (rechts) Proben

4 Zusammenfassung und Ausblick auf weitere Forschungstätigkeiten

Im vorliegenden Beitrag wurde gezeigt, welchen Einfluss die mechanische Schädigung auf die Festigkeit und das Energieabsorptionsvermögen kurzfaserverstärkter Thermoplaste hat. Dazu wurden Proben zunächst durch zyklische Versuche mechanisch vorgeschädigt und anschließend in hochdynamischen Zugversuchen geprüft. In dieser ersten Untersuchung wurden alle Proben parallel zu ihrer Haupt-Faserorientierung geprüft. Die eingangs beschriebene Hypothese, dass die mechanische Festigkeit mit fortschreitender Schädigung zunehmend abnimmt kann bestätigt werden.

Da die Annahme nahe liegt, dass die Anisotropie des Materials sowohl auf die Dauerfestigkeit wie auch auf die Restfestigkeit nach mechanischer Vorbe-



anspruchung erheblichen Einfluss nimmt, stellt die Untersuchung verschiedener Faserorientierungen ein wichtiges Ziel für die weiteren, folgenden Forschungsarbeiten dar. Um dieses Ziel umzusetzen sind zahlreiche weitere zyklische Versuche erforderlich.

Weiterhin wurde im Rahmen der vorgestellten Untersuchung auf die Methode der linearen Schadensakkumulation nach Palmgren und Miner zurückgegriffen. Dies ist in den Grenzen der behandelten einstufigen Beanspruchungshistorie zulässig; für den realitätsnäheren Fall mehrstufiger Lastkollektive wird es jedoch von wesentlicher Bedeutung sein, sowohl ein Verfahren zur Berechnung nichtlinearer Schädigung als auch zur Berücksichtigung von Reihenfolgeneffekten heran zu ziehen. Hierzu wurde in [9] bereits Vorarbeit geleistet, die für das vorliegende Material jedoch ebenfalls durch weitere Experimente überprüft werden muss.

Danksagung

Die Autoren danken der Firma Zwick/Roell in Ulm, namentlich besonders Herrn Johannes Künstler, für die experimentelle Unterstützung im Rahmen dieser Untersuchung.

Literatur

- [1] LANXESS Deutschland GmbH: Ford Focus van features hybrid metal/composite front-end. Reinforced Plastics 45 (2004) 8, S. 4.
- [2] Short, P.; Tullo, A.: Bracing for 'K'. Chemical & engineering news 85 (2007) 28, S. 26.
- [3] Ehrenstein, G.W.; Pongratz, S.: Beständigkeit von Kunststoffen. Hanser Verlag, 2007.
- [4] Kamber, B.: Crashtest gebräuchter Fahrzeuge mit Airbag. Dynamic Test Center Biel, Vauffelin / Biel, 2005.
- [5] Becker, F.: Entwicklung einer Beschreibungsmethodik für das mechanische Verhalten unverstärkter Thermoplaste bei hohen Deformationsgeschwindigkeiten. Dissertation, Universität Halle-Wittenberg, 2009.
- [6] Schoßig, M.: Bewertung der Schädigungsmechanismen von kurzglasfaserverstärkten Polyolefinen durch simultane Aufzeichnung der Schallemissionen unter quasistatischer und dynamischer Beanspruchung. Dissertation, Universität Halle-Wittenberg, 2010.
- [7] Palmgren, A.: Die Lebensdauer von Kugellagern. Zeitschrift des Vereins Deutscher Ingenieure, 68.14, S. 339-341, VDI-Verlag, 1924.
- [8] Miner, M.A.: Cumulative damage in fatigue. Journal of applied mechanics 12.3, S. 159-164, 1945.
- [9] Jollivet, T.; Peyrac, C.; Lefebvre, F.: Damage of composite materials. 5th Fatigue Design Conference, Procedia Engineering, Vol. 66, S. 746-758, Elsevier, 2013.
- [10] Domininghaus, H.: Kunststoffe – Eigenschaften und Anwendungen. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 6. Auflage, 2005.
- [11] Eckell, A.: Die Chemie und Physik von Verbundwerkstoffen mit Polymermatrix. Verbundwerkstoffe und Werkstoffverbunde in der Kunststofftechnik. S. 27-53, VDI-Verlag, 1982.