

FORSCHUNGSBERICHT

Prüf- und Berechnungsverfahren für die beschleunigte Ermittlung der Zeitfestigkeit an thermoplastischen Kunststoffen

Beschleunigte Zeitfestigkeitsbestimmung

Britta Gerets | Frédéric Achereiner | Kurt Engelsing | Ruben Schlutter
Benjamin Baudrit | Thomas Hochrein | Martin Bastian

Danksagung

Das Vorhaben 01IF22552N der Forschungsvereinigung Fördergemeinschaft für das Süddeutsche Kunststoff-Zentrum e. V. (FSKZ) wurde über die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen „Otto von Guericke“ (AiF) und dem DLR Projektträger (DLR) im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Die Forschungseinrichtung SKZ – KFE gGmbH (SKZ) dankt dem Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK), der AiF und dem DLR für die Förderung sowie der Forschungsvereinigung und den Mitgliedern des projektbegleitenden Ausschusses (PA) für die Unterstützung bei der Durchführung des Forschungsvorhabens.

Kurzfassung

Die Betriebsfestigkeitsauslegung und die Materialcharakterisierung im Zeitfestigkeitsbereich thermoplastischer Kunststoffe stellt eine große Herausforderung dar. Den zeit- und kostenintensiven Materialprüfungen stehen immer kürzere Entwicklungszeiten, ein steigender Kostendruck und immer lautere Forderungen nach Ressourcenschonung und Leichtbau gegenüber. Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurde ein Prüf- und Berechnungsverfahren zur beschleunigten Materialcharakterisierung von thermoplastischen Kunststoffen im Zeitfestigkeitsbereich entwickelt. Dabei wird auf Basis eines kraftgeregelten Laststeigerungsversuchs und zweier kraftgeregelter zyklischer Einstufenversuche eine physikalisch begründete Berechnung der Zeitfestigkeitsgeraden vorgenommen. Dazu wurden die Messgrößen Dehnungsamplitude, dissipierte Energiedichte und Temperaturänderung, welche eine direkte Antwort auf die Beanspruchungsgröße darstellen, mathematisch durch Potenzfunktionen beschrieben und so der Zusammenhang zwischen Laststeigerungsversuch und Einstufenversuchen bestimmt. Durch geeignete Umrechnung konnte die Zeitfestigkeitsgerade durch eine weitere Potenzfunktion unter Zuhilfenahme eines Referenzpunkts vollständig bestimmt werden. Dafür ist a priori die Kenntnis einer werkstoffspezifischen Konstante erforderlich, die für verschiedene Materialien ermittelt werden konnte. Das Berechnungsverfahren wurde in Software implementiert. Unter der Voraussetzung, dass die werkstoffspezifische Konstante für die interessierende Beanspruchung bekannt ist, wurde eine deutliche Zeit- und damit einhergehende Kostenersparnis für die Abschätzung des Zeitfestigkeitsbereichs demonstriert. Davon profitieren sowohl Prüflabore, welche das Verfahren selbst anbieten können, als auch Unternehmen, die damit kostengünstig an Materialdaten für die Betriebsfestigkeitsauslegung kämen und damit ihre Produkte für lange Einsatzzeiten absichern können.

Abstract

The material and component design of thermoplastic materials regarding the fatigue strength range is a big challenge. Time intensive and costly material tests are contrary to shortening development cycles, rising cost pressure and requirements aiming at resource efficiency as well as light weight construction. Within the research project an accelerated test and calculation procedure to characterize the materials fatigue strength was developed. Based on one force-controlled cyclic load increase test and two force-controlled fatigue (Wöhler) tests, the so called Wöhler line was physically based calculated. Therefore, the measured values of the strain amplitude, dissipated energy density and temperature changes, which result of the load applied, were mathematically described by power law functions. Thus, the link between cyclic load increase test and fatigue tests was determined. Using another power law equation and one reference point, the Wöhler line has been calculated. This requires a priori knowledge of a material specific constant, which could be determined for several materials. The calculation procedure was implemented in software. Provided that the material specific constant is known, a significant time and therefore costs saving for the Wöhler line estimation was demonstrated. Testing laboratories, which may provide the test procedure developed, and companies, which get access to cheaper fatigue data for their component design and may estimate their products long term performance, benefit from this.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	1
1.1	Anlass für das Forschungsvorhaben	1
1.2	Problemstellung	2
1.3	Zielsetzung.....	3
2	Stand der Technik.....	5
2.1	Mechanisches Verhalten unter zyklischer Beanspruchung	5
2.2	Zeitfestigkeitsbestimmung mittels Wöhler-Verfahren	7
2.3	Zeitfestigkeitsbestimmung mittels physikalisch basierter Lebensdauerberechnung (kurz „Phybal-Ansatz“).....	8
2.3.1	Morrow-Gleichung	9
2.3.2	Basquin-Gleichung	9
2.3.3	Phybal-Beziehung von Morrow- und Basquin-Gleichung	9
2.3.4	Vorgehensweise zur Anwendung des Phybal-Ansatzes.....	10
3	Lösungsweg zur Erreichung des Forschungsziels	13
4	Durchgeführte Arbeiten	15
4.1	Materialauswahl und Grundcharakterisierung.....	15
4.2	Laststeigerungsversuche	17
4.3	Einstufenversuche	19
4.4	Entwicklung von Auswertalgorithmen	20
4.5	Beschleunigte Bestimmung von Zeitfestigkeitsgeraden.....	21
4.6	Konventionelle Ermittlung der Zeitfestigkeitsgeraden.....	21
4.7	Vergleich der Methoden und Validierung	22
5	Darstellung und Diskussion der Ergebnisse.....	23
5.1	Faserorientierung und -verteilung.....	23
5.1.1	Spritzgegossene Probekörper (PBT-GF30).....	23
5.1.2	Aus spritzgegossenen Platten entnommene Probekörper (PA6-GF30)	24
5.2	Mechanisches Kurzzeitverhalten unter Zugbeanspruchung	26
5.3	Laststeigerungsversuche	28
5.3.1	Entwicklung einer Vorgehensweise zur Ermittlung des Beginns der irreversiblen Schädigung (untere Grenzspannung σ_1)	28
5.3.2	Einfluss der Probekörperdicke	32
5.3.3	Einfluss des Lastverhältnisses	35
5.3.4	Einfluss der Faserorientierung bei glasfasergefüllten Werkstoffen ...	37
5.3.5	Grenzen des Zeitfestigkeitsbereichs aus LSV	40

5.4	Einstufen-Versuche (bzw. Wöhler-Versuche)	41
5.4.1	Einfluss der Probekörperdicke	45
5.4.2	Einfluss des Lastverhältnisses.....	49
5.4.3	Einfluss der Faserorientierung bei glasfasergefüllten Werkstoffen....	54
5.4.4	Empirischer Faktor für die Anwendung des Phybal-Ansatzes	59
5.5	Methodenvergleich und Validierung.....	60
6	Zusammenfassung.....	68
7	Literaturverzeichnis.....	70
8	Anhang	73
8.1	Prüfaufbau für Laststeigerungs-, Einstufen- bzw. Wöhler-Versuche	73
8.2	Eigenerwärmung	74
8.2.1	Laststeigerungsversuche	74
8.2.2	Einstufenversuche	74

1 Einleitung

1.1 Anlass für das Forschungsvorhaben

Viele Kunststoffbauteile unterliegen im Einsatz zeitlich veränderlichen zyklischen Beanspruchungen. Bei zyklischer Belastung tritt ein Versagen durch Materialermüdung bei deutlich niedrigeren Lastniveaus als bei einmaliger Belastung auf. Die Auslegung von Kunststoffbauteilen gegen derartige Langzeitbelastungen und die Bewertung der Betriebsfestigkeit stellen auch heute noch eine große Herausforderung in der industriellen Praxis dar. Insbesondere im Bereich der Kunststofftechnik gestaltet sich die Bestimmung und Berücksichtigung der zyklischen Festigkeit im Zeitbereich kompliziert, was häufig nur durch hohe Sicherheitsbeiwerte kompensiert werden kann. Dies führt zu unnötig großen Wanddicken, die dem Leichtbaugedanken und der Ressourceneffizienz entgegenstehen [Kla09, HVF19]. Die Auslegung erfolgt in der Regel auf Basis von zyklischen Festigkeitswerten, für deren Ermittlung Wöhler-Versuche das gängigste Prüfverfahren darstellen [EM19, BRR14, SSK18]. Diese sind jedoch i. d. R. sehr zeit- und kostenintensiv. Hinzu kommt, dass die Ergebnisse stark von äußeren Einflüssen und den Prüfbedingungen abhängen: Lastart und -verhältnis, Temperatur, Konditionierungszustand, Prüffrequenz sowie weitere Faktoren können sich signifikant auf die Lebensdauer auswirken [GFG13, Koc10, OH72]. Für eine Bauteilauslegung können daher mehrere Wöhler-Linien erforderlich sein. Prüftechnische oder rechnerische Ansätze, die eine Zeit- und/oder Kostenersparnis versprechen, sind daher von großer wirtschaftlicher Bedeutung.

1.2 Problemstellung

Über die Lebensdauer von Werkstoffen bzw. Bauteilen geben Wöhler-Diagramme Auskunft. Die Angabe erfolgt in Form von Lastspielen, die in Abhängigkeit der äußeren Beanspruchung bis zum Versagen ertragen werden können. Für die Bauteilauslegung ist dabei insbesondere der Zeitfestigkeitsbereich relevant, der bei thermoplastischen Kunststoffen i. d. R. im Bereich von 10^4 bis 10^7 Lastspielen liegt [SSK18, HVF19, RV07, Mös09]. Insbesondere für die Absicherung von langen Einsatzzeiten müssen damit bis zu 10^7 Lastspiele in einem einzigen Versuch durchlaufen werden. Aufgrund der langen Versuchszeiten und den damit einhergehenden hohen Kosten liegen derartige Daten nur selten vor. Sind zusätzlich die Prüfbedingungen nicht oder nur unvollständig dokumentiert, entwertet dies die Daten weitgehend. Für die Betriebsfestigkeitsauslegung eines Kunststoffbauteils unter spezifischen Einsatzbedingungen müssen die Daten daher häufig experimentell ermittelt werden. Dies stellt eine Herausforderung für Unternehmen dar, da sowohl die zeit- und kostenintensive Bestimmung als auch eine mit Überdimensionierung und Materialineffizienz verbundene Auslegung mit hohen Sicherheitsfaktoren wirtschaftlich nachteilig ist. Eine unzureichende Berücksichtigung von Festigkeitsreduzierungen aufgrund von Ermüdungslasten ist jedoch zu vermeiden, weil eine Unterdimensionierung zu einem vorzeitigen Bauteilausfall und damit einhergehenden hohen Schadenskosten und Imageverlusten führen kann. Eine Reduzierung des Zeit- und Kostenaufwands für die Prüfungen ist daher wünschenswert. Allerdings kann eine Erhöhung der Prüffrequenz zur Reduzierung der Prüfdauer bei Kunststoffen nur stark eingeschränkt genutzt werden, da eine zu starke Frequenzerhöhung durch die eintretende Eigenerwärmung für eine Änderung im Material- bzw. Versagensverhalten sorgt und das Versuchsergebnis verfälscht [FPL12, MWG13, MBK21, SSK18]. Mögliche Prüffrequenzen sind deshalb bei Kunststoffen typischerweise auf wenige Hertz (i. d. R. max. bis zu 10 Hz) beschränkt.

1.3 Zielsetzung

Die Untersuchungen zielten daher auf die Entwicklung eines Prüf- und Berechnungsverfahrens für die beschleunigte Materialcharakterisierung von thermoplastischen Kunststoffen im Zeitfestigkeitsbereich. Das Verfahren beruht auf dem für Metalle entwickelten Ansatz der physikalisch basierten Lebensdauerberechnung (kurz „Phybal-Ansatz“) [SWE06, KSK14a, KSK14b], der in Kapitel 2.3 ausführlich dargestellt ist.

Hierfür wurden die nachfolgenden Arbeitshypothesen (AH) zugrunde gelegt. Dabei beschreiben die AH 2 bis 5 den Phybal-Ansatz – einschließlich der dafür notwendigen Annahmen bzgl. des Materialverhaltens unter zyklischer Beanspruchung.

- AH 1 Für eine Bestimmung der Zeitfestigkeit von thermoplastischen Kunststoffen bzw. eine Auslegung von aus diesen Werkstoffen gefertigten Bauteilen, eignen sich Wöhler-Diagramme bzw. der darin abgebildete Zeitfestigkeitsbereich. Dieser lässt sich mit der sogenannten Zeitfestigkeitsgeraden beschreiben.
- AH 2 Die Grenzen des Zeitfestigkeitsbereichs lassen sich auf Basis eines Laststeigerungsversuchs (LSV) abschätzen. Bei geeignet gewählten Stufen im LSV eignet sich der Bruchpunkt als Näherung der Grenze zu hohen Lasten. Die Schädigungsinitiierung liefert eine Näherung für die Grenze zu niedrigen Lasten und kann über die Auswertung des Hystereseverlaufs (z. B. Dehnungsamplitude) bestimmt werden.
- AH 3 In kraftgeregelten zyklischen Versuchen lassen sich auf Basis von Auswertungen der Hystereseschleifen verschiedene in Zusammenhang stehende Messgrößen erfassen, welche eine Korrelation mit dem anliegenden Lastniveau zulassen. Geeignete Messgrößen lassen sich als Funktion der Spannung in guter Näherung mit Hilfe von Morrow-Gleichungen beschreiben und bilden damit in einer doppellogarithmischen Darstellung eine Gerade.
- AH 4 AH 3 gilt sowohl für eine Reihe von Einstufenversuchen (ESV), welche bei unterschiedlichen Lastniveaus aber sonst gleichen Bedingungen durchgeführt wurden, als auch für LSV. Die Potenzfunktionen für ESV und LSV weisen in einer doppellogarithmischen Darstellung unterschiedliche Steigungen auf. Durch das Bilden eines Quotienten lassen sich LSV und ESV über einen geeigneten werkstoffabhängigen Messparameter in Verbindung setzen.

- AH 5 Auch die Zeitfestigkeitsgerade im doppel-logarithmischen Wöhler-Diagramm lässt sich mit einer Potenzfunktion abbilden (Basquin-Gleichung). Die Basquin-Gleichung lässt sich durch geeignete Umrechnung der Exponenten nach dem Ansatz von Morrow und unter Zuhilfenahme eines Referenzbruchpunkts aus einem ESV vollständig bestimmen.
- AH 6 Durch das neue Verfahren können Zeit und somit Kosten bei der Charakterisierung von thermoplastischen Kunststoffen im Zeitfestigkeitsbereich deutlich reduziert werden.

2 Stand der Technik

2.1 Mechanisches Verhalten unter zyklischer Beanspruchung

Unter zyklischen Belastungen des Werkstoffs bzw. Bauteils tritt ein Versagen durch Materialermüdung auf. Dabei können umso mehr Beanspruchungszyklen ertragen werden, je geringer die Beanspruchung ist (vgl. Abbildung 2.1). Für thermoplastische Kunststoffe können dabei i. d. R. drei verschiedene Bereiche unterschieden werden: Die Kurzzeitfestigkeit, Zeitfestigkeit und Langzeitfestigkeit. Es sei darauf hingewiesen, dass diese Darstellungsform vereinfacht ist. Für verschiedene Werkstoffe wurde gezeigt, dass weitere Bereiche insbesondere bei sehr hohen Lastspielzahlen unterschieden werden können [Fes12, Fis17].

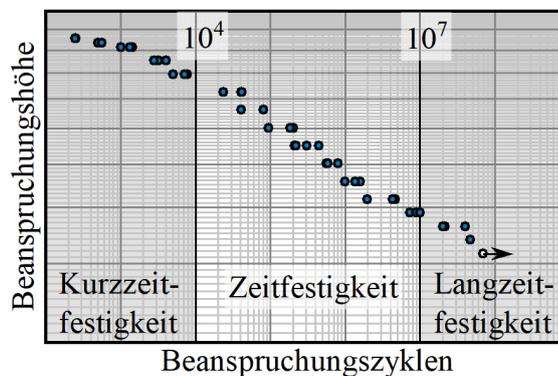


Abbildung 2.1: Ertragbare Beanspruchungszyklen bis zum Bruchversagen in Abhängigkeit von der Beanspruchungshöhe

Die Bezeichnungen für die einzelnen Zeitbereiche werden teils unterschiedlich gebraucht. Daher wird die genutzte Nomenklatur wie folgt definiert: Als **Kurzzeitfestigkeit** wird der Bereich von niedrigen Lastspielen bezeichnet. Begrenzt wird dieser durch die quasi-statische Festigkeit (bei einmaliger Beanspruchung) auf der einen Seite und den Übergang in die Zeitfestigkeitsgerade auf der anderen Seite. Die **Zeitfestigkeit** beschreibt einen Bereich mittlerer Schwingspielzahlen. Dieser wird für Kunststoffe häufig im Bereich von 10^4 bis 10^7 Lastspielen angegeben [SSK18, HVF19, RV07, Mös09], was jedoch stark werkstoffabhängig sein kann. An diesen Bereich anschließend folgt ein meist zunehmend flacher Verlauf der Wöhler-Linie. Im Metallbereich wird hier häufig von einer Dauerfestigkeit gesprochen [Gra29, LK79], was auf die theoretisch unendliche Anzahl ertragbarer Lastspiele hindeutet. Die Wöhler-Linie würde in diesem Fall horizontal verlaufen. Da dieses Phänomen bei Kunststoffen jedoch selten bewiesen wird [JKG08, PKE20] und meist ein langsam abfallender Kurvenverlauf zu beobachten ist [Gus09], wird hier anstelle der Dauerfestigkeit der Begriff **Langzeitfestigkeit** verwendet.

Die Auslegung im Zeitfestigkeitsbereich hat in der Konstruktionspraxis eine hohe Relevanz. Viele Produktlebenszeiten lassen sich in diesen Grenzen beschreiben. Die Auslegung im Kurzzeitfestigkeitsbereich eignet sich nur für verhältnismäßig kurze Produktlebenszyklen. Eine generelle Auslegung im Bereich der Langzeit- bzw. Dauerfestigkeit ist i. d. R. nicht sinnvoll, da das betroffene Bauteil massiver konstruiert werden muss und damit je nach Anwendungsfall deutlich überdimensioniert sein kann. Das Leichtbaupotential, welches häufig treibendes Argument bei der Anwendung von Kunststoffen ist, kann daher nur durch eine effiziente Auslegung im geforderten Lebensdauerbereich voll ausgeschöpft werden [HVF19].

2.2 Zeitfestigkeitsbestimmung mittels Wöhler-Verfahren

Das Wöhler-Verfahren basiert auf zyklischen Belastungen des Werkstoffs bzw. Bauteils, welche in der Regel spannungsbezogen definiert werden und sich durch eine Oberspannung σ_o und Unterspannung σ_u sowie eine zugehörige Frequenz f beschreiben lassen. Das sogenannte Lastverhältnis R wird aus dem Verhältnis von Unterspannung σ_u zu Oberspannung σ_o gebildet. [Ehr02] Die prinzipielle Belastungsfolge im Wöhler-Versuch ist in Abbildung 2.2 links dargestellt. Wöhler-Diagramme stellen die Ergebnisse in Form der Widerstandsfähigkeit eines Werkstoffs bzw. Bauteils gegenüber der vorliegenden zyklischen Belastung dar. Aufgetragen wird die Belastungsgröße gegen die Bruchlastspielzahl N_B , d. h. die Anzahl der erreichten Lastspiele N bis zum Versagen durch Bruch, in doppel-logarithmischer Form. Häufig wird eine Linie als Darstellungsform gewählt, welche sich jedoch aus einzelnen diskreten Punkten zusammensetzt. Die Punkte stellen jeweils einen Versagenspunkt des Werkstoffs dar. Wird ein Versuch ohne Versagen abgebrochen, so wird dieser Punkt ebenfalls eingetragen und als sogenannter Durchläufer gekennzeichnet. Entsprechend Kapitel 2.1 lassen sich die Wöhler-Diagramme für die meisten Werkstoffe grob in drei Bereiche einteilen (vgl. Abbildung 2.2 rechts): Die Kurzzeitfestigkeit, die Zeitfestigkeit und die Dauer- bzw. Langzeitfestigkeit [RV07, BD21, Son13]. Der Bereich der Zeitfestigkeit zeichnet sich im Wöhler-Diagramm durch eine in guter Näherung exponentielle Abhängigkeit zwischen Last und Bruchlastspielzahl bzw. Bruchschwingspielzahl aus, welche die ertragbare Anzahl an Beanspruchungszyklen bis zum Bruchversagen bezeichnet, und kann daher gut mit der sogenannten Zeitfestigkeitsgeraden (auch als Wöhler-Linie bezeichnet) beschrieben werden.

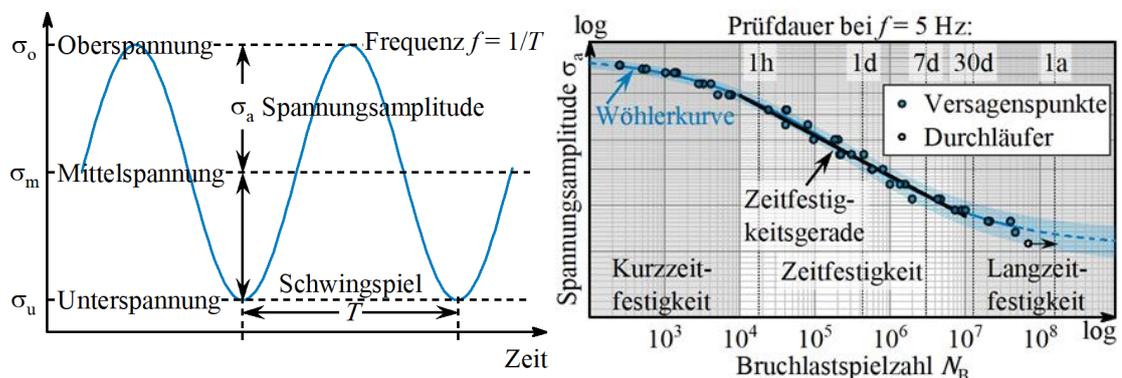


Abbildung 2.2: Prinzip der zyklischen dynamischen Belastung in einem Dauerschwingversuch (links, nach [Ehr02]) und Wöhler-Diagramm mit schematischer Einteilung (rechts)

2.3 Zeitfestigkeitsbestimmung mittels physikalisch basierter Lebensdauerberechnung (kurz „Phybal-Ansatz“)

Für metallische Werkstoffe, aus dem die Wöhler-Versuche stammen, wird auch heute noch hinsichtlich der Beschleunigung der Prüfverfahren geforscht. Einen solchen Ansatz stellt die Methode zur physikalisch basierten Lebensdauerberechnung (kurz „Phybal-Ansatz“) dar, welche zu Beginn der 2000er Jahre an der Universität Kaiserslautern entwickelt wurde [SWE06, KSK14a, KSK14b]. Der Phybal-Ansatz ermöglicht, auf Basis verallgemeinerter Morrow- und Basquin-Gleichungen, mit lediglich einem zyklischen Laststeigerungsversuch (LSV) und zwei zyklischen Einstufenversuchen (ESV), die Lebensdauer zyklisch beanspruchter metallischer Werkstoffe im Zeitfestigkeitsbereich zu berechnen.

Unter einem LSV wird in diesem Kontext ein Versuch mit zyklischer Belastung ähnlich dem Wöhler-Versuch verstanden. Wesentlicher Unterschied ist, dass die Belastung jeweils nur für eine definierte Anzahl an Beanspruchungszyklen beibehalten und anschließend stufenweise um einen definierten Betrag gesteigert wird [Ehr02]. Der Vorteil des LSV besteht darin, dass durch die sukzessive Belastungserhöhung immer ein Versagen in endlichen Zeiten erzielt wird. Allerdings dauert der LSV länger als ein konventioneller Wöhler-Versuch, der mit dem Lastniveau jener Laststufe des LSV durchgeführt wird bei welcher der Probekörper versagte. Die gemessene Lastspielzahl bis zum Versagen beim LSV entspricht einem niedrigeren effektiven Lastniveau bei konstanter Lastamplitude. Die Auftragung im Wöhler-Diagramm kann daher nicht direkt zur Ermittlung der Zeitfestigkeitsgeraden eingesetzt werden. Der Wöhler-Versuch wird (in Abgrenzung zum LSV) nachfolgend als ESV bezeichnet, da dieser nur eine Belastungsstufe beinhaltet, welche bis zum Bruchversagen oder Abbruch des Versuchs beibehalten wird. Die Anwendung von LSV für Kunststoffe konnte in der Vergangenheit bereits erfolgreich demonstriert werden [GHB19, PAK19, BBB21]. Der wesentliche Vorteil des Phybal-Ansatzes ist die mögliche Zeit- und die damit einhergehende Kostenersparnis, ohne eine fragwürdige Extrapolation des Kurvenverlaufs vorzunehmen, da die Prognose auf der Auswertung physikalischer Messgrößen in Abhängigkeit der Ermüdungsbeanspruchung basiert.

2.3.1 Morrow-Gleichung

Morrow zeigte, dass eine Beschreibung der Spannungsamplitude σ_a in Abhängigkeit der Dehnungsamplitude ε_a mit einem einfachen Potenzgesetz möglich ist [Mor65]. Gleichung 1 gibt die gefundene Beziehung mit der Konstanten K' und dem zyklischen Dehnungsverfestigungsexponenten n' wieder. Der Exponent n' gibt in der doppellogarithmischen Darstellung der Morrow-Gleichung die Geradensteigung an.

$$\sigma_a = K' \cdot (\varepsilon_a)^{n'} \quad \text{Gleichung 1}$$

Die Gültigkeit dieses Zusammenhanges konnte für Metalle auch für weitere Messgrößen, wie die Eigenerwärmung und den elektrischen Widerstand, gezeigt werden [SWE06; KSK14a; KSK14b]. Die verallgemeinerte Morrow-Gleichung (Gleichung 2) lautet daher:

$$\sigma_a = K' \cdot (\text{Messgröße})^{n'} \quad \text{Gleichung 2}$$

Die Morrow-Gleichung beschreibt also die Spannungsabhängigkeit einer physikalischen Messgröße während der zyklischen Belastung.

2.3.2 Basquin-Gleichung

Basquin beschrieb bereits im Jahr 1910 ein exponentielles Gesetz zur Abhängigkeit der Spannungsamplitude von Lebensdauer unter zyklischer Beanspruchung [Bas10], welches heute als Basquin-Gleichung bekannt ist. Gleichung 3 gibt die gefundene Beziehung zwischen der Spannungsamplitude σ_a und der Bruchlastspielzahl N_B durch ein Potenzgesetz mit der Konstanten σ'_B und dem Schwingfestigkeitsexponenten b wieder.

$$\sigma_a = \sigma'_B \cdot (2N_B)^b \quad \text{Gleichung 3}$$

Die Basquin-Gleichung beschreibt also die Spannungsabhängigkeit des Versagens am Ende der zyklischen Belastung.

2.3.3 Phybal-Beziehung von Morrow- und Basquin-Gleichung

Von Morrow wurde ein Zusammenhang zwischen der Morrow-Gleichung (Gleichung 1 bzw. Gleichung 2) und der Basquin-Gleichung (Gleichung 3) hergestellt [Mor65]. Die Verknüpfung erfolgt dabei über die Exponenten mittels Gleichung 4. Demnach kann der Schwingfestigkeitsexponent b der Basquin-Gleichung aus dem Dehnverfestigungsexponenten n' der Morrow-Gleichung berechnet werden.

$$b = \frac{-n'}{1 + 5n'} \quad \text{Gleichung 4}$$

Diesen Zusammenhang macht sich der Phybal-Ansatz zunutze, sodass Gleichung 4 nachfolgend als „Phybal-Beziehung“ bezeichnet wird.

2.3.4 Vorgehensweise zur Anwendung des Phybal-Ansatzes

Die Vorgehensweise zur Anwendung des Phybal-Ansatzes wird nachfolgend schematisch am Beispiel der Dehnungsamplitude ε_a erläutert. Aufgrund der Verallgemeinerbarkeit der Morrow-Gleichung kann die beschriebene Vorgehensweise grundsätzlich auch für weitere physikalische Größen geeignet sein.

Im **ersten Schritt** werden die Grenzen des Zeitfestigkeitsbereichs mit Hilfe eines LSV abgeschätzt. Abbildung 2.3 links zeigt schematisch die zugehörige Auswertung. Die Grenze σ_2 zum Kurzzeitfestigkeitsbereich, also zu geringen Lastspielzahlen N bzw. hohen Spannungsamplituden σ_a lässt sich mit dem Bruchpunkt aus dem LSV annähern. Die Grenze σ_1 zu hohen Lastspielzahlen bzw. geringen Spannungsamplituden und damit zum Langzeitfestigkeitsbereich kann mit dem LSV durch die Auswertung der Dehnungsamplitude ε_a bestimmt werden. Die Dehnungsamplitude zeigt bei verhältnismäßig geringen Lasten einen näherungsweise linearen Verlauf. Das Abweichen der Amplitude von dieser Linearität (schwarze Gerade in Abbildung 2.3 links) markiert den abgeschätzten Übergang zur Langzeitfestigkeit. Der Phybal-Ansatz sieht vor, auf die derart ermittelte Grenzspannung σ_1 einen Sicherheitswert aufzuschlagen, um nicht in den Bereich der Dauerfestigkeit bzw. Langzeitfestigkeit zu geraten. Die Grenzspannung σ_2 wird analog etwas abgemindert. Damit ist der Spannungsbereich des werkstoffbezogenen Zeitfestigkeitsbereichs definiert.

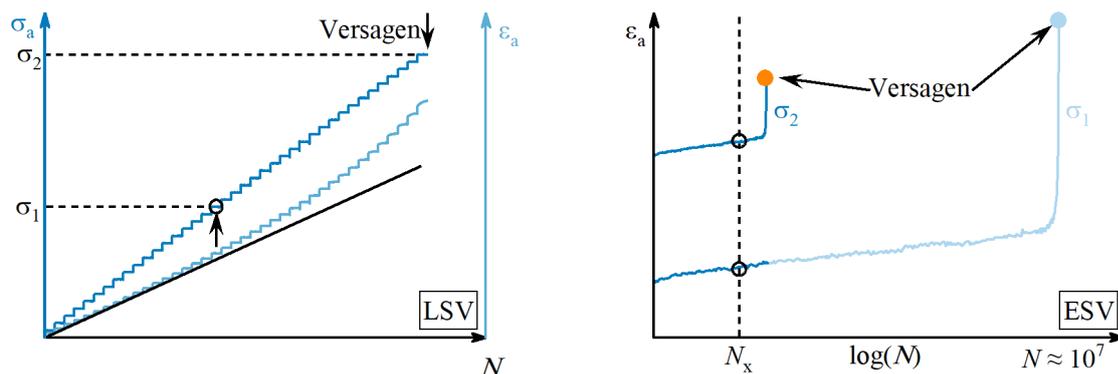


Abbildung 2.3: Schematische Darstellung der Auswertung eines LSV zur Abschätzung der Grenzen des werkstoffbezogenen Zeitfestigkeitsbereichs (links) und Verlauf der Dehnungsamplitude in den ESV als Funktion der Lastspielzahl (rechts)

Im **zweiten Schritt** wird jeweils ein ESV mit den im ersten Schritt ermittelten Werten der Spannungsamplitude σ_1 und σ_2 durchgeführt. Die zur Last korrelierende Messgröße (hier die Dehnungsamplitude ε_a) wird über der Lastspielzahl N aufgetragen, wie in Abbildung 2.3 rechts dargestellt. Anschließend wird die Messgröße bei einer definierten Lastspielzahl N_x ausgelesen (bspw. bei $N_x = 10^3$ oder 10^4) [SWE06]. Der ESV mit der

Spannungsamplitude σ_1 kann nach Erreichen einer Lastspielzahl $N > N_x$ abgebrochen werden. Der ESV mit der Spannungsamplitude σ_2 wird bis zum Versagen durchgeführt, da dieser im vierten Schritt als Referenzpunkt dient.

Im **dritten Schritt** werden die einzelnen Laststufen des LSV ausgewertet, welche sich zwischen den Grenzen σ_1 und σ_2 bewegen. Die Spannungsamplitude wird über der mittleren Dehnungsamplitude im doppel-logarithmischen Diagramm aufgetragen und kann in dieser Darstellung durch eine Gerade angenähert werden. Unter Zuhilfenahme der beiden Stützpunkte aus den ESV lassen sich die Datenpunkte von LSV-Bereich in den ESV-Bereich umrechnen. Abbildung 2.4 links zeigt schematisch die Umrechnung der Datenpunkte in der doppel-logarithmischen Darstellung. Die in den ESV-Bereich umgerechneten Datenpunkte werden wiederum durch eine Morrow-Gleichung angenähert (Gleichung 1). Diese Funktion beschreibt die Abhängigkeit von Spannungsamplitude und Dehnungsamplitude im zyklischen ESV.

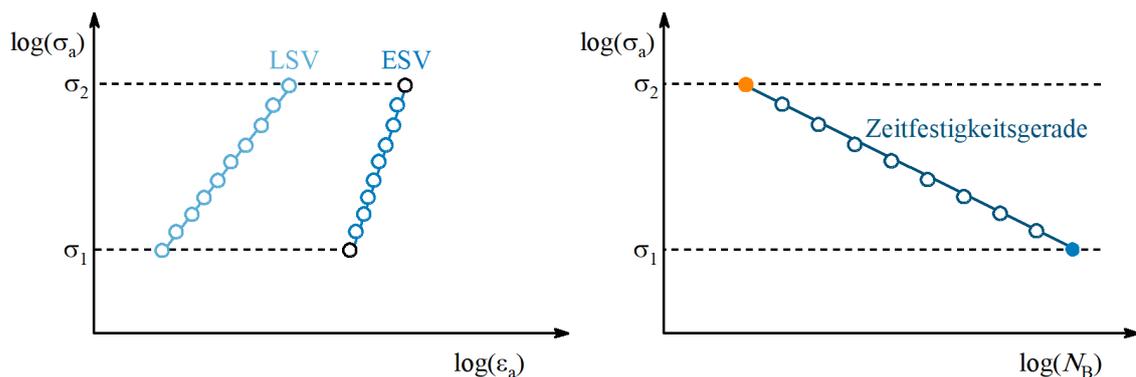


Abbildung 2.4: Schematische Darstellung der Spannungsamplitude, aufgetragen über die Dehnung für LSV und ESV (links, dritter Schritt) und Zeitfestigkeitsgerade mit den aus einem LSV errechneten Bruchpunkten (rechts, vierter Schritt)

Im **vierten Schritt** erfolgt eine Überführung in die Basquin-Form, dazu wird die Phylal-Verknüpfung (Gleichung 4) zur Berechnung des Schwingfestigkeitsexponenten b genutzt. Durch Umstellung der Gleichung 3 nach der Bruchlastspielzahl ergibt sich der Zusammenhang in Gleichung 5. Unter Zuhilfenahme des Bruchpunkts aus dem ESV mit σ_2 als Referenz (oranjer Punkt in Abbildung 2.3 rechts) lässt sich die Zeitfestigkeitsgerade vollständig bestimmen. Abbildung 2.4 rechts zeigt schematisch die erhaltene Gerade und die aus LSV berechneten Punkte. Der blaue Bruchpunkt (aus dem ESV mit σ_1 , Abbildung 2.3 rechts) wird für die Berechnung nicht benötigt – ist er vorhanden, kann er zur Validierung herangezogen werden.

$$N_B = 0,5 \cdot \left(\frac{\sigma_a}{\sigma_B'} \right)^{\frac{1}{b}}$$

Gleichung 5

Abbildung 2.5 zeigt eine Übersicht der zuvor erläuterten Vorgehensweise:

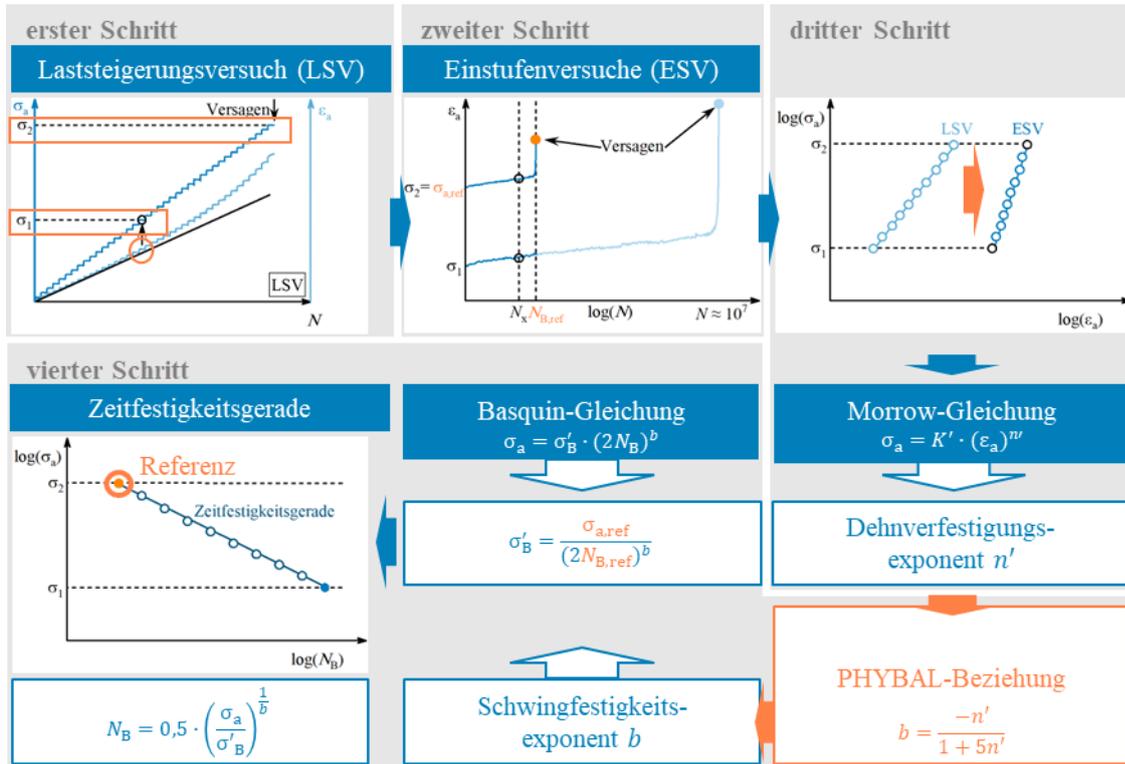


Abbildung 2.5: Schematische Darstellung der Vorgehensweise zur Anwendung des Phyal-Ansatzes. Zur Abschätzung der Erfolgsaussichten, den zuvor nur an Metallen demonstrierten Phyal-Ansatz auf thermoplastische Kunststoffe übertragen zu können, wurde das Vorgehen am SKZ exemplarisch an bestehenden Daten für den Werkstoff Polyvinylchlorid (PVC-U) erprobt. Dabei wurde die aus Hystereseschleifen ermittelte Verlustarbeit \mathcal{W} als Messgröße herangezogen. Abbildung 2.6 zeigt die Ergebnisse analog zu der schematischen Darstellung in Abbildung 2.4: Links wurde der aus einem LSV ermittelte Zusammenhang zwischen zyklischer Belastungshöhe und Verlustarbeit auf den ESV übertragen. Rechts ist die berechnete Zeitfestigkeitsgerade gezeigt und den Daten aus Validierungsversuchen gegenübergestellt; wobei sowohl die Einzelmesswerte (grüne Punkte) als auch die daraus je Belastungsniveau bestimmten Mittelwerte (grüne Kreuze) dargestellt sind.

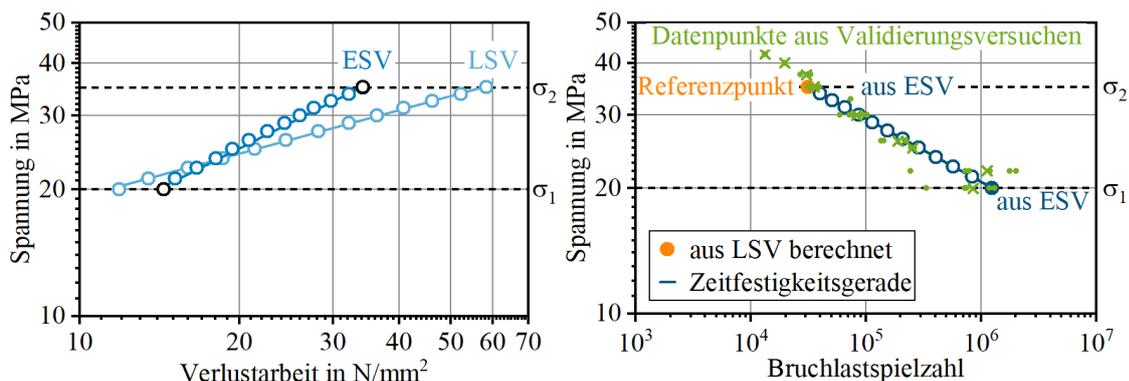


Abbildung 2.6: Umrechnung der Datenpunkte von LSV zu ESV (links) und Abgleich der berechneten Zeitfestigkeitsgeraden mit experimentell ermittelten Bruchpunkten an PVC-U

3 Lösungsweg zur Erreichung des Forschungsziels

Zur Erreichung der in Kapitel 1.3 beschriebenen Zielsetzung wurde eine mehrstufige Vorgehensweise gewählt, die in Abbildung 3.1 grafisch dargestellt ist.

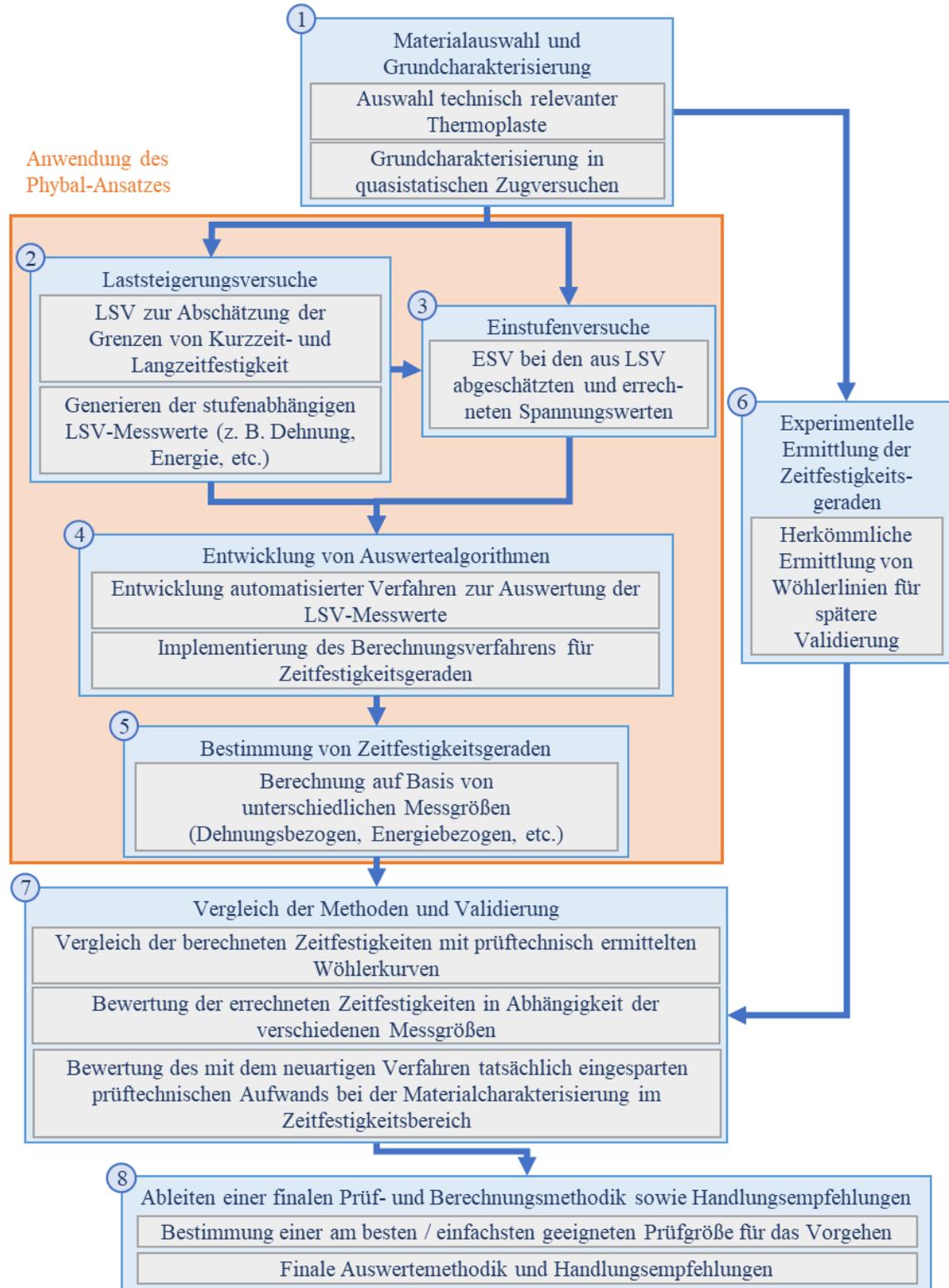


Abbildung 3.1: Flussdiagramm zum geplanten Lösungsweg.

Nach der anfänglichen Auswahl der Materialien und deren Grundcharakterisierung (Kapitel 4.1) sollte der Phybal-Ansatz, wie in Kapitel 2.3.4 beschrieben, experimentell für die gewählten Materialien umgesetzt werden. Dazu wurden LSV (Kapitel 4.2) und ESV (Kapitel 4.3) durchgeführt. Für die Auswertung waren Auswertelgorithmen zu entwickeln (Kapitel 4.4). Im Zuge der Bestimmung der Zeitfestigkeitsgeraden sollten unterschiedliche Messgrößen herangezogen werden (Kapitel 4.5). Neben dieser beschleunigten Ermittlung der Zeitfestigkeitsgeraden, sollten konventionelle Wöhler-Linien ermittelt werden (Kapitel 4.6), um einen Vergleich der Methoden und Validierung der beschleunigt ermittelten Zeitfestigkeitsgeraden zu ermöglichen (Kapitel 4.7).

4 Durchgeführte Arbeiten

4.1 Materialauswahl und Grundcharakterisierung

Die Werkstoffe, an denen das Prüf- und Berechnungsverfahren für die beschleunigte Ermittlung der Zeitfestigkeit entwickelt werden sollte, wurden gemeinsam mit zahlreichen Unternehmensvertretern ausgewählt. Die Auswahl erfolgte im Hinblick auf ein möglichst breites Eigenschaftsspektrum einerseits und eine hohe technische Praxisrelevanz andererseits. Zur Werkstoffauswahl wurden Befragungen vorgenommen und Gruppendiskussionen geführt. Dabei wurde deutlich, dass insbesondere duktile Kunststoffe von Interesse sind, d. h. Werkstoffe aus der Klasse der teilkristallinen Thermoplaste – genannt wurden insbesondere Polyoxymethylen (POM), Polybutylenterephthalat (PBT) und Polyamid (PA). Ungefüllte spröde Kunststoffe, d. h. Werkstoffe aus der Klasse der amorphen Thermoplaste (bspw. Polymethylmethacrylat (PMMA) oder Styrolacrylnitril (SAN)), wurden dagegen mehrheitlich als nicht relevant erachtet und daher von den Untersuchungen ausgeschlossen. Neben ungefüllten duktilen Werkstoffen sind für technischen (Langzeit)Anwendungen Glasfaser (GF) gefüllte Werkstoffe relevant. Besonders häufig wurden hierbei PA-GF Werkstoffe von den Unternehmen genannt. In Tabelle 4.1 sind die ausgewählten Werkstoffe aufgelistet; die Auswahl der spezifischen Materialtype erfolgte im direkten Austausch mit denjenigen Unternehmen, welche die Materialien in Form von spritzgegossenen Zugstabprobekörpern vom Typ 1A bzw. Typ 1B nach DIN EN ISO 527-2 bereitgestellt haben.

Tabelle 4.1: Übersicht der gewählten Werkstoffe

Werkstoff	Probekörperdicke	Probekörpergeometrie
POM	4 mm	DIN EN ISO 527-2 Typ 1A
POM	2 mm	DIN EN ISO 527-2 Typ 1A
PBT	4 mm	DIN EN ISO 527-2 Typ 1A
PBT-GF30	4 mm	DIN EN ISO 527-2 Typ 1A
PA6-GF30	2 mm	DIN EN ISO 527-2 Typ 1B (Probekörperentnahme in Fließrichtung und senkrecht dazu)
PP-GF30	4 mm	DIN EN ISO 527-2 Typ 1B (Probekörperentnahme in Fließrichtung)

Im Fall der DIN EN ISO 527-2 Typ 1B Probekörper wurden diese aus spritzgegossenen Platten ausgefräst. Die Entnahmeposition aus der Spritzgussplatte ist in Abbildung 4.1 schematisch dargestellt.

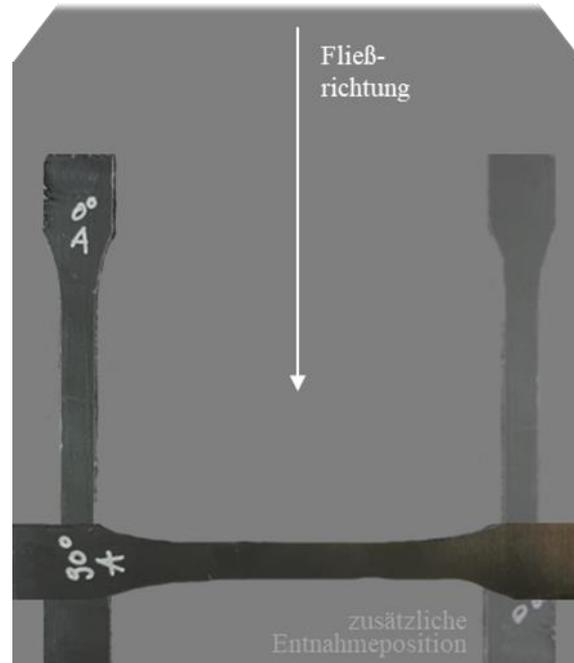


Abbildung 4.1: Entnahmepositionen der DIN EN ISO 527-2 Typ 1B Probekörper aus einer spritzgegossenen Platte

Mittels Computer-Tomographie wurde die Faserorientierung in den PBT-GF30- und PA6-GF30- Probekörpern kontrolliert und quantifiziert (vgl. Kapitel 5.1). Die Messungen erfolgten mit einer Röhrensannung von 100 kV und einer Röhrenstromstärke von 110 μ A. Die Integrationszeit betrug 0,4 s, die Projektionsanzahl 2700 und die Auflösung lag in jeder Raumrichtung bei 0,005 mm.

Anschließend erfolgte eine Grundcharakterisierung aller gewählten Materialien und Konfigurationen mittels quasi-statischer Zugversuche nach DIN EN ISO 527. In diesen wurde das mechanische Kurzzeitverhalten unter Zugbeanspruchung bei Normklima (23 °C und 50 % r. F.) erfasst und die jeweilige Kurzzeitzugfestigkeit ermittelt (Kapitel 5.2). Die Messungen erfolgten auf Universalprüfmaschinen vom Typ Z250 bzw. Z010 der Fa. Zwick/Roell, Ulm. Vor Durchführung der in Kapitel 4.1 bis 4.3 sowie in Kapitel 4.6 beschriebenen Untersuchungen erfolgte zur definierten Konditionierung eine mehrwöchige Lagerung der Probekörper im Normklima (23 °C und 50 % r. F.). Dies ist insbesondere für hygroskopische Werkstoffe (hier insbesondere PA6-GF30) relevant, da deren mechanische Eigenschaften stark vom Feuchtegehalt abhängen.

4.2 Laststeigerungsversuche

Für die Durchführung der Laststeigerungsversuche (LSV) wurden übliche Prüfbedingungen eingesetzt. Um die Reproduzierbarkeit der LSV überprüfen zu können, wurden diese in Dreifachbestimmung durchgeführt. Sämtliche LSV erfolgten in Zugschwellbeanspruchung mit einer Frequenz von $f = 5$ Hz. Jede Laststufe wurde für 1.000 Lastspiele gehalten, wobei als Stufenhöhe ca. ein Vierzigstel der Kurzzeitzugfestigkeit aus dem Datenblatt des Materialherstellers oder den Kurzzeitzugversuchen (vgl. Kapitel 5.2) gewählt wurde. Die LSV wurden auf einer servohydraulischen Schwingprüfmaschine vom Typ PL 10 K der Fa. Instron/Schenck, Darmstadt, durchgeführt, welche mit einer Temperierkammer der Fa. HSR Verfahrenstechnik, Reutlingen ausgerüstet ist. Der Prüfaufbau ist im Anhang fotografisch dokumentiert (Kapitel 8.1). Die Temperierkammer wurde genutzt, um die Kammertemperatur für alle Versuche auf 23 °C zu regeln, da erste LSV an POM eine ungewöhnlich hohe Eigenerwärmung (> 20 K) zeigten (vgl. Anhang Kapitel 8.2.1). Mit Hilfe eines auf der luftführungsabgewandten Oberfläche angebrachten Thermoelements, wurde die Temperaturentwicklung des Probekörpers während der Versuche kontinuierlich erfasst. Darüber hinaus wurden jeweils die Amplitude sowie das Minimum/Maximum der Spannung, der Last, der Dehnung sowie der Position des Aktuators kontinuierlich erfasst. Aus diesen können weitere Größen ermittelt werden; bspw. die dissipierte Energiedichte, welche ein charakteristischer Kennwert für das Materialverhalten in Ermüdungsprüfungen ist.

Die LSV dienen, wie in Kapitel 2.3.4 erläutert, der Abschätzung des Zeitfestigkeitsbereichs. Für die durchgeführten LSV erfolgte die Auswertung der Dehnungsamplitude mit dem Ziel, die Schädigungsinitiierung und damit die Grenze zum Langzeitfestigkeitsbereich zu bestimmen (vgl. Kapitel 2.3.4, erster Schritt). Die korrelierende Spannung (amplitude) bildet gemeinsam mit der Spannung(amplitude) beim Versagen im LSV die spannungsbezogenen Grenzen des Zeitfestigkeitsbereichs. Zur Auswertung der LSV wurde zunächst eine Vorgehensweise zur Ermittlung des Beginns der irreversiblen Materialschädigung (Grenze σ_1) entwickelt (Kapitel 5.3.1). Am Beispiel des POM wurde der Einfluss der Probekörperdicke, insbesondere im Hinblick auf die Probekörpererwärmung, betrachtet (Kapitel 5.3.2). Anschließend wurde am Beispiel des PBT-GF30 der Einfluss des Lastverhältnisses R untersucht (Kapitel 5.3.3). Dafür wurde mit drei unterschiedlichen Lastverhältnissen ($R = 0,01$ | $R = 0,2$ | $R = 0,5$) bis zum Erreichen des Bruchversagens geprüft. Der Einfluss der Faserorientierung bei glasfasergefüllten Werkstoffen wurde am Beispiel des PA6-GF30 eruiert (Kapitel 5.3.4).

In Tabelle 4.2 sind die untersuchten Werkstoff-Lastverhältnis-Kombinationen und die untersuchten weiteren Einflussgrößen zusammengestellt.

Tabelle 4.2: Übersicht der untersuchten Kombinationen aus Werkstoff, Lastverhältnis und ggf. weiterer Einflussgrößen

Werkstoff	Lastverhältnis R	Einflussgröße
POM	0,01	Probekörperdicke (4 mm)
POM	0,01	Probekörperdicke (2 mm)
PBT	0,01	–
PBT-GF30	0,01 0,2 0,5	Lastverhältnis
PA6-GF30	0,01	Faserorientierung (Probekörperentnahme in bzw. senkrecht zur Fließrichtung)
PP-GF30	0,01	Faserorientierung (Probekörperentnahme in Fließrichtung)

4.3 Einstufenversuche

Für die Umsetzung des Phybal-Ansatzes sind lediglich zwei Einstufenversuche (ESV) pro Werkstoff-Lastverhältnis-Kombination notwendig. Im Gegensatz zu den LSV handelt es sich hierbei um konventionelle Dauerschwingversuche mit konstanter Spannungsamplitude. Die anderen Prüfbedingungen (Lastverhältnis und Prüffrequenz) wurden analog zu den LSV gewählt. Während der Versuch an der oberen Lastgrenze grundsätzlich bis zum Bruchversagen durchgeführt werden muss, da dieser im Phybal-Ansatz den Referenzpunkt für die Berechnung der Zeitfestigkeitsgeraden liefert, kann der ESV an der unteren Lastgrenze abgebrochen werden, sobald die Einschwingphase abgeschlossen ist und die für die Auswertung festgelegte Lastspielzahl N_x erreicht wurde (vgl. Kapitel 2.3.4). Im Rahmen der Forschungsarbeiten wurden alle ESV bis zum Versagen durchgeführt, um u. a. die Aussage der Phybal-Auswertung validieren zu können. Dazu wurden die Spannungsniveaus so ausgewählt, dass sie zu Bruchzeiten im Bereich von bis zu 10^6 Lastspielen führen (vgl. Kapitel 4.6).¹

Da sich in ersten ESV an PBT-GF30 wie bei den LSV an POM eine starke Eigenerwärmung zeigte (vgl. Anhang Kapitel 8.2.2), wurden prüftechnisch für die ESV dieselben Gegenmaßnahmen wie bei den LSV getroffen, d. h. derselbe Prüfaufbau verwendet (vgl. Anhang Kapitel 8.1) und dieselben Messgrößen erfasst. Dies entspricht der Erfassung aller mit dem verwendeten Prüfaufbau zugänglichen Messgrößen. Notwendig war dies, weil im Vorfeld der Auswertung nicht abzusehen war, welche Messgrößen sich als geeignet für die Bestimmung der Zeitfestigkeitsgeraden herausstellen. Die Ergebnisse der ESV sind in Kapitel 5.4 dargestellt, wobei dieselben Einflussparameter (Probekörpertiefe, Lastverhältnis und Faserorientierung) wie zuvor bei den LSV systematisch betrachtet wurden.

¹ Da ein ESV des PP-GF30-Material diese maximale Zielbruchlastspielzahl deutlich überschritt, wurde dieser eine ESV mit dem Erreichen von ca. $2 \cdot 10^6$ Lastspielen abgebrochen – er ist in den Ergebnissen als Durchläufer gekennzeichnet.

4.4 Entwicklung von Auswertalgorithmen

Algorithmen bzw. eine Vorgehensweise zur automatisierten, benutzerunabhängigen Auswertung der LSV und ESV bis zur Berechnung wurde entwickelt. Die Implementierung der Routinen erfolgte mit dem Softwarepaket der Fa. OriginLab Corporation, Northampton (MA, USA), zuletzt in der Version OriginPro 2023.

Erstes Ziel der Auswertalgorithmen war eine Aufbereitung und übersichtliche Darstellung der erhaltenen Messdaten und eine nachvollziehbare Visualisierung der einzelnen Arbeitsschritte. Dazu wurde jeweils ein Importfilter zum Einlesen der LSV- und ESV-Daten erstellt, die von der verwendeten Schwingprüfmaschine als Textdatei (Comma-separated values, CSV) ausgegeben werden.² Mit den erstellten Origin-Vorlagen können nach erfolgreichem Datenimport teilautomatisiert die in Kapitel 5.3 bis 5.5 gezeigten Grafiken erstellt werden. Zur Anpassung der Daten wurden Fit-Funktionen implementiert, welche die Datenpunkte durch Morrow-Gleichungen approximieren und die Koeffizienten mit Angabe des jeweiligen Bestimmtheitsmaßes ausgeben. Die Umsetzung erfolgte für verschiedene Messgrößen. Eine detaillierte Betrachtung für die Dehnungsamplitude, die dissipierte Energie und die Temperaturänderung wird in Kapitel 5.4 ausführlich diskutiert. Die Implementierung des Phybal-Ansatzes beinhaltet auch eine Ausgabe der berechneten Zeitfestigkeitsgeraden bzw. der Parameter der Basquin-Gleichung. Diese wurde zur Anpassung der Daten aus den ESV (vgl. Kapitel 4.3 und 4.6) ebenfalls als Fit-Funktion implementiert. Die Durchführung von schwer automatisierbaren Schritten wurde jeweils in Kurzanleitungen festgehalten. Mit der Kombination der Origin-Vorlagen, Importfilter, Fit-Funktionen und Kurzanleitungen liegt ein vollständiger Algorithmus vor, welcher die Anwendung des Phybal-Ansatzes für Kunststoffe abbildet. Die Inhalte wurden im Zuge der Forschungsarbeiten fortlaufend verfeinert und optimiert.

² Die Formatierung der Messdatenausgabe ist von Maschinenhersteller zu Maschinenhersteller sehr unterschiedlich und hängt auch von der verwendeten Messsoftware ab. Folglich ist jeweils eine individuell an das Prüfsetup angepasste Schnittstelle bzw. ein geeigneter Importfilter notwendig.

4.5 Beschleunigte Bestimmung von Zeitfestigkeitsgeraden

Die entwickelten Routinen (Kapitel 4.4) ermöglichten die Ermittlung von Zeitfestigkeitsgeraden für alle untersuchten Kombinationen aus Werkstoff und Lastverhältnis (vgl. Tabelle 4.2). Dafür wurden aus den experimentell ermittelten LSV- und ESV-Ergebnissen (aus Kapitel 4.2 und 4.3) Zeitfestigkeitsgeraden rechnerisch mithilfe des Phybal-Ansatzes ermittelt. Dabei wurden verschiedene physikalische Größen herangezogen. Es erfolgte jeweils eine Beschreibung durch Basquin-Gleichungen. Dabei wurde auch die Gültigkeit der Phybal-Beziehung überprüft und auf Basis der erzielten Ergebnisse angepasst (vgl. Kapitel 5.4).

Unter allen in LSV und ESV erfassten Messgrößen sowie den daraus abgeleiteten Größen, wurden für die Auswertung insbesondere die Dehnungsamplitude, die dissipierte Energiedichte und die Temperaturänderung berücksichtigt und hinsichtlich ihrer Eignung für den Phybal-Ansatz bewertet (vgl. Kapitel 5.3 und 5.4). Diese Auswahl sowie eine Betrachtung der Messwertverläufe erlaubte eine Beurteilung (vgl. Kapitel 5.5 und 6), welche Messgrößen für die physikalisch basierte Lebensdauerberechnung an Thermoplasten geeignet sind und bis zu welcher Lastspielzahl die ESV an der unteren Spannungsgrenze durchgeführt werden müssen. Dabei gilt: Je geringer die Lastspielzahl, desto größer ist die Zeitersparnis.

4.6 Konventionelle Ermittlung der Zeitfestigkeitsgeraden

Es wurden für alle gewählten Kombinationen aus Werkstoff und Lastverhältnis (vgl. Tabelle 4.2) Zeitfestigkeitsgeraden mittels Wöhler-Versuchen experimentell ermittelt. Dies entspricht pro Wöhler-Linie der Durchführung von ca. zehn ESV bis zum Bruchversagen mit Lastniveaus unterhalb der Kurzzeitfestigkeit.³ Die Prüfungen erfolgten bis zu einer maximalen Lastspielzahl von ca. 10^6 , sodass der Zeitfestigkeitsbereich weitgehend abgedeckt wurde (vgl. Kapitel 4.3). Die Ergebnisse sind in Kapitel 5.4 dargestellt. Um die Vergleichbarkeit der Untersuchungen zu gewährleisten, wurden für die Untersuchungen derselbe Prüfaufbau (vgl. Kapitel 8.1) wie für die LSV (Kapitel 4.2) und ESV (Kapitel 4.3) verwendet und dieselben Messgrößen erfasst.

³ In der industriellen Praxis ist es üblich, relativ wenige Belastungsniveaus in Mehrfachbestimmung zu prüfen. An dieser Stelle wurden zugunsten relativ vieler Belastungsniveaus Einfachbestimmungen durchgeführt.

4.7 Vergleich der Methoden und Validierung

Im Rahmen eines Methodenvergleichs wurden die auf Basis des Phybal-Ansatzes beschleunigt ermittelten Zeitfestigkeitsgeraden mit den konventionell ermittelten Zeitfestigkeitsgeraden aus Wöhler-Versuchen (Wöhler-Linien) abgeglichen. Dabei wurde die Ergebnisqualität in Abhängigkeit der genutzten Mess- und Berechnungsparameter bewertet. Darauf aufbauend wurde insbesondere die Eignung der jeweiligen Messgrößen für die Umsetzung des Phybal-Ansatzes für thermoplastische Kunststoffe analysiert. Die Analyse umfasste auch die Festlegung einer geeigneten Lastspielzahl N_x zur Auswertung der ESV. Aus den zum Prüf- und Berechnungsverfahren gewonnenen Erkenntnissen wurden die erzielbaren Zeit- und Kosteneinsparungen des Phybal-Ansatzes abgeleitet. Die grundsätzliche Eignung des Phybal-Ansatzes sowie die Möglichkeiten zur Verallgemeinerung wurden durch Betrachtung der verschiedenen thermoplastischen Kunststoffe und Variation der Einflussgrößen Probekörperdicke, Lastverhältnis und Faserorientierung bewertet. Die Ergebnisse sind in Kapitel 5.5 dargestellt.

5 Darstellung und Diskussion der Ergebnisse

5.1 Faserorientierung und -verteilung

5.1.1 Spritzgegossene Probekörper (PBT-GF30)

In Abbildung 5.2 sind Ergebnisse der Computer-Tomographie für die spritzgegossenen 4 mm dicken DIN EN ISO 527-2 Typ 1A Probekörper am Beispiel des PBT-GF30 dargestellt: Der Probekörper wurde einseitig angebunden und gefüllt (vgl. Abbildung 5.1). Die in Abbildung 5.2 dargestellte Querschnittsfläche wurde im Bereich der Messlänge des Zugprobekörpers aufgenommen und ausgewertet.

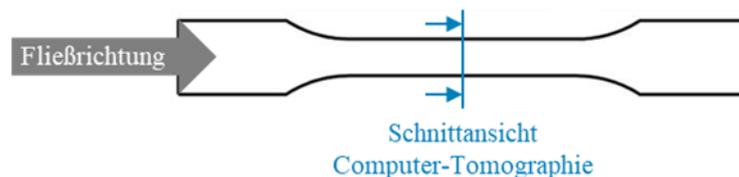


Abbildung 5.1: Füllung des DIN EN ISO 527-2 Typ 1A Probekörpers und Orientierung der Schnittansicht für die Computer-Tomographie

In Abbildung 5.2 links ist die Verteilung der Fasern in der Ebene des Prüfquerschnittes zu sehen, wobei die Farbe der Faserorientierung im Volumen entspricht. Die Farbzuordnung ist identisch mit dem Histogramm (Abbildung 5.2 rechts). Demnach repräsentieren rote Flächen in Fließrichtung ausgerichtete Fasern (0° -Orientierung) und cyane Flächen senkrecht zur Fließrichtung ausgerichtete Fasern (90° -Orientierung). Die Peakhöhe im Histogramm rechts indiziert den Anteil der jeweiligen Ausrichtung. So sind die Fasern im untersuchten Prüfquerschnitt der spritzgegossenen Probekörper des Typs 1A überwiegend in Fließrichtung ausgerichtet. Sie liegen somit in Beanspruchungsrichtung bei Zugbelastung. Die Fasern in der Mitte sind senkrecht zur Fließrichtung ausgerichtet. Die Faserorientierungen entsprechen den Erwartungen an derart gefüllte Spritzgussteile.

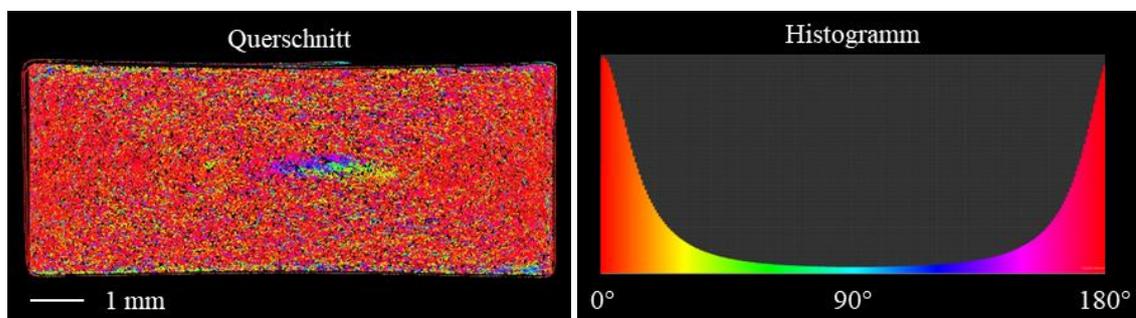


Abbildung 5.2: Computer-Tomographie zur Ermittlung der Verteilung der Faserorientierung eines spritzgegossenen DIN EN ISO 527-2 Typ 1A Probekörpers aus PBT-GF30: Querschnitt (links) und Histogramm (rechts)⁴

⁴ Die feine Linie im Randbereich des Querschnittsbildes ist einem Klebefilm, der zur Markierung der Messposition aufgebracht wurde.

5.1.2 Aus spritzgegossenen Platten entnommene Probekörper (PA6-GF30)

In Abbildung 5.3 und Abbildung 5.4 sind, analog zur Darstellung in Kapitel 5.1.1, die Ergebnisse der Computer-Tomographie für die aus spritzgegossenen Platten entnommenen 2 mm dicken DIN EN ISO 527-2 Typ 1B Probekörper am Beispiel des PA6-GF30 dargestellt: Durch die Entnahme aus Platten ist die Struktur am linken und rechten Rand offen (entspricht den Schnittkanten). Erwartungsgemäß dominiert bei dem in Fließrichtung entnommenem Probekörper (Probekörperposition A 0° in Abbildung 4.1) die 0°-Orientierung der Glasfasern (Abbildung 5.3).

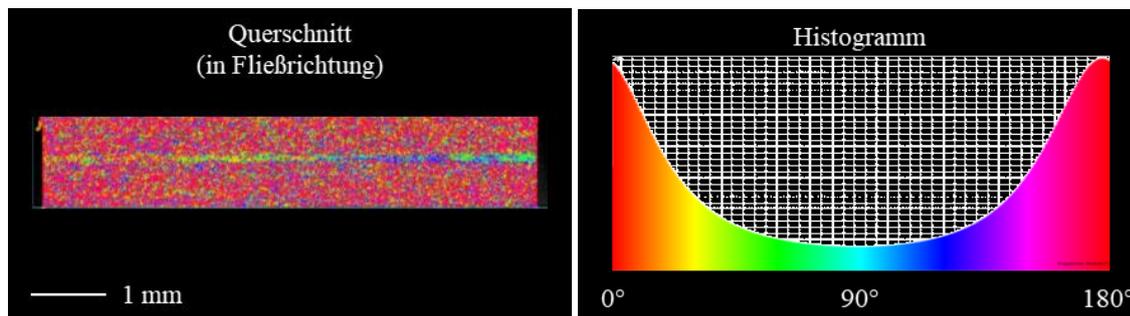


Abbildung 5.3: Computer-Tomographie zur Ermittlung der Verteilung der Faserorientierung eines aus spritzgegossenen Platten in Fließrichtung entnommenen DIN EN ISO 527-2 Typ 1B Probekörpers aus PA6-GF30: Querschnitt (links) und Histogramm (rechts)

Der senkrecht zur Fließrichtung entnommene Probekörper (Probekörperposition A 90° in Abbildung 4.1) weist erwartungsgemäß ein lokales Orientierungsmaximum der Glasfasern für die 90°-Orientierung auf, jedoch auch für die 0°-Orientierung der Glasfasern (Abbildung 5.4). Somit liegen die Fasern in der untersuchten Messlänge der aus spritzgegossenen Platten entnommenen Typ 1B Probekörper sowohl in als auch senkrecht zur Beanspruchungsrichtung bei Zugbelastung vor.

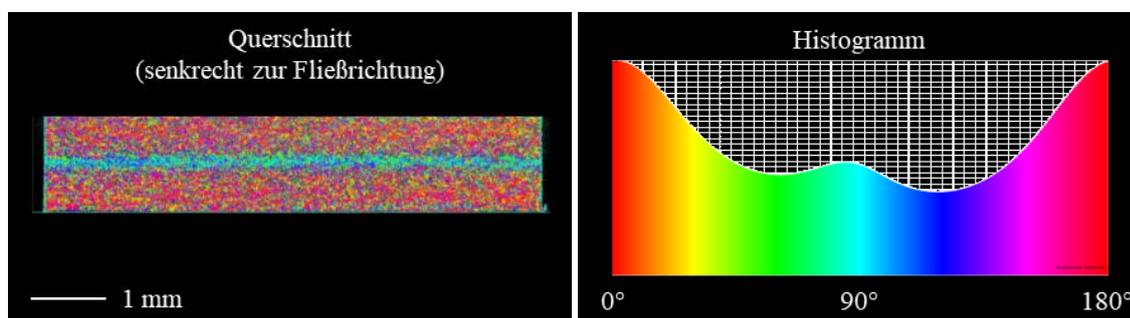


Abbildung 5.4: Computer-Tomographie zur Ermittlung der Verteilung der Faserorientierung eines aus spritzgegossenen Platten senkrecht zur Fließrichtung entnommenen DIN EN ISO 527-2 Typ 1B Probekörpers aus PA6-GF30: Querschnitt (links) und Histogramm (rechts)

Das Histogramm (Abbildung 5.4) des senkrecht zur Fließrichtung entnommenen Probekörpers entspricht nicht einfach einem um 90° verschobenen Histogramm des in Fließrichtung entnommenen Probekörpers (Abbildung 5.3). Dies liegt an den unterschiedlichen Entnahmepositionen der untersuchten Probekörper (und damit der mittels Computer-Tomographie charakterisierten Querschnittsflächen) auf der spritzgegossenen Platte (vgl. Abbildung 4.1). Die Entnahmeposition des senkrecht zur Fließrichtung entnommenen Probekörpers ist eher am Fließwegende. Daraus resultiert eine weniger starke Orientierung der Schmelze und infolgedessen eine isotropere Verteilung der Fasern. Da die PA6-GF30 Probekörper aus identisch hergestellten Spritzgussplatten desselben Materials entnommen wurden, kann der Einfluss der Faserorientierung auf das Werkstoffverhalten abgeschätzt werden. Weil sich die Faserorientierungsverteilung(en) der PA6-GF30 Probekörper deutlich von jener der direkt spritzgegossenen Typ 1A Probekörper (PBT-GF30, Kapitel 5.1.1) unterscheidet sowie aufgrund der werkstofflichen Unterschiede, sollte kein Vergleich des Einflusses der Faserorientierung zwischen den beiden Werkstoffen vorgenommen werden.

5.2 Mechanisches Kurzzeitverhalten unter Zugbeanspruchung

Die Materialauswahl verfolgte das Ziel sowohl spröde als auch duktile Werkstoffe abzudecken. In Abbildung 5.5 bis Abbildung 5.8 sind die Spannungs-Dehnungs-Kurven der gewählten Werkstoffe dargestellt. Unterschiedlich farbige Spannungs-Dehnungs-Kurven in Abbildung 5.5 rechts (POM) bzw. Abbildung 5.6 links (PBT) gehören zu Probekörpern aus unterschiedlichen Werkzeugkavitäten. Unterschiedliche Entnahmeposition im Fall der PP-GF30 Probekörper (Abbildung 5.8 – vgl. auch Kapitel 4.1) sind in gleicher Weise dargestellt.

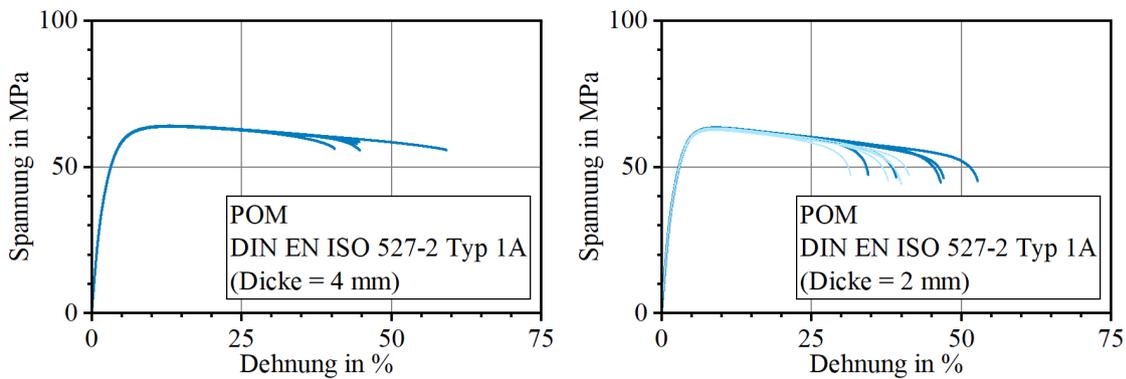


Abbildung 5.5: Spannungs-Dehnungs-Verhalten des POM zur Untersuchung des Einflusses der Wanddicke in Kurzzeitzugversuchen

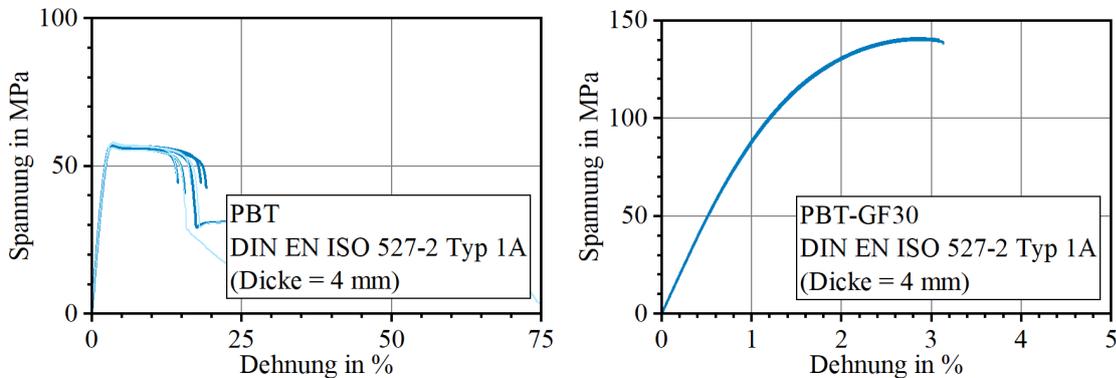


Abbildung 5.6: Spannungs-Dehnungs-Verhalten von PBT und PBT-GF30 zur Untersuchung des Einflusses von Glasfasern in Kurzzeitzugversuchen

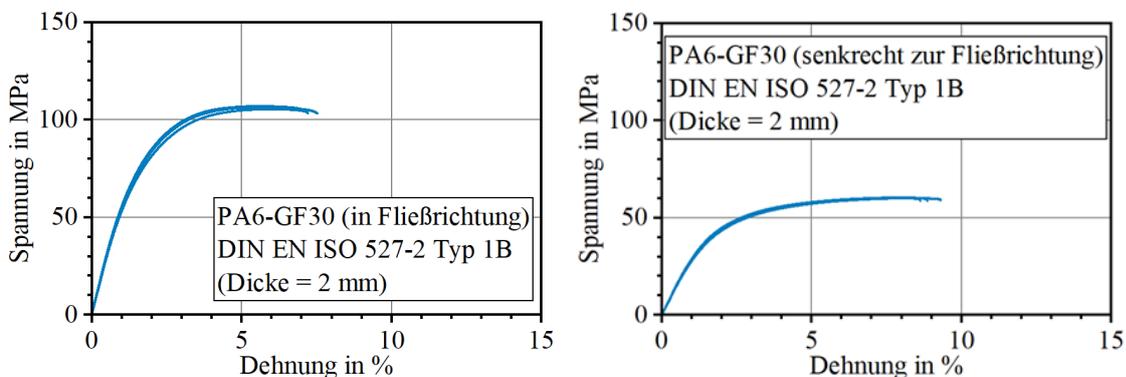


Abbildung 5.7: Spannungs-Dehnungs-Verhalten von PA6-GF30 zur Untersuchung des Einflusses der Orientierung der Glasfasern in Kurzzeitzugversuchen

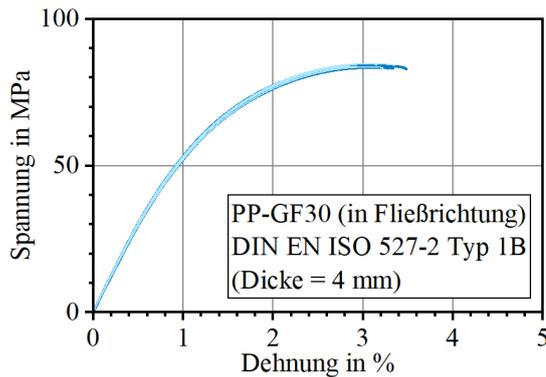


Abbildung 5.8: Spannungs-Dehnungs-Verhalten von PP-GF30 in Kurzzeitzugversuchen

Erwartungsgemäß zeigen die ungefüllten Werkstoffe (PBT und POM) mit Bruchdehnungen im zweistelligen Prozentbereich und ausgeprägter Streckgrenze ein duktileres Verhalten als die glasfasergefüllten Werkstoffe (PBT-GF30, PA6-GF30 und PP-GF30), die bei geringen Dehnungen im Bereich der Maximalspannung versagen. Der für die 2 mm dicken Probekörper aus POM sowie die 4 mm dicken Probekörper aus PBT durchgeführte Vergleich zeigt kaum kavitätsbedingte Unterschiede. Dasselbe gilt für den Einfluss der Entnahmeposition im Fall der PP-GF30 Probekörper. In allen Fällen zeigt sich im Kurzzeitzugverhalten eine gute qualitative und quantitative Übereinstimmung.

Aus den Spannungs-Dehnungs-Kurven wurde die Kurzzeitzugfestigkeit ermittelt. Dazu wurde die Streck- bzw. Maximalspannung herangezogen. Der Mittelwert und die Standardabweichung sowie der Wert aus dem Datenblatt der Hersteller (für 4 mm dicke Probekörper, sofern vorhanden) sind in Tabelle 5.1 aufgelistet. Es zeigt sich eine gute Übereinstimmung der gemessenen Werte mit den Herstellerangaben. Wie die maximal erreichten Spannungen mit Werten zwischen ca. 57 MPa und 141 MPa zeigen, wurde das gewünschte breite Festigkeitsspektrum realisiert.

Tabelle 5.1: Kurzzeitzugfestigkeit der gewählten Werkstoffe in Normklima (23 °C und 50 % r. F.)

Werkstoff	DIN EN ISO 527-2 Probekörpergeometrie (Probekörperdicke)	Kurzzeitzugfestigkeit in MPa gemessen (Datenblatt)
POM	Typ 1A (4 mm)	63,9 ± 0,1 (62)
POM	Typ 1A (2 mm)	63,3 ± 0,2 62,9 ± 0,4 (64)
PBT	Typ 1A (4 mm)	57,2 ± 0,5 57,4 ± 0,7 (60)
PBT-GF30	Typ 1A (4 mm)	140,7 ± 0,3 (140)
PA6-GF30	Typ 1B (2 mm) 0° Typ 1B (2 mm) 90°	106,2 ± 0,8 - 60,0 ± 0,2 -
PP-GF30	Typ 1B (4 mm) 0°	84,0 ± 0,4 84,1 ± 0,5 -

(0° = in Fließrichtung, 90° = senkrecht zur Fließrichtung)

5.3 Laststeigerungsversuche

5.3.1 Entwicklung einer Vorgehensweise zur Ermittlung des Beginns der irreversiblen Schädigung (untere Grenzspannung σ_1)

Die entwickelte Vorgehensweise zur Ermittlung des Beginns der irreversiblen Schädigung (Grenze σ_1) wird nachfolgend am Beispiel eines LSV für das gewählte PBT-GF30-Material erläutert. In Abbildung 5.9 ist exemplarisch für die Beanspruchungsvorgabe der gemessene Verlauf der maximalen Spannung über den absolvierten Lastspielen, d. h. den Gesamtzyklen, aufgetragen. Die aus der Beanspruchung resultierende, messtechnisch erfasste Materialantwort ist im Hinblick auf die Dehnungsamplitude, die Oberflächentemperatur des Probekörpers (kurz „Temperatur“) und die berechnete dissipierte Energiedichte jeweils über den Gesamtzyklen aufgetragen. Anfänglich verläuft die Materialantwort näherungsweise linear entsprechend der linear zunehmenden Beanspruchung. Dieser lineare Verlauf geht sukzessive in einen Anstieg über, dessen Steigung kurz vor dem Bruchversagen Richtung unendlich geht.

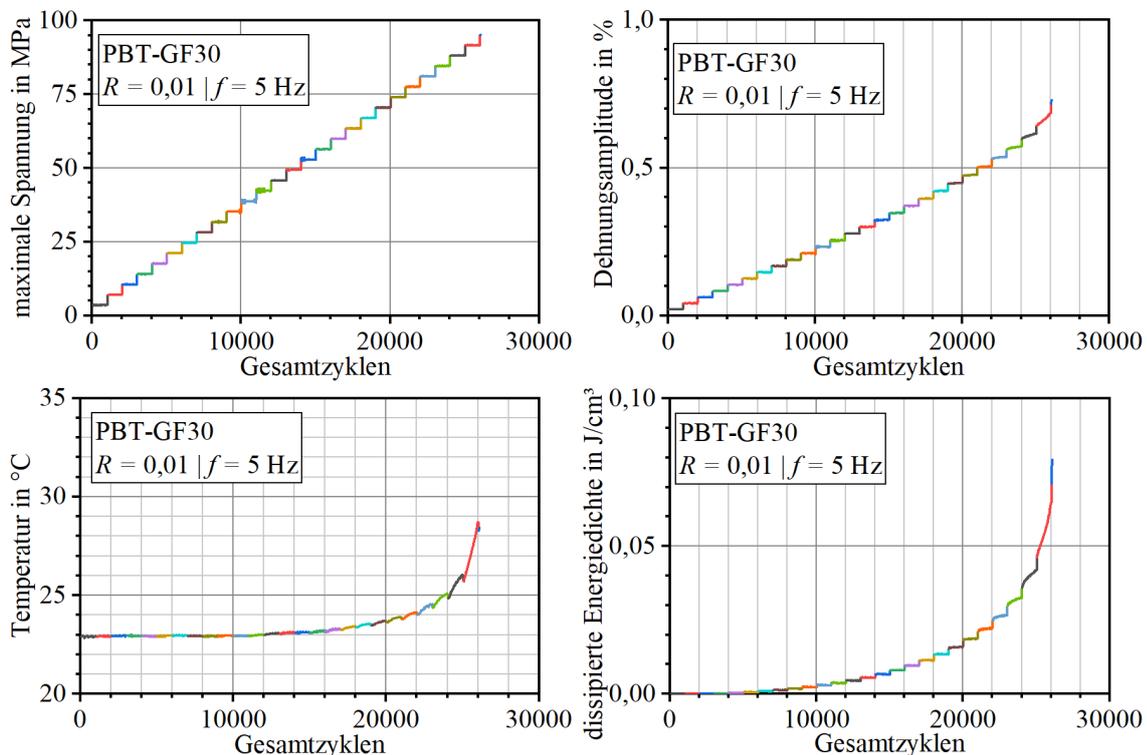


Abbildung 5.9: Materialverhalten von PBT-GF30 im LSV

Entsprechend der in Kapitel 2.3.4 beschriebenen Vorgehensweise zur Umsetzung des Phyal-Ansatzes wurde die Dehnungsamplitude zur Bestimmung des Übergangs in den nichtlinearen Anstieg herangezogen. Dabei wurden zunächst der Median der Dehnungsamplitude und der Median der maximalen Spannung für jede Belastungsstufe berechnet. Um eine Verfälschung der Ergebnisse durch das technisch bedingte Aufblenden der Belastung zu Beginn einer Stufe zu vermeiden, wurde die Auswertung für jede Stufe erst nach Erreichen stabiler Bedingungen (jeweils ab dem 40. Zyklus) vorgenommen. Für die Auswertung wurden die derart bestimmten Werte der Dehnungsamplitude über der zugehörigen maximalen Spannung aufgetragen (vgl. Abbildung 5.10 links). Jeder Punkt entspricht somit einer Belastungsstufe. Anschließend wurden lineare Anpassung durchgeführt, das zugehörige Bestimmtheitsmaß R-Quadrat (engl. coefficient of determination, COD) ermittelt und über der jeweiligen Belastungsstufe (kurz „Stufe“) aufgetragen (vgl. Abbildung 5.10 rechts). Grundsätzlich gilt, dass die Anpassung umso besser ist, je näher R-Quadrat am Wert 1 liegt. Um minimale Unterschiede in der Nähe dieses Optimums auflösen zu können, wurde oberhalb von $R\text{-Quadrat} = 0,9980$ eine feinere Achsenkalibrierung verwendet. Die Trennung der unterschiedlichen Achsenkalibrierungen wird durch die schwarze Linie in den rechten Grafiken in Abbildung 5.10 visualisiert. Bei den linearen Anpassungen wurde sukzessive die Anzahl der betrachteten Stufen erhöht. Demnach wurde die lineare Anpassung zunächst für zwei Stufen, dann für drei Stufen, anschließend für vier Stufen usw. durchgeführt, bis schließlich alle Stufen eingeschlossen wurden. In Abbildung 5.10 sind die Ergebnisse exemplarisch für die linearen Anpassungen über zwei, fünf, zehn, 20 sowie alle Stufen dargestellt. Die Anpassungsgerade ist jeweils in der Farbe der letzten eingeschlossenen Stufe eingezeichnet (Abbildung 5.10 links). Im betrachteten Beispiel ist zunächst ein Anstieg des R-Quadrat Wertes zu beobachten, ehe dieser nach Durchlaufen eines Maximalwertes wieder abnimmt. Die Abnahme nimmt dabei erwartungsgemäß mit steigender Stufenanzahl zu, da dies der zunehmenden Nichtlinearität der Materialantwort entspricht. Für die lineare Anpassung über 20 Stufen sowie insbesondere über alle Stufen (vgl. Abbildung 5.10 unten) ist die Abweichung der Messdaten von der Anpassungsgeraden deutlich erkennbar.

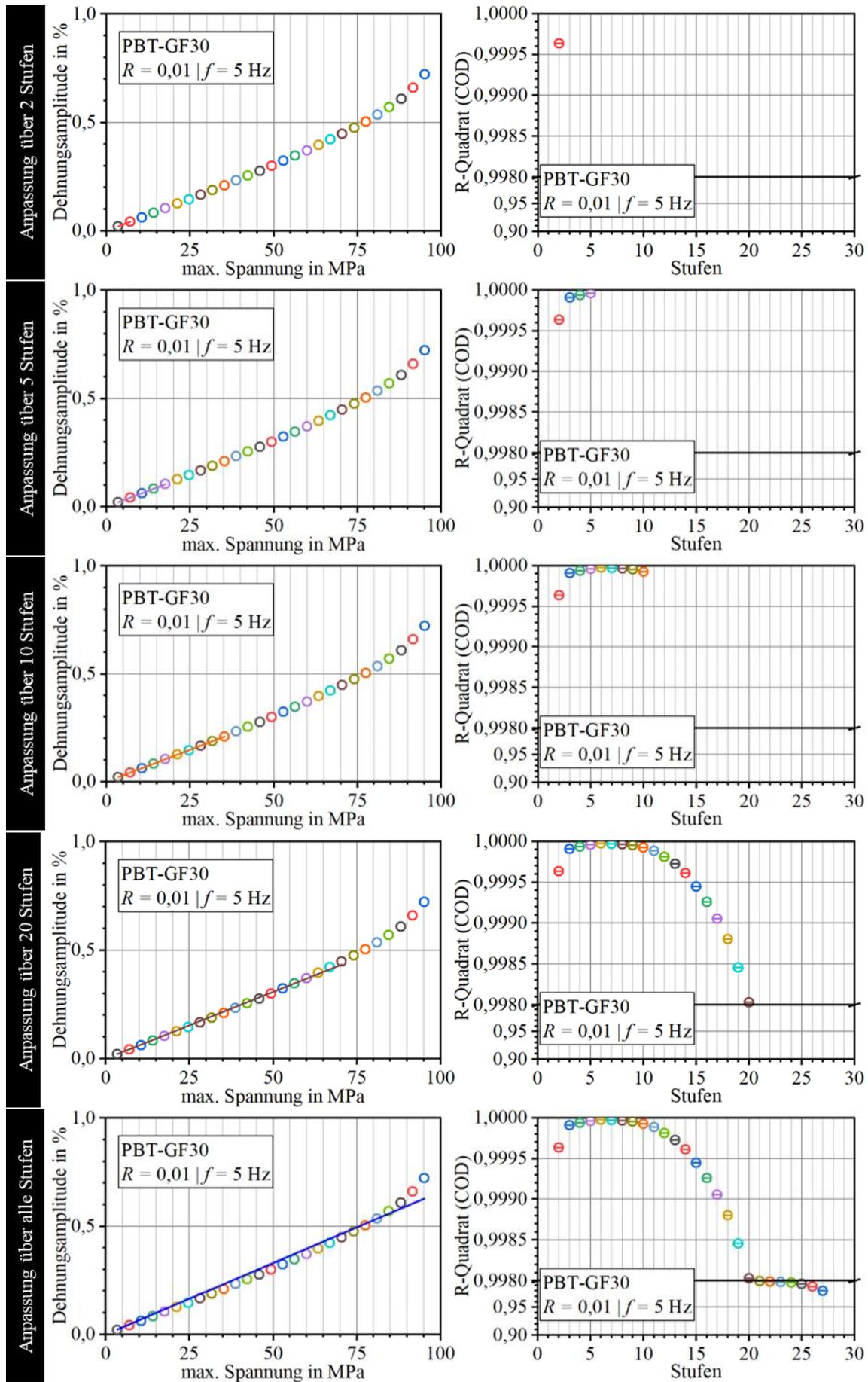


Abbildung 5.10: Auswertung eines LSV an PBT-GF30: Auftragung der Ergebnisse linearer Anpassungen abhängig von der Anzahl der betrachteten Belastungsstufen.

Die ermittelten R-Quadrat-Verläufe wurden zur Festlegung des Beginns der Nichtlinearität herangezogen. Abweichend von der Modellvorstellung liegen die experimentell ermittelten Werte der ersten Stufen nicht exakt bei einem Wert von 1, sodass das Idealkriterium „erster Wert R-Quadrat < 1“ nicht verwendet werden kann. Prinzipiell kommen zwei Alternativen in Betracht: das Maximum und ein zu definierender Schwellenwert. Beide Kriterien sind in Abbildung 5.11 oben dargestellt. Die Herausforderung in der Verwendung des Maximalwertes besteht darin, dass nicht in allen Fällen ein eindeutiges Maximum identifiziert werden kann (vgl. Kapitel 5.3.2 bis 5.3.4) und prüfungsbedingte Abweichungen, insbesondere in den ersten Stufen, einen sehr großen Einfluss erlangen. Daher wurde für die Forschungsarbeiten ein Schwellenwert verwendet und mit $R\text{-Quadrat} = 0,9990$ definiert. Dies kann als eine Wahrscheinlichkeit von 99,9 % dafür interpretiert werden, dass die Werte der bis dahin absolvierten Stufen auf einer Geraden liegen bzw. das Idealkriterium mit einer Messgenauigkeit von 0,1 % erfüllt ist. In Abbildung 5.11 unten sind die Ergebnisse der linearen Anpassungen für den mit dem Schwellenwert gewählten Anpassungsbereich für die Auftragung der Dehnungsamplitude über der maximalen Spannung (Median, links) und über den Gesamtzyklen (Messwertkurve, rechts) dargestellt – der Anpassungsbereich ist jeweils grau hinterlegt.

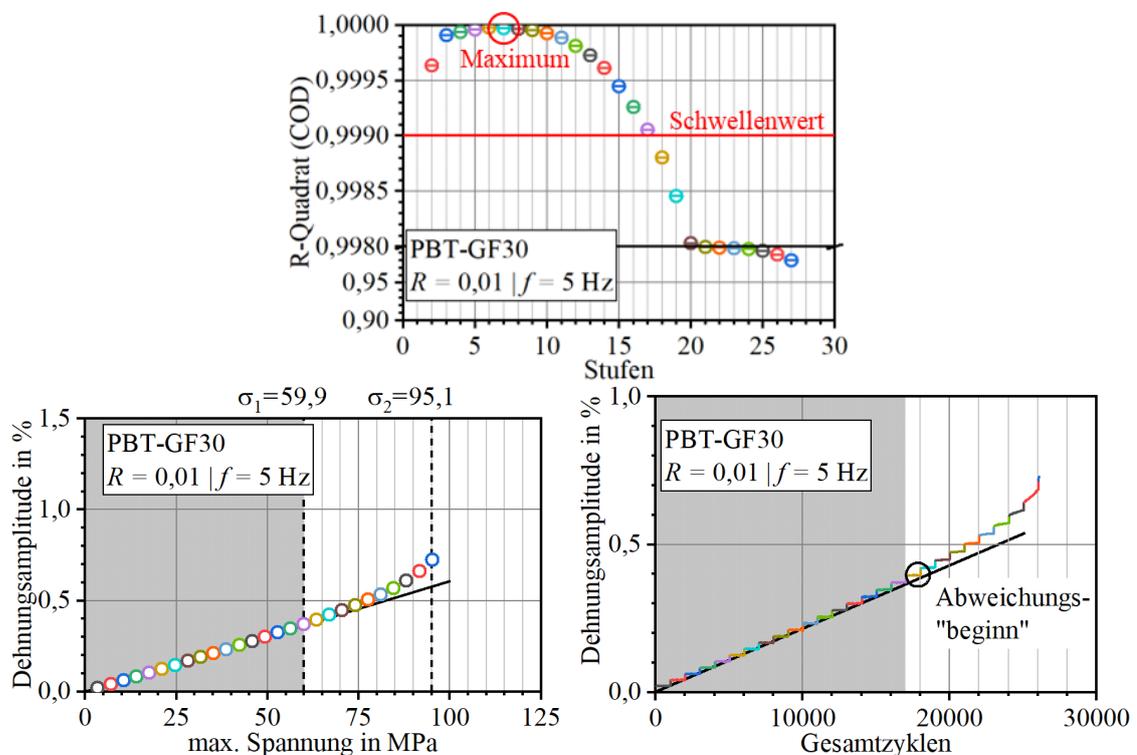


Abbildung 5.11: Auswertung eines LSV an PBT-GF30
 oben: Kriterien zur Definition des Beginns der Nichtlinearität
 unten: und lineare Anpassungen (schwarze Gerade) für den mittels Schwellenwert
 gewählten Anpassungsbereich (grau hinterlegt)

5.3.2 Einfluss der Probekörperdicke

In Abbildung 5.12 ist die messtechnisch erfasste Dehnungsamplitude über den Gesamtzyklen aller drei Prüfungen aufgetragen. Qualitativ zeigt sich das in Kapitel 5.3.1 beschriebene, für Kunststoffe typische Verhalten mit einer sehr guten Reproduzierbarkeit. Quantitativ sind die Unterschiede für die beiden untersuchten POM-Materialien, deren Probekörper sich in der Dicke unterscheiden, sehr ähnlich. Die Dehnungsamplitude fällt im Fall der 2 mm dicken Probekörper etwas größer aus als bei den 4 mm dicken Probekörpern. Dies kann, neben der Probekörperdicke, auch den unterschiedlichen POM-Materialtypen liegen. Zu beachten ist dabei jedoch, dass auch die Höhe der Belastungsstufen für die 2 mm dicken Probekörper etwas größer als bei den 4 mm dicken Probekörpern waren, da zu deren Bestimmung der im Datenblatt der Hersteller angegebene Wert herangezogen wurde (64 MPa vs. 62 MPa). Dementsprechend wäre selbst bei identischem Materialverhalten eine etwas größere Dehnungsamplitude pro Belastungsstufe zu erwarten. Zudem geht dies mit einer etwas größeren Gesamtbeanspruchung bei identischer Anzahl an Belastungszyklen für die 2 mm dicken Probekörper einher.

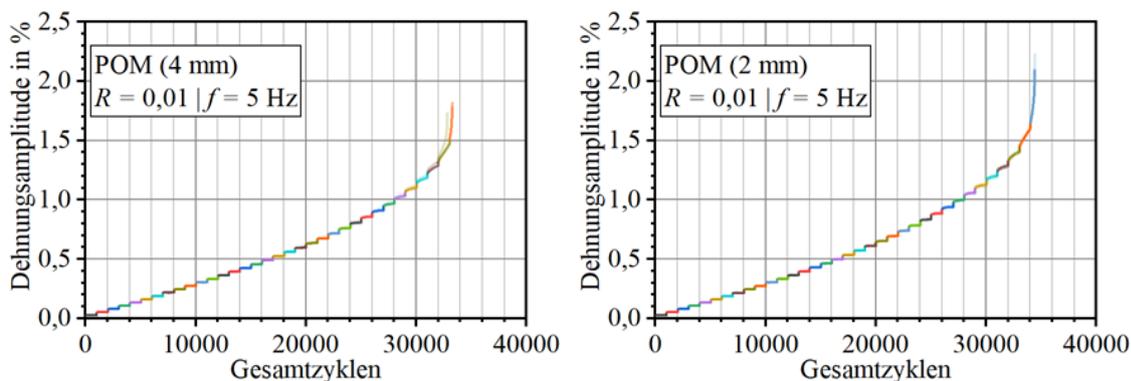


Abbildung 5.12: LSV-Ergebnisse für 4 mm und 2 mm dicke Probekörper aus POM
Auftragung der gemessenen Dehnungsamplitude über den Gesamtzyklen

Die in Abbildung 5.13 links dargestellten Verläufe des Bestimmtheitsmaßes R-Quadrat (COD) wurden mit der in Kapitel 5.3.1 beschriebenen Vorgehensweise ermittelt. Mit dem Schwellenwert von R-Quadrat = 0,9990 ergaben sich die Abbildung 5.13 rechts grau hinterlegten Anpassungsbereiche für den näherungsweise linearen Bereich (schwarze Anpassungsgerade), deren Grenze der Grenzspannung σ_1 entspricht. Diese wird für das POM-Material der 2 mm dicken Probekörper früher, d. h. nach 9 bzw. 10 Belastungsstufen, erreicht als für das POM-Material der 4 mm dicken Probekörper, wo die Grenze bei 13 Belastungsstufen liegt. Dies entspricht einer deutlich geringeren Grenzspannung σ_1 (14,9 MPa statt 20 MPa), die im POM-Materialtyp begründet sein könnte.

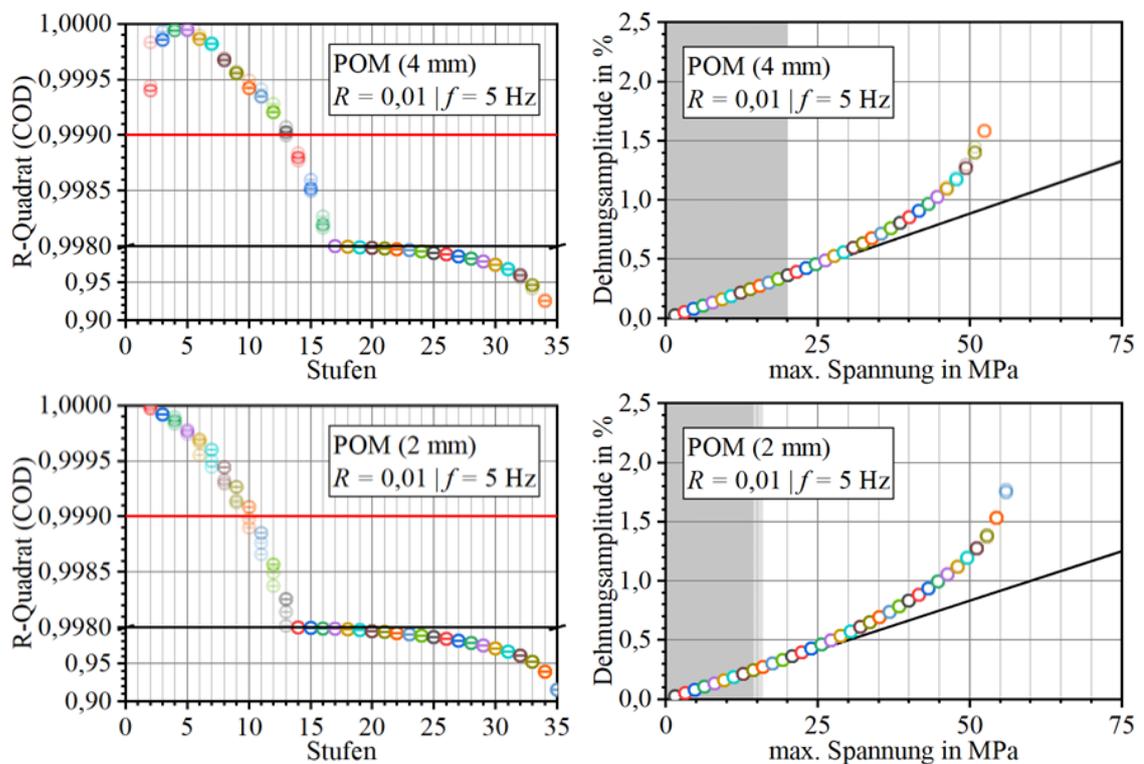


Abbildung 5.13: LSV-Ergebnisse für 4 mm und 2 mm dicke Probekörper aus POM
 links: Auftragung des R-Quadrat (COD) über den für die lineare Anpassung verwendeten Stufen mit Markierung des Schwellenwertes bei 0,9990 (rote Linie)
 rechts: Auftragung der Dehnungsamplitude über der maximalen Spannung mit linearen Anpassungen (schwarze Geraden) für den mittels Schwellenwert gewählten Anpassungsbereich (grau hinterlegt)

Darüber hinaus kommt eine dickenbedingt unterschiedliche Eigenerwärmung der Probekörper als Erklärung für unterschiedliches Verhalten in Betracht. Diese sollte im Fall der 2 mm dicken Probekörper grundsätzlich geringer ausfallen, da die Wärme in den 2 mm dicken Probekörpern schneller nach außen abgeführt werden kann und sich die Probekörper im Inneren daher nicht so stark erwärmen können wie die 4 mm dicken Probekörper. Die gemessenen Temperaturverläufe zeigen für die 2 mm dicken Probekörper, verglichen mit den 4 mm dicken Probekörper, einen nur minimal geringeren Temperaturanstieg oberhalb von ca. 20.000 Gesamtzyklen, der näherungsweise vernachlässigbar ist (vgl. Abbildung 5.14). Hinzu kommt, dass die Eigenerwärmung als Erklärung unterschiedlicher Grenzspannungen σ_1 größere Werte für die 2 mm dicken Probekörper implizieren würde – tatsächlich wurden jedoch kleinerer Werte ermittelt (vgl. Abbildung 5.13).

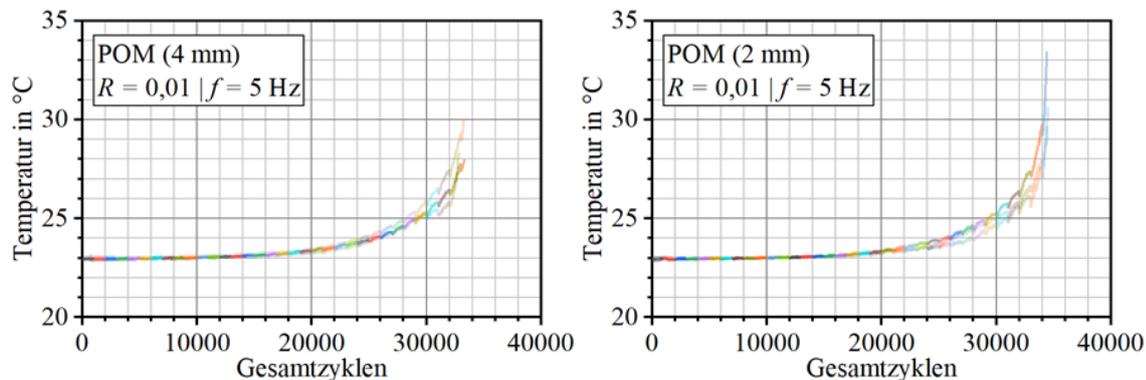


Abbildung 5.14: LSV-Ergebnisse für 4 mm und 2 mm dicke Probekörper aus POM
Auftragung der gemessenen Temperatur über den Gesamtzyklen

5.3.3 Einfluss des Lastverhältnisses

In Abbildung 5.15 ist die messtechnisch erfasste Dehnungsamplitude für den Werkstoff PBT über den Gesamtzyklen aller Mehrfachbestimmungen aufgetragen. Die gute Übereinstimmung der Kurven belegt, wie schon beim POM, die gute Reproduzierbarkeit der LSV. Obwohl die Höhe der Belastungsstufen des ungefüllten PBT-Materials (Abbildung 5.15 links) entsprechend der wesentlich geringeren Kurzzeitzugfestigkeit (57,3 MPa, vgl. Kapitel 5.2) deutlich kleiner gewählt wurde als für das glasfasergefüllte PBT-GF30-Material in Abbildung 5.15 rechts (140,7 MPa, vgl. Kapitel 5.2), fällt die Dehnungsantwort bei gleichem Lastverhältnis ($R = 0,01$) deutlich größer aus und das Versagen tritt bei einer späteren Belastungsstufe auf. Dies passt gut zu dem unter Kurzzeitzugbeanspruchung beobachteten deutlich duktileren Verhalten (vgl. Kapitel 5.2). Für das glasfasergefüllte PBT-GF30-Material wurde zusätzlich das Lastverhältnis R variiert. Dabei ist die je Belastungsstufe erreichte maximale Spannung (Oberspannung σ_o) identisch, die minimale Spannung (Unterspannung σ_u) und die mittlere Spannung (Mittelspannung σ_m) werden mit zunehmendem Lastverhältnis größer, sodass die Spannungsamplitude σ_a abnimmt (vgl. Abbildung 2.2 links). Dies führte erwartungsgemäß zu einer zunehmenden Anzahl der Beanspruchungszyklen bis zum Versagen der Probekörper für größere Lastverhältnisse bei gleichzeitig geringerer Zunahme der Dehnungsamplitude.

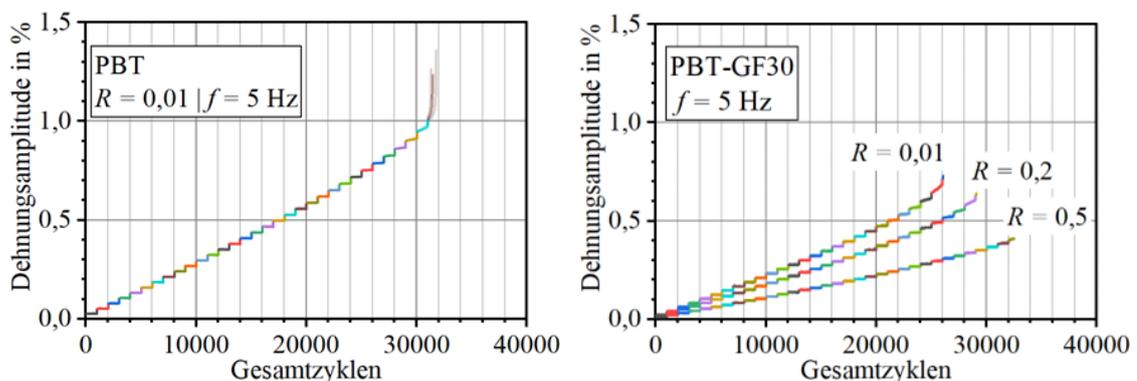


Abbildung 5.15: LSV-Ergebnisse für ungefülltes PBT (links) und glasfasergefülltes PBT-GF30 (rechts) Auftragung der gemessenen Dehnungsamplitude über den Gesamtzyklen

Die in Abbildung 5.16 links dargestellten Verläufe des Bestimmtheitsmaßes R-Quadrat (COD) wurden mit der in Kapitel 5.3.1 beschriebenen Vorgehensweise ermittelt. Mit dem Schwellenwert von R-Quadrat = 0,9990 ergaben sich die Abbildung 5.16 rechts grau hinterlegten Anpassungsbereiche für den näherungsweise linearen Verlauf (schwarze Anpassungsgerade), deren Grenze der Grenzspannung σ_1 entspricht. Die Grenzspannung $\sigma_1 = 27,6$ MPa des ungefüllten PBT-Material (Abbildung 5.16 oben) ist deutlich kleiner als jene des glasfasergefüllten PBT-GF30-Materials ($\sigma_1 = 59,9$ MPa), wobei die

Grenzspannung σ_1 mit zunehmendem Lastverhältnis R größer wird (vgl. Kapitel 5.3.5 Tabelle 5.2).

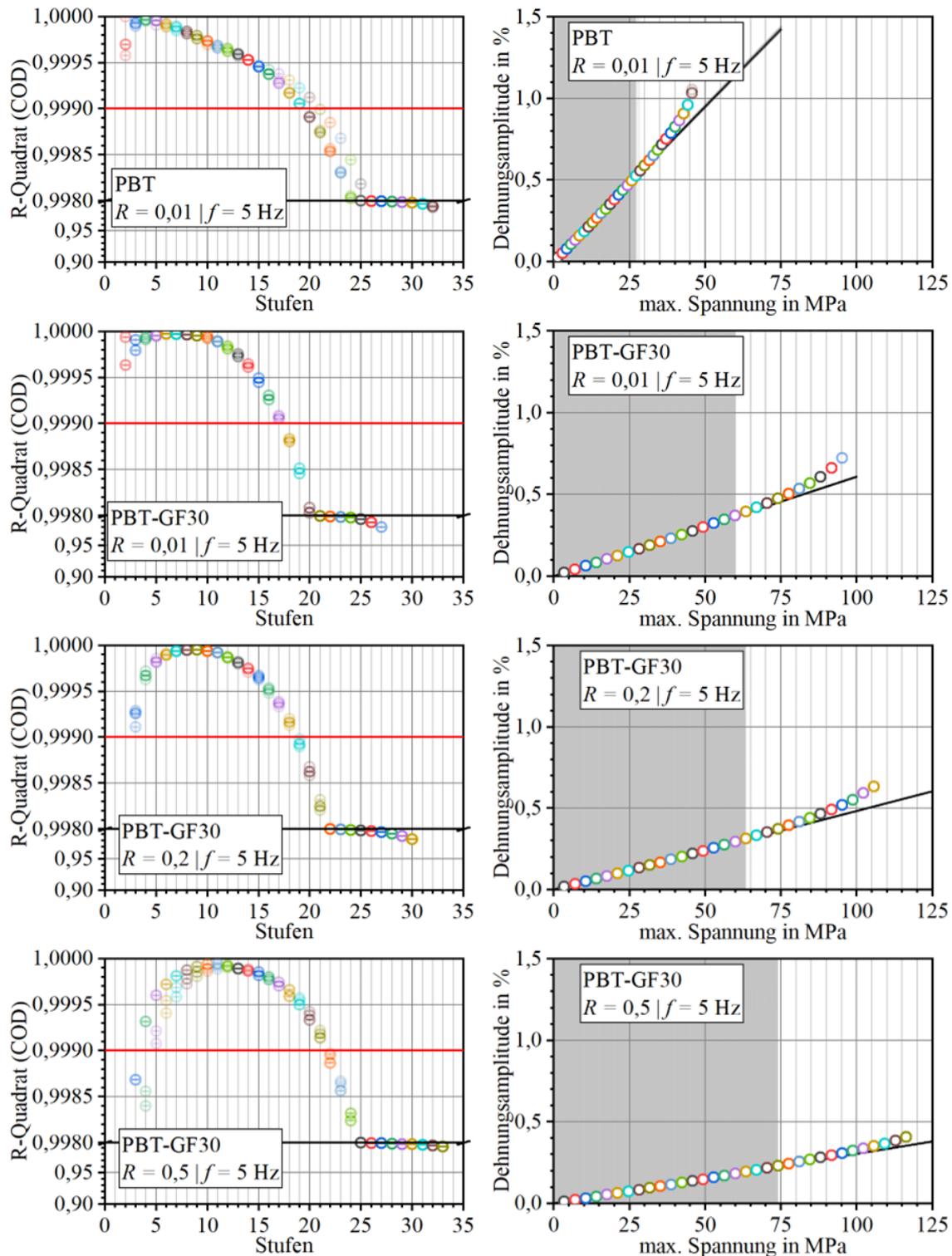


Abbildung 5.16: LSV-Ergebnisse für ungefülltes PBT (oben) und glasfasergefülltes PBT-GF30 (untere drei Auswertungen)

links: Auftragung des R-Quadrat (COD) über den für die lineare Anpassung verwendeten Stufen mit Markierung des Schwellenwertes bei 0,9990 (rote Linie)

rechts: Auftragung der Dehnungsamplitude über der maximalen Spannung mit linearer Anpassung (schwarze Gerade) für den mittels Schwellenwert gewählten Anpassungsbereich (grau hinterlegt)

5.3.4 Einfluss der Faserorientierung bei glasfasergefüllten Werkstoffen

In Abbildung 5.17 und Abbildung 5.18 ist die messtechnisch erfasste Dehnungsamplitude für die glasfasergefüllten Werkstoffe PA6-GF30 und PP-GF30 über den Gesamtzyklen aller Mehrfachbestimmungen aufgetragen. Erneut belegen die Kurvenverläufe die hohe Reproduzierbarkeit der LSV. Die Höhe der Belastungsstufen wurde für die aus spritzgegossenen Platten entnommenen Probekörper des PA6-GF30-Materials, entsprechend den Resultaten der Kurzzeitzugversuche (vgl. Kapitel 5.2), in Fließrichtung (0° -Orientierung) deutlich größer als für die senkrecht zur Fließrichtung (90° -Orientierung) gewählt. Die resultierenden Dehnungsamplituden liegen in einer ähnlichen Größenordnung – sie fallen in 90° -Orientierung etwas größer aus.

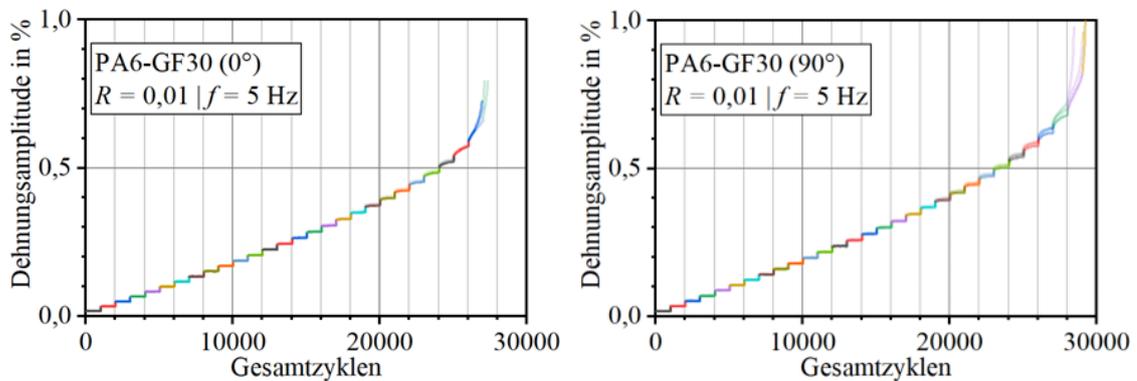


Abbildung 5.17: LSV-Ergebnisse für in und senkrecht zur Fließrichtung aus spritzgegossenen Platten entnommene Probekörper aus PA6-GF30
Auftragung der gemessenen Dehnungsamplitude über den Gesamtzyklen

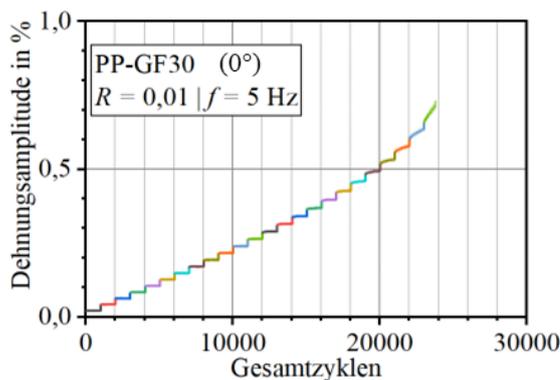


Abbildung 5.18: LSV-Ergebnisse für in Fließrichtung aus spritzgegossenen Platten entnommene Probekörper aus PP-GF30
Auftragung der gemessenen Dehnungsamplitude über den Gesamtzyklen

Die in Abbildung 5.19 links dargestellten Verläufe des Bestimmtheitsmaßes R-Quadrat (COD) wurden mit der in Kapitel 5.3.1 beschriebenen Vorgehensweise ermittelt. Mit dem Schwellenwert von R-Quadrat = 0,9990 ergaben sich die Abbildung 5.19 rechts grau hinterlegten Anpassungsbereiche für den näherungsweise linearen Verlauf (schwarze Anpassungsgerade), deren Grenze der Grenzspannung σ_1 entspricht. Entsprechend den Resultaten der Kurzzeitzugversuche (vgl. Kapitel 5.2) ist die Grenzspannung σ_1 der in Fließrichtung (0° -Orientierung) beanspruchten PA6-GF30-Probekörper deutlich größer als die der senkrecht zur Fließrichtung (90° -Orientierung). Das Verhältnis der ermittelten Grenzspannungen $\sigma_{1,0^\circ} / \sigma_{1,90^\circ}$ liegt mit einem Wert von 1,72 in derselben Größenordnung wie das Verhältnis der ermittelten Kurzzeitzugfestigkeiten $\sigma_0^\circ / \sigma_{90^\circ}$ mit einem Wert von 1,77.

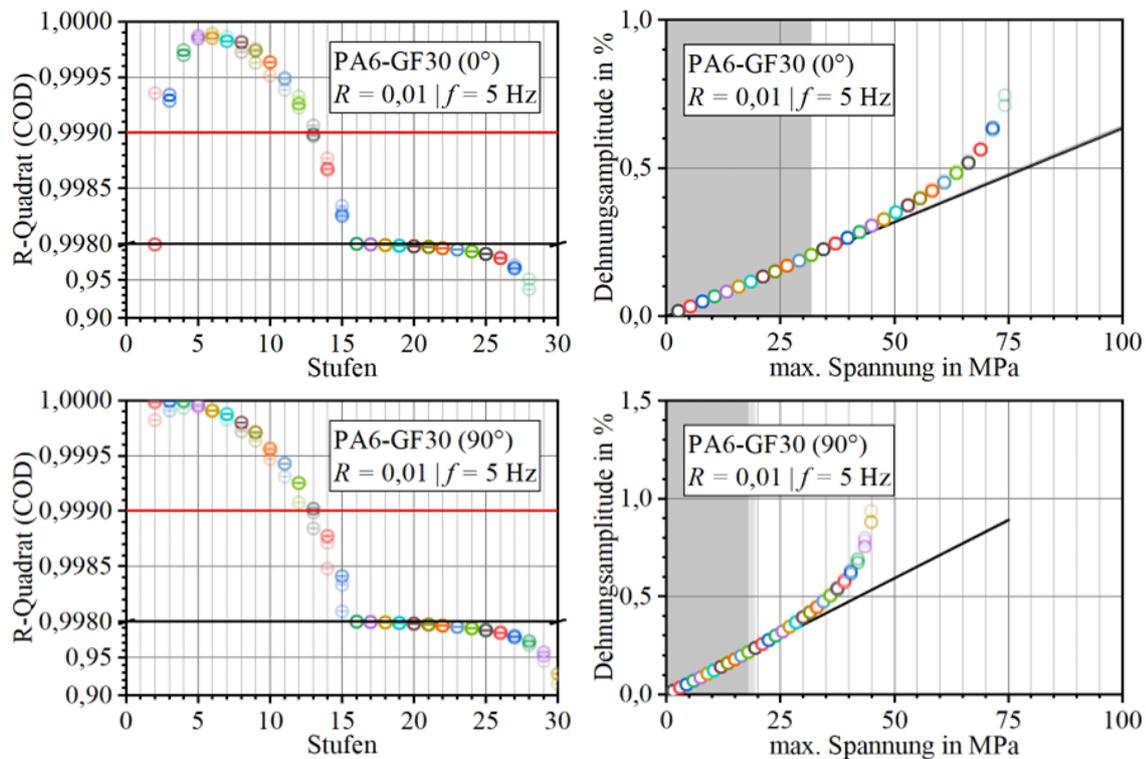


Abbildung 5.19: LSV-Ergebnisse für in und senkrecht zur Fließrichtung aus spritzgegossenen Platten entnommene Probekörper aus PA6-GF30
 links: Auftragung des R-Quadrat (COD) über den für die lineare Anpassung verwendeten Stufen mit Markierung des Schwellenwertes bei 0,9990 (rote Linie)
 rechts: Auftragung der Dehnungsamplitude über der maximalen Spannung mit linearen Anpassungen (schwarze Geraden) für den mittels Schwellenwert gewählten Anpassungsbereich (grau hinterlegt)

In Abbildung 5.20 sind die Resultate des nur in Fließrichtung (0° -Orientierung) untersuchten PP-GF30-Materials in gleicher Art und Weise wie zuvor in Abbildung 5.19 für PA6-GF30 dargestellt. Auch in für dieses Material konnte die in Kapitel 5.3.1 erläuterte Vorgehensweise zur Ermittlung der Grenzspannung σ_1 erfolgreich mit hoher Reproduzierbarkeit angewendet werden.

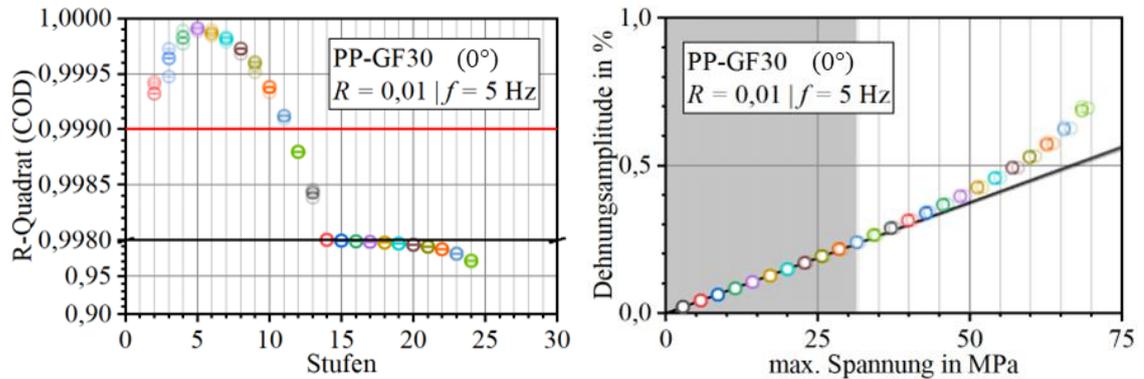


Abbildung 5.20: LSV-Ergebnisse für in Fließrichtung aus spritzgegossenen Platten entnommene Probekörper aus PP-GF30
 links: Auftragung des R-Quadrat (COD) über den für die lineare Anpassung verwendeten Stufen mit Markierung des Schwellenwertes bei 0,9990 (rote Linie)
 rechts: Auftragung der Dehnungsamplitude über der maximalen Spannung mit linearen Anpassungen (schwarze Geraden) für den mittels Schwellenwert gewählten Anpassungsbereich (grau hinterlegt)

5.3.5 Grenzen des Zeitfestigkeitsbereichs aus LSV

In Tabelle 5.2 sind die aus den LSV auf Basis der Dehnungsamplitude ermittelten Grenzspannungen σ_1 und σ_2 zusammengestellt. Hierbei sind jeweils die Mittelwerte und Standardabweichungen der Dreifachbestimmungen angegeben. Die Grenzspannung σ_1 grenzt den Zeitfestigkeitsbereich gegenüber dem Bereich der Langzeitfestigkeit ab (vgl. Kapitel 2.3.4). Die Ermittlung erfolgt unter Nutzung eines Schwellenwertes von $R\text{-Quadrat} = 0,9990$ (vgl. Kapitel 5.3.1 bis 5.3.4). Standardabweichungen von 0,0 MPa besagen, dass der Übergang zur Nichtlinearität in allen Versuchen der Dreifachbestimmung in derselben Laststufe beobachtet wurde. Die Grenzspannung σ_2 grenzt den Zeitfestigkeitsbereich gegenüber dem Bereich der Kurzzeitfestigkeit ab. Bei der Ermittlung wurde der Median der maximalen Spannung der letzten (näherungsweise) vollständig absolvierten Belastungsstufe vor dem Bruchversagen des Probekörpers herangezogen (vgl. Kapitel 2.3.4).

Tabelle 5.2: Grenzspannungen der gewählten Werkstoffe unter Zugschwellbeanspruchung bei 23 °C und einer Prüffrequenz von 5 Hz

Werkstoff	Probekörpergeometrie nach DIN EN ISO 527-2 (Probekörperdicke)	Lastverhältnis	GS σ_1 in MPa	GS σ_2 in MPa
POM	Typ 1A (4 mm)	0,01	20,0 ± 0,0	50,9 ± 0,0
POM	Typ 1A (2 mm)	0,01	14,9 ± 0,9	54,4 ± 0,0
PBT	Typ 1A (4 mm)	0,01	27,6 ± 0,8	44,3 ± 0,0
PBT-GF30	Typ 1A (4 mm)	0,01	59,9 ± 0,0	91,6 ± 0,0
		0,2	63,4 ± 0,0	102,2 ± 0,0
		0,5	74,0 ± 0,0	112,8 ± 0,0
PA6-GF30	Typ 1B (2 mm) 0°	0,01	31,8 ± 0,0	71,5 ± 0,0
	Typ 1B (2 mm) 90°	0,01	18,5 ± 0,9	42,0 ± 0,0
PP-GF30	Typ 1B (4 mm) 0°	0,01	31,5 ± 0,3	68,8 ± 0,7

(0° = in Fließrichtung, 90° = senkrecht zur Fließrichtung, GS = Grenzspannung)

5.4 Einstufen-Versuche (bzw. Wöhler-Versuche)

Anhand des PBT-GF30-Materials wurde die Gültigkeit der Phyal-Beziehung überprüft. Dazu wurden 13 ESV mit unterschiedlichen Belastungsniveaus durchgeführt. Für die Auswertung wurden mit der Dehnungsamplitude ε_a , der dissipierten Energiedichte W_{diss} und der Temperaturänderung ΔT verschiedene Messgrößen betrachtet. Ausgewertet wurde bei einer Lastpielzahl von $N_k = 10^3$. In Abbildung 5.21 ist die Spannungsamplitude σ_a über der jeweiligen Messgröße aufgetragen. Die Datenpunktbeschriftungen geben die maximale Spannung (Oberspannung σ_o) des zugehörigen ESV in MPa an (auch in den Abbildungen der nachfolgenden Kapitel). Es war möglich die Spannungsabhängigkeit der physikalischen Messgröße während der zyklischen Belastung jeweils mit Morrow-Gleichungen (vgl. Kapitel 2.3.1 Gleichung 2) zu beschreiben. In Abbildung 5.21 sind jeweils in der doppel-logarithmischen Auftragung die Anpassungsgerade (schwarze Linie) und das 95 %-Konfidenzintervall (grau hinterlegt) eingezeichnet.

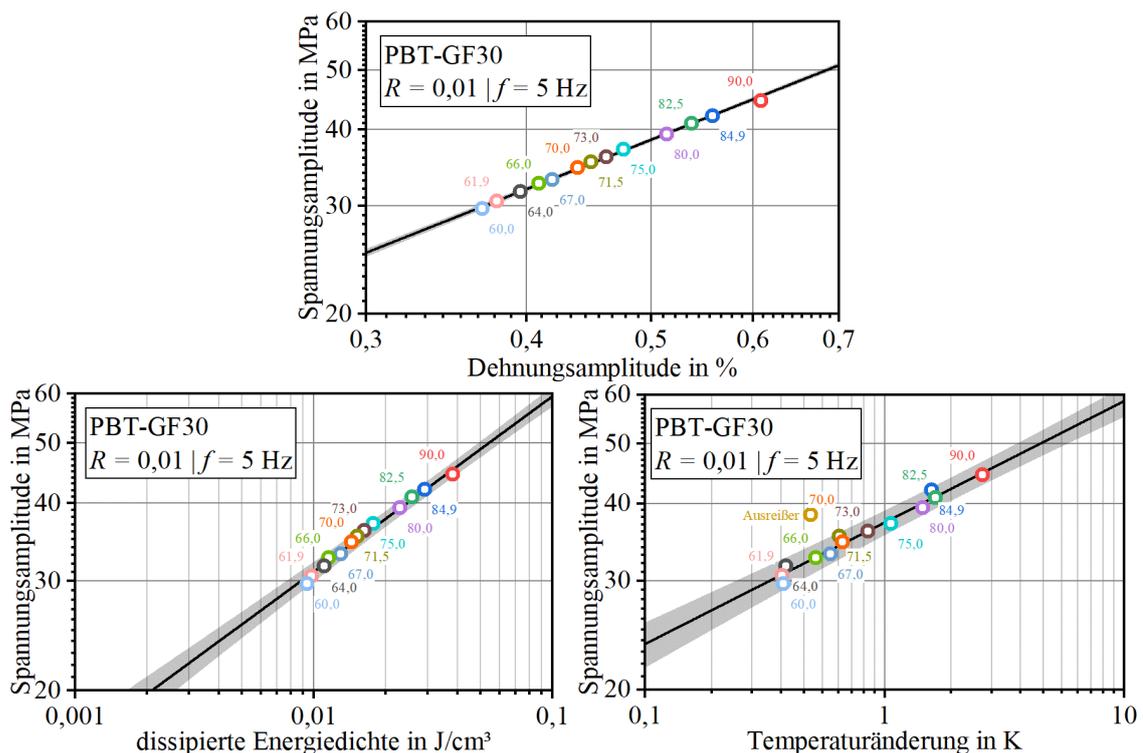


Abbildung 5.21: Ergebnisse aus ESV für PBT-GF30
Darstellung der Spannungsamplitude in Abhängigkeit von den Messgrößen Dehnungsamplitude, dissipierter Energiedichte und Temperaturänderung, inkl. Anpassung mittels Morrow-Gleichung.

Tabelle 5.3 enthält die zur Datenanpassung verwendeten Messgrößen spezifischen Morrow-Gleichungen und die aus der Anpassung (engl. Fit) erhaltenen Werte der Konstanten K' und des zyklischen Dehnungsverfestigungsexponenten n' . Aus diesen wurde mittels Phyal-Beziehung (Kapitel 2.3.3 Gleichung 4) der Schwingfestigkeitsexponent b der Basquin-Gleichung (Kapitel 2.3.2 Gleichung 3) berechnet.

Tabelle 5.3: Ergebnisse aus ESV für PBT-GF30
Anpassungsparameter der Morrow-Gleichungen und mittels Phyal-Beziehung berechneter Schwingfestigkeitsexponent

ausgewertete Messgröße	Morrow-Gleichung	K' aus Fit	n' aus Fit	b (berechnet)
Dehnungsamplitude in %	$\sigma_a = K' \cdot (\varepsilon_a)^{n'}$	$68,5 \pm 0,5$	$0,83 \pm 0,01$	-0,161
Dissipierte Energiedichte in J/cm ³	$\sigma_a = K' \cdot (W_{\text{diss}})^{n'}$	$113,7 \pm 3,9$	$0,28 \pm 0,01$	-0,117
Temperaturänderung in K	$\sigma_a = K' \cdot (\Delta T)^{n'}$	$37,3 \pm 0,2$	$0,20 \pm 0,01$	-0,099

Mit dem Schwingfestigkeitsexponent b und einem beliebigen Referenzpunkt der Zeitfestigkeitsgeraden, d. h. dem Ergebnis eines einzigen ESV-Versuchs, kann die Konstante σ_B der Basquin-Gleichung (Kapitel 2.3.2 Gleichung 3) ermittelt werden, sodass anschließend eine vollständige Beschreibung der Zeitfestigkeitsgerade vorliegt. In Abbildung 5.22 sind die mittels ESV experimentell ermittelte Zeitfestigkeitsgerade (schwarze Linie mit grau hinterlegtem 95 %-Konfidenzintervall) und die berechneten Zeitfestigkeitsgeraden einander gegenübergestellt. Jeder Datenpunkt entspricht einem bis zum Bruchversagen durchgeführten ESV. Zur Anpassung der experimentellen Daten wurde die Basquin-Gleichung (Kapitel 2.3.2 Gleichung 3) verwendet. Für die berechneten Zeitfestigkeitsgeraden diente der erste dem Zeitfestigkeitsbereich zugeordnete Datenpunkt ($\sigma_a = 42,075 \text{ MPa} / N_B = 18.642 \text{ Lastspiele}$) als Referenz.

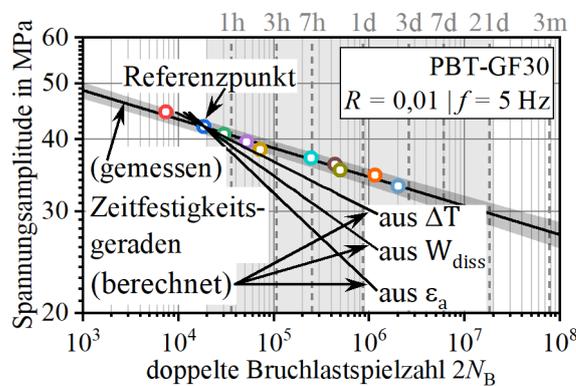


Abbildung 5.22: Experimentell ermittelte und berechnete Zeitfestigkeitsgerade für PBT-GF30

Es ist offensichtlich, dass die berechneten Zeitfestigkeitsgeraden von der gemessen abweichen. Für die bei der Lastspielzahl $N_x = 10^3$ ausgewerteten ESV war die erfolgreiche Anpassung mittels Morrow-Gleichung möglich und für die Bruchlastspielzahlen N_B derselben ESV die erfolgreiche Anpassung mittels Basquin-Gleichung. Deshalb müssen die beobachteten Abweichungen an der Phyal-Beziehung liegen, die zur Überführung der Morrow- in die Basquin-Gleichung verwendet wurde. Diese stammt aus dem Bereich der Metalle und wurde in Vorarbeiten exemplarisch für vorhandene PVC-U Daten überprüft (vgl. Kapitel 2.3.4). Diese Beobachtung führte zur Annahme, dass der Phyal-Ansatz grundsätzlich für Kunststoffen gültig ist. Mit Blick auf die zuvor für das

PBT-GF30-Material beschriebenen Abweichungen ist demnach eine Anpassung der Phybal-Beziehung notwendig. Grundlage dafür ist die aus der Literatur gestützte Hypothese [Mor65], dass es sich bei dem Faktor mit dem Wert 5 in Gleichung 4 um einen empirisch ermittelten Wert handelt. Mit Gleichung 6 wurde deshalb die Phybal-Beziehung verallgemeinert. Darin bezeichnet der Faktor Z eine werkstoffspezifische Konstante, welche für die in Kapitel 4.1 gewählten Werkstoffe unbekannt ist.

$$b = \frac{-n'}{1 + Z \cdot n'} \quad \text{Gleichung 6}$$

Diese Anpassung des Phybal-Ansatzes ändert zwar wenig an seinem enormen Zeit- und Kostenersparnispotenzial, erforderte aber eine Nachjustierung der Forschungsziele: Es sollten für weitere Kunststoffe die Gültigkeit der Morrow- und Basquin-Gleichungen überprüft werden. Sofern diese gegeben ist, sollte ein angepasster empirischer Faktor Z für den jeweiligen Kunststoff ermittelt werden. In Abbildung 5.23 ist die Vorgehensweise, in Anlehnung an die Darstellung der Vorgehensweise zur Anwendung des Phybal-Ansatzes (Kapitel 2.3.4 Abbildung 2.5), dargestellt.

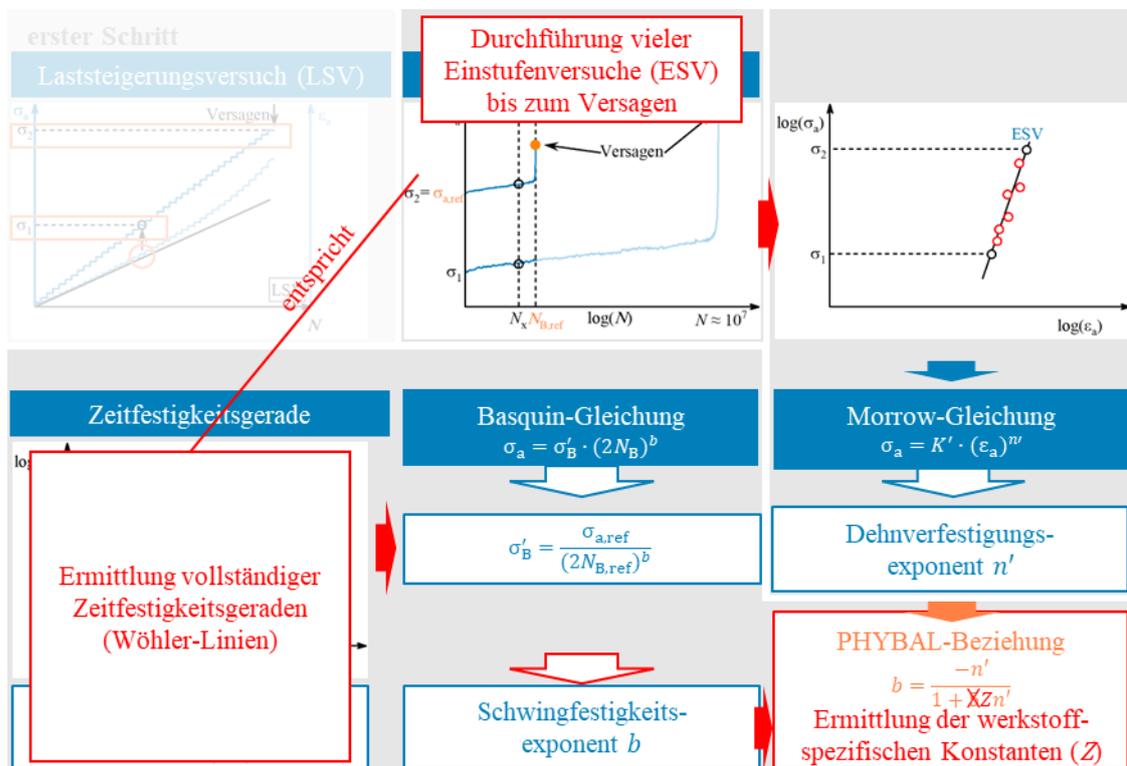


Abbildung 5.23: Schematische Darstellung der Vorgehensweise zur Ermittlung der werkstoff-spezifischen Konstante Z

Die Nachjustierung der Ziele erforderte eine Anpassung der experimentellen Arbeiten, um die Grundvoraussetzungen für die Anwendbarkeit bzw. Gültigkeit des Phyal-Ansatzes überprüfen zu können. Da hierbei der empirische Faktor Z a priori unbekannt ist, konnten die Daten für die Überprüfung der Anwendbarkeit der Morrow- und Basquin-Gleichungen nicht wie ursprünglich geplant beschleunigt mittels LSV ermittelt werden. Vielmehr mussten diese Daten in zahlreichen ESV bestimmt werden, welche bis zum Bruchversagen durchgeführt werden mussten. Die in Kapitel 5.3 präsentierten LSV wurden erst nach den in Kapitel 5.4 dargestellten Arbeiten durchgeführt. Für die Auswahl der Lastniveaus der ESV erfolgte daher im Bereich hoher Spannungen eine Orientierung an der Kurzzeitzugfestigkeit (vgl. Kapitel 5.2) – im Bereich niedriger Spannung wurden maximale Bruchlastspielzahlen von ca. 10^6 angestrebt. Bei der Auswertung wurde zur Festlegung der Anpassungsgrenzen zudem der Verlauf der Messgrößen betrachtet, insbesondere im bzw. bis zum Bereich der definierten Lastspielzahl N_x bei welcher die Messgrößen für die Anpassung mittels Morrow-Gleichung ausgelesen wurden (vgl. Kapitel 2.3.4). Ein besonderes Augenmerk wurde dabei auf die Entwicklung der Temperatur des Probeköpers gelegt. Eine kritische Bewertung der gewählten Anpassungsgrenzen durch einen Vergleich mit den Resultaten der später durchgeführten LSV wird anschließend durchgeführt (vgl. Kapitel 5.5). Die Ergebnisse der ESV werden nachfolgend, analog zu Kapitel 5.3 im Hinblick auf die verschiedenen Einflüsse dargestellt.

5.4.1 Einfluss der Probekörperdicke

Für die gewählten POM-Materialien wurde zunächst die Gültigkeit der Basquin-Gleichung (Kapitel 2.3.2 Gleichung 3) überprüft. Dazu wurden die Spannungsamplituden der ESV, welche durch die Wahl der maximalen Spannung und des Lastverhältnisses R in den Versuchen vorgegeben wurden, über den zugehörigen doppelten Bruchlastspielzahlen aufgetragen, welche das Versuchsergebnis darstellen (Abbildung 5.24 links). Jeder Punkt repräsentiert somit einen ESV. Die zugehörigen experimentell ermittelten Verläufe der an der Probekörperoberfläche gemessenen Temperaturen sind in Abbildung 5.24 rechts dargestellt, wobei die Datenpunktbeschriftungen die maximale Spannung (Oberspannung σ_o) des ESV in MPa angeben. Zeigte sich in den Temperaturverläufen ein (starker) Temperaturanstieg im Bereich der später für die Auswertungen mittels Morrow-Gleichungen herangezogenen Lastspielzahl $N_k = 10^4$, so wurde der jeweilige Versuch für sämtliche Auswertungen ausgeschlossen. In der doppellogarithmischen Auftragung liefert die Anpassung mittels Basquin-Gleichung, die als schwarze Linie dargestellte Anpassungsgerade mit dem zugehörigen grauhinterlegten 95 %-Konfidenzintervall; im extrapolierten Bereich ist die Anpassungsgerade gestrichelt dargestellt (Abbildung 5.24 links). Von den Anpassungsparametern der Basquin-Gleichung interessiert im Hinblick auf den Phybal-Ansatz der Schwingfestigkeitsexponent b – er ist in Tabelle 5.4 auf Seite 47 angegeben.

Der Vergleich der beiden POM-Materialien zeigt, dass die Beanspruchungsabhängigkeit unter zyklischer Beanspruchung sehr ähnlich ist (näherungsweise gleiche Steigung der Geraden in Abbildung 5.24 links). Dabei liegen die bei gleichem Lastniveau erzielten Bruchlastspielzahlen des POM-Materials der 2 mm dicken Probekörper etwas höher als die des POM-Materials der 4 mm dicken Probekörper. Dies kann einerseits in den unterschiedlichen Materialtypen begründet sein, da zumindest laut Datenblatt der Hersteller das POM-Material der 2 mm dicken Probekörper eine etwas höhere Kurzzeitzugfestigkeit aufweist (vgl. Kapitel 5.2). Andererseits kommt auch die unterschiedliche Probekörperdicke und die damit einhergehenden Unterschiede als Erklärung in Betracht. So offenbart Abbildung 5.24 rechts eine etwas geringere Temperaturzunahme der 2 mm dicken Probekörper – zudem fehlt das bei den 4 mm dicken Probekörpern bei ca. 10^3 Lastspielen beobachtete Temperaturmaximum.

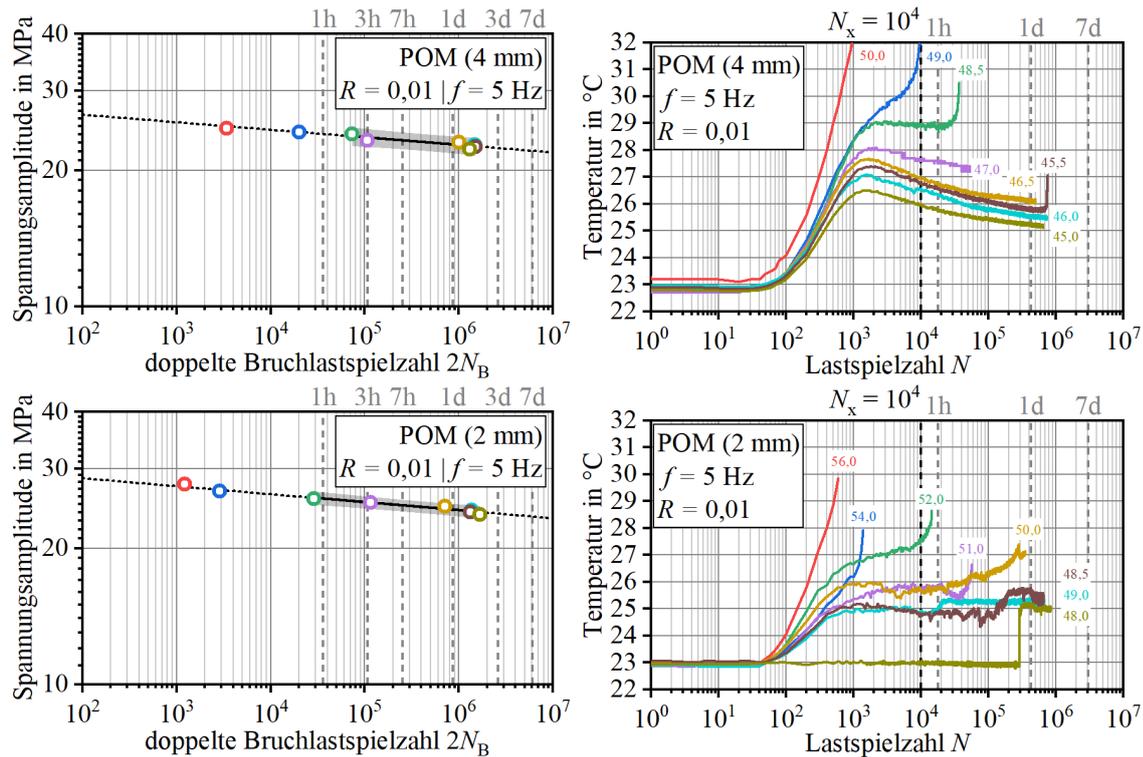


Abbildung 5.24: ESV-Ergebnisse für 4 mm und 2 mm dicke Probekörper aus POM
links: Auftragung der Spannungsamplitude über der doppelten Bruchlastspielzahl
rechts: Auftragung der gemessenen Temperatur über der Lastspielzahl⁵

Anschließend wurde auch die Gültigkeit der Morrow-Gleichung für die gewählten POM-Materialien (Kapitel 2.3.1 Gleichung 2) überprüft. Mit der Dehnungsamplitude, der dissipierten Energiedichte und der an der Oberfläche der Probekörper gemessenen Temperaturänderung wurden verschiedene Messgrößen herangezogen. Dabei wurde, entsprechend der Beschreibung in Kapitel 2.3.4, jeweils der experimentell ermittelte Verlauf der Messgröße während jedes ESV über der Lastspielzahl aufgetragen und für eine (im angenommenen Bereich der Zeitfestigkeit liegende) Lastspielzahl N_x (im Fall der POM-Materialien $N_x = 10^4$) ausgewertet. Im Zuge dessen wird die Messgröße bei der Lastspielzahl N_x ermittelt (rechte Diagramme in den Abbildung 5.25 bis Abbildung 5.27) und anschließend die Spannungsamplitude des zugehörigen ESV über der derart ermittelten zugehörigen Messgröße in doppel-logarithmischer Darstellung aufgetragen (linke Diagramme in den Abbildung 5.25 bis Abbildung 5.27). Die Anpassung mittels Morrow-Gleichung liefert die als schwarze Linie dargestellte Anpassungsgerade mit dem zugehörigen grauhinterlegten 95 %-Konfidenzintervall; im extrapolierten Bereich ist die Anpassungsgerade gestrichelt dargestellt. ESV, deren Verläufe einen (starken) Anstieg

⁵ Der Temperaturverlauf des ESV bei 48 MPa in Abbildung 5.24 rechts unten legt nahe, dass das Thermoelement erst ab ca. $3 \cdot 10^5$ Lastspielen ausreichenden Kontakt zum Probekörper hatte. Für die Auswertung der Temperaturänderung (Abbildung 5.27) wurde der Datenpunkt dieses ESV daher ausgeschlossen

im Bereich der zur Auswertung herangezogenen Lastspielzahl zeigen, wurden ausgeschlossen. Von den Anpassungsparametern der Morrow-Gleichung interessiert im Hinblick auf den Phyal-Ansatz der Dehnverfestigungsexponent n' – er ist nachfolgend in Tabelle 5.4 angegeben.

Tabelle 5.4: Parameter für die Anwendung des Phyal-Ansatzes bei 23 °C und einer Prüffrequenz von 5 Hz für den Werkstoff POM

Werkstoff	DIN EN ISO 527-2 Probekörpergeometrie (Probekörperdicke)	R	Schwingfestig- keitsexponent b (Basquin)	Dehnverfestigungsexponent n' (Morrow)		
				aus ϵ_a	aus W_{diss}	aus ΔT
POM	Typ 1A (4 mm)	0,01	- 0,01668	0,20450	0,14763	0,10890
POM	Typ 1A (2 mm)	0,01	- 0,01767	0,32471	0,14362	0,07504

Die Auftragungen der Spannungsamplitude des POM-Materials der 2 mm dicken Probekörper und des POM-Materials der 4 mm dicken Probekörper unterscheiden sich kaum. Die Anpassungsgeraden verlaufen näherungsweise parallel, wobei jene des POM-Materials der 2 mm dicken Probekörper bei der Auftragung über der Dehnungsamplitude (Abbildung 5.25) und der Auftragung über der Temperaturänderung (Abbildung 5.27) oberhalb jener des POM-Materials der 4 mm dicken Probekörper liegt. Im Fall der dissipierten Energiedichte verlaufen die Anpassungsgeraden nahezu deckungsgleich. Dies spiegeln auch die ermittelten Dehnverfestigungsexponent n' (Tabelle 5.4) wider.

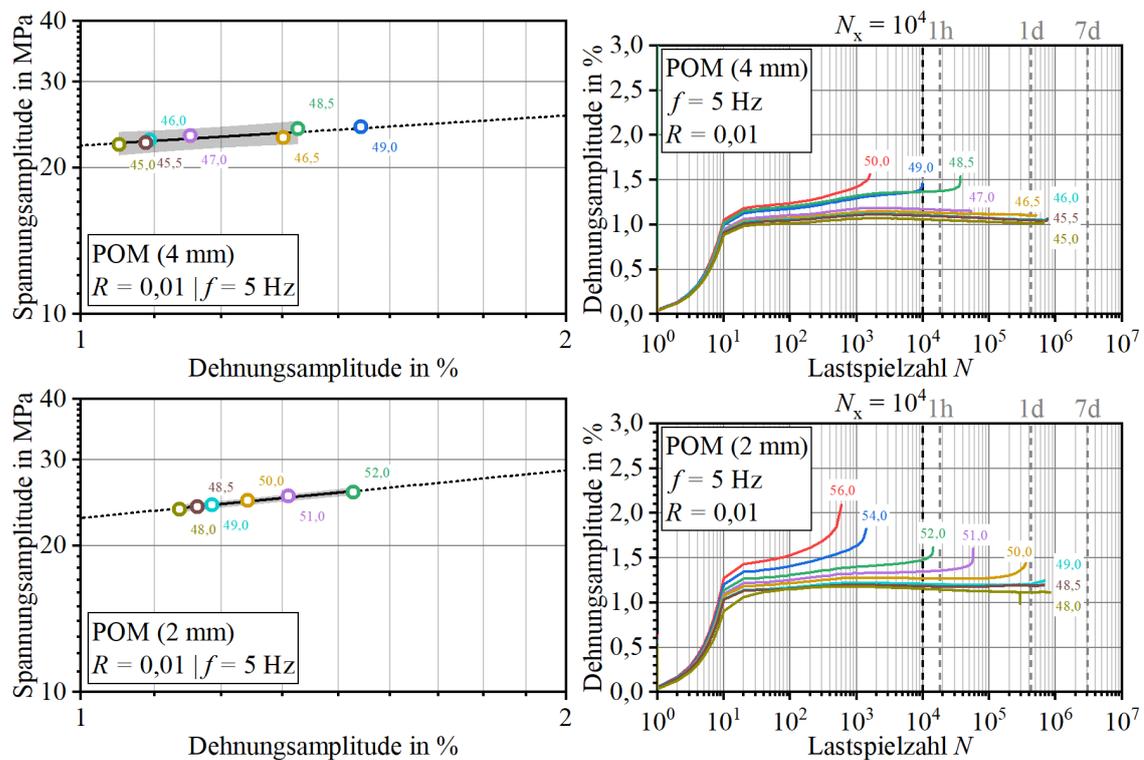


Abbildung 5.25: ESV-Ergebnisse für 4 mm und 2 mm dicke Probekörper aus POM
links: Auftragung der Spannungsamplitude über der Dehnungsamplitude bei $N_x = 10^4$
rechts: Auftragung der gemessenen Dehnungsamplitude über der Lastspielzahl

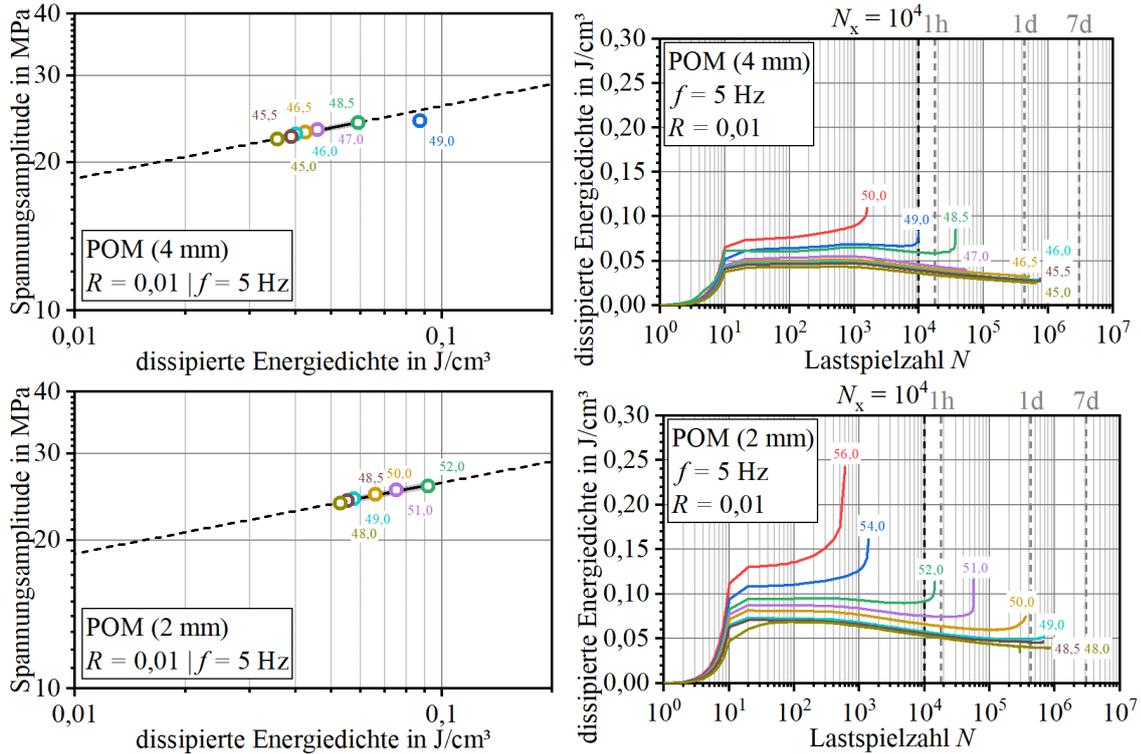


Abbildung 5.26: ESV-Ergebnisse für 4 mm und 2 mm dicke Probekörper aus POM
 links: Auftragung der Spannung amplitude über der diss. Energiedichte bei $N_x = 10^4$
 rechts: Auftragung der gemessenen dissipierten Energiedichte über der Lastspielzahl

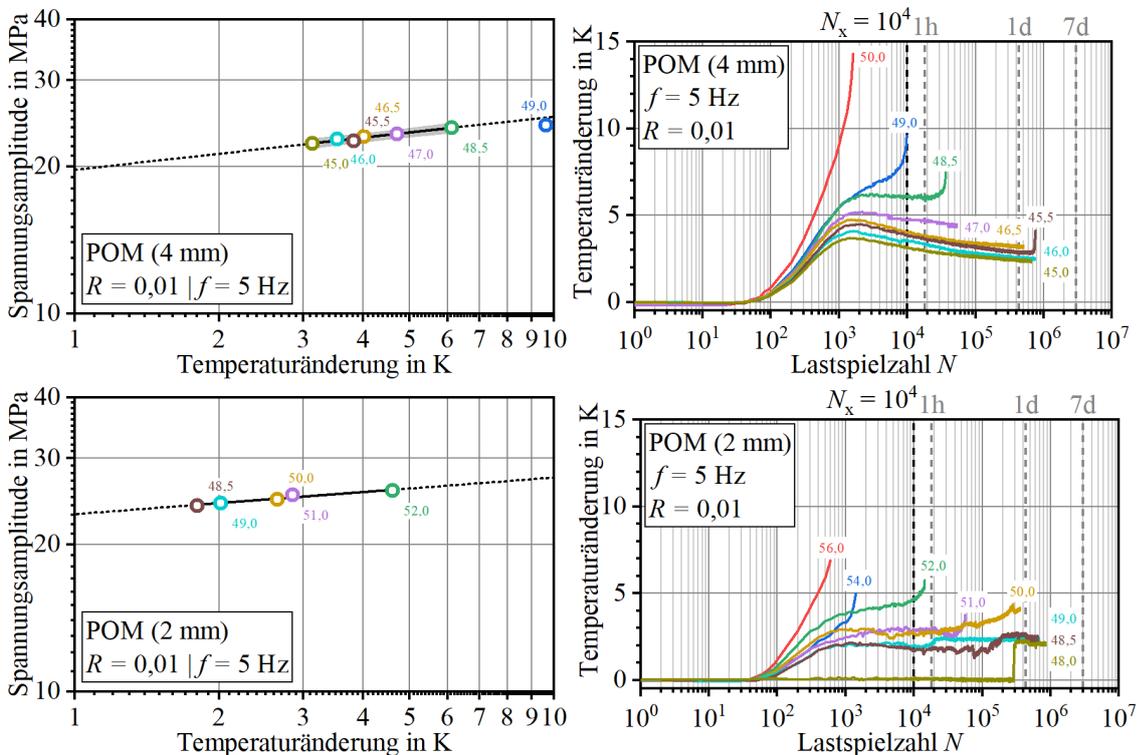


Abbildung 5.27: ESV-Ergebnisse für 4 mm und 2 mm dicke Probekörper aus POM
 links: Auftragung der Spannung amplitude über der Temperaturänderung bei $N_x = 10^4$
 rechts: Auftragung der gemessenen Temperaturänderung über der Lastspielzahl

5.4.2 Einfluss des Lastverhältnisses

Das Vorgehen zur Überprüfung der Gültigkeit der Basquin-Gleichung und der Morrow-Gleichung entsprach für die PBT-Materialien dem in Kapitel 5.4.1 für die POM-Materialien ausführlich erläuterten Vorgehen. Es konnte jeweils die Gültigkeit der Gleichungen gezeigt werden – die für den Phyal-Ansatz relevanten Anpassungsparameter sind in Tabelle 5.5 zusammengefasst.

Tabelle 5.5: Parameter für die Anwendung des Phyal-Ansatzes bei 23 °C und einer Prüffrequenz von 5 Hz für den Werkstoff PBT und PBT-GF30

Werkstoff	DIN EN ISO 527-2 Probekörpergeometrie (Probekörperdicke)	R	Schwingfestig- keitsexponent b (Basquin)	Dehnverfestigungsexponent n' (Morrow)		
				aus ε_a	aus W_{diss}	aus ΔT
PBT	Typ 1A (4 mm)	0,01	- 0,0252	0,77808	0,25834	0,17333
PBT-GF30	Typ 1A (4 mm)	0,01	- 0,04710	0,81858	0,28543	0,13562
		0,2	- 0,04772	0,78835	0,26310	0,12027
		0,5	- 0,03502	0,85794	0,27866	0,16826

Die untersuchten PBT-Materialien zeigten nur eine geringfügige Temperaturzunahme während der ESV (vgl. Abbildung 5.28 rechts). Diese fällt umso geringer aus, je größer das Lastverhältnis R ist. Die mittels Basquin-Gleichung erzeugten Anpassungsgeraden verlaufen bei gleichem Material (PBT-GF30) für verschiedene Lastverhältnisse R näherungsweise parallel. Wie schon für die LSV erläutert (vgl. Kapitel 5.3.3), nimmt die bei gleicher maximaler Spannung erzielte Bruchlastspielzahl zu, was in Abbildung 5.28 links entsprechend auch in der Spannungsamplitude sichtbar ist. Das ungefüllte PBT-Material versagte im Vergleich zu dem glasfasergefüllten PBT-GF30-Material bei gleicher Spannungsamplitude bei deutlich geringeren Lastspielzahlen. In Anbetracht der Ergebnisse der Kurzzeitzugversuche war dies zu erwarten.

Für die Überprüfung der Gültigkeit der Morrow-Gleichungen erfolgte die Auswertung für die PBT-Materialien bei einer Lastspielzahl von $N_k = 10^3$. Die mittels Morrow-Gleichung erzeugten Anpassungsgeraden verlaufen bei gleichem Material (PBT-GF30) für verschiedene Lastverhältnisse R näherungsweise parallel (vgl. Abbildung 5.29 bis Abbildung 5.31). Dabei unterscheiden sich die Anpassungsgeraden der Untersuchungen mit Lastverhältnissen von $R = 0,01$ und $R = 0,2$ kaum – sie liegen oberhalb der mit einem Lastverhältnis von $R = 0,5$ ermittelten. Die größten Steigungsunterschiede wurden für die Temperaturänderung (Abbildung 5.31) beobachtet. Interessant ist in Bezug auf die Steigung auch die gute Übereinstimmung der Ergebnisse von ungefülltem PBT-Material und glasfasergefülltem PBT-GF30-Material.

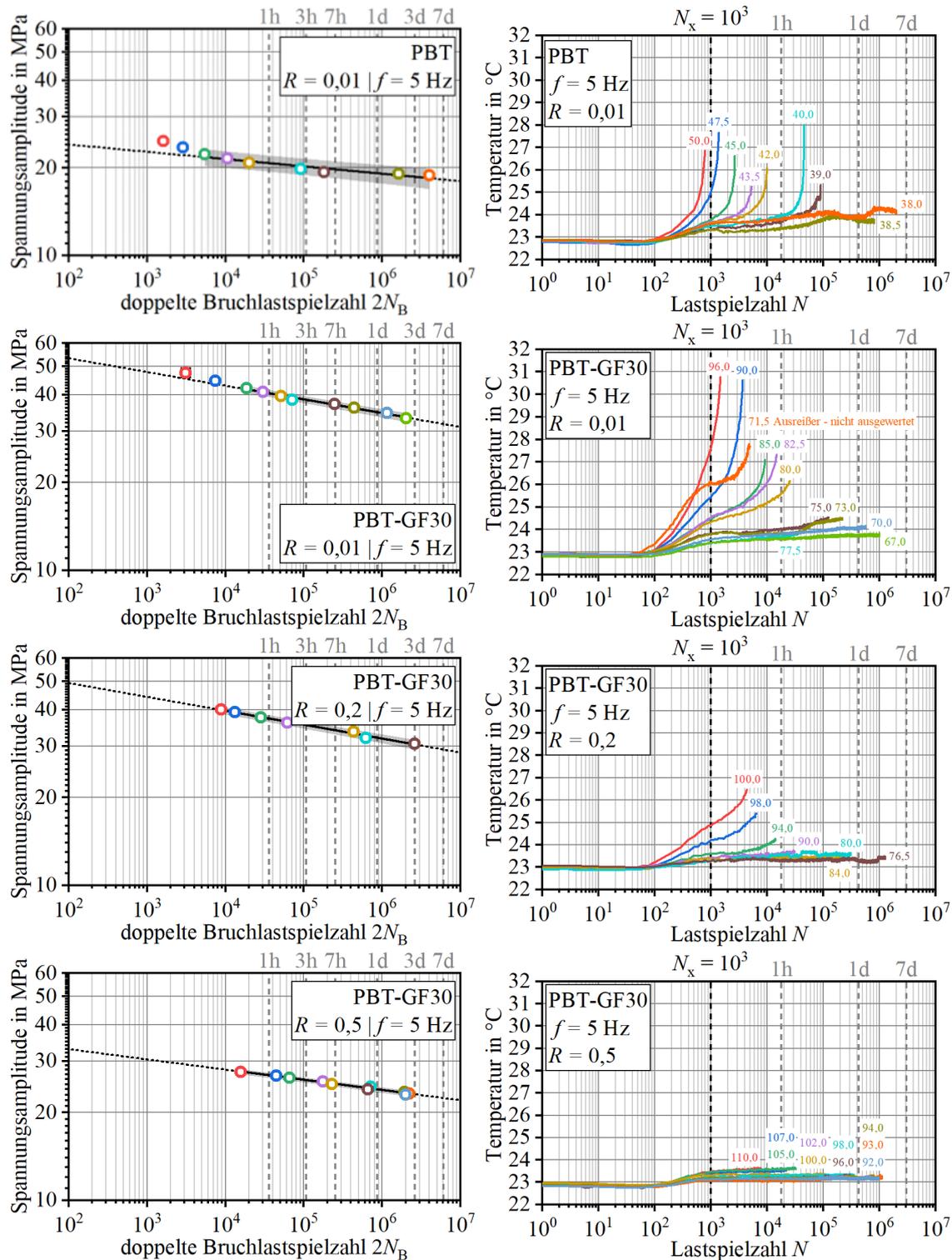


Abbildung 5.28: ESV-Ergebnisse für ungefülltes PBT (oben) und glasfasergefülltes PBT-GF30 links: Auftragung der Spannungsamplitude über der doppelten Bruchlastspielzahl rechts: Auftragung der gemessenen Temperatur über der Lastspielzahl

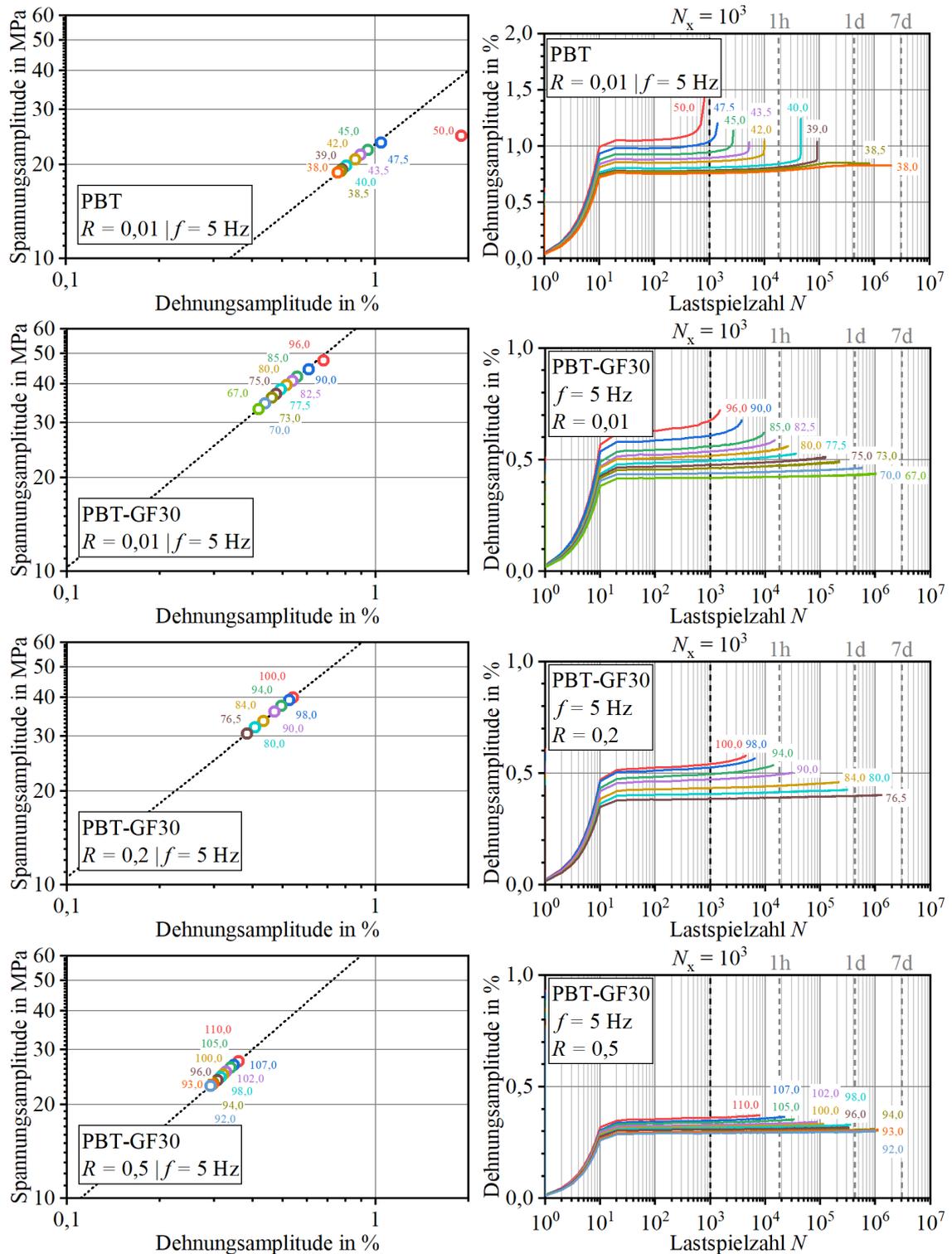


Abbildung 5.29: ESV-Ergebnisse für ungefülltes PBT (oben) und glasfasergefülltes PBT-GF30 links: Auftragung der Spannungsamplitude über der Dehnungsamplitude bei $N_x = 10^3$ rechts: Auftragung der gemessenen Dehnungsamplitude über der Lastspielzahl

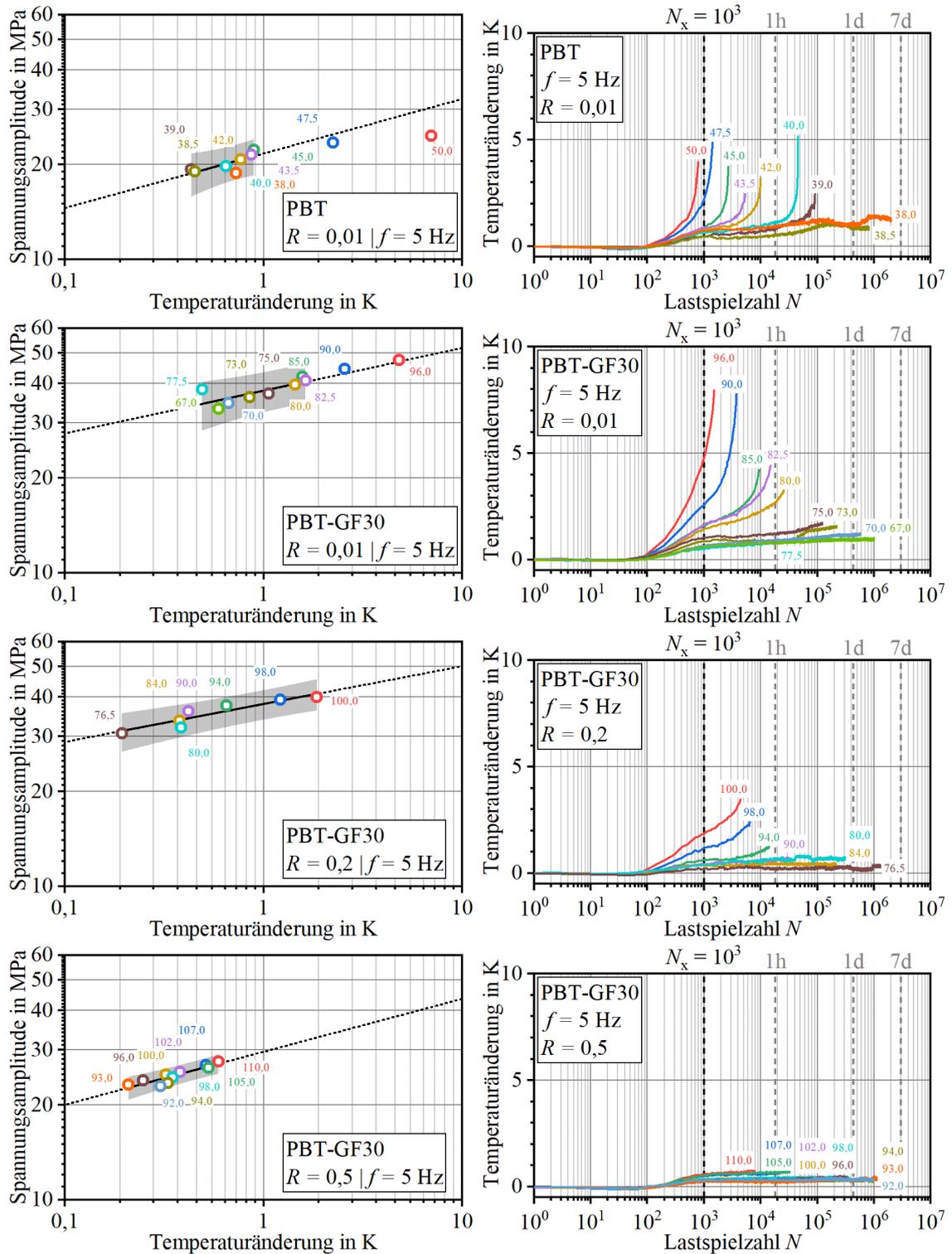


Abbildung 5.31: ESV-Ergebnisse für ungefülltes PBT (oben) und glasfasergefülltes PBT-GF30 links: Auftragung der Spannungsamplitude über der Temperaturänderung bei $N_x = 10^3$ rechts: Auftragung der gemessenen Temperaturänderung über der Lastspielzahl

5.4.3 Einfluss der Faserorientierung bei glasfasergefüllten Werkstoffen

Das Vorgehen zur Überprüfung der Gültigkeit der Basquin-Gleichung und der Morrow-Gleichung entsprach für das glasfasergefüllte PA6-GF30- und PP-GF30-Material dem in Kapitel 5.4.1 für die POM-Materialien ausführlich erläuterten Vorgehen. Es konnte auch für diese Werkstoffe jeweils die Gültigkeit der Gleichungen gezeigt werden – die für den Phyal-Ansatz relevanten Anpassungsparameter sind in Tabelle 5.6 zusammengefasst.

Tabelle 5.6: Parameter für die Anwendung des Phyal-Ansatzes bei 23 °C und einer Prüffrequenz von 5 Hz für den Werkstoff PA6-GF30 und PP-GF30

Werkstoff	DIN EN ISO 527-2 Probekörpergeometrie (Probekörperdicke)	R	Schwingfestig- keitsexponent b (Basquin)	Dehnverfestigungsexponent n' (Morrow)		
				aus ϵ_a	aus W_{diss}	aus ΔT
PA6-GF30	Typ 1B (2 mm) 0°	0,01	- 0,01996	0,58604	0,23165	0,07105
	Typ 1B (2 mm) 90°	0,01	- 0,01164	0,35210	0,15933	0,07076
PP-GF30	Typ 1B (4 mm) 0°	0,01	- 0,05608	0,67881	0,25973	0,15344

(0° = in Fließrichtung, 90° = senkrecht zur Fließrichtung)

Das untersuchte PA6-GF30-Material zeigte im Unterschied zum PP-GF30-Material einen deutlichen Temperaturanstieg in den ESV, der bei Beanspruchung in Fließrichtung (0°-Orientierung) stärker ausgeprägt ist (vgl. Abbildung 5.32 und Abbildung 5.33). Entsprechend der Ergebnisse der Kurzzeitzugversuche zeigte sich auch bezüglich der Lage der mittels Basquin-Gleichung erzeugten Anpassungsgeraden ein deutlicher Einfluss der Faserorientierung für das PA6-GF30-Material⁶. So werden dieselben Bruchlastspielzahlen bei Prüfung senkrecht zur Fließrichtung (90°-Orientierung) bei ESV mit deutlich geringeren Spannungsamplituden als bei in Fließrichtung (0°-Orientierung) beobachtet (vgl. Abbildung 5.32). Mit PP-GF30 wurde ein weiterer glasfasergefüllter Thermoplast untersucht (Abbildung 5.33). Wie aufgrund der generellen Unterschiede im Verhalten von Polyamiden und Polyolefinen zu erwarten, zeigten auch die hier untersuchten glasfasergefüllten Materialtypen deutlich unterschiedliches Verhalten.

⁶ Um den Einfluss der Feuchte möglichst gering zu halten, wurden alle Probekörper aus PA6-GF30 gleich konditioniert. Da die Prüfungen auf demselben Prüfgerät erfolgten, mussten diese nacheinander durchgeführt werden. Es wurde jeweils die Feuchte der Probekörper vor Beginn des ersten ESV und nach Abschluss des letzten ESV ermittelt. Für die PA6-GF30-Probekörper in 0°-Orientierung wurden 0,52 % bis 0,55 % gemessen und für die PA6-GF30-Probekörper in 90°-Orientierung 0,60 % bis 0,71 %.

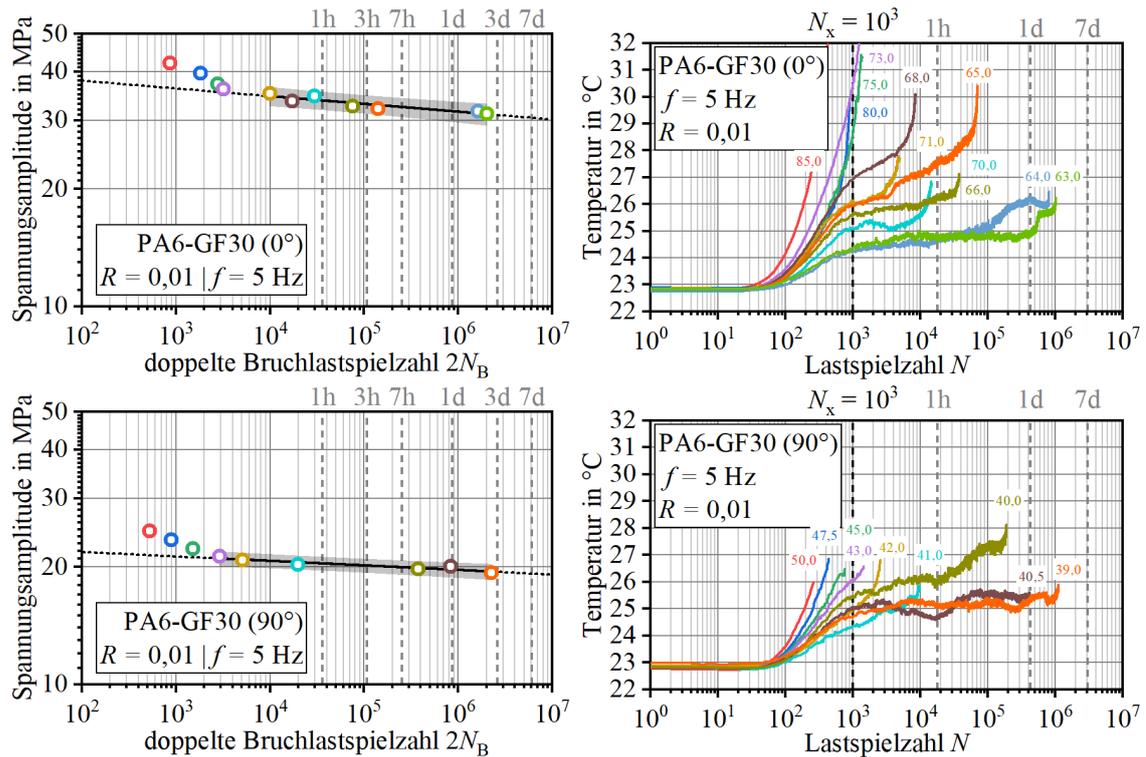


Abbildung 5.32: ESV-Ergebnisse für in und senkrecht zur Fließrichtung aus spritzgegossenen Platten entnommene Probekörper aus PA6-GF30
links: Auftragung der Spannung amplitude über der doppelten Bruchlastspielzahl
rechts: Auftragung der gemessenen Temperatur über der Lastspielzahl

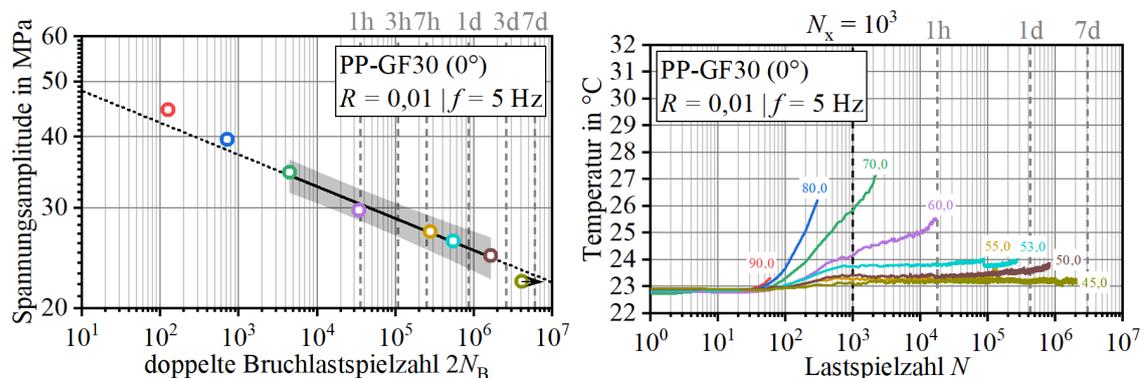


Abbildung 5.33: ESV-Ergebnisse für in Fließrichtung aus spritzgegossenen Platten entnommene Probekörper aus PP-GF30
links: Auftragung der Spannung amplitude über der doppelten Bruchlastspielzahl
rechts: Auftragung der gemessenen Temperatur über der Lastspielzahl

Für die Überprüfung der Gültigkeit der Morrow-Gleichungen erfolgte die Auswertung für das PA6-GF30-Material und das PP-GF30-Material bei einer Lastspielzahl von $N_x = 10^3$. Die Lage der mittels Morrow-Gleichung erzeugten Anpassungsgeraden (Abbildung 5.34, Abbildung 5.36 und Abbildung 5.38) des untersuchten PA6-GF30-Materials zeigen einen deutlichen Einfluss der Faserorientierung. Sie liegen bei Prüfung senkrecht zur Fließrichtung (90°-Orientierung) deutlich unterhalb der in Fließrichtung (0°-Orientierung) geprüften. Während die Steigung der Anpassungsgeraden näherungsweise identisch ist, wenn die Temperaturänderung betrachtet wird (Abbildung 5.38), weisen die Anpassungsgeraden für die Betrachtung der Dehnungsamplitude und der

dissipierten Energiedichte (Abbildung 5.34 und Abbildung 5.36) signifikant niedrigere Steigungen im Fall der senkrecht zur Fließrichtung (90° -Orientierung) entnommen Probekörper auf. Das Verhalten des PP-GF30-Materials (Abbildung 5.35, Abbildung 5.37 und Abbildung 5.39) unterscheidet sich erwartungsgemäß deutlich von dem des zuvor erläuterten PA6-GF30-Materials. Die in beiden Fällen tendenziell etwas breiteren Konfidenzintervalle, verglichen mit den in Kapitel 5.4.1 und 5.4.2 gezeigten Ergebnissen, könnten auf die Probekörper(herstellung) (vgl. Kapitel 4.1) als mögliche Ursache hindeuten.

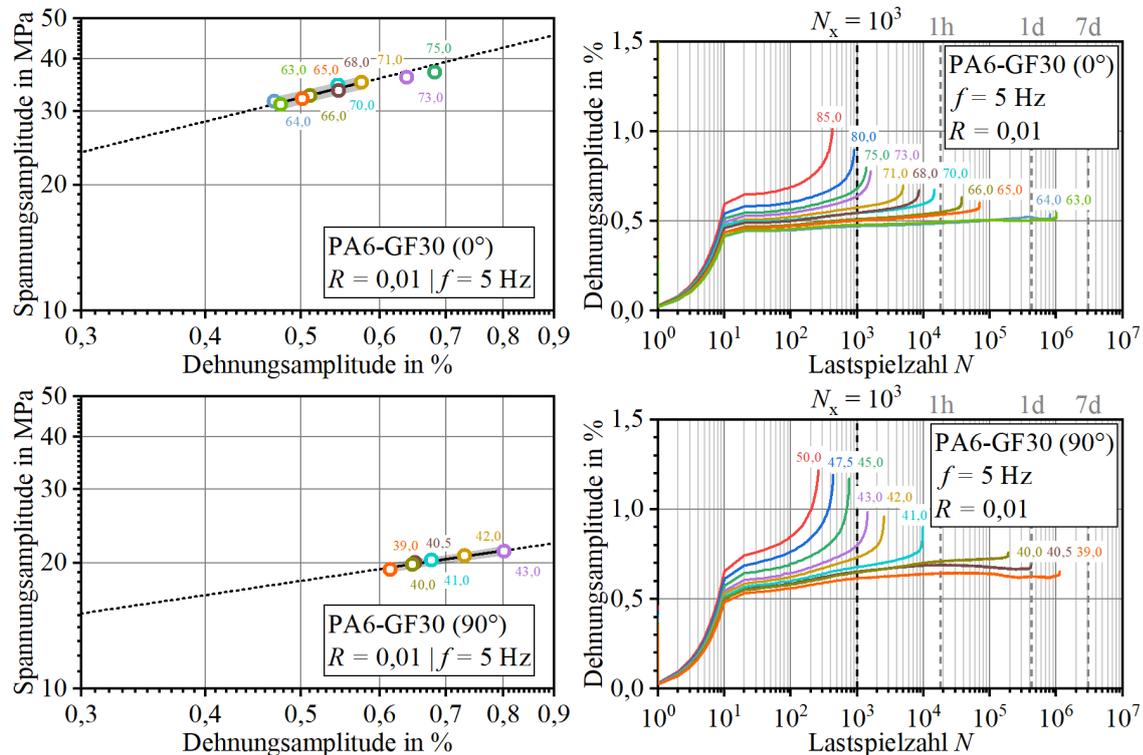


Abbildung 5.34: ESV-Ergebnisse für in und senkrecht zur Fließrichtung aus spritzgegossenen Platten entnommene Probekörper aus PA6-GF30
 links: Auftragung der Spannung amplitude über der Dehnung amplitude bei $N_x = 10^3$
 rechts: Auftragung der gemessenen Dehnung amplitude über der Lastspielzahl

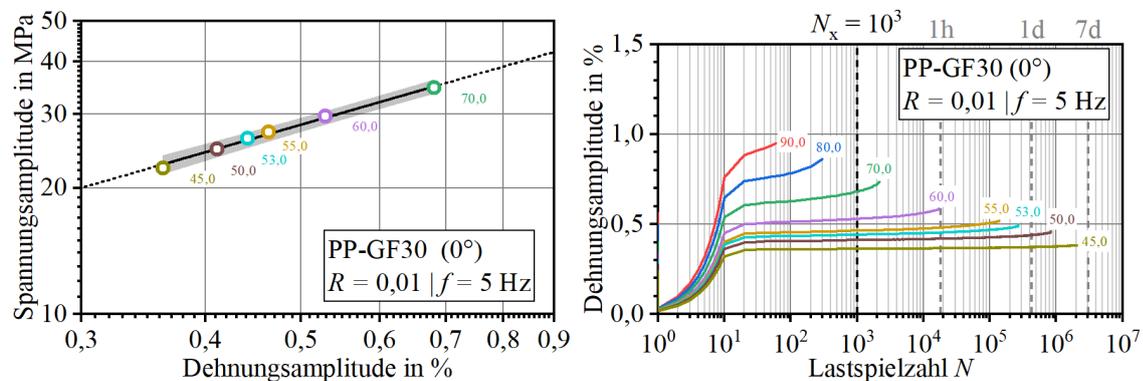


Abbildung 5.35: ESV-Ergebnisse für in Fließrichtung aus spritzgegossenen Platten entnommene Probekörper aus PP-GF30
 links: Auftragung der Spannung amplitude über der Dehnung amplitude bei $N_x = 10^3$
 rechts: Auftragung der gemessenen Dehnung amplitude über der Lastspielzahl

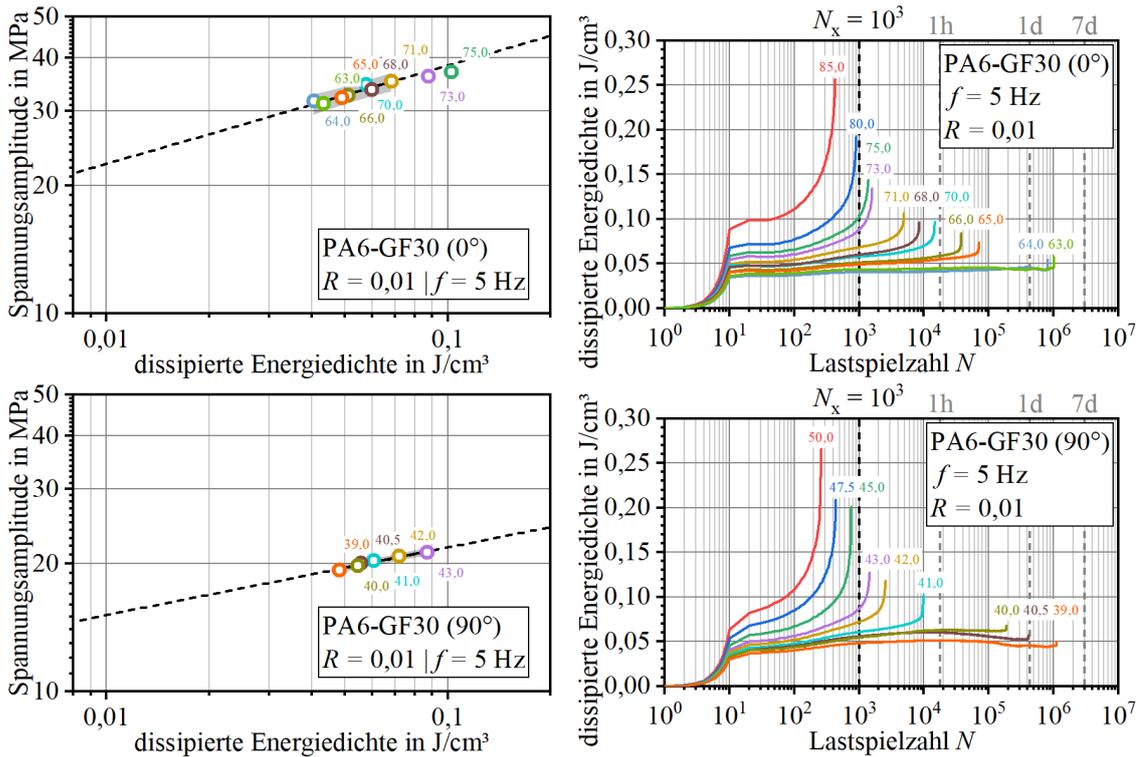


Abbildung 5.36: ESV-Ergebnisse für in und senkrecht zur Fließrichtung aus spritzgegossenen Platten entnommene Probekörper aus PA6-GF30
 links: Auftragung der Spannungsamplitude über der diss. Energiedichte bei $N_x = 10^3$
 rechts: Auftragung der gemessenen dissipierten Energiedichte über der Lastspielzahl

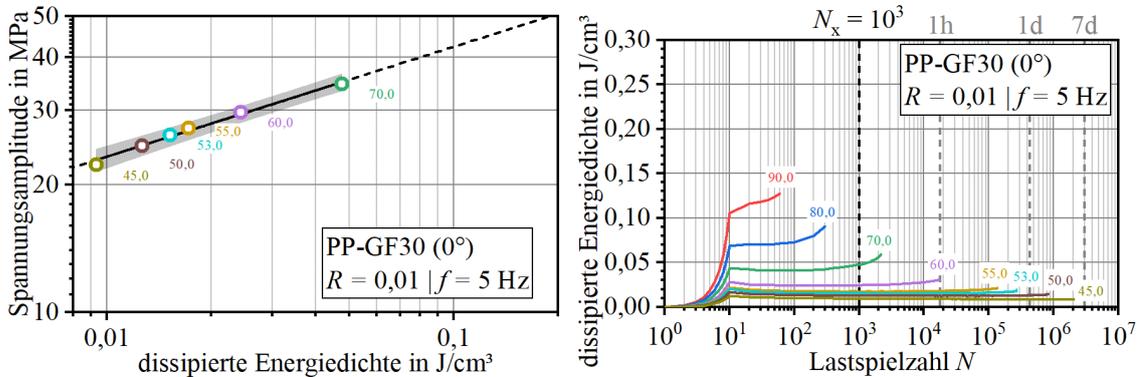


Abbildung 5.37: ESV-Ergebnisse für in Fließrichtung aus spritzgegossenen Platten entnommene Probekörper aus PP-GF30
 links: Auftragung der Spannungsamplitude über der diss. Energiedichte bei $N_x = 10^3$
 rechts: Auftragung der gemessenen dissipierten Energiedichte über der Lastspielzahl

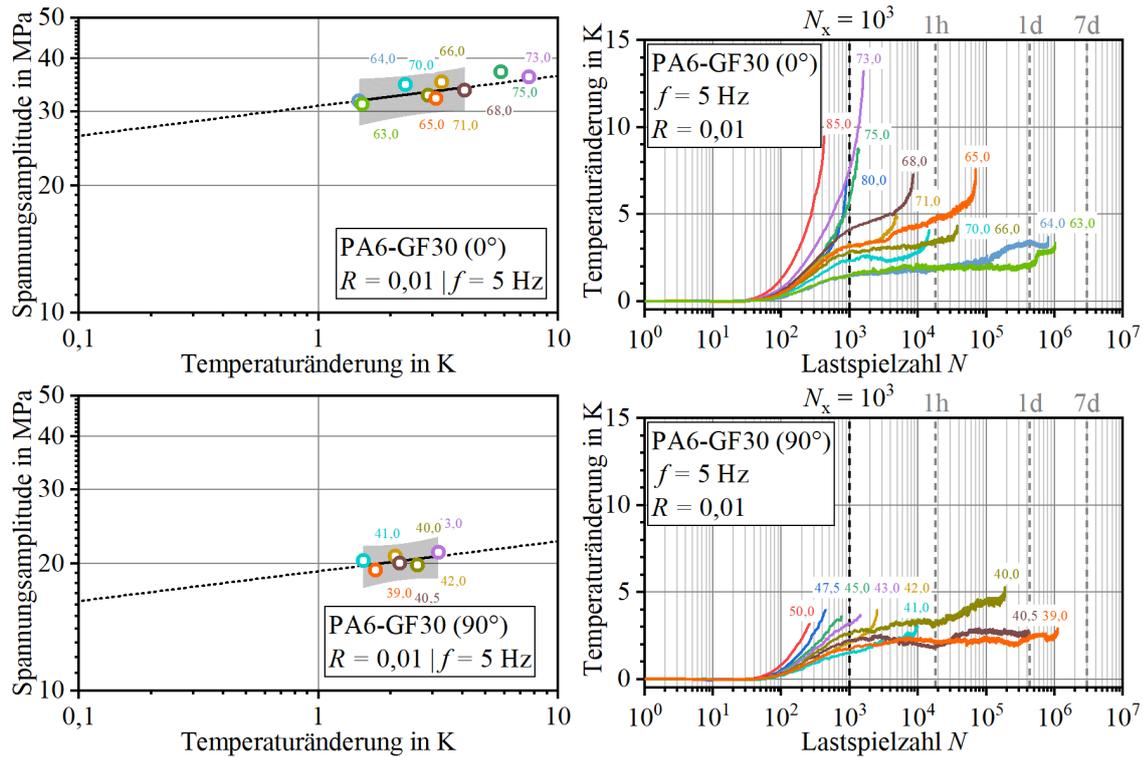


Abbildung 5.38: ESV-Ergebnisse für in und senkrecht zur Fließrichtung aus spritzgegossenen Platten entnommene Probekörper aus PA6-GF30
links: Auftragung der Spannungsamplitude über der Temperaturänderung bei $N_x = 10^3$
rechts: Auftragung der gemessenen Temperaturänderung über der Lastspielzahl

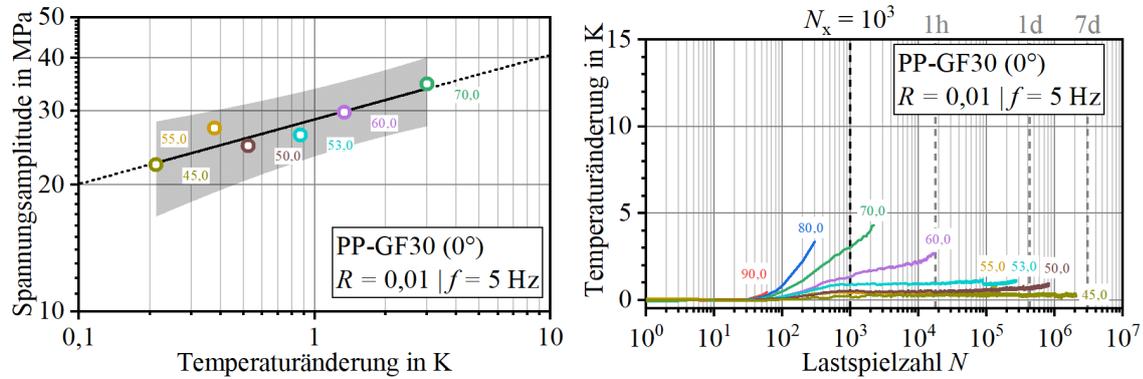


Abbildung 5.39: ESV-Ergebnisse für in Fließrichtung aus spritzgegossenen Platten entnommene Probekörper aus PP-GF30
links: Auftragung der Spannungsamplitude über der Temperaturänderung bei $N_x = 10^3$
rechts: Auftragung der gemessenen Temperaturänderung über der Lastspielzahl

5.4.4 Empirischer Faktor für die Anwendung des Phybal-Ansatzes

Für alle untersuchten Werkstoffe konnte die Gültigkeit der Morrow-Gleichung für verschiedene Messgrößen sowie für die Basquin-Gleichung erfolgreich demonstriert werden (vgl. Kapitel 5.4.1 bis 5.4.3). Somit konnten werkstoffspezifischen Konstanten Z der verallgemeinerten Phybal-Beziehung (Gleichung 6) mit Gleichung 7 aus den Dehnverfestigungsexponenten n' der Morrow-Gleichungen und dem Schwingfestigkeits-exponenten b der Basquin-Gleichung die berechnet werden – sie sind in Tabelle 5.7 angegeben.

$$Z = -\frac{n' + b}{n' \cdot b} \quad \text{Gleichung 7}$$

Tabelle 5.7 ist zu entnehmen, dass das R -Verhältnis im für das PBT-GF30-Material Variationsrahmen einen eher geringen Einfluss auf die resultierende werkstoffspezifischen Konstanten Z hatte. Auch der Einfluss der Probekörperdicke, der anhand von zwei POM-Materialien untersucht wurde, ist eher gering. Der für ein PA6-GF30-Material betrachtete Einfluss der Faserorientierung hingegen ist sehr deutlich. Bei Prüfung senkrecht zur Fließrichtung bzw. Faserorientierung ergaben sich deutlich höhere Werte.

Insgesamt konnten für alle untersuchten Werkstoff-Lastverhältnis-Kombinationen spezifische Konstanten Z ermittelt werden. Diese unterscheiden sich jedoch für die verschiedenen thermoplastischen Kunststoffe. Damit wurde demonstriert, dass die Notwendigkeit besteht, die verallgemeinerte Form der Phybal-Beziehung (Kapitel 5.4 Gleichung 6) zu verwenden.

Tabelle 5.7: Empirisch ermittelte werkstoffspezifische Konstanten der untersuchten Kunststoffe für die Anwendung des Phybal-Ansatzes bei 23 °C und einer Prüffrequenz von 5 Hz

Werkstoff	DIN EN ISO 527-2 Probekörpergeometrie (Probekörperdicke)	R	werkstoffspezifische Konstante Z (verallgemeinerte Phybal-Beziehung)		
			aus ϵ_a	aus W_{diss}	aus ΔT
POM	Typ 1A (4 mm)	0,01	55,1	53,2	50,8
POM	Typ 1A (2 mm)	0,01	53,5	49,6	43,3
PBT	Typ 1A (4 mm)	0,01	38,4	35,8	33,9
PBT-GF30	Typ 1A (4 mm)	0,01	20,0	17,7	13,9
		0,2	19,7	17,2	12,6
		0,5	27,4	25,0	22,6
PA6-GF30	Typ 1B (2 mm) 0°	0,01	48,4	45,8	36,0
	Typ 1B (2 mm) 90°	0,01	83,1	79,6	71,8
PP-GF30	Typ 1B (4 mm) 0°	0,01	16,4	14,0	11,3

(0° = in Fließrichtung, 90° = senkrecht zur Fließrichtung)

5.5 Methodenvergleich und Validierung

Mit der aus ESV empirisch ermittelten Konstanten Z der verallgemeinerten Phyal-Beziehung (Kapitel 5.4 Gleichung 6), konnte die in Kapitel 2.3.4 beschriebene Vorgehensweise zur Anwendung des Phyal-Ansatzes umgesetzt werden. Dazu wurde der ESV mit dem höchsten Spannungsniveau, welches zur Ermittlung der Zeitfestigkeitsgeraden herangezogen wurde (Kapitel 5.4) als Referenz verwendet. Dies entspricht (näherungsweise) dem im Phyal-Ansatz vorgesehenen ESV bei der aus LSV ermittelten Grenzspannung σ_2 wie die Gegenüberstellung in Tabelle 5.8 verdeutlicht.⁷ Der Vergleich der ebenfalls in Tabelle 5.8 angegebenen aus LSV abgeschätzten Grenzspannung σ_1 (vgl. Kapitel 5.3) und dem niedrigsten in den ESV verwendeten Spannungsniveau (welches mit einer Bruchlastspielzahl von ca. 10^6 einhergeht, vgl. Kapitel 5.4) zeigt, dass für die untersuchten Werkstoffe unter den gegebenen Bedingungen die (mittels LSV prognostizierte) Langzeitfestigkeit noch nicht erreicht ist. Eine Validierung der Grenzspannung σ_1 mittels ESV war daher aufgrund der zu erwartenden langen Prüfdauern nicht möglich. Für den im Phyal-Ansatz notwendigen zweiten ESV wurde jeweils der ESV mit dem niedrigsten realisierten Spannungsniveau herangezogen.

Tabelle 5.8: Anpassungsbereiche für den Zeitfestigkeitsbereich der gewählten Werkstoffe unter Zug-schwellbeanspruchung bei 23 °C und einer Prüffrequenz von 5 Hz

Werkstoff	DIN EN ISO 527-2 Probekörpergeometrie (Probekörperdicke)	R	Spannung in MPa (Anpassungsbereich) aus LSV	Spannung in MPa (Anpassungsbereich) aus ESV
POM	Typ 1A (4 mm)	0,01	20,0 bis 50,9	45,0 bis 48,5
POM	Typ 1A (2 mm)	0,01	14,9 bis 54,4	48,0 bis 52,0
PBT	Typ 1A (4 mm)	0,01	27,6 bis 44,3	38,0 bis 45,0
PBT- GF30	Typ 1A (4 mm)	0,01	59,9 bis 91,6	67,0 bis 85,0
		0,2	63,4 bis 102,2	76,5 bis 100,0
		0,5	74,0 bis 112,8	92,0 bis 110
PA6- GF30	Typ 1B (2 mm) 0°	0,01	31,8 bis 71,5	63,0 bis 71,0
	Typ 1B (2 mm) 90°	0,01	18,5 bis 42,0	39,0 bis 43,0
PP-GF30	Typ 1B (4 mm) 0°	0,01	31,5 bis 68,8	45,0 bis 70,0

(0° = in Fließrichtung, 90° = senkrecht zur Fließrichtung)

⁷ Abweichungen resultieren aus den gewählten diskreten Spannungsniveaus und/oder dem maximal umgesetzten Spannungsniveau (bspw. für die PBT-GF30 Proben mit $R=0,2$ und $R=0,5$).

Die Anwendung des Phybal-Ansatzes wird nachfolgend exemplarisch für das PP-GF30-Material dargestellt, wobei die Dehnungsamplitude als Messgröße betrachtet wurde. In Abbildung 5.40 sind die Verläufe der gemessenen maximalen Spannung (links oben) und Dehnungsamplitude (rechts oben) über den absolvierten Gesamtzyklen bzw. Lastspielen aufgetragen. Der zur weiteren Auswertung herangezogene Bereich ist grau hinterlegt und grenzt den Bereich zwischen den verwendeten Grenzspannungen σ_1 bis σ_2 ab. Das für jede Laststufe aus den Messwerten ermittelte Wertepaar ist in Abbildung 5.40 unten links dargestellt – es wurde jeweils der Medianwert verwendet. Da die Grenzspannungen hier, wie auf Seite 60 erläutert, nicht aus LSV ermittelt wurden, kann die Dehnungsamplitude für σ_1 bis σ_2 hier nicht direkt abgelesen werden und muss interpoliert werden. Dazu erfolgte eine Anpassung der Datenpunkte in Abbildung 5.40 unten links mit einer Potenzfunktion. Mit dieser wurden anschließend durch Vorgabe der in den beiden ESV verwendeten Grenzspannungen die zugehörigen Dehnungsamplituden rechnerisch ermittelt (schwarze Punkte in Abbildung 5.40 unten rechts). Bei der herkömmlichen Anwendung des Phybal-Ansatzes, wie in Kapitel 2.3.4 beschrieben, sind diese Schritte nicht notwendig – es erfolgt lediglich die Bestimmung der Grenzspannungen und zugehörigen Dehnungsamplituden (erster Schritt in Kapitel 2.3.4).

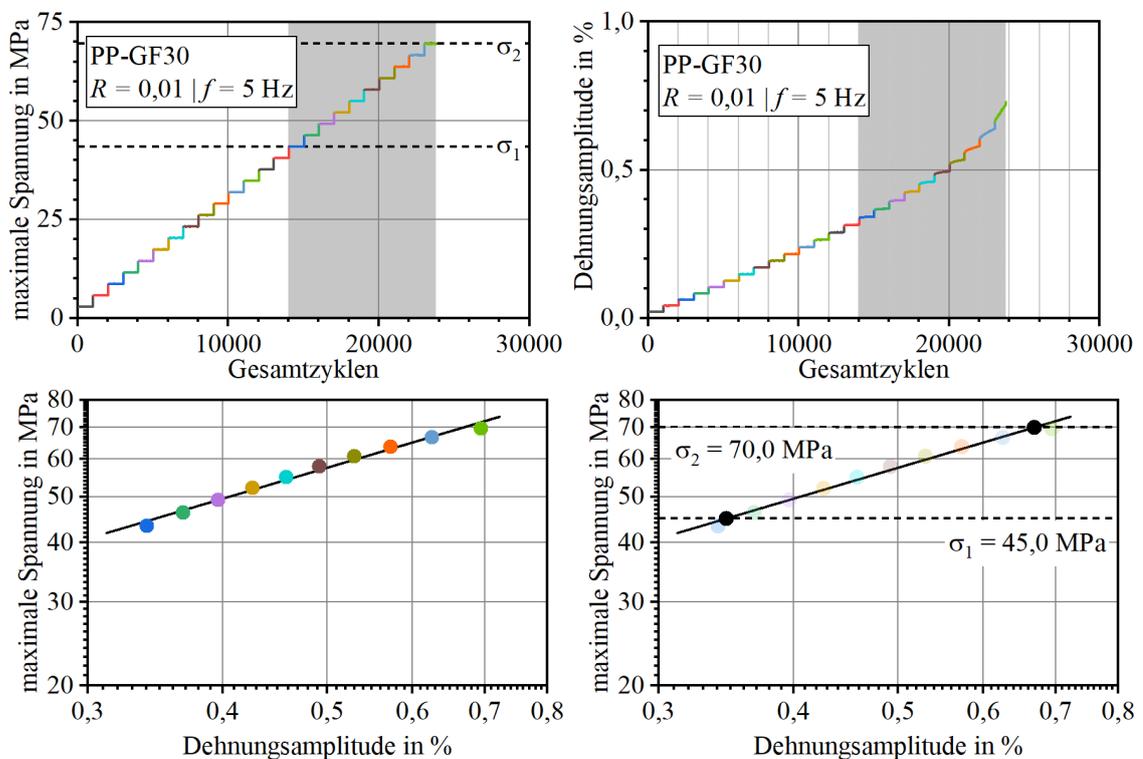


Abbildung 5.40: LSV-Ergebnisse für PP-GF30
 Oben: Verlauf der maximalen Spannung (links) und der Dehnungsamplitude (rechts)
 Unten: Auftragung der maximalen Spannung über der Dehnungsamplitude (Medianwerte jeder Stufe)

In Abbildung 5.41 sind die in den ESV gemessenen Verläufe der Dehnungsamplitude über der Lastspielzahl aufgetragen. Dabei wurde der ESV bei der Grenzspannung σ_2 bis zum Bruchversagen durchgeführt. Der ESV bei der Grenzspannung σ_1 kann bei einer Lastspielzahl von ca. $2 \cdot 10^3$ ohne Versagen beendet werden. Aus den ESV-Daten wurden dann die zur Lastspielzahl $N_x = 10^3$ gehörenden Dehnungsamplituden ermittelt, sodass sich mit der vorgegebenen Belastung ebenfalls zwei Wertepaare (farbige Punkte in Abbildung 5.41) resultieren. Dies entspricht dem zweiten Schritt in Kapitel 2.3.4.

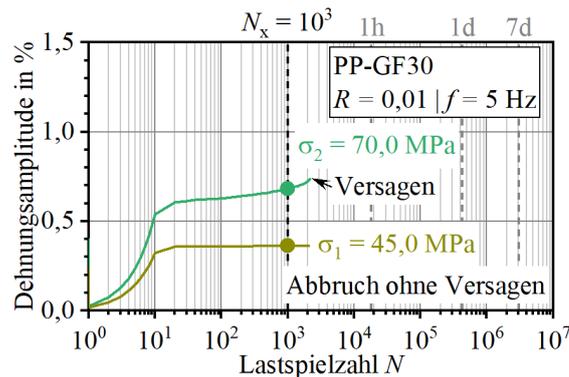


Abbildung 5.41: ESV-Ergebnisse für PP-GF30

Im dritten Schritt zur Anwendung des Phybal-Ansatzes (vgl. Kapitel 2.3.4) erfolgt der Transfer der LSV-Daten in berechnete ESV-Daten. Dabei wird ausgenutzt, dass für die Grenzspannungen σ_1 und σ_2 jeweils die zugehörigen Werte der Dehnungsamplitude im LSV und ESV bekannt sind. Damit kann die notwendige Verschiebung berechnet werden. Dazu wird zunächst das Verhältnis der Dehnungsamplituden aus ESV und LSV gebildet. Dieses wird dann über der zugehörigen maximalen Spannung aufgetragen und der Zusammenhang mit einer Potenzfunktion beschrieben (Abbildung 5.42 links). Dieser funktionale Zusammenhang kann dann verwendet werden, um für das Spannungsniveau jeder Laststufe des LSV das zugehörige Dehnungsamplitudenverhältnis zu berechnen (zusätzliche Punkte in Abbildung 5.42 rechts).

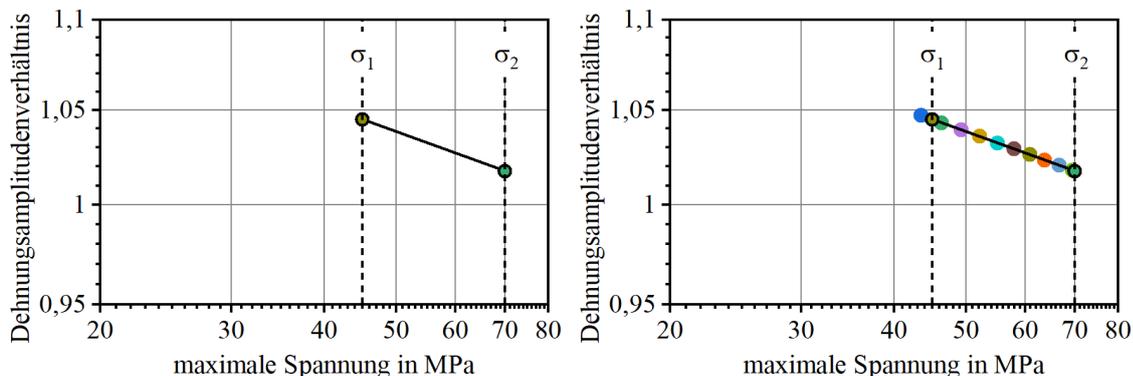


Abbildung 5.42: Dehnungsamplitudenverhältnis für PP-GF30

Durch Multiplikation der berechneten Dehnungsamplitudenverhältnisse mit der Dehnungsamplitude im LSV ergeben sich die Dehnungsamplituden der berechneten ESV-Daten (Abbildung 5.43). Für diese Daten erfolgt dann die Anpassung mittels Morrow-Gleichung.

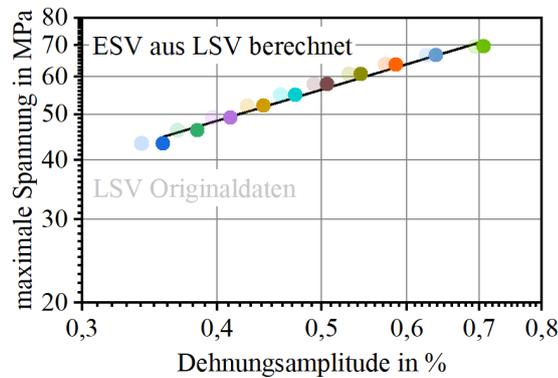


Abbildung 5.43: Aus LSV berechnete ESV-Daten für PP-GF30

Anschließend wird der Dehnungsverfestigungsexponent n' der Morrow-Gleichung (unter Berücksichtigung der werkstoffspezifischen Konstante Z) in die verallgemeinerte Phyal-Beziehung (Kapitel 5.4 Gleichung 6) eingesetzt, um den Schwingfestigkeitsexponenten b der Basquin-Gleichung zu berechnen. Mit Gleichung 5 und Einsetzen des Wertepaares aus dem ESV mit der Grenzspannung σ_2 als Referenzpunkt wird schließlich zu jedem Lastniveau des LSV die zugehörige Bruchlastspielzahl berechnet. Die berechneten Zeitfestigkeitsdaten und die mittels Basquin-Gleichung beschriebene Zeitfestigkeitsgerade sind in Abbildung 5.44 dargestellt. Hell dargestellt wurden hierbei die außerhalb des verwendeten Spannungsbereichs liegenden LSV-Daten für den aus der LSV-Auswertung (Kapitel 5.3.5) resultierenden Anpassungsbereich bzw. prognostizierten Zeitfestigkeitsbereich.

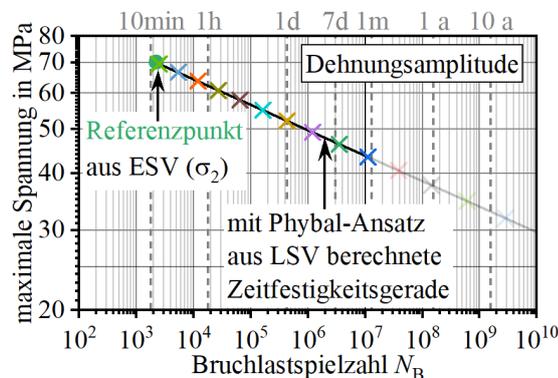


Abbildung 5.44: Aus LSV auf Basis der Dehnungsamplitude berechnete Zeitfestigkeitsgerade für PP-GF30

Mit derselben Vorgehensweise kann die Berechnung auch unter Verwendung anderer Messgrößen erfolgen. In Abbildung 5.45 sind die Resultate für die dissipierte Energiedichte und Temperaturänderung dargestellt.

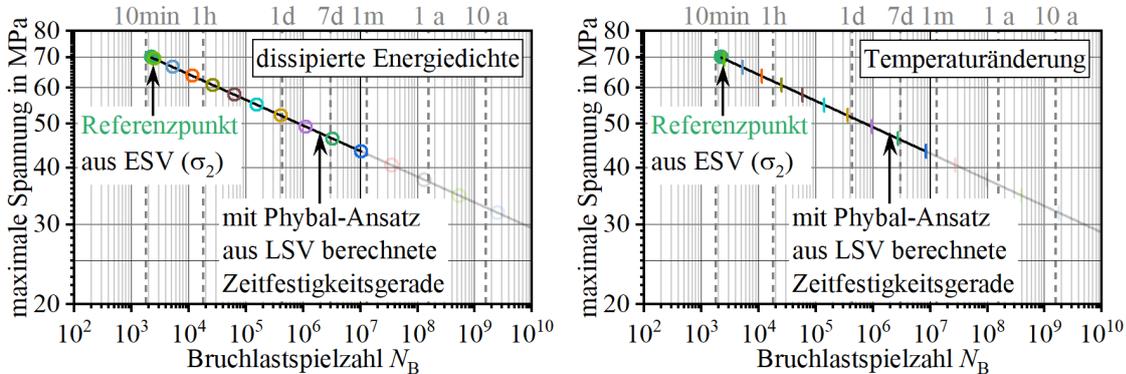


Abbildung 5.45: Aus LSV auf Basis der dissipierten Energiedichte (links) und der Temperaturänderung (rechts) berechnete Zeitfestigkeitsgerade für PP-GF30

Vergleicht man die derart berechneten Zeitfestigkeitsdaten aller Messgrößen (schwarze Symbole in Abbildung 5.46) mit den experimentell ermittelten Zeitfestigkeitsdaten (farbige Symbole und Zeitfestigkeitsgerade in Abbildung 5.46), so zeigt sich eine sehr gute Übereinstimmung. Ergänzend ist der aus den LSV prognostizierte Zeitfestigkeitsbereich hellgrau hinterlegt (Kapitel 5.3.5). Wie schon aus Abbildung 5.44 und Abbildung 5.45 ersichtlich wurde, kann keine experimentelle Validierung für derart hohe Bruchlastspielzahlen erfolgen.

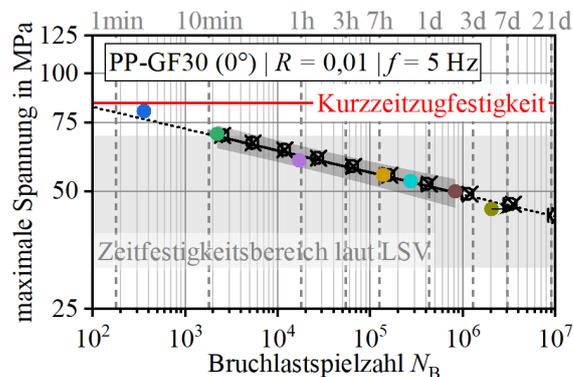


Abbildung 5.46: Vergleich der experimentell mittels ESV (farbige Messpunkte) ermittelten Zeitfestigkeitsgeraden (schwarze Linie) und den aus LSV mittels Phybal-Ansatz berechneten Punkten der Zeitfestigkeitsgeraden (schwarze Symbole: Kreuz = aus Dehnungsamplitude; Kreis = aus dissipierter Energiedichte; senkrechter Strich = aus Temperaturänderung) für PP-GF30

In Abbildung 5.47 bis Abbildung 5.49 sind die aus den LSV-Ergebnissen mittels Phybal-Ansatz berechneten Punkte der Zeitfestigkeitsgeraden in Analogie zu Abbildung 5.46 für die weiteren untersuchten Werkstoff-Lastverhältnis-Kombinationen dargestellt. Da die LSV bei Mehrfachbestimmung nahezu identische Resultate lieferten (vgl. Kapitel 5.3), ist es ausreichend die Ergebnisse für einen LSV darzustellen.

In Abbildung 5.47 sind die Ergebnisse für die beiden untersuchten POM-Materialien dargestellt. Die aus LSV berechneten Punkte der Zeitfestigkeitsgerade stimmen jeweils sehr gut mit der experimentell ermittelten Zeitfestigkeitsgeraden überein. Dies gilt auch für den extrapolierten Bereich (dargestellt für bis zu 10^7 Bruchlastspiele). Für die unterschiedlichen Messgrößen unterscheidet sich die Prognosegenauigkeit kaum. Der zuvor für die LSV und ESV beschriebene Einfluss der Probekörperdicke und/oder der POM-Materialtype zeigt sich erneut: Die Zeitfestigkeitsgerade des POM-Materials der 2 mm dicken Probekörper liegt oberhalb des POM-Materials der 4 mm dicken Probekörper.

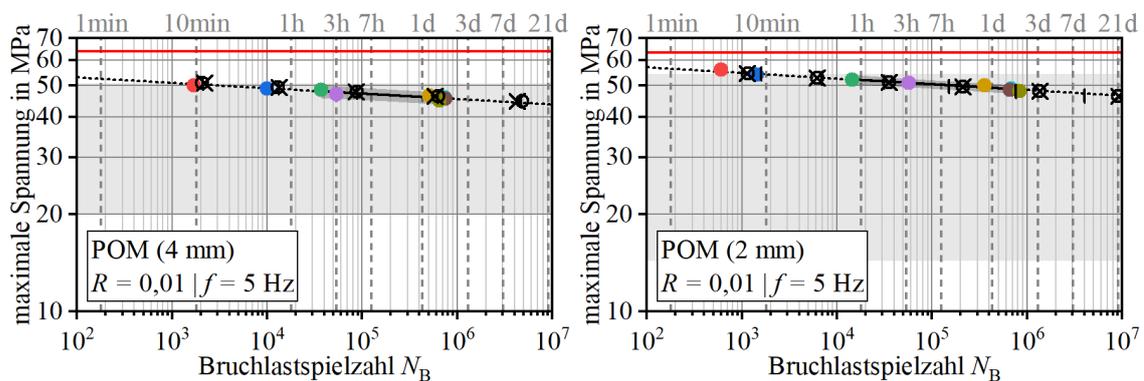


Abbildung 5.47: Vergleich der experimentell mittels ESV (farbige Messpunkte) ermittelten Zeitfestigkeitsgeraden (schwarze Linie) und den aus LSV mittels Phybal-Ansatz berechneten Punkten der Zeitfestigkeitsgeraden (schwarze Symbole: Kreuz = aus Dehnungsamplitude; Kreis = aus dissipierter Energiedichte; senkrechter Strich = aus Temperaturänderung) für 4 mm und 2 mm dicke Probekörper aus POM

Abbildung 5.48 enthält die Ergebnisse für das ungefüllte PBT sowie das mit unterschiedlichen Lastverhältnissen R geprüfte glasfasergefüllte PBT-GF30. Auch für diese beiden Werkstoffe stimmen die experimentell ermittelten und berechneten Zeitfestigkeiten, relativ unabhängig von der zur Berechnung verwendeten Messgröße, gut überein. Dies gilt erneut auch für den extrapolierten Bereich (dargestellt für bis zu 10^7 Bruchlastspiele als typische Grenze des Zeitfestigkeitsbereichs). Die bereits in Kapitel 5.3 und 5.4 beschriebene Zunahme der Bruchlastspielzahl mit zunehmenden Lastverhältnissen R ist für das glasfasergefüllte PBT-GF30-Material deutlich erkennbar. Die Zeitfestigkeitsgerade des ungefüllten PBT-Materials unterscheidet sich sowohl hinsichtlich der Lage als auch hinsichtlich der Steigung, d. h. der Spannungsabhängigkeit des Verhaltens, deutlich von dem glasfasergefüllten PBT-GF30-Material.

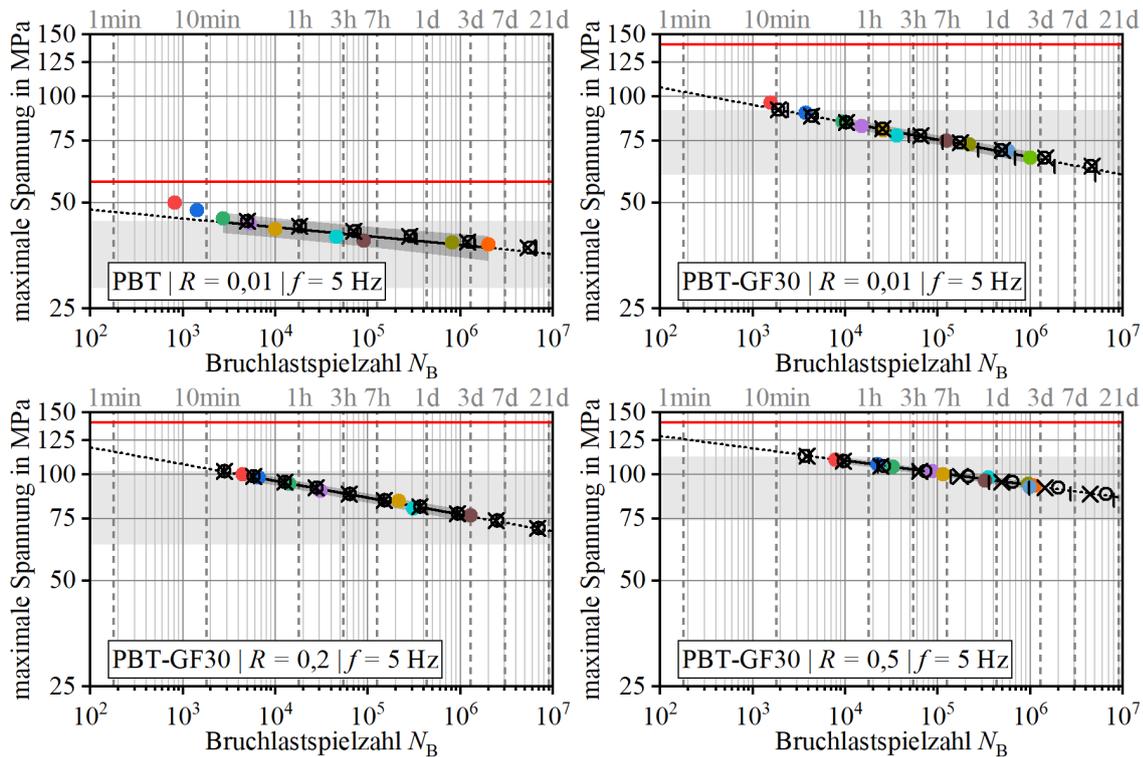


Abbildung 5.48: Vergleich der experimentell mittels ESV (farbige Messpunkte) ermittelten Zeitfestigkeitsgeraden (schwarze Linie) und den aus LSV mittels Phybal-Ansatz berechneten Punkten der Zeitfestigkeitsgeraden (schwarze Symbole: Kreuz = aus Dehnungsamplitude; Kreis = aus dissipierter Energiedichte; senkrechter Strich = aus Temperaturänderung) für ungefülltes PBT und glasfasergefülltes PBT-GF30

Ähnliche Resultate wurden auch für die in und senkrecht zur Fließrichtung aus spritzgegossenen Platten entnommenen Probekörper aus PA6-GF30 erzielt. Deutlich ist der in den ESV und LSV beobachtete Einfluss der Faserorientierung für das glasfasergefüllte PA6-GF30-Material erkennbar. Die Zeitfestigkeit ist senkrecht zur Fließrichtung und damit auch zur Faserorientierung (vgl. Kapitel 5.1.2) stark reduziert, wobei die Steigungen der Zeitfestigkeitsgeraden ähnlich sind.

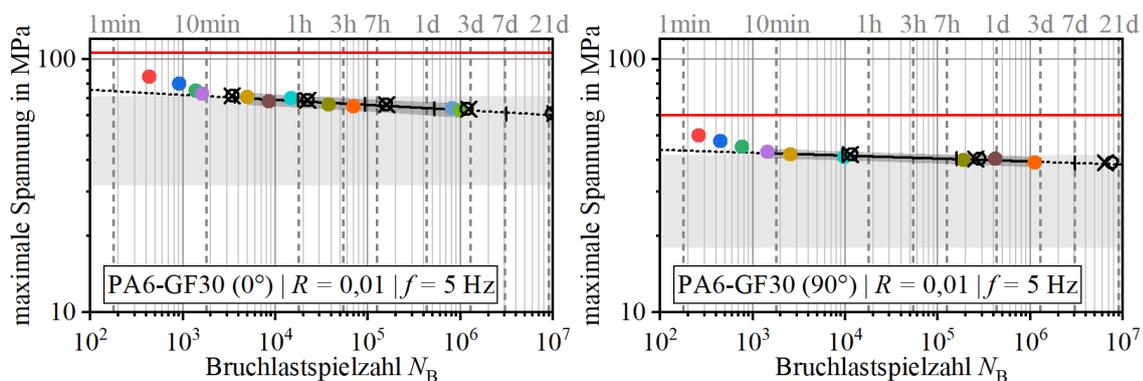


Abbildung 5.49: Vergleich der experimentell mittels ESV (farbige Messpunkte) ermittelten Zeitfestigkeitsgeraden (schwarze Linie) und den aus LSV mittels Phybal-Ansatz berechneten Punkten der Zeitfestigkeitsgeraden (schwarze Symbole: Kreuz = aus Dehnungsamplitude; Kreis = aus dissipierter Energiedichte; senkrechter Strich = aus Temperaturänderung) für in und senkrecht zur Fließrichtung aus spritzgegossenen Platten entnommene Probekörper aus PA6-GF30

Insgesamt belegen die dargestellten Ergebnisse eine gute Abschätzung der experimentellen Zeitfestigkeitsdaten durch den Phybal-Ansatz für die untersuchten Werkstoffe und die variierten Einflussfaktoren. Um den technisch relevanten Bereich von bis zu 10^6 bzw. 10^7 Bruchlastspielen abzudecken, war es nicht notwendig ESV mit der aus LSV ermittelten Grenzspannung σ_1 durchzuführen (vgl. Tabelle 5.8). Demnach erscheint im Kontext des Phybal-Ansatzes eine grobe Abschätzung der Grenzspannung σ_1 ausreichend. Während die aus LSV ermittelte Grenzspannung σ_1 im Bereich von ca. 27 % bis 66 % der Grenzspannung σ_2 lag, betrug das Niveau der Grenzspannung σ_1 der ausgewerteten ESV ca. 65 % bis 93 % der Grenzspannung σ_2 . Mit Blick auf die Prognosequalität für den interessierenden Bereich von 10^6 bzw. 10^7 Bruchlastspielen könnte dieses höhere Niveau sogar vorteilhaft sein.⁸

Schätzt man den Aufwand für die Durchführung von drei LSV mit ca. 5 h bis 7 h ab⁹ und den ESV bis zum Versagen mit maximal 10^5 Lastspielen (= 5,56 h) sowie den weiteren ESV mit Abbruch bei $2 \cdot 10^3$ bzw. $2 \cdot 10^4$ (= 0,11 h bzw. 1,11 h), so ergibt sich für die Ermittlung einer Zeitstandgeraden mittels Phybal-Ansatz (unter der Voraussetzung, dass der Wert der Konstanten Z bekannt ist) ein experimenteller Zeitaufwand von ca. 14 h (ca. 2 Arbeitstage). Diese stehen einem Aufwand von ca. 56 h bis 556 h = 23 d für einen einzigen Wöhler-Versuch mit einer Bruchlastspielzahl von 10^6 bis 10^7 gegenüber – ohne, dass ein Versagen im angestrebten Lastspielzahlbereich garantiert ist. Der Zeitaufwand für die Ermittlung einer vollständigen Zeitstandgerade ist noch wesentlich größer. Selbst bei konservativer Einschätzung ermöglicht der Phybal-Ansatz demnach eine Zeit- und damit auch Kostenreduktion im Bereich von bis zu ca. 90 %.

⁸ Die mittels Morrow-Gleichung angepassten ESV-Daten bilden in der doppel-logarithmischen Darstellung nur näherungsweise Geraden. Daher ist die Abschätzung der Zeitfestigkeitsgeraden aus den LSV-Daten mittels Phybal-Ansatz umso passender, je weniger die Spannung des abzuberechnenden ESV (σ_1) vom zur höchsten interessierenden Bruchlastspielzahl der Zeitfestigkeitsgeraden gehörenden Spannungsniveau abweicht.

⁹ Bei 5 Hz entsprechen 30.000 bis 40.000 Lastzyklen einer Prüfdauer von 1,67 h bis 2,22 h.

6 Zusammenfassung

Wenn Werkstoffe bzw. Bauteile in Langzeitanwendungen zyklischen mechanischen Beanspruchung ausgesetzt sind, muss dies bereits bei der Werkstoffauswahl bzw. Bauteil-auslegung berücksichtigt werden. Dazu werden i. d. R. sogenannte Wöhler-Diagramme herangezogen, welche angeben wie viele Lastspiele in Abhängigkeit der äußeren Beanspruchung ertragen werden können bevor Versagen auftritt. Dabei ist insbesondere der Zeitfestigkeitsbereich relevant, der bei thermoplastischen Kunststoffen i. d. R. im Bereich von 10^4 bis 10^7 Lastspielen liegt. Da die experimentelle Ermittlung durch entsprechend langlaufende Versuche sehr aufwändig und damit teuer ist, wurde im Rahmen der Forschungsarbeiten untersucht, ob der für Metalle entwickelte Ansatz der physikalisch basierten Lebensdauerberechnung (kurz „Phybal-Ansatz“) auch für thermoplastische Kunststoffe adaptiert werden kann. Neben den Werkstoffen PBT und PP-GF30 wurde dabei für POM auch der Einfluss der Probekörperdicke, für PBT-GF30 der Einfluss des Lastverhältnisses R und für PA6-GF30 der Einfluss der Faserorientierung untersucht. Für alle untersuchten thermoplastischen Kunststoffe wurde das Zeitfestigkeitsverhalten in Versuchen beobachtet, welches in Wöhler-Diagrammen dargestellt und mit einer Zeitfestigkeitsgeraden beschrieben werden konnte (AH 1). Durch Laststeigerungsversuche (LSV) konnten jeweils Grenzspannungen für den Zeitfestigkeitsbereich abgeschätzt werden (AH 2). Der Bruchpunkt als Näherung für die Grenze zu hohen Lasten konnte experimentell bestätigt werden, für die Schädigungsinitiierung als Näherung für die Grenze zu niedrigen Lasten war eine Überprüfung aufgrund der sehr hohen zu erwartenden Bruchlastspielzahlen nicht möglich. Verschiedene Messgrößen (Dehnungsamplitude, dissipierte Energiedichte und Temperaturänderung) konnten als Funktion der Spannung mithilfe von Morrow-Gleichungen beschrieben werden, sodass sich in doppel-logarithmischer Darstellung Anpassungsgeraden ergaben (AH 3). Dies galt sowohl für LSV als auch für Einstufenversuche (ESV) (AH 4). Die Zeitfestigkeitsgeraden im doppel-logarithmischen Wöhler-Diagramm konnten mithilfe von Basquin-Gleichungen beschrieben werden (AH 5). Für die Berechnung von Zeitfestigkeitsgeraden aus LSV unter Zuhilfenahme eines Referenzbruchpunktes aus einem bis zum Bruchversagen durchgeführten ESV muss der Dehnverfestigungsexponent der Morrow-Gleichung in den Schwingfestigkeitsexponent der Basquin-Gleichung umgerechnet werden (Phybal-Beziehung). Dabei stellte sich heraus, dass die für Metall geltende Phybal-Beziehung für

thermoplastische Kunststoffe nicht generell zutreffend ist. Da beide Exponenten je nach Messgröße und Material unterschiedlich variieren können, ist diese „Beziehung“ nicht konstant. Es konnte aber erfolgreich demonstriert werden, dass die Phybal-Beziehung durch Einführung einer werkstoffspezifischen Konstante Z anstelle des für Metalle geltenden (vermutlich empirisch ermittelten) Faktors mit dem Wert 5 verallgemeinert werden kann. In umfangreichen Arbeiten wurde diese werkstoffspezifischen Konstante Z für die untersuchten thermoplastischen Kunststoffe ermittelt. Der Wert der Konstanten hängt, je nach betrachteter Messgröße, auch von weiteren Einflussgrößen ab. Verglichen mit dem Einfluss der Faserorientierung, war der Einfluss der Probekörperdicke und des Lastverhältnisses gering. Eine Überwachung der Probekörpertemperatur während der Versuche ist zu empfehlen. Da die messtechnische Erfassung jedoch potenziell stör anfällig ist, sind andere Messgrößen wie die Dehnungsamplitude oder die dissipierte Energiedichte für die Auswertung zu bevorzugen. Nach Ermittlung der werkstoffspezifischen Konstanten Z konnte die Anwendbarkeit des Phybal-Ansatzes für die beschleunigte Ermittlung der Zeitfestigkeit der untersuchten thermoplastischen Kunststoffe erfolgreich demonstriert werden. Unter der Prämisse, dass passende werkstoff- und ggf. beanspruchungsspezifische Konstanten Z zukünftig bekannt wären oder mit geringem Aufwand ermittelt werden könnten, könnte das Verfahren deutliche Zeit- und somit Kostenreduktionen bei der Charakterisierung von Kunststoffen im Zeitfestigkeitsbereich bewirken (AH 6). Entsprechende Forschungsaktivität zur Bestimmung der Konstanten Z könnten einerseits versuchen auf bekannten Langzeitdaten weiterer Werkstoffe aufzubauen oder andererseits funktionale Abhängigkeiten von einfacher zugänglichen Materialparametern (bspw. aus Kurzzeitversuchen) zu finden. Zudem sollte überprüft werden, ob der Einfluss verschiedener Einflussgrößen (bspw. R -Verhältnis, Faserorientierung, Füllstoffanteile, Beanspruchungsarten) über Abminderungsfaktoren vorgenommen werden können.

7 Literaturverzeichnis

- [Bas10] O. H. Basquin: „*The Exponential Law of Endurance Tests*“, Proceedings, American Society for Testing and Materials, vol. 10, Part II, (1910)
- [BBB21] C. Balzer; H. Beckensträter; M. Brückner et al.: „*Langzeiteigenschaften von vibrationsgeschweißten Polyamidverbindungen*“, 1. Auflage, Shaker Verlag, Düren (2021)
- [BD21] K. Block; F. Dreier: „*Die Ermüdungsfestigkeit zuverlässig und kostengünstig ermitteln – Das interaktive Verfahren*“, Materials Testing, vol. 40, Issue 3 (2021)
- [BRR14] R. Bürgel; H. A. Richard; A. Riemer: „*Werkstoffmechanik – Bauteile sicher beurteilen und Werkstoffe richtig einsetzen*“, 2. Auflage, Springer Verlag, Wiesbaden (2014)
- [Ehr02] G. W. Ehrenstein: „*Mit Kunststoffen konstruieren: Eine Einführung*“, 2. Auflage, Carl Hanser Verlag, München Wien (2002)
- [EM19] S. Einbock; F. Mailänder: „*Betriebsfestigkeit mit FEM – Schnell verstehen und anwenden*“, 2. Auflage, Books on Demand, Norderstedt (2019)
- [Fes12] T. M. Fesich: „*Festigkeitsnachweis und Lebensdauerberechnung bei komplex mehrachsiger Schwingbeanspruchung*“, Dissertation, Universität Stuttgart (2012)
- [Fis17] C. H. F. Fischer: „*Einfluss der Versuchsfrequenz auf die Wöhlerlinie der Aluminiumknetlegierung EN AW-6060*“, Dissertation, Technische Universität Darmstadt (2017)
- [FPL12] H. Paul; J. Fleckenstein; A. Büter et al.: „*Ermittlung der mechanischen Eigenschaften von langfaserverstärkten Thermoplasten (LFT) auch im Hinblick auf den Einsatz in Materialverbänden*“, Konferenzschrift, Deutscher Verband für Materialforschung und -prüfung, DVM-Tag Berlin (2012)
- [GFG13] C. Gaier; H. Fleischer; C. Guster et al.: „*Influence of Fiber Orientation, Temperature and Moisture on the Fatigue Behavior of Injection Molded Fiber Reinforced Thermoplastics*“, Materials Testing, vol. 52, Issue 7-8 (2014)
- [GHB19] B. Gerets; T. Hochrein; M. Bastian: „*Mechanisches Langzeitverhalten additiv gefertigter Kunststoffbauteile*“, 1. Auflage, Shaker Verlag, Düren (2019)
- [Gra29] O. Graf: „*Die Dauerfestigkeit der Werkstoffe und der Konstruktionselemente – Elastizität und Festigkeit von Stahl, Stahlguß, Gußeisen, Nichteisenmetall, Stein, Beton, Holz und Glas bei oftmaliger Belastung und Entlastung*“, 1. Auflage, Springer Verlag, Berlin (1929)
- [Gus09] C. Guster: „*Ansätze zur Lebensdauerberechnung von kurzglasfaserverstärkten Polymeren*“, Dissertation, Montanuniversität Leoben (2009)

- [HVF19] T. S. Hartwich; H. Völkl; M. Franz et al.: „Zur Notwendigkeit eines konstruktionsmethodischen Ansatzes für die zeitfeste Auslegung endlosfaserverstärkter Kunststoffbauteile“, Tagungsbeitrag, 30. DfX-Symposium, Jesteburg (2019)
- [JKG08] R. P. M. Janssen; D. de Kanter; L. E. Govaert et al.: „Fatigue Life Predictions for Glassy Polymers: A Constitutive Approach“, *Macromolecules* vol. 41, Issue 7 (2008)
- [Kla09] J. H. A. H. Klammer: „Strukturmechanik und Vibroakustik von CFK-Flugzeugrümpfen“, Dissertation, Technische Universität München (2009)
- [Koc10] I. Koch: „Modellierung des Ermüdungsverhaltens textilverstärkter Kunststoffe“, Dissertation, Fakultät Maschinenwesen, Technischen Universität Dresden (2010)
- [KSK14a] H. S. Kramer; P. Starke; M. Klein et al.: „Cyclic hardness test PHYBALCHT – Short-time procedure to evaluate fatigue properties of metallic materials“, *International Journal of Fatigue*, vol. 63 (2014)
- [KSK14b] H. S. Kramer; P. Starke; M. Klein et al.: „PHYBALCHT: Kurzzeitverfahren zur Abschätzung der Ermüdungseigenschaften metallischer Werkstoffe“, *Journal of Heat Treatment and Materials Mat.* 69 (2014)
- [LK79] O. R. Lang; R. Kernen: „Dimensionierung komplizierter Bauteile aus Stahl im Bereich der Zeit- und Dauerfestigkeit“, *Materials Science & Engineering Technology*, vol. 10, Issue 1, pp 24-29 (1979)
- [MBK21] G. Menges; N. Brand; B. Kleinemeier et al.: „Anleitung zur Berücksichtigung der Eigenerwärmung dynamisch belasteter Kunststoffbauteile“, *Materials Testing*, vol. 18, Issue 1 (2021)
- [Mor65] J. D. Morrow: „Cyclic Plastic Strain Energy and Fatigue of Metals“, in „Internal Friction, Damping, and Cyclic Plasticity“, B. J. Lazan (Hrsg.), American Society for Testing and Materials, Baltimore, Md. (1965)
- [Mös09] A. Mösenbacher: „Ansätze zur spannungsbasierenden und bruchmechanischen Charakterisierung des Ermüdungsverhaltens von glasfaserverstärktem Polyamid“, Diplomarbeit, Lehrstuhl für Allgemeinen Maschinenbau, Montanuniversität Leoben (2009)
- [MWG13] E. Moosbrugger; R. Wieland; P. Gumnior et al.: „Design and Dimensioning of High Loaded Plastic Parts in Engine Compartments“, *Materials Testing*, vol. 47, Issue 7-8 (2013)
- [OH72] K. Oberbach, G. Heese: „The influence of frequency and loading history on the fatigue behaviour of plastics“, *Materials Testing*, vol. 14, Issue 6, pp. 173-204 (1972)
- [PAK19] C. Pommer; F. Achereiner; E. Kraus: „Dynamische Eigenschaften von Ultraschallschweißverbindungen“, 1. Auflage, Shaker Verlag, Düren (2019)

- [PKE20] L. V. Pastukhov; M. J. W. Kanters; T. A. P. Engels et al.: „*Physical background of the endurance limit in poly(ether ether ketone)*“, Journal of Polymer Science, vol. 58, Issue 5 (2020)
- [RV07] D. Radaj; M. Vormwald: „*Ermüdungsfestigkeit – Grundlagen für Ingenieure*“, 3. neu bearbeitete und erweiterte Auflage, Springer Verlag, Berlin Heidelberg (2007)
- [Son13] C. M. Sonsino: „*Betriebsfestigkeit — Eine Einführung in die Begriffe und ausgewählte Bemessungsgrundlagen*“, Materials Testing, vol. 50, Issue 1-2 (2013)
- [SSK18] M. Stommel; M. Stojek; W. Korte: „*FEM zur Berechnung von Kunststoff- und Elastomerbauteilen*“, 2. neu bearbeitete und erweiterte Auflage, Carl Hanser Verlag, München (2018)
- [SWE06] P. Starke; F. Walther; D. Eifler: „*PHYBAL—A new method for lifetime prediction based on strain, temperature and electrical measurements*“, International Journal of Fatigue, vol. 28 (2006)

8 Anhang

8.1 Prüfaufbau für Laststeigerungs-, Einstufen- bzw. Wöhler-Versuche



Abbildung 8.1: Gesamtsicht des Prüfaufbaus (links) und Blick in die Temperierkammer (rechts)

8.2 Eigenerwärmung

8.2.1 Laststeigerungsversuche

In Abbildung 8.2 ist die Temperaturentwicklung von zwei LSV an POM dargestellt, die sich nur durch das Fehlen (links) bzw. den Einsatz (rechts) der in Abbildung 8.1 zu sehenden Temperierkammer unterscheiden. Durch den Einsatz der Temperierkammer wird die Temperaturzunahme ΔT deutlich reduziert und der Probekörper versagt später.

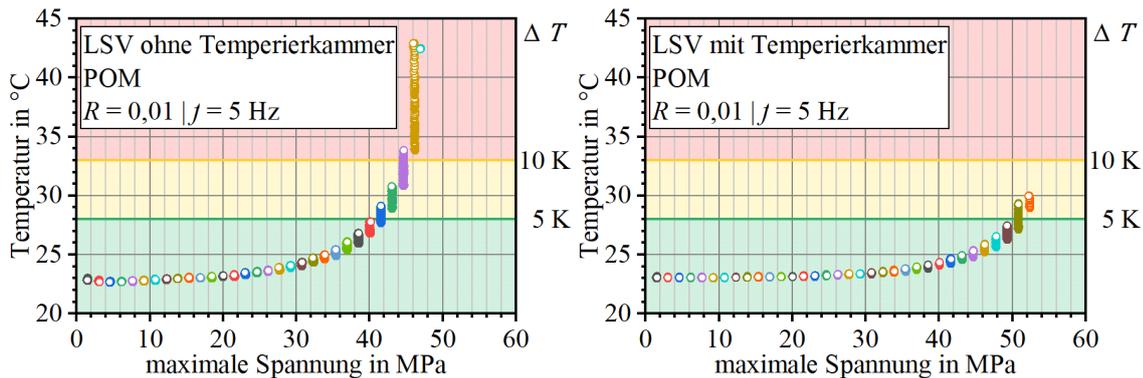


Abbildung 8.2: Temperaturentwicklung in LSV auf einer Schwingprüfmaschine ohne Temperierkammer (links) und mit Temperierkammer (rechts) für POM

8.2.2 Einstufenversuche

In Abbildung 8.3 ist die Temperaturentwicklung von zwei ESV an PBT-GF30 mit einer maximalen Spannung von 75 MPa dargestellt, die sich nur durch das Fehlen (links) bzw. den Einsatz (rechts) der in Abbildung 8.1 zu sehenden Temperierkammer unterscheiden. Durch den Einsatz der Temperierkammer wird die Temperaturzunahme zuverlässig reduziert und der Probekörper versagt später.

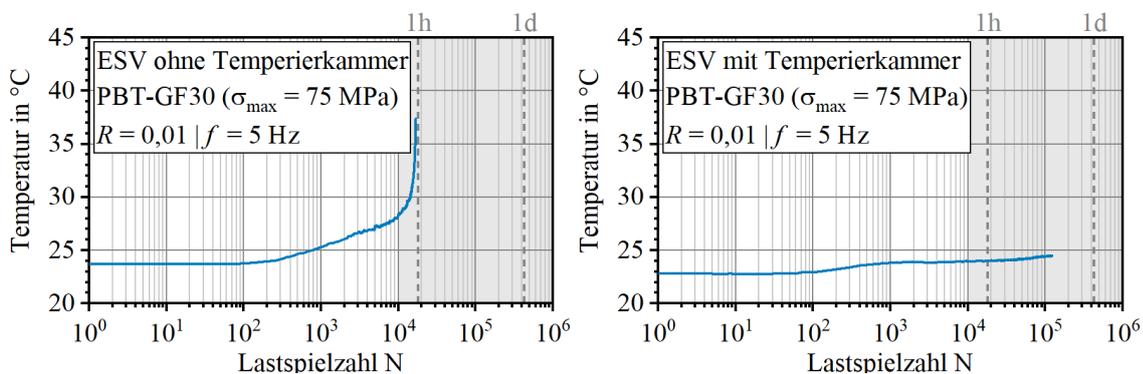


Abbildung 8.3: Temperaturentwicklung in ESV auf einer Schwingprüfmaschine ohne Temperierkammer (links) und mit Temperierkammer (rechts) für PBT-GF30