Industrielle Gemeinschaftsforschung

Schlussbericht vom 22.11.2023

zu IGF-Vorhaben Nr. 21327 N

Thema

Entwicklung einer Prüfmethodik für endlosfaserverstärkte duroplastische Kunststoffe basierend auf Frequenz- und Temperatureinflüssen zur Verringerung des Prüfaufwandes für Ermüdungsprüfungen als Grundlage einer zuverlässigeren und effizienteren Auslegung von Strukturen aus faserverstärkten Kunststoffen

Berichtszeitraum

01.09.2020-31.05.2023

Forschungsvereinigung

Kunststoffverarbeitung

Forschungseinrichtung(en)

Institut für Kunststoffverarbeitung in Industrie und Handwerk an der RWTH Aachen - IKV

Forschungsnetzwerk Mittelstand

Gefördert durch:

Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

KURZZUSAMMENFASSUNG

Endlosfaserverstärkte Kunststoffe (FVK) werden in hochbeanspruchten Strukturen eingesetzt, bei denen besonders hohe Anforderungen an mechanische Eigenschaften und auch Integrität gestellt werden. Beispiele für den Einsatz dieser Werkstoffklasse sind Windenergieanlagen, Komponenten für die Automobil- und die Luftfahrtindustrie. Ermüdungsprüfungen von kontinuierlich faserverstärkten Kunststoffen sind jedoch aufgrund werkstoffspezifischer Eigenschaften zeit- und kostenintensiv, was für KMU eine hohe Barriere darstellt, neue Werkstoffkombinationen für strukturelle Anwendungen einzusetzen. Darüber hinaus erreichen beispielsweise die ersten Windenergieanlagen bereits heute die Auslegungslebensdauer von 20 Jahren, so dass eine schnelle und kostengünstige Methode zum Nachweis der Betriebsfestigkeit für deren fortlaufenden Betrieb benötigt wird. In der Literatur werden dazu verschiedene Ansätze zur Verkürzung der Prüfdauer und Verringerung des Prüfaufwandes zur Bestimmung des Ermüdungsverhaltens von kontinuierlichen faserverstärkten Kunststoffen diskutiert, die jedoch teilweise unzulässige Annahmen treffen oder entscheidende Werkstoffeffekte nicht berücksichtigen.

Ziel dieses Forschungsvorhabens war es daher, eine neuartige Prüfmethodik zur Ermittlung des Ermüdungsverhaltens von kontinuierlich unidirektional faserverstärkten Kunststoffen unter Reduktion der Prüfzeit sowie des Prüfumfanges zu erproben. Die zugrundeliegende Hypothese war, dass eine definierte Substitution der dynamisch-zyklischen Ermüdungsprüfungen durch andere zeitraffende experimentelle Prüfverfahren unter Berücksichtigung der dominierenden Schädigungsmechanismen in den zeit- und lastspielzahlabhängigen Ermüdungsbereichen (Kurzzeit-, Zeit- und Langzeitfestigkeit) eine Beschleunigung der Kennwertermittlung ermöglicht. Als Substitutionsmöglichkeiten wurden die quasistatische Zugprüfung, die dynamisch-zyklische Schwingprüfung mit erhöhter Frequenz sowie die Zeitstandfestigkeitsprüfung nach der Stepped-Isothermal-Methodik untersucht. Zur Überprüfung der Hypothese wurden sowohl herkömmliche dynamisch-zyklische Ermüdungsprüfungen als auch die neue Prüfmethodik in faserparalleler sowie fasersenkrechter Belastungsrichtung für kontinuierlich unidirektional glasfaserverstärktes Epoxid durchgeführt.

Als Ergebnis dieses Forschungsvorhabens geht hervor, dass die vorgeschlagene Methodik für kontinuierlich unidirektional glasfaserverstärktes Epoxid erfolgreich umgesetzt wurde. Für den Kurzzeitfestigkeitsbereich (bis ca. 10^3 Lastwechsel) liegen die dynamisch-zyklischen Ermüdungsversuche mit einer Fasersenkrechtbelastung von 85 % der Zugfestigkeit noch im Bereich der Spannweite der Zugversuche. Andererseits wird bei faserparalleler Belastungsrichtung eine Beanspruchung von mehr als 85 % der Zugfestigkeit benötigt. Damit konnte gezeigt werden, dass Zugversuche eine Annäherung an den Kurzzeitfestigkeitsbereich ermöglichen.

Für den Zeitfestigkeitsbereich (von 10^4 bis ca. 10^6 Lastwechsel) ergeben sich bei der Schwingfestigkeitsprüfung bei 15 Hz Prüffrequenz ähnliche Versagenszeiten wie bei den Versuchen bei 5 Hz Prüffrequenz. Es kann daher nicht von einer Verkürzung der Dauer der Prüfung bei der untersuchten Prüffrequenz gesprochen werden. Die Methodik deutet jedoch darauf hin, dass bei höheren Prüffrequenzen die Prüfdauer verkürzt werden könnte. Für die Beschleunigung der Ermüdungsversuche im Langzeitfestigkeitsbereich erwies sich die Stepped-Isothermal-Methodik jedoch nur dann als geeignet, wenn eine Kriechdehnung vorlag.

Im Forschungsprojekt konnte festgestellt werden, dass eine mögliche Reduktion des Prüfumfangs mit der neuen Methodik erreicht werden kann. Allerdings müssen die Prüfbedingungen für die einzelnen Substitutionsversuche angepasst werden. Diese Prüfbedingungen variieren für die faserparallele und die fasersenkrechte Belastungsrichtung aufgrund der unterschiedlich wirkenden Schädigungsmechanismen, was zu einem zusätzlichen Aufwand bei der realen Umsetzung der Methodik führen kann.

Das Ziel dieses Vorhabens wurde erreicht.

DANK

Die im nachfolgenden beschriebenen und erläuterten Untersuchungen wurden im Rahmen des IGF-Vorhabens 21327 N der Forschungsvereinigung Kunststoffverarbeitung über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsförderung und – entwicklung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Bundestages gefördert.

Der vorliegende Bericht ist der Schlussbericht des Forschungsvorhabens.

Ein wesentlicher Teil der Ergebnisse wurde durch wissenschaftliche Mitarbeitende erarbeitet und teilweise von Studenten der RWTH Aachen in Form von Studienarbeiten niedergelegt. Eine Kurzfassung von jeder dieser Arbeiten befindet sich im Anhang. Diese Arbeiten sind nicht zur Veröffentlichung vorgesehen, können aber in der Bibliothek des Instituts für Kunststoffverarbeitung eingesehen werden. Eine Gesamtdarstellung des Themenkreises, zu dem dieses Forschungsvorhaben gehört, wird in einem technisch-wissenschaftlichen Bericht des Instituts für Kunststoffverarbeitung nach Abschluss der Arbeiten erfolgen.

Dem Deutschen Bundestag, dem BMWi und der AiF-Mitgliedsvereinigung Kunststoffverarbeitung gilt unser Dank. Darüber hinaus gilt unser Dank allen Firmen, die durch Bereitstellung von Werkstoffen, Maschinen und sonstigen Sachmitteln diese Arbeit unterstützt haben.

Danken möchten wir auch den Mitarbeitern der Fachbeiratsgruppe Strukturberechnung und Werkstofftechnik, die durch Rat und Tat die Untersuchungen unterstützt haben.

1 ZUSAMMENFASSUNG 1

2 EINLEITUNG UND ZIELSETZUNG 4

3 GRUNDLAGEN 6

3.1 Schädigungsmechanismen von UD-FVK unter zyklischen Beanspruchungen 6
3.2 Langzeitfestigkeitsverhalten von UD-FVK (Kriechen und Langzeitfestigkeit) 7
3.3 Vorarbeiten der Forschungseinrichtung 8

4 PROBEKÖRPERFERTIGUNG UND UNTERSUCHUNGSMETHODEN 10

4.1 Verwendete Werkstoffe 10
4.2 Herstellung von GFK-Probekörperplatten im Nasswickelverfahren 10
4.3 Bestimmung der Schädigungsinitiierung 13
4.4 Ermittlung des Ermüdungsverhaltens von UD-GFK bei 5 Hz Prüffrequenz 17
4.4.1 Ermüdungsverhaltens von UD-GFK bei fasersenkrechter Beanspruchung (90°) 18
4.4.2 Ermüdungsverhaltens *von UD-GFK bei fasersenkrechter Beanspruchung (0°)* 18
4.5 Entwicklung eines Prüfstands mit Temperaturführung 18
4.6 Versuchsaufbau der Zeitstandprüfung 19

5 ERKENNTNISSE DER UNTERSUCHUNGSMETHODEN 21

5.1 Beschleunigung der Lebensdauerprüfungen 21
5.1.1 Beschleunigte Prüfung des Kurzzeitfestigkeitsbereichs mittels Zugversuches 21
5.1.2 Beschleunigte Prüfung des Zeitfestigkeitsbereichs mittels Schwingprüfungen bei erhöhter Frequenz mittels adaptiver isothermer Temperierung 21
5.1.3 Beschleunigung des Langzeitfestigkeitsbereichs mittels beschleunigten Zeitstandfestigkeitsprüfungen 22

6 FAZIT UND AUSBLICK 28

7 EINSATZ VON GERÄT UND WISSENSCHAFTLICH-TECHNISCHEM PERSONAL 30

8 WIRTSCHAFTLICHE RELEVANZ FÜR KMU 31

8.1 Wirtschaftliche Bedeutung der Forschungsergebnisse für KMU 31

9 PLAN ZUM ERGEBNISTRANSFER IN DIE WIRTSCHAFT 32

10 VERÖFFENTLICHUNGEN UND STUDENTISCH-WISSENSCHAFTLICHE ARBEITEN 35

11 PARAMETER, ABKÜRZUNGEN, FORMELZEICHEN, INDIZES 38

11.1 Parameter 38
11.2 Abkürzungen 39
11.3 Formelzeichen 39
11.4 Indizes 40

12 LITERATUR 41

1 ZUSAMMENFASSUNG

Deskriptoren: Zeitstandverhalten, Ermüdung, Temperatur, Epoxidharz, GFK, Versagen dynamisch,

Schlagworte: Ermüdung, Stepped-Isothermal-Methode, Zeitstandfestigkeit

Faserverstärkte Kunststoffe weisen aufgrund ihrer guten gewichtsspezifischen mechanischen Eigenschaften ein hohes Leichtbaupotenzial auf. Sie eignen sich daher für strukturrelevante Anwendungen vom Energiesektor über die Automobilindustrie bis hin zur Luftfahrt. Durch das hohe Leichtbaupotential, die hohe Beständigkeit gegen Umwelteinflüsse aber auch das gutmütige sukzessive Ermüdungsverhalten dieser Werkstoffklasse, können nachhaltig Ressourcen geschont werden. Um dieses Potenzial bestmöglich auszuschöpfen, ist die Kenntnis zum Ermüdungsverhaltens von faserverstärkten Kunststoffen daher unerlässlich. Die derzeitigen notwendigen experimentellen Prüfmethoden sind jedoch äußerst zeit- und kostenaufwändig und somit nicht für jedes Unternehmen umsetzbar. Eine beschleunigte und kosteneffiziente Prüfmethodik zur Bestimmung des Ermüdungsverhaltens von faserverstärkten Kunststoffen würde jedoch den Markteintritt von Innovationen beschleunigen.

Dies bildet den Ausgangspunkt zur Erprobung eines neuartigen Prüfmethodik zur beschleunigten Ermüdungsprüfung mit reduzierten Prüfumfang am Beispiel der kontinuierlich unidirektional faserverstärkten Kunststoffe in faserparalleler sowie fasersenkrechter Belastungsrichtung in diesem Forschungsvorhaben. Die neuartige Prüfmethodik unterlag dabei folgender Hypothese:

„Durch den Austausch der dynamisch-zyklischen Ermüdungsprüfungen durch beschleunigte Prüfverfahren unter Berücksichtigung der in den jeweiligen Bereichen der Kurzzeit-, Zeit- und Langzeitfestigkeit vorherrschenden Schädigungsmechanismen können die Prüfzeit und der Prüfumfang für jeden Bereich reduziert werden. Anschließend erfolgt die Korrelation der Prüfergebnisse zu einer Master-Wöhlerkurve, die eine vergleichbare Aussage zur standardisierten dynamisch-zyklischen Ermüdungsprüfung bietet.“

Zunächst wurde dafür das dynamisch-zyklische Ermüdungsverhalten von kontinuierlich unidirektional glasfaserverstärkten Kunststoffen (UD-GFK) durch standardisierte Ermüdungsprüfungen als Referenz analysiert. Anschließend wurde eine Aufteilung des Ermüdungsverhaltens in die drei zeit- und lastspielzahlabhängigen Bereiche der Kurzzeit-, Zeit- und Langzeitfestigkeit vorgenommen und ein entsprechend der vorliegenden Schädigungsmechanismen geeignetes beschleunigtes Prüfverfahren für jeden Bereich identifiziert.

Als Substitution der Ermüdungsprüfungen und zur Verkürzung der Prüfdauer wurden quasistatische (QS) Zugversuche, uniaxiale Ermüdungsversuche mit erhöhter Frequenz und adaptiver isothermer Prüfkörpertemperierung und sowie beschleunigte Zeitstandfestigkeitsversuche nach der Stepped-Isothermal-Methode unter Ausnutzung der Zeit-Temperatur-Verschiebung untersucht.

Die Schädigungsinitiierung und die Möglichkeit zur Abbildung des Kurzzeitfestigkeitsverhaltens wurden mittels quasistatischer Zugversuche und einer parallel durchgeführten Schallemissionsanalyse (SEA) untersucht. Mittels der Ergebnisse der Schallemissionsanalyse wurde das Vorhandensein einer Mikroschädigungsgrenze nach *Talreja et al.* experimentell untersucht [Tal81].

Eine Möglichkeit zur Anhebung der Prüffrequenz von 5 Hz auf 15 Hz geschah durch den Vergleich der Ergebnisse zwischen der herkömmlichen Ermüdungsprüfung bei 5 Hz und einer Ermüdungsprüfung bei 15 Hz, wobei eine adaptive isotherme Temperierung des Prüfkörpers angewendet wurde.

Zur Reduzierung des Prüfumfangs im Langzeitfestigkeitsbereich wurde die Möglichkeit zur Substitution der Ermüdungsversuche durch die Anwendung von zeitraffenden Zeitstandfestigkeitsprüfungen nach der sogenannten Stepped-Isothermal-Methode (SIM) untersucht.

Über einen Vergleich der Ergebnisse aus der standardisierten Ermüdungsprüfung sowie der neuartigen Prüfmethode wurden die folgenden Erkenntnissen gelangt:

- Eine Reduktion des Prüfumfanges durch eine Senkung der Anzahl zu testender Prüfkörper erweist sich nur dann als möglich, wenn eine hohe Qualität der Prüfkörper vorhanden ist. So sind die Reduzierung von Lufteinschlüssen in der Polymermatrix, unbeschädigte Kanten und Oberflaschen der Probekörper sowie ein konstanter Faservolumengehalt wünschenswert. In diesem Forschungsvorhaben wurde explizit die Mindestanzahl von drei Prüfkörpern definiert. Da eine homogene Qualität der Prüfkörper in der Realität jedoch nicht in diesem Umfang zu garantieren ist, können einzelne Ausreißer einen großen Einfluss auf die erzielten Ergebnisse zeigen. Besonders im Rahmen der Produktauslegung hinsichtlich der Betriebsfestigkeit, sollte eine reale Abbildung des Ermüdungsverhaltens des Werkstoffes vorliegen. Daher empfiehlt sich den Prüfumfang nicht zu reduzieren und eine Mindestanzahl an fünf Prüfkörpern pro Versuchspunkt beizubehalten.
- Die Anwendbarkeit der vorgeschlagenen Methode hängt stark von der Qualität der Probekörper sowie der Anzahl der Versuchspunkte ab. Darüber hinaus wurde festgestellt, dass auch die Belastungsbedingungen, d.h. ob die Belastung in faserparalleler oder fasersenkrechter Beanspruchungsrichtung erfolgt, einen Einfluss auf die Anwendbarkeit der vorgeschlagenen neuartigen Prüfmethode hat.

- Aus den Ergebnissen der quasistatischen Zugversuche mit begleitender SEA konnte keine eindeutige Mikroschädigungsgrenze abgeleitet werden. Sowohl bei faserparalleler als auch bei fasersenkrechter Beanspruchung zeigte die SEA, dass die Schädigung kurz für kontinuierlich unidirektional faserverstärkte Kunststoffe vor oder zum Zeitpunkt der maximalen Zugfestigkeit auftrat. Zusätzlich zeigten die Ergebnisse der dynamisch-zyklischen Ermüdungsversuche bei 5 Hz und 85 % der Zugfestigkeit, dass der Kurzzeitfestigkeitsbericht (bis zu 10^3 Lastzyklen) nicht eindeutig durch die quasistatischen Zugversuche abgedeckt werden konnte.
- Es wurde festgestellt, dass die dynamisch-zyklische Schwingprüfung bei 15 Hz und adaptiver isothermer Prüfkörpertemperierung eine ähnliche Versagenszeit erreicht wie bei den Versuchen mit einer Prüffrequenz von 5 Hz. Es kann daher nicht von einer Verkürzung der Dauer der Prüfung gesprochen werden. Andererseits bedeutet das, dass die Prüfkörper bei 15 Hz einer höheren Anzahl von Zyklen standhalten. Daher sollte die Schwingprüfung mit höheren Frequenzen nur dann angewendet werden, wenn die Versagenszeit anstelle der Lastspielzahl als Auslegungskriterium verwendet wird.
- Durch die Erkenntnisse aus dem Forschungsprojekt ist es nun möglich, mit der SIM den Langzeitfestigkeitsbereich bei fasersenkrechter Belastung in weniger als 24 Stunden zu charakterisieren. Die Genauigkeit der erhaltenen Masterkurve hängt jedoch stark von der Qualität der Probe ab. Außerdem wird empfohlen, dass die Anzahl der Temperaturstufen erhöht werden, um eine qualitativ bessere Masterkurve generieren zu können. Bei faserparalleler Beanspruchung erwies sich die SIM wegen der nicht erkennbaren Kriechverformung des Werkstoffs als nicht anwendbar.

2 EINLEITUNG UND ZIELSETZUNG

Faserverstärkte Kunststoffe (FVK) werden häufig in technischen Anwendungen eingesetzt, bei denen eine längere Einsatzdauer unter Kriech- und Ermüdungsbedingungen erforderlich ist. Die typische Einsatzdauer für diese Anwendungen liegt zwischen 15 und 25 Jahren, wobei der Windenergiesektor, die Automobilindustrie und die Luft- und Raumfahrt zu den wichtigsten Anwendungsbereichen gehören [Gam00]. Eine genaue Charakterisierung des Ermüdungsverhaltens des Werkstoffes ist daher unerlässlich, um die Sicherheit und Zuverlässigkeit von FVK-Bauteilen zu gewährleisten und optimierte Bauteile mit erhöhter Einsatzdauer zu entwickeln [Vas20]. Zur Bestimmung des Ermüdungsverhaltens von kontinuierlich unidirektional faserverstärkten Kunststoffen (UD-FVK) werden häufig uniaxiale dynamisch-zyklische Ermüdungsversuche durchgeführt. Obwohl diese Methode gut etabliert ist, sind die Versuche zeit- und kostenaufwändig und daher für KMU unpraktisch zu implementieren und zu realisieren. Eine zeitsparendere Prüfmethode zur Charakterisierung des Ermüdungsverhaltens ist daher unerlässlich.

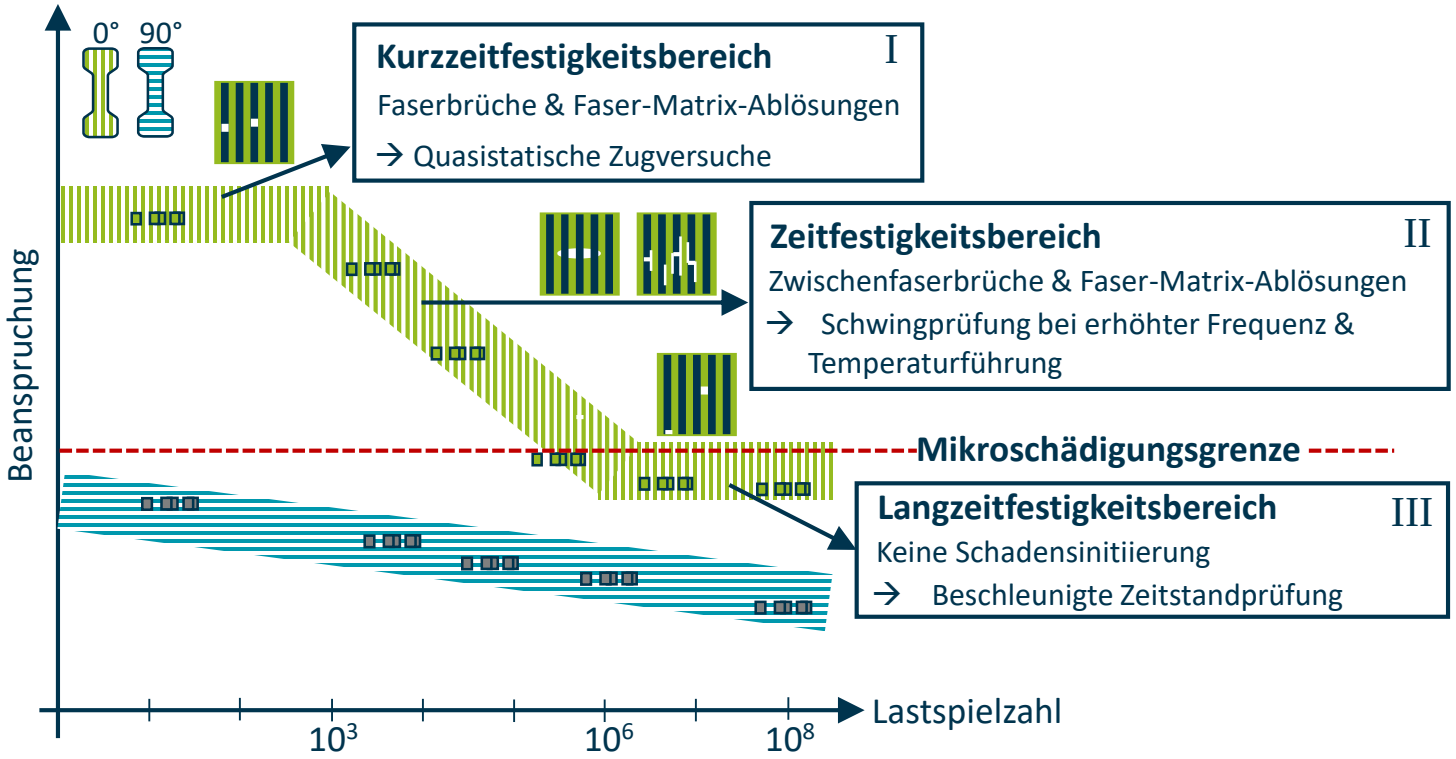
Das Ermüdungsverhalten von UD-FVK kann in den Kurzzeitfestigkeit-, Zeitfestigkeit-, und Langzeitfestigkeitsbereich eingeteilt werden [TS12], wobei der größte Fokus auf der Untersuchung des Zeitfestigkeit- und Langzeitfestigkeitsbereichs liegt. Abbildung 2.1 zeigt schematisch die drei Bereiche am Beispiel einer Wöhlerkurve. So können durch die entsprechende Zuordnung der Ermüdungsbereiche zu den jeweils dominierenden Schädigungsmechanismen spezifische Prüfverfahren für die verschiedenen zeit- oder lastspielzahlabhängigen Bereiche definiert werden.

Durch eine Erhöhung der Prüffrequenz sollen die Prüfungen im Zeitfestigkeitsbereich beschleunigt werden. Die Zeitersparnis ist auf die Frequenz-Zeit-Transformation zurückzuführen. Je höher die Frequenz gewählt wird, desto stärker kann die Prüfdauer verkürzt werden, da mehr Lastspiele in kürzerer Zeit stattfinden. Die Frequenz kann jedoch nicht unbegrenzt erhöht werden, da eine Temperaturerhöhung durch die Energiedissipation viskoelastischer Werkstoffeffekte oder vorliegender Schädigungen innerhalb des Prüfkörpers den Matrixwerkstoff degradieren und zu irrtümlichen Rückschüssen bzgl. der Ermüdung führen können. So können beispielweise durch die Temperaturerhöhung die Festigkeit und Steifigkeit infolge der thermomechanischen Eigenschaften des kontinuierlich unidirektional faserverstärkten Kunststoffes abnehmen [Arn13, FBK+09, Sch07]. Durch eine geeignete aktive Temperierung des Prüfkörpers kann diesem thermisch bedingten Degradationseffekt während der Prüfung jedoch entgegengewirkt werden. Die bisherigen Ergebnisse der Literatur zeigen, dass das Langzeitermüdungsverhalten im Wesentlichen unterhalb einer Mikroschädigungsschwelle durch das zeitabhängige

mechanische Werkstoffverhalten der Matrix dominiert wird, so dass vor dem Werkstoffversagen keine oder nur eine vernachlässigbare Anzahl von Mikroschädigungsereignissen auftritt [Gam00, TS12]. Darüber hinaus wurde die Hypothese aufgestellt, dass die Viskoelastizität und die Plastizität der Matrix ausgenutzt werden können, um das Langzeitermüdungsverhalten von Polymerverbundwerkstoffen näherungsweise zu bestimmen [EvG20]. Damit wird eine Korrelation zwischen der Retardation sowie der Zeitstandfestigkeit und der Langzeitfestigkeit erstellt, die durch Zeitstandzugversuche und basierend auf dem Prinzip der Zeit-Temperatur-Verschiebung (ZTV) den Langzeitfestigkeitsbereich abdecken könnte. Zeitstandzugversuche bei verschiedenen Temperaturen werden zur Erstellung einer Zeitstandmasterkurve verwendet, mit welcher der Langzeitfestigkeitsbereich von UD-FVK abgebildet werden kann. [Fer80]. Der Zeitaufwand für die Erstellung dieser Zeitstandmasterkurve kann durch die Anwendung der sogenannten Stepped-Isothermal-Methode (SIM) reduziert werden [AEB+13].

Über die Kombination der zuvor erläuterten Prüfverfahren soll im Rahmen dieses Vorhabens eine neuartige Prüfmethodik für kontinuierlich unidirektional faserverstärkte duroplastische Kunststoffe basierend auf Frequenz- und Temperatureinflüssen zur Verringerung des Prüfaufwandes für Ermüdungsprüfungen entwickelt werden.

Bereiche der Zeitstandfestigkeit von UD-FVK auf einer Wöhlerkurve



3 GRUNDLAGEN

Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens werden verschiedene mechanische Prüfungsverfahren angewendet und deren Korrelation zueinander untersucht, um die in der Hypothese aufgestellten Zusammenhänge zu überprüfen. Auf diese Weise können spezifische Prüfverfahren für die verschiedenen zeit- und lastspielabhängigen Bereiche der Werkstoffermüdung definiert werden, indem die jeweils dominanten Schädigungsmechanismen untersucht werden [TS12]. Der erste Schritt ist daher die Charakterisierung der Schädigungsmechanismen, die bei dynamisch-zyklischer Ermüdungsbeanspruchung wirken.

3.1 Schädigungsmechanismen von UD-FVK unter zyklischen Beanspruchungen

Die Werkstoffklasse der kontinuierlich unidirektional faserverstärkten Kunststoffe (UD-FVK) zeichnet sich durch ihre hohen gewichtsspezifischen mechanischen Werkstoffeigenschaften aus. Jedoch liegen diese hohen mechanischen Werkstoffeigenschaften, wie Steifigkeit und Festigkeit, lediglich in faserparalleler Beanspruchung vor. In fasertransversaler Richtung betragen die mechanischen Werkstoffeigenschaften im Vergleich nur einen Bruchteil der Beträge für die faserparallelen mechanischen Werkstoffeigenschaften [Kno08]. Diese Differenz ist auf die Morphologie des kontinuierlich unidirektional faserverstärkten Werkstoffs zurückzuführen, welche ein transversal isotropes Werkstoffverhalten bedingt. Infolge des transversal isotropen Werkstoffverhaltens und in Abhängigkeit der Beanspruchungshöhe unterscheiden sich die auftretenden Schädigungsmechanismen und deren sukzessiver Schädigungsfortschritt im Rahmen der Ermüdungsprüfung [Tal81]. Dies ist auch in Abbildung 2.1 dargestellt.

In faserparalleler Beanspruchungsrichtung kommt es in Abhängigkeit der Beanspruchungshöhe bei Erstbelastung zu Ablösungen des Faser-Matrix-Interfaces, Zwischenfaserbrüchen sowie zu vereinzelten Faserbrüchen [Kno08]. Gleiches gilt für die Beanspruchung des Werkstoffes in transversaler Richtung. Hier liegen jedoch nur die Schädigungsmechanismen der Faser-Matrix-Ablösung sowie des Zwischenfaserbruches vor. Dies ist nach *Talreja* für Beanspruchungen oberhalb der Mikroschädigungsgrenze beschrieben [Tal81]. Wird der Werkstoff unterhalb der Mikroschädigungsgrenze beansprucht, erfolgt keine Initiierung von Schädigungen und es laufen lediglich viskoelastische Werkstoffeffekte (Retadaration/ Relaxation) ab. Es sei jedoch zu erwähnen, dass bei einer erhöhten Beanspruchungsdauer auch eine Initiierung von Schäden aus den viskoelastischen Werkstoffeffekten resultieren kann.

Die initiierten Schädigungen können sich mit zunehmender Beanspruchungsdauer weiter fortpflanzen. Dabei kann die sukzessive Schädigung in drei Bereiche untergliedert werden, welche primäre, sekundäre und tertiäre Phase genannt werden [SB91]. In der primären Phase erfolgt durch vorhandene Fehlstellen oder Eigenspannungen die Initiierung von Schäden. Dies geht in

der Regel mit einem Verlust der Steifigkeit des Werkstoffes in den ersten Zyklen der dynamisch-zyklischen Beanspruchung einher. Nach der Initiierung folgt eine Phase mit einer konstanten Abnahme der Steifigkeit (sekundäre Phase), welche durch die sukzessive Zunahme der Schädigungen entsteht. Diese sukzessive Zunahme ist durch Rissfortschritte an den Faser-Matrix-Interfaces sowie die Ausbreitung von Zwischenfaserbrüchen parallel oder transversal zur Faserrichtung gekennzeichnet [GT99, Tal81]. Entsprechend der Höhe des vorliegenden Lastniveaus können bei faserparalleler Beanspruchung auch Faserbrüche initiiert werden. Mit zunehmender Beanspruchungsdauer und einem fortgeschrittenen Schädigungsgrad kommt es zu einer erhöhten Reduktion der Steifigkeit infolge der fehlenden Möglichkeiten zur Lastumlagerung im Sinne des Shear-Lag-Modells durch die Vielzahl an Schädigungen [LMM99]. Diese finale tertiäre Phase der Schädigung beschreibt das finale Werkstoffversagen des kontinuierlich unidirektional faserverstärkten Kunststoffes. UD-FKV zeichnet sich in faserparalleler Beanspruchungsrichtung durch ein „bürstenartiges“ Versagen aus, indem die Überlagerung von Faser-Matrix-Ablösungen und Faserbrüchen zu sogenannten Faser-Pullouts führen oder ganze Faserbündel an undefinierten Stellen lokal versagen [BP15].

Unter fasertransversaler Beanspruchung treten wie zuvor erläutert lediglich die Schädigungsmechanismen der Faser-Matrix-Ablösung sowie des Zwischenfaserbruches auf [BP15]. Initial entstehen mit einer Beanspruchung Ablösungen zwischen der Verstärkungsfaser und dem Matrixwerkstoff, da die Verstärkungsfasern in transversaler Richtung als Kerbstelle im Matrixwerkstoff agieren und somit lokal hohe mechanische Beanspruchungen entstehen. Bei einer dynamisch zyklischen Ermüdungsprüfung breitet sich demnach der Riss entlang des Faser-Matrix-Interfaces oder in Form eines Zwischenfaserbruches aus.

3.2 Langzeitfestigkeitsverhalten von UD-FVK (Kriechen und Langzeitfestigkeit)

Der Zusammenhang zwischen Kriech- und Ermüdungsverhalten von UD-FVK wurde von *Guedes und Vieille et al.* unter fasersenkrechter Beanspruchung untersucht [Gue08, VAT14]. Dabei wurde festgestellt, dass Mikrorisse in der Matrix die Entwicklung der Kriechdehnung beschleunigte. Weiterhin ist bekannt, dass unter nicht faserparalleler zyklischer Beanspruchung die Ermüdungsschädigung im UD-FVK durch die Matrix initiiert und fortgepflanzt wird [Vas20]. Es wurde auch gezeigt, dass das viskoelastische Verhalten von FVK hauptsächlich von den Eigenschaften der Matrix abhängt [KJB+19]. Es wird daher angenommen, dass im Langzeitfestigkeitsbereich unterhalb der Mikroschädigungsgrenze die Kriechverformung als hauptsächliche Komponente des Werkstoffermüdungsverhaltens angenommen werden kann.

Erartsin et al. zeigten, dass die Rissfortschrittsrate während des Kriechens und im Bereich der Langzeitfestigkeit für dynamisch-zyklische Ermüdungsprüfungen für querbelasteten Glas/PP- und Kohlenstoff/PEEK-Laminaten korreliert werden kann [EvG20]. *Pastukhov et al.* zeigten ähnliche Korrelationen zwischen dem Kriechen und dem Langzeitfestigkeitsbereich für PC/Carbon-Nano-Tubes-Verbundwerkstoffe [PMP+18]. Die für einen Zeitstandzugversuch erforderliche Zeit ist jedoch nicht wesentlich kürzer als die für einen uniaxialen Ermüdungsversuch erforderliche Zeit. Basierend auf dem Prinzip der Zeit-Temperatur-Verschiebung (ZTV) können Zeitstandzugversuche bei verschiedenen Temperaturen zur Erstellung einer Zeitstandmasterkurve verwendet werden [Fer80]. Der Zeitaufwand für die Erstellung einer Kriech-Masterkurve, die den Langzeitfestigkeitsbereich abdeckt, erscheint jedoch für industrielle Anwendungen noch nicht praktikabel. Eine weitere vielversprechende Alternative, die ebenfalls auf der ZTV basiert, ist die Beschleunigung der Zeitstandfestigkeitsprüfung durch kurzzeitig gestufte isotherme Kriechversuche, nachfolgend Stepped-Isothermal-Methode (SIM) genannt. Diese Methode wurde ursprünglich nicht explizit für die Kennwertermittlung an Kunststoffen entwickelt, aber es wurden erhebliche wissenschaftliche Anstrengungen unternommen, um die SIM auf Kunststoffe anzuwenden [AEB+13, PWM+21, TN13]. Nach den gleichen Prinzipien kann die experimentelle Ermittlung des Langzeitfestigkeitsbereichs für UD-FVK durch Zeitstandsfestigkeitszugversuche angenähert werden. Die SIM kann dann zur Beschleunigung der erforderlichen Zeitstandfestigkeitsversuche eingesetzt werden. Da die Genauigkeit der Masterkurve, insbesondere für die Vorhersage des Kriechens über große Zeiträume, von der ZTV abhängt, ist die Methode auf eine genaue Messung des Zeitstandverhaltens des Werkstoffs angewiesen. Der Grund dafür ist, dass Alterungsphänomen in der ZTV nicht berücksichtigt werden [AEB+13]. Um eine zuverlässige Kriech-Masterkurve zu gewährleisten, ist daher ein beschleunigtes Kriechverhalten bzw. ein klarer Übergang zwischen Temperatur- und Belastungsstufen des Verbundwerkstoffs erforderlich.

3.3 Vorarbeiten der Forschungseinrichtung

Am Institut für Kunststoffverarbeitung (IKV) liegen umfangreiche Erfahrungen im Bereich der Ermüdungsprüfung sowie zur Schädigungscharakterisierung unter dynamisch-zyklischer Beanspruchung von faserverstärkten Kunststoffen vor.

So wurde an der Forschungseinrichtung im Rahmen des von der DFG geförderten Schwerpunktprogrammes SPP 1466 die matrixdominierte dynamisch-zyklische Ermüdung von UD-FVK bis zum Zwischenfaserbruch mittels Schallemissionsanalyse charakterisiert und deren Einfluss auf die Langzeitfestigkeitsbereich ausgeschlossen [HMB17]. Des Weiteren folgten Untersuchungen zum Ermüdungsverhaltens von kontinuierlich unidirektional faserverstärkten

Kunststoffen unter komplexer multiaxialer Beanspruchung. Im Rahmen der "RWTH-Ford-Allianz" wurden umfangreiche Untersuchungen zur Ermüdungsprüfung von GFK für automobile Anwendungen durchgeführt [BHI+19]. Die Ergebnisse führten zu einer realistischeren Darstellung des Spannungszustandes der Blattfeder in den Ermüdungsversuchen. Im 2019 abgeschlossenen DFG-Projekt (Projektnummer 281870175) wurde die Schädigungsinitiierung und –evolution von Polymer-Verbundwerkstoffen bei Schwingbelastung mit Lastrichtungsumkehr experimentell und numerisch untersucht [KJB+19, RCH20].

Im Rahmen des IGF-Forschungsvorhabens 17857 N wurde eine praxisnahe Methode zur Berücksichtigung von variablen Lastformen in der Lebensdauervorhersage auf Basis von Wöhlerkurven entwickelt [HB16]. Dabei wurde festgestellt, dass der Einfluss der Prüffrequenz und Lastreihenfolge- sowie Mittelspannungseffekte berücksichtigt werden müssen. Im Rahmen des IGF-Vorhaben Nr. 19419 N wurden diese Effekte der Lastkollektiv-Reihenfolge auf das Ermüdungsverhalten technischer kurzfaserverstärkter Kunststoffe untersucht, welcher ebenfalls für kontinuierlich faserverstärkte Kunststoffe von Bedeutung ist.

4 PROBEKÖRPERFERTIGUNG UND UNTERSUCHUNGSMETHODEN

Im Folgenden werden zunächst die Herstellung und Präparation der verwendeten Prüfkörper beschrieben. Anschließend wird eine Methodik zur experimentellen Bestimmung der *von Talreja* [Tal81] definierten Bereiche der Kurzzeit-, Zeit- und Langzeitfestigkeit für kontinuierlich unidirektional faserverstärkte Kunststoffe erläutert. Auf der Grundlage dieser Ergebnisse werden die Belastungshorizonte für die nachfolgend beschriebenen Zeitstandfestigkeitsversuche sowie die damit zu korrelierenden Ermüdungsversuche im Langzeitfestigkeitsbereich festgelegt. Zur Untersuchung der im Antrag formulierten Hypothese wurden Prüfkörper aus einem kontinuierlich faserverstärkten duroplastischen Kunststoff mit unidirektionaler Faserverstärkung gefertigt. Dazu wurden plattenförmige Halbzeuge in den Dicken 1 mm sowie 2 mm in Anlehnung an die DIN EN ISO 527-5 hergestellt [NN22].

4.1 Verwendete Werkstoffe

Zur Herstellung der plattenförmigen Halbzeuge wurden sowohl Glasfaserrovings des Typs SE2000 (2400 tex) des Herstellers 3B Fiberglass, Battice, Belgien als auch des Typs StarRow090 (4800 tex) des Herstellers Johnson Manville, Denver, USA verwendet. Als duroplastischer Matrixwerkstoff wurde das definierte Harzsystem EPIKOTE® RIMR 135 in Kombination mit den Härter EPIKURE® RIMH 134 sowie EPIKURE® RIMH 137 des Herstellers HEXION, Columbus, USA verwendet. Die beiden Härterkomponenten wurden in einem Mischungsverhältnis von 20 % EPIKURE® RIMH 134 und 80 % EPIKURE® RIMH 137 in das Harzsystem eingearbeitet. Der erhöhte Anteil an EPIKURE® RIMH 137 ermöglicht eine längere Topfzeit und damit ein verbessertes Arbeitsfenster für den Nasswickelprozess.

4.2 Herstellung von GFK-Probekörperplatten im Nasswickelverfahren

Probekörperplatten

Zur Herstellung der plattenförmigen Halbzeuge wurde das Nasswickelverfahren in Kombination mit einem plattenförmigen, nicht rotationssymmetrischen Wickelkern eingesetzt. Hierbei wurden die mit dem Matrixwerkstoff getränkten Glasfaserrovings direkt auf dem Wickelkern abgelegt und anschließend mit Hilfe von zwei Formplatten auf dem Wickelkern verpresst. Der Aushärtezyklus der plattenförmigen Halbzeuge erfolgte im komprimierten Zustand bei einer Temperatur von 70 °C für eine Dauer von 2 h.

Bei der Verarbeitung konnte zunächst ein erhöhter Porositätsgrad bei den plattenförmigen Halbzeugen festgestellt werden. Zur Reduktion der Porosität wurden die Prozessparameter des

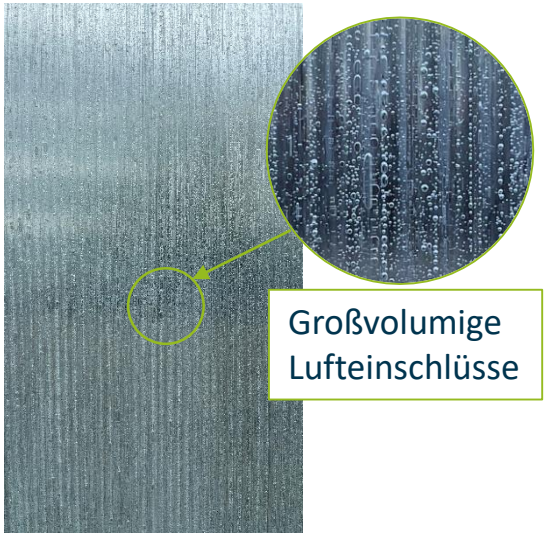
Nasswickelprozesses optimiert. Zusätzlich wurde der ursprünglich vorgesehene Glasfaserroving durch einen Glasfaserroving vom Typ StarRov 090 des Herstellers Johnson Manville, Denver, USA ersetzt. Hintergrund ist die bessere Spreizung und Benetzung dieses Glasfaserrovings, wodurch eine geringere Porosität erreicht werden konnte. Eine Verbesserung der Porosität der plattenförmigen Halbzeuge ist in Abbildung. 4.1 dargestellt. Eine vollständige Vermeidung von Lufteinschlüssen konnte nicht erreicht werden. Daher wurde ein optimaler Prozesspunkt ermittelt, um anschließend die erforderliche Anzahl an plattenförmigen Halbzeugen herzustellen. Es ist anzumerken, dass eine Vermeidung von Lufteinschlüssen bei UD-FVK verfahrenstechnisch nur mit erheblichem Aufwand möglich wäre. In der Realität sind Lufteinschlüsse jedoch ein realistischeres Bild des gefertigten Bauteils und daher wird die Lebensdauer von porenfreien Proben überschätzt.

Prüfkörper

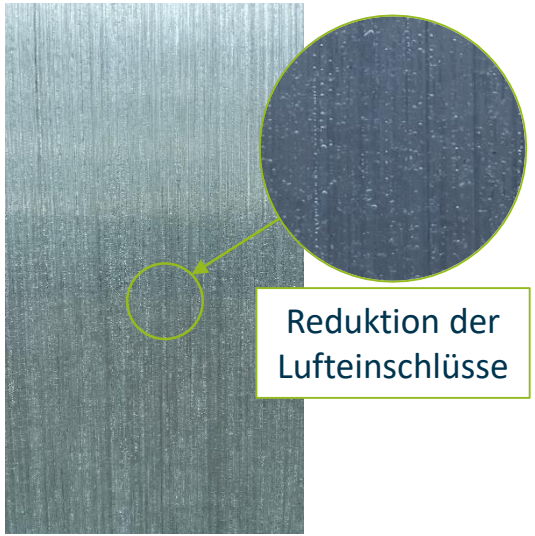
Zur Präparation der definierten Prüfkörper nach DIN EN ISO 527-5 werden auf die plattenförmigen Halbzeuge Lasteinleitungselemente aus kontinuierlich glasfasergewebeverstärkten duroplastischen Kunststoffen mit einer Faserorientierung von ± 45° und einer Dicke von 1 mm aufgebracht [NN22]. Für die Applikation der Lasteinleitungselemente wird eine stoffschlüssige Fügeverbindung mittels Klebstoff angewandt. Als Klebstoff wurde Scotch-Weld DP490 des Unternehmens 3M, Saint Paul, USA verwendet. Zur passgenauen Positionierung der Fügepartner diente eine Fügevorrichtung zur Einstellung eines definierten Klebspaltes. Mit dieser Fügevorrichtung kann ein definierter Klebespalt mit einer Dicke von 0,3 mm eingestellt werden, wodurch eine maximale Steifigkeit und Festigkeit der Strukturklebverbindung erreicht werden kann. Die Optimierung der Klebverbindung dient dazu, ein Versagen der Klebverbindung vor dem zu prüfenden kontinuierlich unidirektional faserverstärkten Kunststoff zu vermeiden. Insbesondere aufgrund der hohen Belastungen in faserparalleler Richtung kann im Bereich der Lasteinleitungselemente ein Versagen auftreten, welches insbesondere bei Prüfungen wie dem Zeitstandfestigkeitsversuch oder der dynamisch-zyklischen Ermüdungsprüfung vermieden werden muss. Zusätzlich wurden Schäftungen an den Übergängen der Lasteinleitungselemente zum Prüfbereich des Prüfkörpers vorgesehen. Diese dienen der Reduzierung von Spannungsspitzen, um ein vorzeitiges Versagen am Probenrand zu verhindern. Die Reduzierung der Spannungsspitzen via Schäftungen und deren positive Auswirkungen auf die Ermüdungsfestigkeitsprüfung wurden von [EWB+19] aufgezeigt. Zur Herstellung der Schäftung wurde der Klebstoff Scotch-Weld DP490 verwendet, der auch zum Fügen der Lasteinleitungselemente eingesetzt wird. Die applizierten Schäftungen sind in den Abbildung 4.2 und 4.3 dargestellt.

Prozessoptimierung zur Senkung der Porosität nassgewickelter plattenförmiger Halbzeuge

Prozesspunkt 1



Prozesspunkt 2

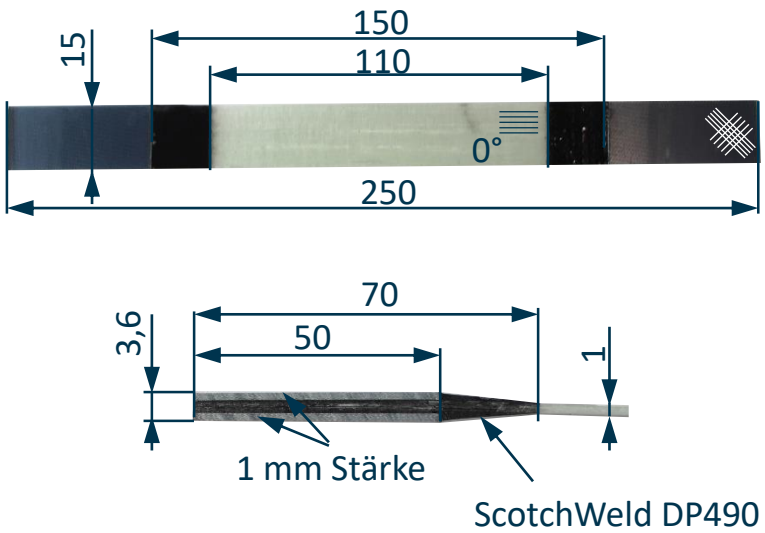


Prozesspunkt 3

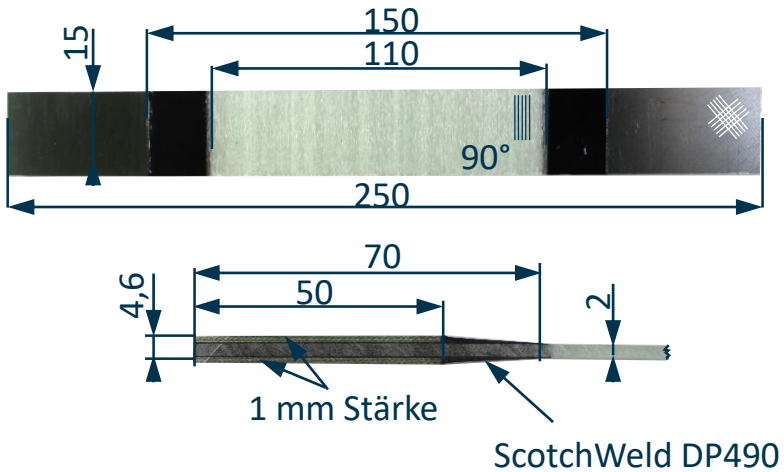
- Senkung der Lufteinschlüsse durch eine Erhöhung der Fadenspannung, optimierten Faserspreizung sowie einer der Ablage vorgeschalteten Walkstrecke.

Prüfkörper

DIN EN ISO 527-5 Typ A

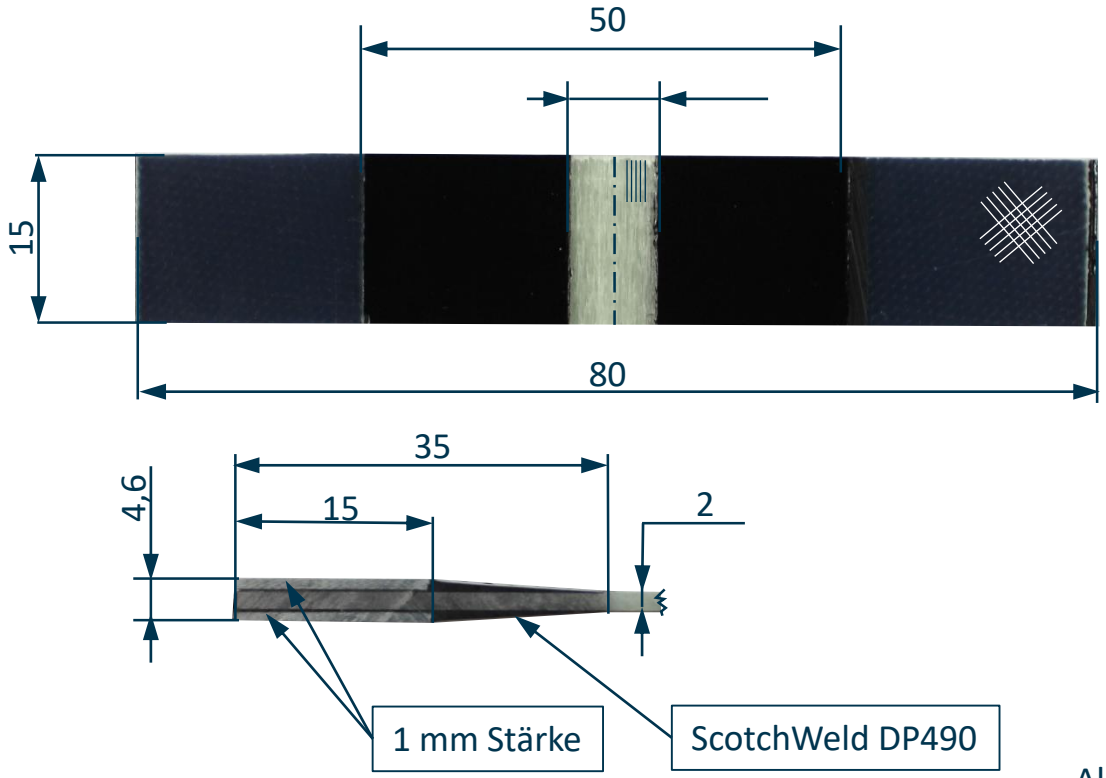


DIN EN ISO 527-5 Typ B



Alle Abmessungen in mm

Prüfkörper Typ IKV



Alle Abmessungen in mm

Zur Bestimmung des FVG wurde die Thermogravimetrie nach DIN EN ISO 11358 angewendet. Dabei werden aus den plattenförmigen Prüfkörpern Proben mit definierten Abmessungen entnommen und gewogen. Anschließend wird der Matrixwerkstoff der entnommenen Proben thermisch zersetzt, bis nur noch die Glasfasern überbleiben. Durch anschließendes erneutes Wiegen der verbliebenen Glasfasern sowie unter Berücksichtigung des zuvor ermittelten Probenvolumens und der Dichte der Glasfasern kann auf den FVG rückgeschlossen werden. Die ermittelten FVG der hergestellten plattenförmigen Halbzeuge sind in Tabelle 1 aufgeführt.

FVG	**Pos. 1**	**Pos. 2**	**Pos. 3**	**Mittelwert**
Platte 1	41,3 %	40,7 %	40,4 %	40,8 %
Platte 2	38,9 %	40,2 %	39,2 %	39,4 %
Platte 3	39,4 %	41,0 %	39,9 %	40,1 %

Tabelle 1: Darstellung der nach DIN EN ISO 11358 experimentell bestimmten Faservolumengehälter der plattenförmigen Halbzeuge.

Wie aus Tabelle 1 hervorgeht, weisen die hergestellten plattenförmigen Halbzeuge einen mittleren FVG von 40,1 % auf. Die geringe Variation der FVG zeigt, dass eine gleichbleibende die Qualität des endlosfaserverstärkten Kunststoffs vorliegt.

Nachfolgend sind in Tabelle 2 die verwendeten Prüfkörper für die jeweiligen durchgeführten Prüfverfahren aufgelistet. Alle Prüfkörper sind an entsprechende Normen angelehnt. Eine Ausnahme bilden die Prüfkörper zur Bestimmung der dynamisch-zyklischen Ermüdungsfestigkeit von kontinuierlich unidirektional faserverstärkten Kunststoffen mit einer Faserorientierung von 90°. Aufgrund geometrischer Restriktionen der Instron Schenk VH7-Prüfmaschine werden Prüfkörper mit abweichenden Abmessungen verwendet. Die Abmessungen orientieren sich an DIN EN ISO 527-5. Alle Abmessungen der verwendeten Probekörper sind in Tabelle 2 aufgeführt.

Prüfverfahren	Faser-orientierung	Standard	Länge	Breite	Dicke
QS-Zugversuch	0°	DIN EN ISO 527-5	250,0 mm	15,0 mm	1,0 mm
QS-Zugversuch	90°	DIN EN ISO 527-5	250,0 mm	25,0 mm	2,0 mm
Zeitstandfestigkeitsprüfung	0°	DIN EN ISO 527-5	250,0 mm	15,0 mm	1,0 mm
Zeitstandfestigkeitsprüfung	90°	DIN EN ISO 527-5	250,0 mm	25,0 mm	2,0 mm
Dyn.-zykl. Schwingversuch	0°	DIN EN ISO 527-5	250,0 mm	15,0 mm	1,0 mm
Dyn.-zykl. Schwingversuch	90°	-	80,0 mm	20,0 mm	2,0 mm

Tabelle 2: Abmaße der verwendeten Prüfkörper zur Durchführung der experimentellen mechanischen Prüfungen

4.3 Bestimmung der Schädigungsinitiierung

In Anlehnung an die Theorie von *Talreja* [Tal81], die besagt, dass kontinuierlich unidirektional faserverstärkte Kunststoffe unterhalb einer Mikroschädigungsschwelle keine Schädigungsinitiierung erfahren, wurde diese Hypothese für die zu betrachtenden Werkstoffe angenommen.

Wie in der Hypothese zuvor formuliert, werden bei dynamisch-zyklischen Schwingversuchen unterhalb der Mikroschädigungsgrenze unter idealer Annahme keine Schädigungen initiiert. Unter der weiteren Annahme, dass die Amplitudenspannung σ_a nur geringfügig größer als die Mittelspannung σ_m ist, kann die Ermüdungsfestigkeit im Langzeitfestigkeitsbereich über einen Zeitstandfestigkeitsversuch abgebildet werden.

Auf dieser Grundlage wurde ein Vorhandensein einer Mikroschädigungsgrenze für UD-FVK untersucht. Hierbei ist zusätzlich zu beachten, dass eine Mikroschädigungsgrenze sowohl für das faserdominierte Werkstoffverhalten in faserparalleler Richtung (0°- Faserorientierung) als auch für das matrixdominierte Werkstoffverhalten in fasersenkrechter Richtung (90°- Faserorientierung) zu bestimmen ist. Zur Ermittlung der Mikroschädigungsgrenzen wurden quasistatische Zugversuche auf der Prüfmaschine Z100 (ZwickRoell, Ulm, Deutschland) mit begleitender Schallemissionsanalyse (SEA) durchgeführt. Für die SEA wurden die Versuche in einer Klimaprüfkammer durchgeführt, die mit einem schallabsorbierenden Schaumstoff ausgekleidet

ist. Dies ermöglicht eine maximale Abschirmung der Schallemissionssensoren (SES) von Umgebungsgeräuschen. Die Dehnung des Werkstoffes wurde mit einem Sensor-Arm-Extensometer Typ BTC-EXMULTI.003 der Firma ZwickRoell, Ulm, Deutschland ermittelt.

Zur Aufzeichnung der Schallemissionsereignisse wurden zwei SES vom Typ impactXS (iND-Tact GmbH, Würzburg, Deutschland) am oberen und unteren Ende des Messbereichs der Prüfkörper angebracht. Die SES wurden mit Hilfe von Hochvakuumfett (DOW Corning, Midland, Vereinigte Staaten von Amerika) auf den Probekörpern befestigt. Die Verwendung von zwei SES ermöglicht eine verbesserte Analyse der Schallemissionsereignisse, da beide SES das akustische Signal erfassen und somit Fehler durch anderweitige Störgrößen aus der Umgebung etc. reduziert werden können. Zur Erfassung der Schallemissionssignale wurden neben den Schallemissionssensoren ein Vorverstärker iNDTact Champ 1.1 (iNDTact GmbH, Würzburg, Deutschland), ein Analog-Digital-Wandler cDAQ-0181 (National Instruments, Austin, Texas, Vereinigte Staaten von Amerika) sowie die entsprechende Software iMS (iNDTact GmbH, Würzburg, Deutschland) zur Auswertung der Schallemissionssignale eingesetzt.

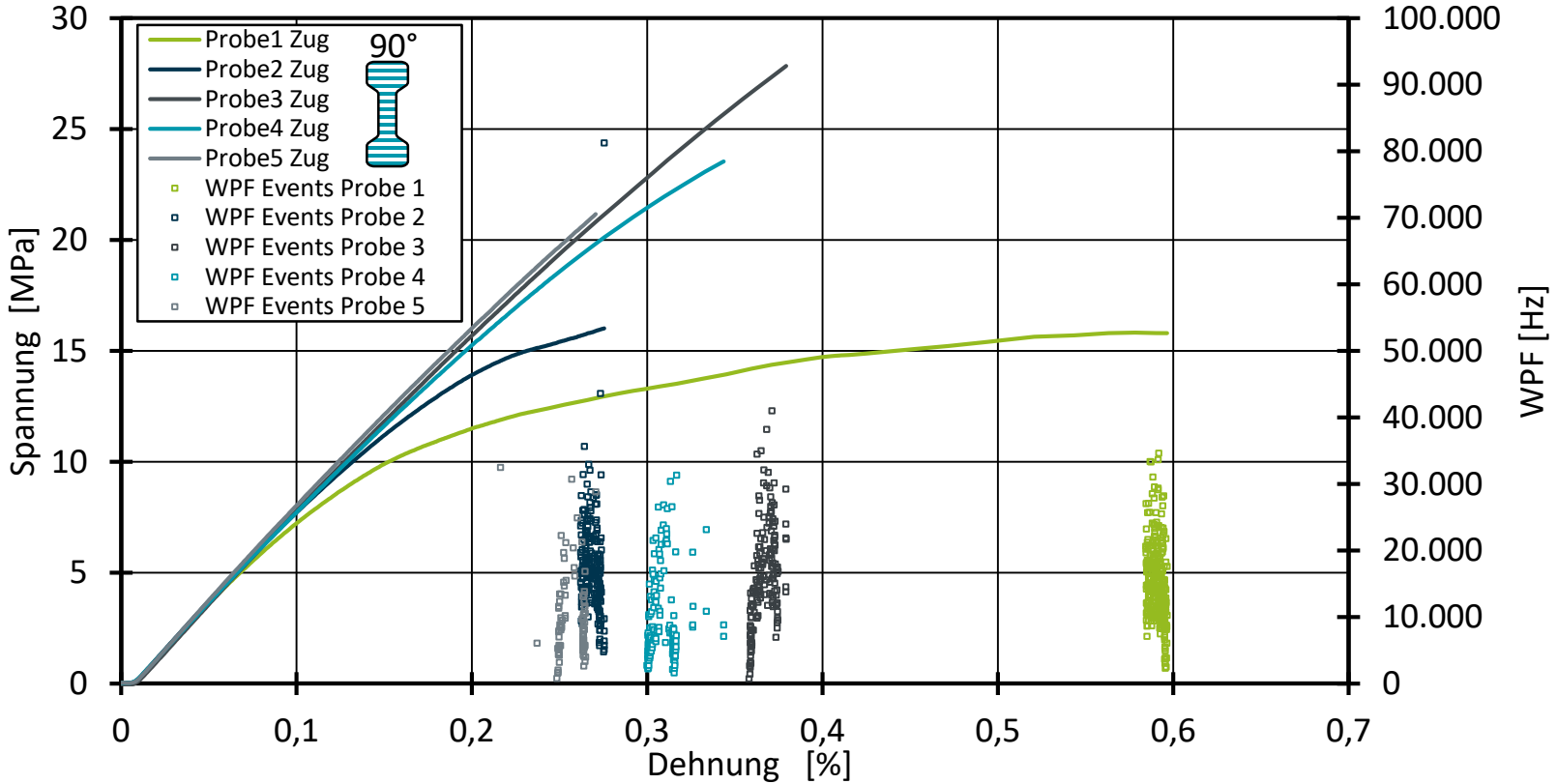
Zur experimentellen Bestimmung der Mikroschädigungsgrenze wurden fünf Prüfkörper mit 0°- Faserorientierung und fünf Prüfkörper mit 90°-Faserorientierung nach DIN EN ISO 527-5 mit einer Dehngeschwindigkeit von 2 mm/min bis zum Bruch des Prüfkörpers geprüft. Die Aufzeichnung der akustischen Emissionen wurden mit einer Signaltotzeit von 10 µs sowie einer Schwellspannung von 10 mV durchgeführt.

Die Ergebnisse des quasistatischen Zugversuchs in fasersenkrechter Belastungsrichtung sind in Abbildung 4.4 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass eine erhöhte Streuung im Werkstoffverhalten der fasersenkrechten Probekörper vorliegt. So variieren die Spannungs-Dehnungs-Kurven in ihrem Verlauf. Zum einen wurden Spannungs-Dehnungs-Kurven aufgenommen, die einen linearen Verlauf und nur geringe Bruchdehnungen aufweisen. Dies ist typisch für das Bruchverhalten eines kontinuierlich faserverstärkten Kunststoffes unter fasersenkrechter Beanspruchung. Zum anderen ergeben sich nichtlineare Verläufe mit vergleichsweise höheren Bruchdehnungen, die dem Deformations- und Versagensverhalten von rein duroplastischen Werkstoffen gleichen [Sch07, SH11]. Eine genaue Ursache für die Abweichungen konnte nicht ermittelt werden.

Ausgehend von den in Abbildung 4.4 beschriebenen Spannungs-/Dehnungsverläufen unterliegen die mechanischen Kennwerte der Steifigkeit, der Festigkeit und der maximalen Bruchdehnung einer größeren Streuung. Die gemittelten mechanischen Kennwerte für das fasersenkrechte Werkstoffverhalten sind in Tabelle 3 dargestellt.

QS-Zugversuch und Frequenzgewichtete Schallemissionen

Fasersenkrechte Belastung – 2 mm/min



Mechanische Kenngröße	Einheit	Wert
Fasersenkrechter E-Modul $E_{\perp}^{+}$	MPa	6996,7 ± 358,9
Fasersenkrechte Zugfestigkeit $R_{\perp}^{+}$	MPa	35,0 ± 5,6
Fasersenkrechte Bruchdehnung A	%	4,1 ± 0,29

Tabelle 3: Darstellung der experimentell ermittelten mechanischen Kennwerte des kontinuierlich unidirektional faserverstärkten Kunststoffes bei fasersenkrechter Beanspruchung.

Bei der Betrachtung der Schadensinitiierung anhand der gemessenen Hits zeigt sich, dass die ersten Hits erst kurz vor dem Erreichen der maximalen Zugfestigkeit $R_{\perp}^{+}$ ermittelt werden können und der Anstieg der Hitanzahl innerhalb kurzer Zeit erfolgt. Die Anzahl der gemessenen Hits liegt in einem Größenbereich von weniger als 500 Ereignissen. Bei Betrachtung der in Abbildung 4.5A dargestellten geschädigten Prüfkörper ist ein Zwischenfaserbruch in Form eines Sprödbruchs zu erkennen. Es wird daher vermutet, dass es sich hierbei um die akustischen Emissionen des spröden Rissfortschritts handelt.

Zusätzlich zur Messung der auftretenden Hits können die ermittelten akustischen Schallsignale hinsichtlich ihrer Weighted Peak Frequency (WPF) analysiert werden. Die WPF beschreibt eine gemittelte Frequenz des gemessenen Schallsignals. Nach Literaturangaben besitzen die in kontinuierlich unidirektional faserverstärkten Kunststoffen auftretenden Schädigungsmechanismen einen charakteristischen WPF-Bereich [SH11]. So weisen auftretende Zwischenfaserbrüche (Zfb) eine charakteristisch niedrige WPF auf. Faserbrüchen (FB) wird eine höhere WPF von über 100.000 Hz zugeordnet. Die charakteristische WPF von Faser-Matrix-Brüchen (IB) liegt im Frequenzspektrum zwischen den Zfb und den FB. Bei fasersenkrechter Beanspruchung ergibt sich ein matrixdominiertes Werkstoffverhalten, aus dem ein Werkstoffversagen allein aufgrund von IB und Zfb abgeleitet werden kann. In Abbildung 4.4 sind ebenfalls die ermittelten WPF der Hits über den Verlauf der Spannungs-Dehnungs-Kurven aufgetragen. Es ist zu erkennen, dass sich für alle Prüfkörper ein vergleichbarer Frequenzbereich der WPF unterhalb von 40.000 Hz ergibt. Eine eineindeutige Unterscheidung der auftretenden Schädigungsmechanismen in Zfb und IB kann anhand der Ergebnisse nicht vorgenommen werden.

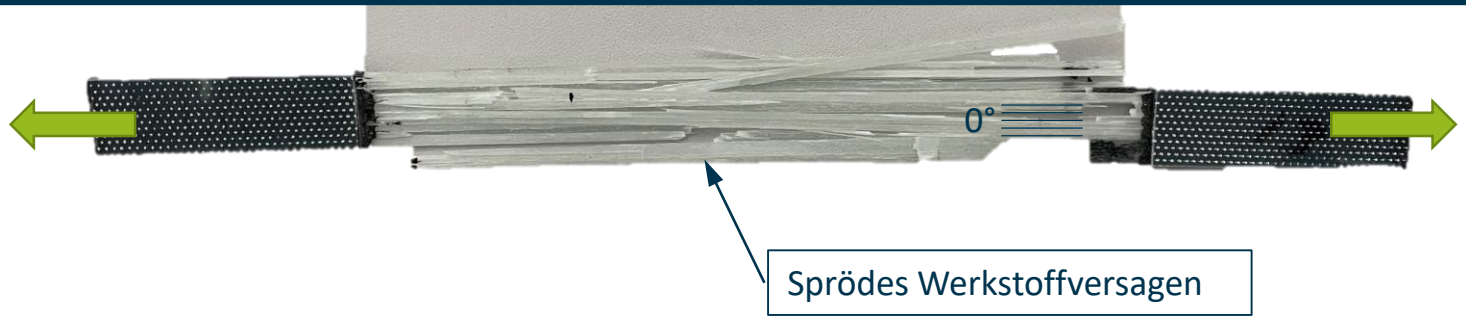
Die Ergebnisse der quasistatischen Zugversuche für den kontinuierlich unidirektional faserverstärkten Kunststoff bei faserparalleler Beanspruchung sind in Abbildung 4.6 dargestellt. Die Messdaten zeigen einen linearen Spannungsanstieg mit zunehmender Dehnung, bevor der Werkstoff zum Schluss stufenförmig und in kurzer Zeit versagt. Die mittlere mechanische Steifigkeit, Festigkeit und Bruchdehnung sind in Tabelle 4 dargestellt.

Bruchbild – QS-Zugversuch

2 mm/min

(A) Fasersenkrechte Belastung (90°)

(B) Faserparallele Belastung (0°)



Mechanische Kenngröße	**Einheit**	**Wert**
Faserparalleler E-Modul $E_{\|\|}^{+}$	MPa	31629,9 ± 380,4
Faserparallele Zugfestigkeit $R_{\|\|}^{+}$	MPa	883,0 ± 57,8
Faserparallele Bruchdehnung A	%	4,1 ± 0,3

Tabelle 4: Darstellung der experimentell ermittelten mechanischen Kennwerte des kontinuierlich unidirektional faserverstärkten Kunststoffes bei faserparalleler Beanspruchung.

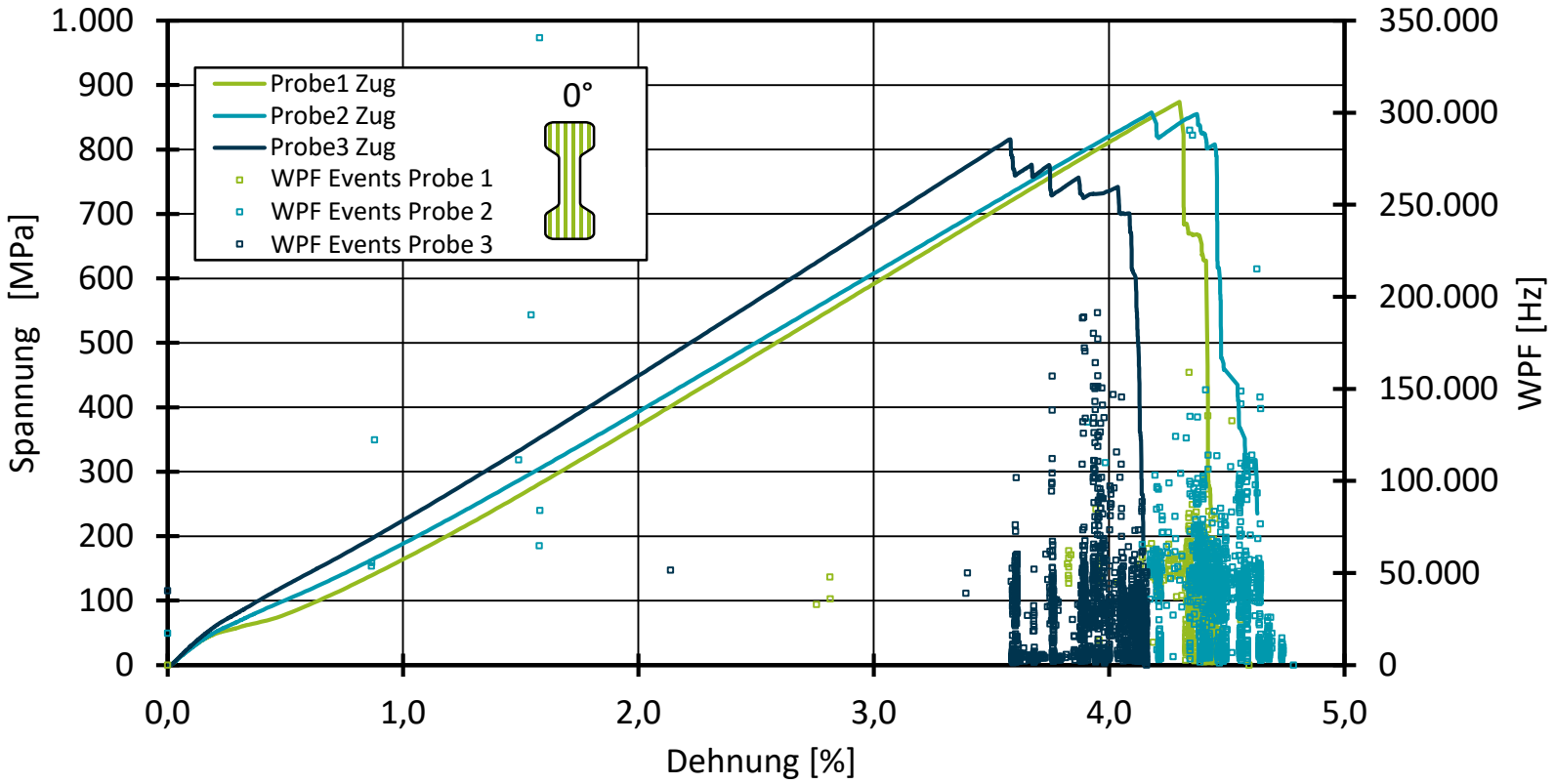
Der stufenförmige Spannungsabfall bei faserparalleler Belastung kann mit dem in Abbildung 4.5B dargestellten Bruchbild eines kontinuierlich unidirektional faserverstärkten Probekörper erklärt werden. Der Prüfkörper zeigt ein sprödes Versagensbild. Dieses Versagen ist typisch für kontinuierlich unidirektional faserverstärkte Kunststoffe bei faserparalleler Beanspruchung. Entsprechend der Theorie tritt eine erste globale Schädigung durch den Bruch eines Filamentbündels auf, welches die statistisch geringsten mechanischen Eigenschaften aufweist. Es folgt anschließend eine Rissbildung in Form von faserparallelen Zwischenfaserbrüchen bis zur nächsten Schwachstelle der umliegenden Filamentbündel, fortlaufend, bis die Beanspruchung im Gesamtquerschnitt die maximale Verbundfestigkeit überschreitet.

Bei der Betrachtung der Schadensinitiierung anhand der gemessenen Hits zeigt sich, dass erste Hits unterhalb der maximalen Bruchspannung detektiert werden können. Dies kann möglicherweise ein Hinweis auf eine Mikroschädigungsgrenze sein, allerdings variieren die Dehnungen, bei denen die ersten Hits auftreten, stark. Zudem ist die Anzahl der detektierten Schallemissionen vor dem finalen Werkstoffversagen mit einer Anzahl von weniger als 10 Hits im Vergleich zur Anzahl der gemessenen Hits bei Erreichen der maximalen Zugfestigkeit mit einer Größenordnung von 100 bis 1.000 Hits deutlich geringer. Zur Analyse der unterhalb der maximalen Zugfestigkeit gemessenen Hits wird die WPF. Wie in Abbildung 4.6 dargestellt, wurde die WPF der gemessenen Einschläge über die Spannungs-Dehnungskurve aufgetragen. Die gemessenen Hits unterhalb der maximalen Verbundfestigkeit lassen sich anhand der ermittelten WPF in zwei Schädigungsmechanismen einteilen. So treten bei Prüfkörper 2 die ersten FB nach ca. 1,5 % Dehnung auf. Die FB können aufgrund der erhöhten WPF (> 100.000 Hz) der Hits detektiert werden. Die Zfb weisen dagegen eine geringere WPF (< 60.000 Hz) auf. Bei den übrigen Prüfkörpern konnten erste Zfb nur bei höheren Dehnungsniveaus detektiert werden. Ein Auftreten von FB konnte nicht nachgewiesen werden. Aufgrund der großen Streuung der Dehnungen, bei denen diese Hits gemessen wurden, kann keine einheitliche Mikroschädigungsgrenze abgeleitet werden.

Erst nach Erreichen der maximalen Zugfestigkeit zeigt sich ein stufenförmiger Anstieg der FB ausgehend von den detektierten Hits mit hoher WPF (> 100.000 Hz) sowie eine große Menge

QS Zugversuch und Frequenzgewichtete Schallemissionen

Faserparallele Belastung – 2 mm/min



an Zfb durch Hits mit niedriger WPF (< 60.000 Hz). Der stufenförmige Anstieg der FB kann mit dem sukzessiven Versagen einzelner Filamentbündel begründet werden, die aufgrund der Querschnittsverringerung im Prüfkörper zunehmend höheren Beanspruchungen ausgesetzt sind.

Sowohl bei faserparalleler als auch bei fasersenkrechter Beanspruchung der endlosfaserverstärkten Kunststoffe konnten erst kurz vor bzw. bei Erreichen der maximalen Zugfestigkeit charakteristische Schallemissionen entsprechend der auftretenden Schädigungsmechanismen detektiert werden. Alle gemessenen Schallemissionen unterhalb der maximalen Zugfestigkeit können möglicherweise auf fertigungsbedingte Vorschädigungen zurückgeführt werden, da deren Auftreten starken Schwankungen des Dehnungsniveaus sowie des zuzuordnenden Schädigungsmechanismus unterliegt. Darüber hinaus sollte eine Optimierung der Erfassungsparameter wie Schwellwert oder Totzeit für die Erfassung der akustischen Signale in Betracht gezogen werden. Möglicherweise können durch eine verbesserte Erfassungsempfindlichkeit der akustischen Signale erste IB nachgewiesen werden.

Aufgrund der hier gewonnenen Erkenntnisse konnte mit Hilfe einer begleitenden Schallemissionsanalyse keine eindeutige Mikroschädigungsgrenze nachgewiesen werden.

4.4 Ermittlung des Ermüdungsverhaltens von UD-GFK bei 5 Hz Prüffrequenz

Um das dynamisch-zyklische Ermüdungsverhalten der Prüfkörper mit 0°-Faserorientierung zu bestimmen, wurden die Versuche nach ASTM D3479 auf einem Hydropulser des Typ PCN0005 der Carl Schenk AG (Darmstadt, Deutschland) durchgeführt [NN19]. Für eine genauere Regelung wurde eine 25 kN Kraftmessdose des Typ PMNC0005 der Carl Schenk AG (Darmstadt, Deutschland) verwendet. Um eine konstante Temperatur von 23 °C zu gewährleisten, wurde ein Kühlaggregat der Carl Schenk AG (Darmstadt, Deutschland) genutzt.

Zur Ermittlung des dynamisch-zyklischen Ermüdungsverhaltens der Probenkörper (90°-Faserorientierung) wurden dynamisch-zyklische Schwingprüfungen auf der Prüfmaschine VHF7 der Firma ZwickRoell GmbH & Co. KG (Ulm, Deutschland) durchgeführt. Hierbei wurde eine Kraftmessdose der Firma GTM Testing and Metrology GmbH (Bickenbach, Deutschland) genutzt. Diese gehört zu der Serie DR und hat einen Arbeitsbereich von bis zu 5 kN. Um die Prüfkammer zu temperieren, wurde die Temperierungskammer HA1020 der Firma Barbender GmbH & Co. KG (Duisburg, Deutschland) verwendet. Die Versuche finden bei 23 °C statt. Für alle dynamisch-zyklischen Schwingprüfungen wurde ein Spannungsverhältnis R = 0,1 ($R = \sigma_{min}/\sigma_{max}$) verwendet.

4.4.1 Ermüdungsverhaltens von UD-GFK bei fasersenkrechter Beanspruchung (90°)

Die Bestimmung des fasersenkrechten Ermüdungsverhaltens erfolgt bei einer Prüffrequenz von 5 Hz für unterschiedliche Belastungsniveaus. Die Belastungsniveaus orientieren sich prozentual an der im Abschnitt 4.3 ermitteltet durchschnittlichen Zugfestigkeit des Werkstoffes für eine fasersenkrechte Belastungsrichtung (85%, 65%, 60%, 50%, 45%, 35% der Zugfestigkeit). In Abbildung 4.7 sind die Ergebnisse des dynamisch-zyklischen Ermüdungsversuches über die Anzahl der Belastungszyklen und über die Versagenszeit dargestellt. Aus den Ergebnissen geht hervor, dass die resultierenden Lastspiele bei einem Lastniveau von 85% der Zugfestigkeit teilweise über dem Bereich der Kurzzeitfestigkeit ($< 10^3$ Lastzyklen) liegen. Die geringeren Lastniveaus von 65% Zugfestigkeit bis teilweise hin zu 45% Zugfestigkeit decken dabei den Bereich der Zeitfestigkeit (bis 10^6 Lastzyklen) ab. Für ein Lastniveau von 45% Zugfestigkeit respektive 35% Zugfestigkeit kann der Langzeitfestigkeitsbereich ($> 10^6$ Lastzyklen) angenommen werden.

4.4.2 Ermüdungsverhaltens von UD-GFK bei fasersenkrechter Beanspruchung (0°)

Analog zum vorherigen Kapitel orientieren sich die definierten prozentual an der im Abschnitt 4.3 ermitteltet durchschnittlichen Zugfestigkeit des Werkstoffes für die faserparallele Belastungsrichtung (85%, 65%, 55%, 45% der Zugfestigkeit). Abbildung 4.8 zeigt die Ergebnisse des dynamisch-zyklischen Ermüdungsversuches über die Anzahl der Belastungszyklen und über die Versagenszeit. Das Lastniveau von 85% Zugfestigkeit erreicht maximale Lastspielzahlen von über 10^3 Lastzyklen und ist damit nicht explizit repräsentativ für den Kurzzeitfestigkeitsbereich. Die Lastniveaus von 55% Zugfestigkeit und 65% Zugfestigkeit liegen demgegenüber innerhalb der definierten grenzen für den Bereich der Zeitfestigkeit ($< 10^4$ und $< 10^6$ Lastzyklen). Die Ergebnisse der Prüfung bei einem Lastniveau von 45% Zugfestigkeit sind eindeutig dem Langzeitfestigkeitsbereich ($> 10^6$ Lastzyklen) zuzuordnen.

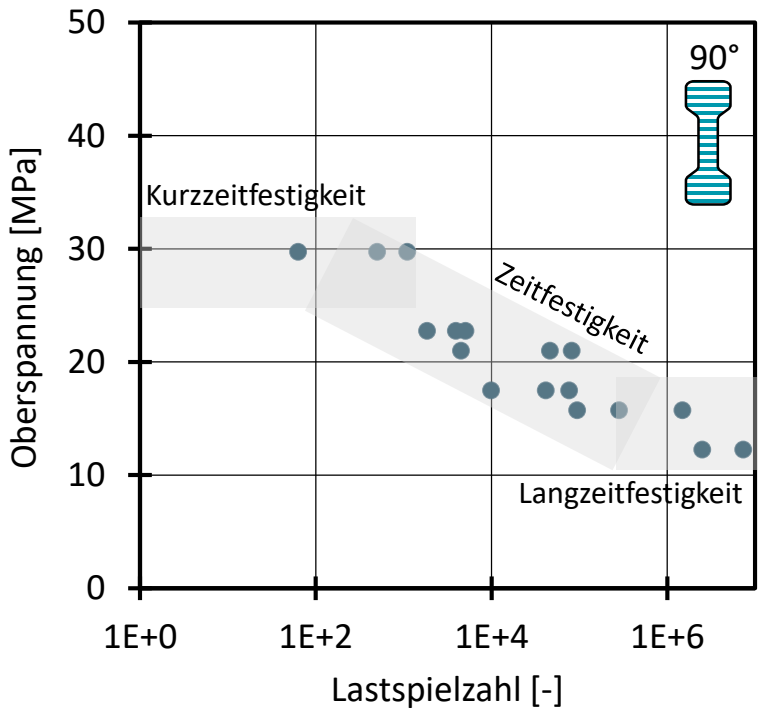
4.5 Entwicklung eines Prüfstands mit Temperaturführung

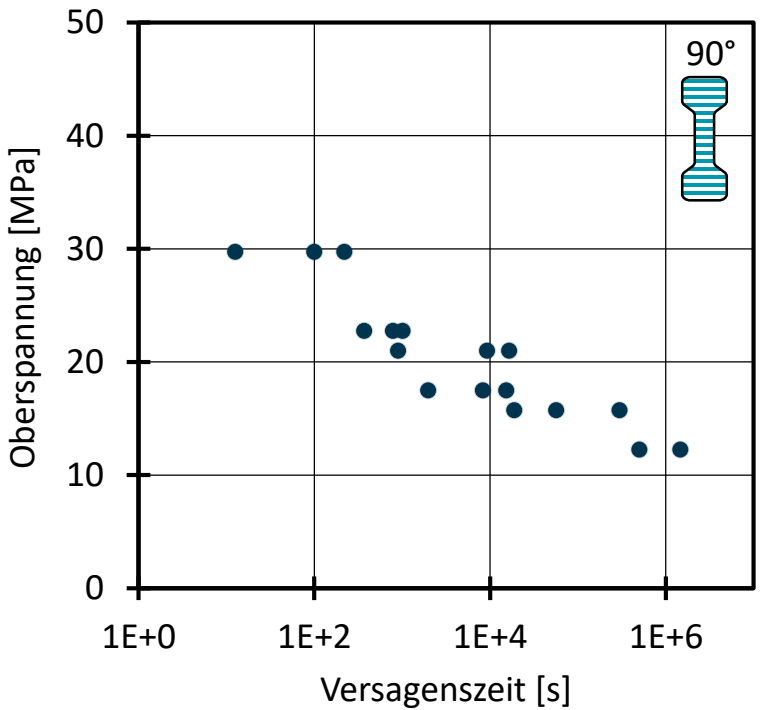
Da eine Erhöhung der Prüffrequenz über 5 Hz gemäß der zugrundeliegenden Norm ASTM D3479 [NN19] wegen einer möglichen Prüfkörpererwärmung und der damit verbundenen Veränderung der thermomechanischen Werkstoffeigenschaften für dynamisch-zyklische Ermüdungsprüfungen nicht zulässig ist, wurde der vorliegende Prüfstand um eine Temperier-Einheit für die Prüfkörper erweitert.

Hierzu wurde von der Firma Bolle&Cords GmbH eine Temperierkammer zur Einhausung der Prüfachse gefertigt. An diese Temperierkammer wird ein Temperiergerät des TypsLKG-K-TK-

Wöhlerkurve – dynamisch zyklische Ermüdungsprüfung

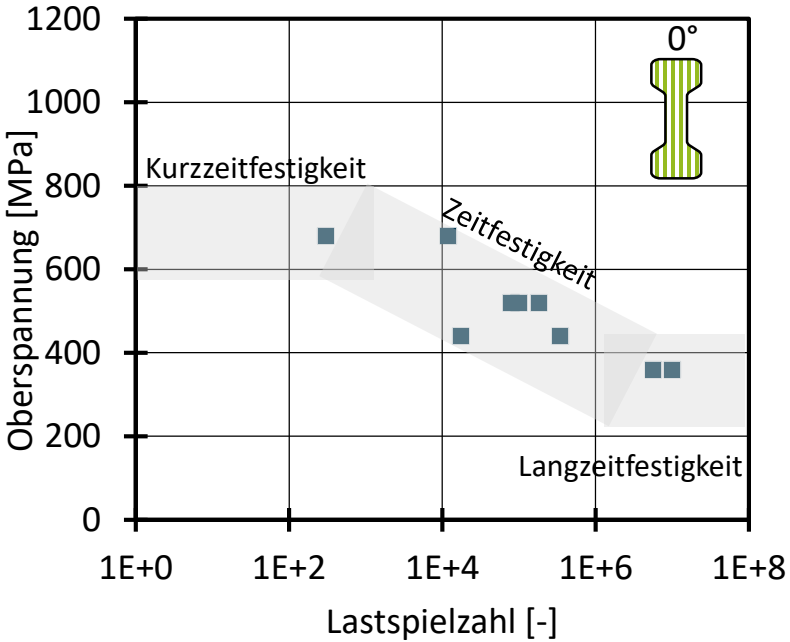
Fasersenkrechte Belastung (90°); Prüffrequenz: 5 Hz; R = 0,1

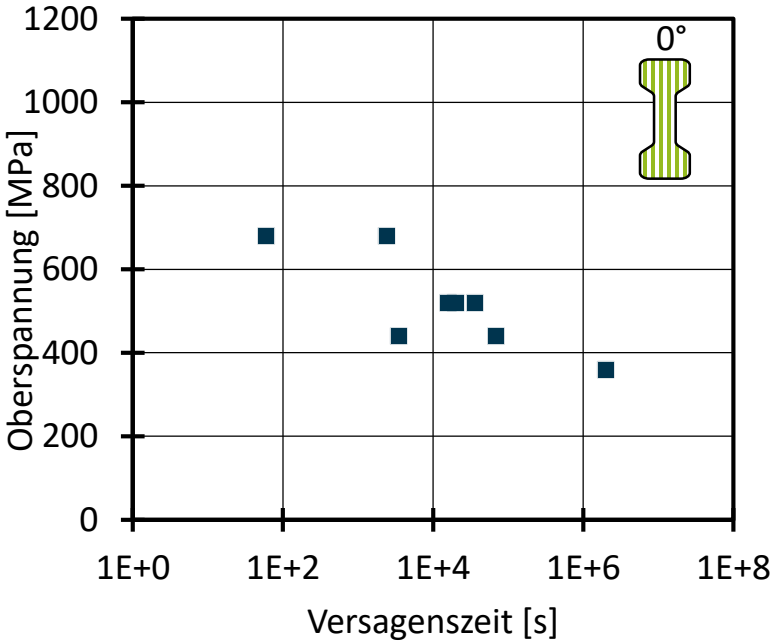




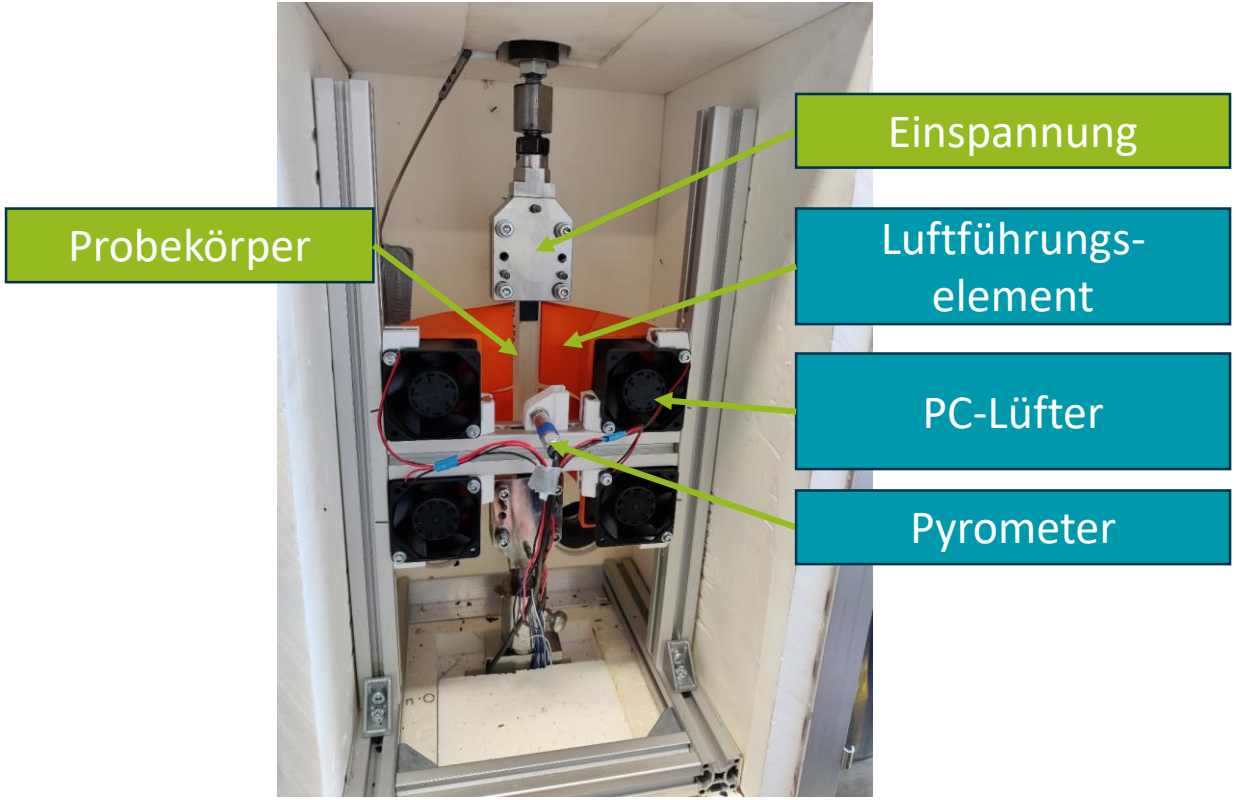
Wöhlerkurve – dynamisch zyklische Ermüdungsprüfung

Faserparallele Belastung (0°); Prüffrequenz: 5 Hz; R = 0,1





Aufbau des Schwingprüfstandes mit Temperaturführung



16-060/250 (Airtemp GmbH, Buchholz, Deutschland) angeschlossen, um eine konstante Umgebungstemperatur von 21 °C zu gewährleisten. Diese gegenüber der Solltemperatur von 23 °C leicht reduzierte Umgebungstemperatur ist notwendig, um eine Temperaturdifferenz für die erzwungene Konvektionskühlung des Prüfkörpers zu erzeugen.

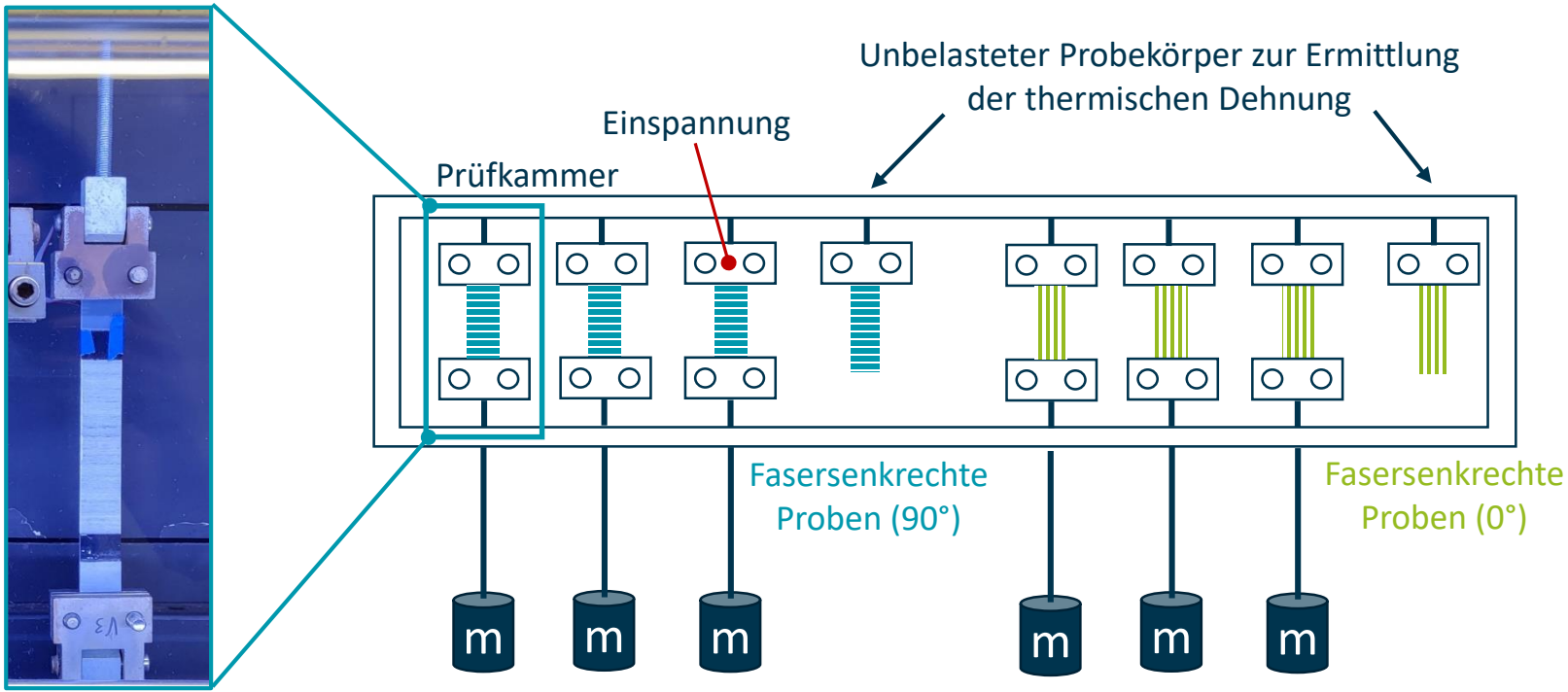
Zur Erzeugung der erzwungenen Konvektion wurde vom IKV eine Lüftungseinheit entwickelt. Diese besteht aus einem Pyrometer vom Typ CSmicro LT22H der Firma optris GmbH (Berlin, Deutschland), vier PC-Lüftern inkl. Luftführungselementen und einer Steuereinheit. Des Weiteren aus handelsüblichen Systemprofile und 3D-gedruckten Elementen, um eine kostengünstige Reproduzierbarkeit zu gewährleisten. Die Steuereinheit wird mit einem ebenfalls kostengünstigen Arduino-Uno-Board betrieben. Zur Temperierung des Prüfkörpers bei Eigenerwärmung wird die Oberflächentemperatur mit dem Pyrometer gemessen. Überschreitet der gemessene Temperaturwert die Solltemperatur von 23 °C, werden die PC-Lüfter mittels Pulsweitenmodulation gezielt angesteuert und der Prüfkörper mit kühler Luft umströmt und damit abgekühlt. Unterschreitet der Temperaturmesswert die Solltemperatur, so wird die Lüftung ausgeschalten. In der Abbildung 4.9 ist die Modifikation des Prüfstandes dargestellt.

4.6 Versuchsaufbau der Zeitstandprüfung

Abbildung 4.10 zeigt den Versuchsaufbau für den standardisierten Zeitstandfestigkeitsversuch und die durchzuführende SIM. Beide Versuche wurden in einer isolierten Prüfkammer HOAG NP 160 durchgeführt. Die Kammertemperatur wurde mit zwei Pt100-Temperatursensoren erfasst. Auf diese Weise kann festgestellt werden, ob es in der Kammer Temperaturgradienten gibt, die die Messungen beeinflussen könnten. Um die genauen Belastungen, die auf die Prüfkörper einwirken, zu bestimmen, wurden die resultierenden Lasten der Gewichte mittels einer digitalen Ringkraftmessdose erfasst. Je nach benötigtem Lastniveau wurde eine 1 kN oder eine 10 kN Ringkraftmessdose der Firma Tiedemann Instruments GmbH & Co. KG (Garmisch-Partenkirchen, Deutschland) genutzt. Dieser Ringkraftmesser wird genau wie die Probekörper in den Prüfaufbau eingespannt und bis zum definierten Lastniveau über die Hebelarmkonstruktion mit Bleigewichten belastet. Die Belastung wird, aufgrund der benötigten Lastniveaus, mittels Hebel aufgebracht. Für die Prüfkörper (0°-Faserorientierung) wird ein 1:20 Hebelverhältnis und für die Prüfkörper (90°-Faserorientierung) ein 1:10 Hebelverhältnis verwendet.

Für die Versuche entsprechend der Stepped-Isothermal-Methode wurde zusätzlich eine Temperiereinheit von der Firma Frank genutzt, um die Temperaturschritte in der Prüfkammer zu ermöglichen. Mithilfe dieser Temperiereinheit wird die Luft in der Kammer erwärmt und mittels Lüftungsröhren gleichmäßig in der Prüfkammer verteilt. Um die rein thermische Dehnung der kontinuierlich unidirektional faserverstärkten Kunststoffe zu bestimmen, wird ein unbelasteter Probekörper stetig in der Prüfkammer platziert.

Aufbau Zeitstandzugversuch



Die verwendeten Prüfkörper vom Typ B mit einer Dicke von 2 mm nach ASTM D3039/D3039 M-17 [NN17] wurden für die Zeitstandzugversuche sowie SIM verwendet (Abbildung 4.2). Für die Untersuchungen in faserparalleler Richtung kamen Prüfkörper nach DIN EN ISO 527-5 Typ A zum Einsatz. Zur Bestimmung der Kriechdehnung wurden Dehnungsmessstreifen auf der Oberfläche der Prüfkörper angebracht und an den Universalmessverstärker Typ MX1615B der Firma Hottinger Brüel & Kjaer GmbH (Darmstadt, Deutschland) angeschlossen. Gemäß DIN ISO 899-1 beginnt die Messwerterfassung mit dem Zeitpunkt der Belastung der Prüfkörper mit dem Endgewicht [NN18].

5 ERKENNTNISSE DER UNTERSUCHUNGSMETHODEN

5.1 Beschleunigung der Lebensdauerprüfungen

5.1.1 Beschleunigte Prüfung des Kurzzeitfestigkeitsbereichs mittels Zugversuches

Aus den Zugversuchen in Abschnitt 4.3 geht hervor, dass die maximale Zugfestigkeit (UTS) in faserparalleler Belastungsrichtung 800 MPa beträgt, während die Zugfestigkeit in fasersenkrechter Belastungsrichtung 35 MPa beträgt. Abbildung 5.1 vergleicht diese resultierenden Ergebnisse der QS-Zugversuche mit den Ergebnissen der dynamisch-zyklischen Ermüdungsversuche bei einem Lastniveau von 85% der Zugfestigkeit (Abschnitt 4.4). Der Kurzzeitfestigkeitsbereich bei fasersenkrechter Belastungsrichtung (90°) liegt bis ca. 10^3 Lastwechsel noch im Bereich der Spannweite der QS-Zugversuche. Andererseits konnte der Kurzzeitfestigkeitsbereich bei faserparalleler Belastung (0°) nicht ermittelt werden, da die Ergebnisse der dynamisch-zyklischen Ermüdungsprüfung für ein Lastniveau von 85% Zugfestigkeit nicht im Streubereich der quasistatischen Zugversuche liegen. Die Streuung der Zugfestigkeit kann auf verschiedene Faktoren wie Prozessschwankungen in der Probenherstellung und Kerbeffekte durch die angebrachten SES zurückzuführt werden.

Insgesamt zeigt sich, dass keine eineindeutige Übertragung der Ergebnisse der QS-Zugversuche auf den Kurzzeitfestigkeitsbereich bei dynamisch-zyklischer Ermüdung für ein Lastniveau von 85% Zugfestigkeit möglich ist.

5.1.2 Beschleunigte Prüfung des Zeitfestigkeitsbereichs mittels Schwingprüfungen bei erhöhter Frequenz mittels adaptiver isothermer Temperierung

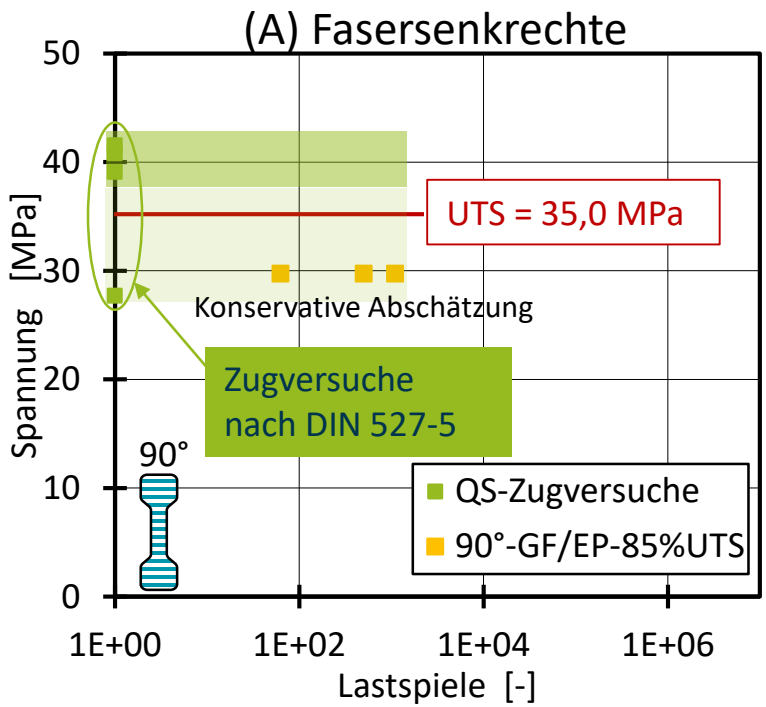
Nachfolgend sind die Ergebnisse der dynamisch-zyklischen Ermüdungsprüfung mit erhöhter Prüffrequenzen von 15 Hz dargestellt. Zur Gewährleistung der gleichbleibenden thermomechanischen Werkstoffeigenschaften wurden die Prüfkörper während der Ermüdungsversuche aktiv temperiert. Dazu kam der in Kapitel 4.5 beschriebene und in Abbildung 4.9 dargestellte Prüfaufbau zu Einsatz.

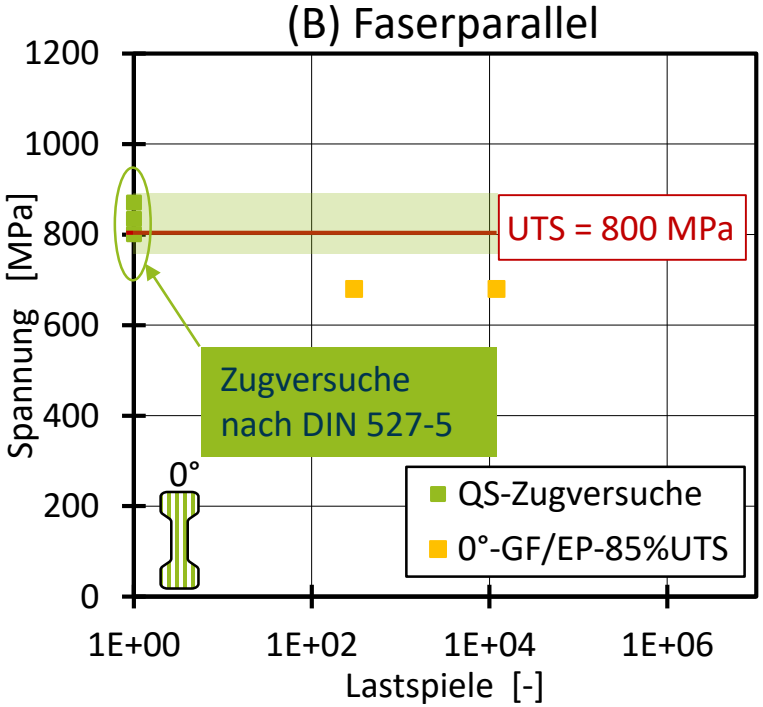
Beschleunigte Ermüdungsprüfungen unter fasersenkrechter Belastung (90°)

Die Belastungsniveaus orientieren sich an der im Abschnitt 4.3 ermitteltet durchschnittlichen maximalen Zugfestigkeit des Werkstoffes sowie die in Kapitel 4.4.1 definierte Lastniveaus. Für die Durchführung der beschleunigten Ermüdungsprüfung für eine fasersenkrechte Belastungsrichtung wurden folgende Lastniveaus definiert (75%, 65%, 45%, 35% Zugfestigkeit). Abbildung 5.2 zeigt die Ergebnisse der dynamisch-zyklischen Ermüdungsprüfungen bei erhöhter Frequenz von 15 Hz überlagert mit den Ergebnissen bei 5 Hz aus Abschnitt 4.4.1.

Rekonstruktion des Kurzzeitfestigkeitsbereich

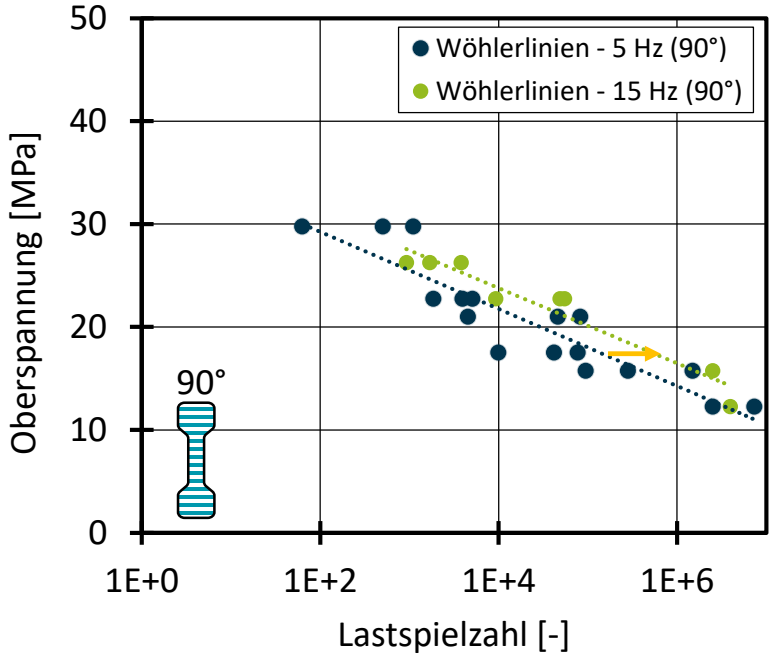
Fasersenkrechte und -parallele Beanspruchung - Dynamisch Zyklische Prüfung (R=0,1 bei 5Hz)

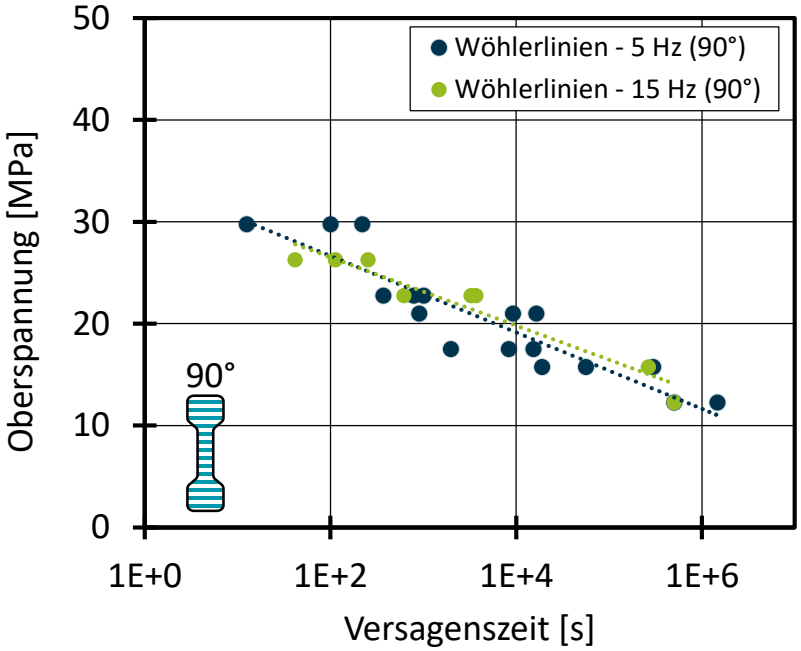




Zeitfestigkeitsbereich – Fasersenkrechte Beanspruchung

Dynamisch-zyklische Schwingprüfung – R=0,1 bei 5Hz und 15 Hz





Da für alle Prüfkörper auf gleiche Art und Weise mit den identischen Fertigungsparametern hergestellt wurden, ist davon auszugehen, dass die Streuung der Ergebnisse aufgrund von unvermeidbaren Fertigungseinflüssen hervorgerufen werden können. Eine größere Anzahl von Datenpunkten könnte jedoch diese Streuung konsolidieren.

Die Ergebnisse in Abhängigkeit von der Lastspielzahl zeigen, dass die Proben bei 15 Hz eine höhere Lastspielzahl ertragen (Verschiebung der maximalen Lastspielzahl zu höheren Dekaden). Dies kann möglicherweise auf die isotherme Temperierung zurückgeführt werden. Daher ist die Erwärmung der Probe ein wichtiger Faktor, der bei der Charakterisierung der Ermüdung berücksichtigt werden muss. Diese Erwärmung kann durch innere Reibung zwischen Faser und Matrix oder durch viskoelastische Dissipation verursacht werden, da der Spannungszustand von der Matrix dominiert wird [KJB+19, RCH20, TX07, TX08, TX09]. Werden dagegen die Ergebnisse in Bezug auf die Versagenszeit betrachtet, so ergibt sich unabhängig von der Frequenz ein ähnliches Verhalten. Dies bedeutet, dass die Schwingprüfung mit höheren Frequenzen und Temperaturführung nur dann angewendet werden sollte, wenn die Versagenszeit anstelle der Lastspielzahl als Auslegungskriterium verwendet wird. Die Beobachtung der Parallelität der beiden Wöhlerkurven lässt jedoch die Hypothese zu, dass der Zeitfestigkeitsbereich durch Schwingversuche mit noch höheren Frequenzen verkürzt werden könnte.

Beschleunigte Ermüdungsprüfungen unter faserparalleler Belastung (0°)

Die Belastungsniveaus orientieren sich prozentual an der im Abschnitt 4.3 ermitteltet durchschnittlichen Zugfestigkeit des Werkstoffes in faserparalleler Richtung (85%, 65%, 55%, 45% Zugfestigkeit). Abbildung 5.3 zeigt die Ergebnisse der Schwingprüfungen bei erhöhter Frequenz von 15 Hz überlagert mit den Ergebnissen bei 5 Hz aus Abschnitt 4.4.2.

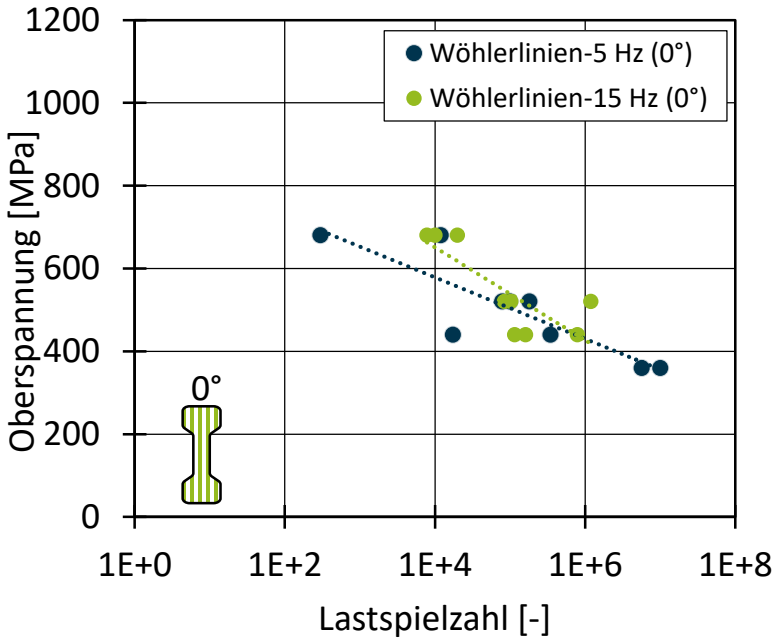
Im Gegensatz zu den resultierenden Wöhlerlinien unter fasersenkrechter Belastung verlaufen hier die beiden Wöhlerkurven nicht parallel zueinander. Aufgrund des faserdominierten Werkstoffverhaltens haben viskoelastische Effekte der Polymermatrix bei faserparalleler Belastung annähernd keine Auswirkung. Daher hat die Einführung einer isothermen Temperierung, die z. B. die dissipierte Wärmeenergie aus der viskoelastischen Dämpfung der Matrix reguliert, keine großen Auswirkungen. Stattdessen sind Schädigungsmechanismen wie Faserbrüche und das Versagen der Matrix-Faser-Grenzfläche entlang der Faserlänge die Hauptmechanismen, die die Ermüdungsentwicklung bei faserparalleler Belastung beeinflussen [Tal81, Vas20].

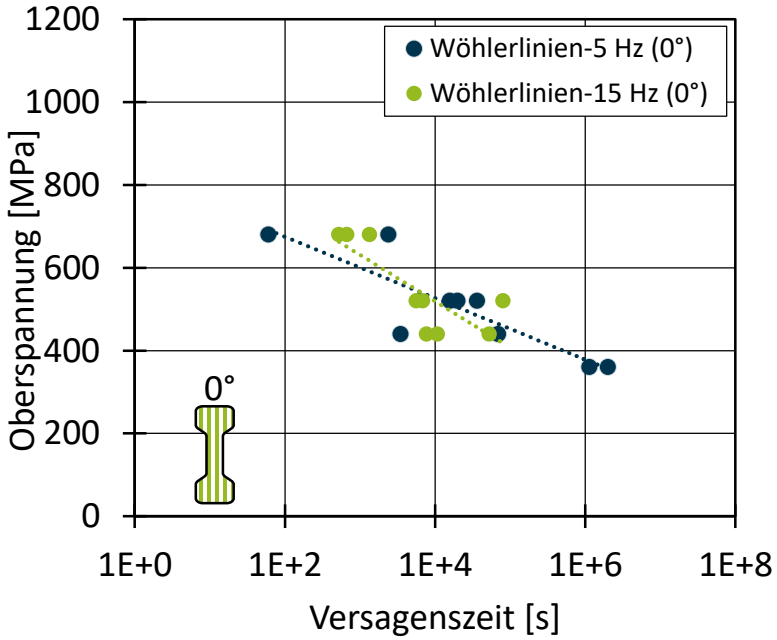
5.1.3 Prüfung des Langzeitfestigkeitsbereichs mittels beschleunigten Zeitstandfestigkeitsprüfungen

Zur Bestimmung des Kriechverhaltens von UD-GFK wurden Prüfkörper sowohl in faserparalleler als auch in fasersenkrechter Belastungsrichtung geprüft. Die definierten Lasten für den

Zeitfestigkeitsbereich – Faserparallele Beanspruchung

Dynamisch-zyklische Schwingprüfung – R=0,1 bei 5Hz und 15 Hz





Zeitstandfestigkeitsversuch wurden auf der Grundlage der Ergebnisse der Zugfestigkeit (Abschnitt 4.3) und der Ermüdungsversuche aus dem Zeitfestigkeitsbereich (Abschnitt 4.4) der jeweiligen Belastungsrichtungen ausgewählt. Da die UD-GFK-Prüfkörper eine nicht signifikante Kriechverformung in faserparalleler Belastungsrichtung (0°) aufweisen, wurden nur die Kriechspannungen von 35% Zugfestigkeit und 65% Zugfestigkeit zur möglichen Anwendung der Stepped-Isothermal-Methode untersucht. Da eine signifikante Kriechdehnung für den fasersenkrechten Belastungszustand zu erwarten ist, wurden die Spannungszustände bei 65%, 55%, 45% und 35 % Zugfestigkeit untersucht. Für jeden der genannten Spannungszustände wurden drei Prüfkörper getestet.

Bestimmung des Zeitstandfestigkeitsverhaltens von UD-GFK in Faserrichtung (0°)

Die Ergebnisse der Zeitstandfestigkeitsversuche in Faserrichtung für 35% und 65% der Zugfestigkeit sind in Abbildung 5.4 dargestellt. Die Dehnung wurde bei drei Proben nicht aufgezeichnet, da eine Fehlfunktion der DMS-Streifen vorlag. Das Kriechverhalten zeigte, dass weder bei einem Lastniveau von 35% Zugfestigkeit noch bei 65% Zugfestigkeit eine signifikante Kriechdehnung erreicht wurde. Dies kann damit erklärt werden, dass bei faserparalleler Belastung die Fasern den größten Teil der Last tragen und Glasfasern bekanntermaßen ein nahezu vernachlässigbares Kriechverhalten aufweisen.

Der einzige gültige Zeitstandfestigkeitsversuch bei 65% Zugfestigkeit zeigt einen Dehnungsbruch von 0,75 %. Die Versuche bei 35 % der Zugfestigkeit versagten nicht innerhalb der in DIN 899-1 angegebenen 1000 Stunden und wurden deshalb abgebrochen. Anschließend wurde die Restfestigkeit in einem quasistatischen Zugversuch bestimmt (Tabelle 5). Die Ergebnisse zeigen eine Abnahme der Zugfestigkeit um ca. 10 % im Vergleich zur quasistatischen Zugfestigkeit (800 MPa). Dies ist darauf zurückzuführen, dass das Versagensverhalten von den Fasern dominiert wird.

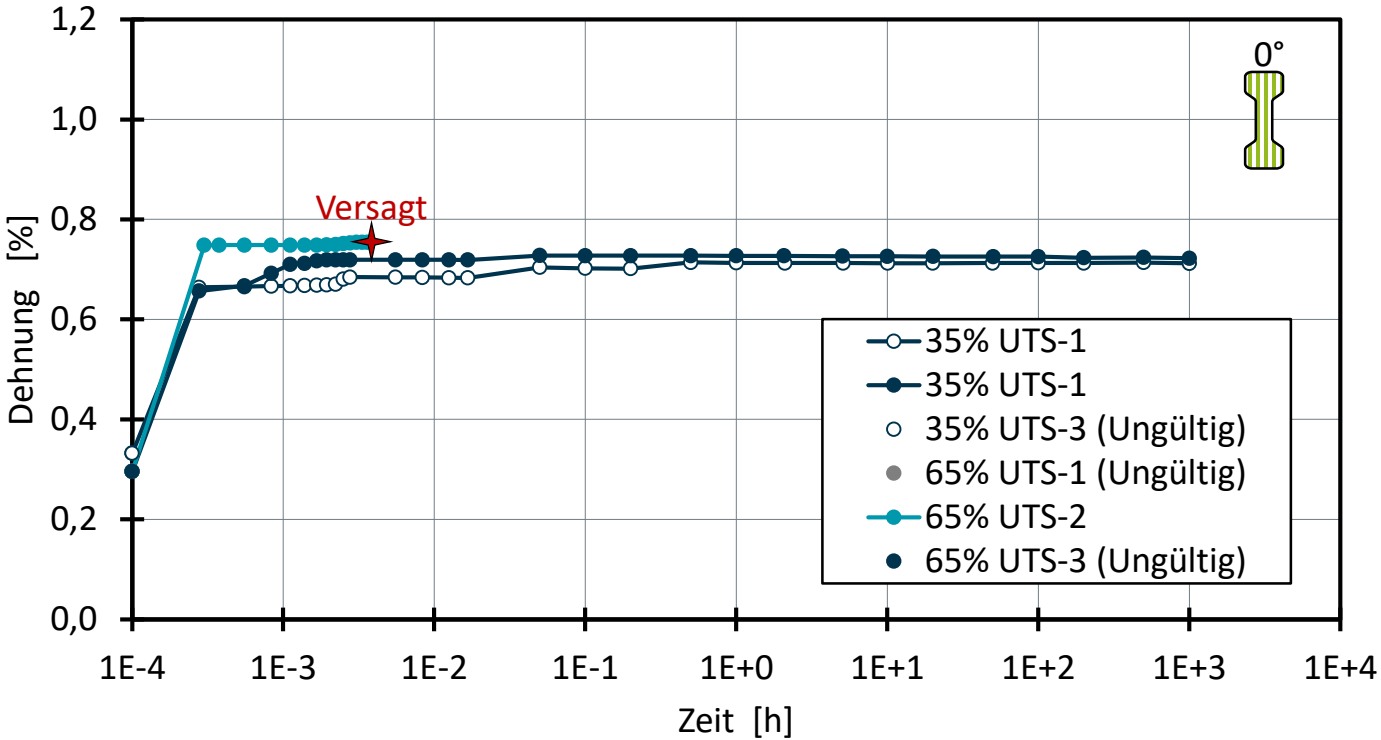
Probe	Bruchspannung in [MPa]	Bruchdehnung in [%]
35% UTS - 1	720,0	2,3
35% UTS - 2	756,4	2,5
35% UTS - 3	Ungültig	Ungültig

Tabelle 5: Bestimmung der Restfestigkeit der Probekörper bei 0°- Faserorientierung mittels quasistatischem Zugversuch nach DIN EN ISO 527-5

Der Einfluss der Temperatur auf die Messungen kann vernachlässigt werden, da sie während der Prüfung nahezu konstant blieb (23,5 ± 0,5 °C). Aufgrund dieser geringen Abnahme der

Zeitstandverhaltens von UD-GFK

Faserparallele Belastung (0°) – T = 23°C



Restfestigkeit und der geringeren Kriechdehnung wurden keine weiteren Ergebnisse in faserparalleler Belastungsrichtung generiert. Durch die Verwendung einer höheren Referenztemperatur (60 - 80°C) kann jedoch eine gewisse Kriechdehnung erreicht werden [Kon05], welche eine Anwendung der SIM faserparalleler Belastungsrichtung ermöglichen könnte.

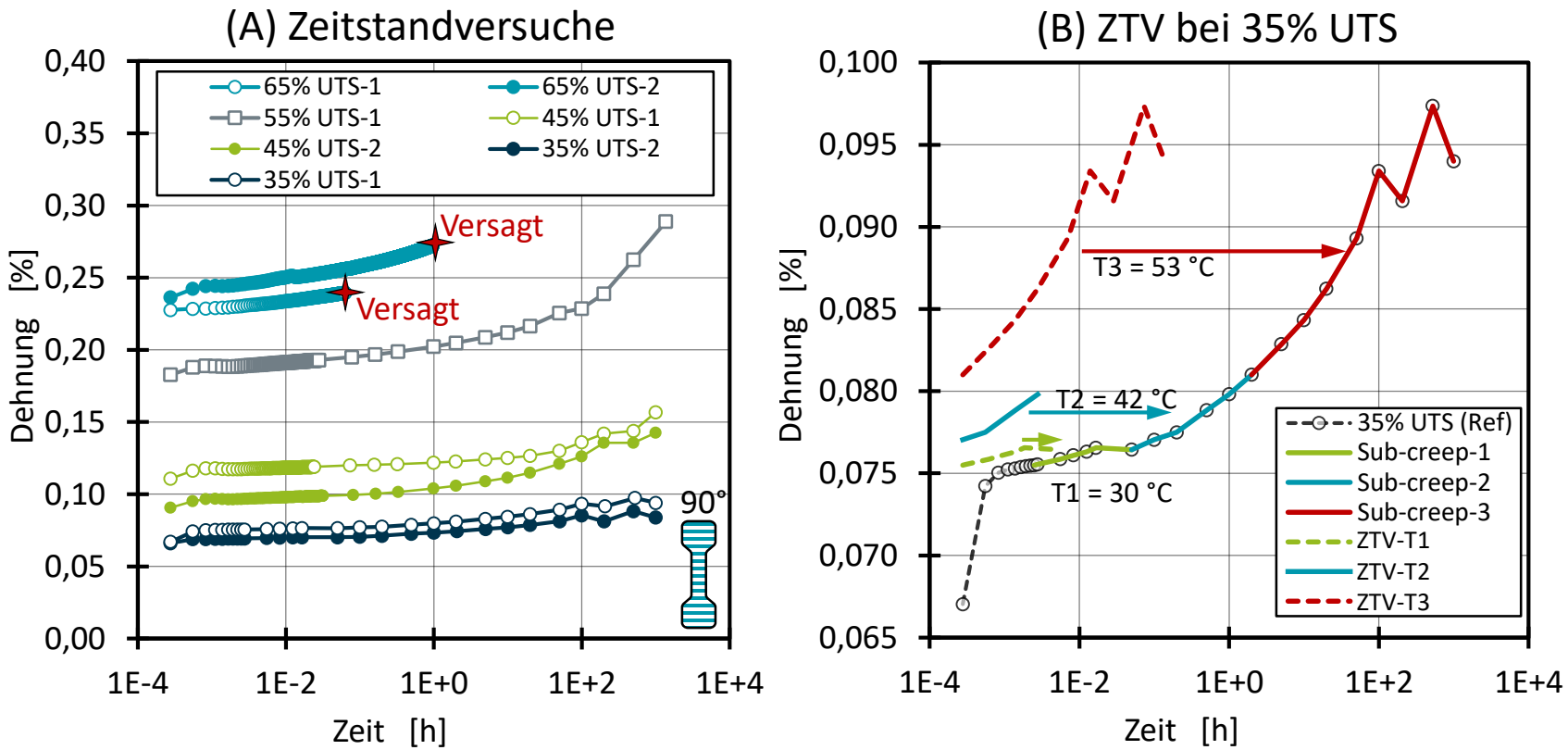
Bestimmung des Zeitstandverhaltens von UD-GFK unter fasersenkrechter Belastung (90°)

Abbildung 5.5A zeigt die Ergebnisse der Zeitstandfestigkeitsversuche bei fasersenkrechter Belastung. Es ist zu beachten, dass einige Prüfkörper kurz nach der Belastung mit dem Endgewicht vorzeitig versagten und nicht in die Analyse aufgenommen wurden. Der Einfluss der Temperatur auf die Messungen kann vernachlässigt werden, da diese während der Prüfung nahezu konstant war (23,3 ± 0,1 °C). Da alle Prüfkörper gleichzeitig geprüft wurden, können die Abweichungen bei der gemessenen Dehnung und dem vorzeitigen Versagen auf Unterschiede in der Probenqualität zurückgeführt werden.

Unter 65% der Zugfestigkeit trat das Werkstoffversagen im sekundären und tertiären Kriechverhalten mit Versagensdehnungen von 0,27% und 0,24% auf. Im Gegensatz dazu zeigen die Kriechkurven bei 55% und 45% der Zugfestigkeit ein tertiäres Kriechverhalten ohne Versagen innerhalb der ersten 1000 Prüfstunden. Bei 55% Zugfestigkeit wurde der Test insgesamt 2100 Stunden aufrechterhalten und eine finale Dehnung von ca. 0,29% erreicht. Obwohl eine höhere Dehnung erreicht werden konnte als die bei den Proben bei 65% der Zugfestigkeit beobachtete Versagensdehnung, wurde kein Werkstoffversagen erreicht. Dies kann auf Unterschiede in der Probenqualität zurückzuführen sein. Die Entwicklung der Kriechdehnung unter 35% der Zugfestigkeit zeigt, dass das sekundäre Kriechen während des gesamten Kriechversuchs relativ konstant bleibt und um etwa 0,1% schwankt. In den ersten 1000 Prüfstunden wurde ebenfalls kein Versagen festgestellt. Anschließend wurde die Restfestigkeit der gültigen Prüfkörper quasistatisch bestimmt (Tabelle 6). Die Ergebnisse zeigen keine signifikante Abnahme der Zugfestigkeit im Vergleich zur quasistatisch ermittelten Zugfestigkeit (35 MPa). Dies kann auf eine mögliche Qualitätsschwankung der untersuchten Prüfkörper zurückgeführt werden.

Zeitstandverhaltens von UD-GFK

Fasersenkrechte Belastung (90°); T_{ref}=23 °C und K = 12795.64 [K^{-1}] [KAGE19].



Probe	Bruchspannung in [MPa]	Bruchdehnung in [%]
55% UTS - 1	37,6	0,43
55% UTS - 2	Ungültig	Ungültig
55% UTS - 3	Ungültig	Ungültig
45% UTS - 1	28,5	0,25
45% UTS - 2	34,9	0,34
45% UTS - 3	Ungültig	Ungültig
35% UTS - 1	27,2	0,27
35% UTS - 2	39,4	0,38
35% UTS - 3	Ungültig	Ungültig

Tabelle 6: Bestimmung der Restfestigkeit der Probekörper bei 90°- Faserorientierung mittels quasistatischem Zugversuch nach DIN EN ISO 527-5

Wie in den Abschnitten 3.1 und 3.2 diskutiert, wird erwartet, dass die Kriechkurve bei 35% der Zugfestigkeit eine Annäherung an das Ermüdungsverhalten für den Langzeitfestigkeitsbereich ermöglicht. Die bisherigen Ergebnisse zeigen jedoch, dass ein Kriechversuch nicht innerhalb eines angemessenen Zeitrahmens durchführbar sind (mehr als 1000 Stunden sind von Nöten). Daher wird nachfolgend die SIM zur Beschleunigung des Zeitstandversuchs eingesetzt.

Durchführung und Anwendung der SIM

Nach dem Boltzmann'schen Überlagerungsprinzip können Kriechkurven bei verschiedenen Temperaturstufen als Einzelversuche behandelt werden, die mit einem virtuellen Startzeitpunkt (t') beginnen [Bol74]. Mit der Kriechkurve bei 35% Zugfestigkeit als Referenz wurden drei Sub-kriechkurven abgeleitet, in denen der Kriechmodul relativ konstant bleibt (Abbildung 5.5B). Unter der Annahme, dass die virtuelle Startzeit jeder Subkriechkurve gleich der Startzeit der Referenzkurve ist, kann ein Verschiebungsfaktor ($\log a_t$) durch eine horizontale Verschiebung jeder Subkriechkurven zu ihrer virtuellen Startzeit gefunden werden. Anschließend werden die Temperaturschritte für die SIM durch Umkehrung der Arrhenius-Zeit-Temperatur-Überlagerung berechnet (Gleichung 5.2):

$$\log a_t = \mathrm{K}\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}}\right) \qquad \textit{(Gl. 5.1)}$$

$$T = \left(\frac{\log a_t}{K} + \frac{1}{T_{ref}}\right)^{-1} \qquad \textit{(Gl. 5.2)}$$

Hierbei stellt K eine Materialkonstante, a_t der Verschiebungsfaktor bei einer Temperatur T und T_{ref} die Referenztemperatur dar. Abbildung 5.5B zeigt die Referenzkriechkurve (35 % UTS-2), die drei Subkriechkurven und die verschobenen Subkriechkurven mit den entsprechenden Verschiebungstemperaturen (30 °C, 42 °C, 53 °C).

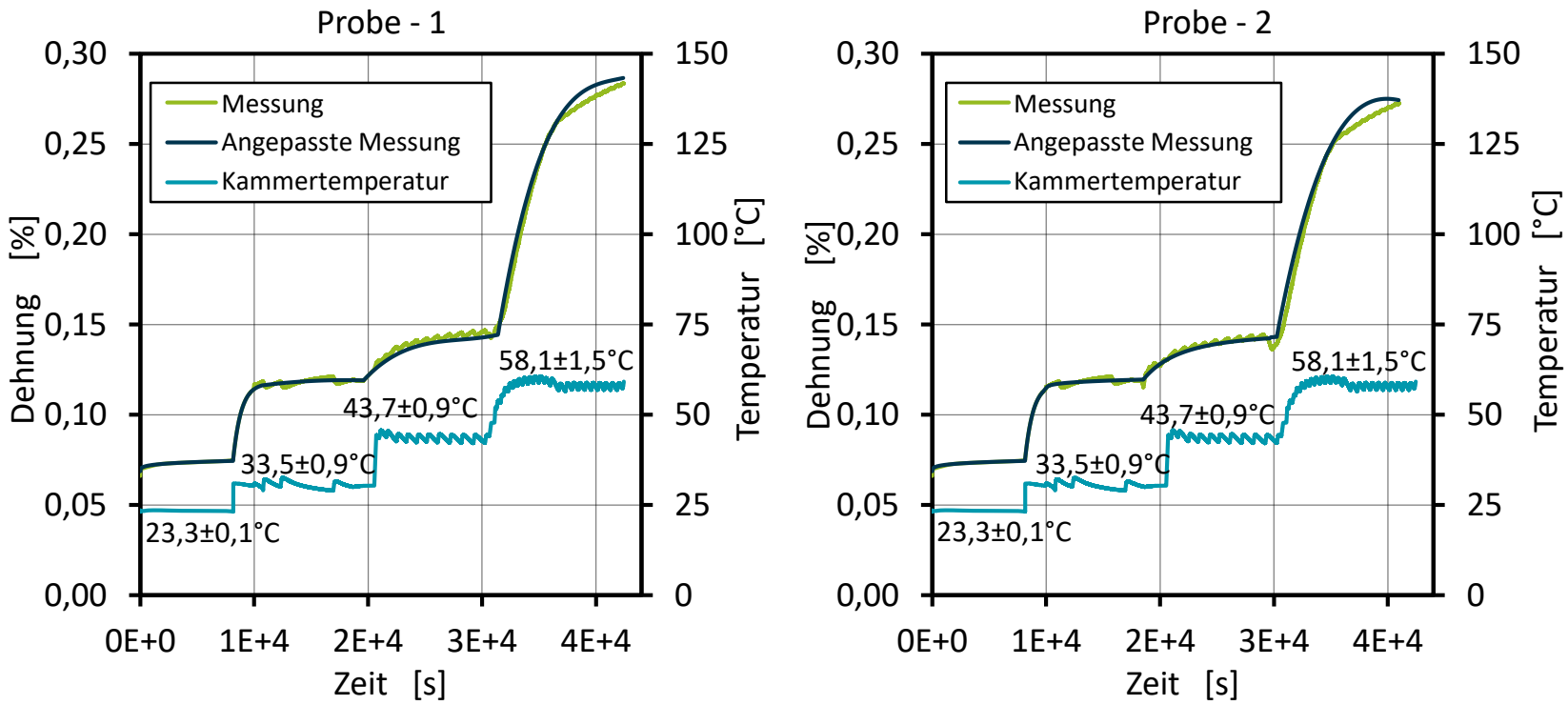
Für die SIM wurden isotherme Kurzzeit-Kriechversuche mit einer Dauer von bis zu 3 Stunden bei den zuvor festgelegten Zieltemperaturen (30 °C, 42 °C, 53 °C) durchgeführt. Die benötigte Zeit für das Einstellen der Temperaturen wurde aufgezeichnet und ist in Abbildung 5.6 dargestellt. Um die erste Temperaturstufe, ausgehend von der Raumtemperatur (23 °C), zu erreichen, wurden ca. 150 Sekunden benötigt. Für die zweite Temperaturerhöhung waren ca. 1100 Sekunden von Nöten. Die dritte Temperaturerhöhung betrug circa ca. 40 Minuten. Abbildung 5.6 zeigt die Dehnungskurven, das Temperaturprofil und die Durchschnittstemperaturen, die bei den einzelnen Temperaturstufen erreicht wurden. Es ist anzumerken, dass der Dehnungsmessstreifen einer Probe eine Fehlfunktion aufwies und aus der Analyse entfernt wurde. Aufgrund des hohen Luftdurchsatzes wurde die Wärme gleichmäßig verteilt, so dass der Temperaturgradient in der Kammer zu vernachlässigen ist. Allerdings konnten die Zieltemperaturen mit dem verwendeten Temperaturregler nicht exakt erreicht werden. *Achereiner et al*. kamen jedoch zu dem Schluss, dass leicht unterschiedliche Prüftemperaturen, zu nahezu identischen Kriechvorhersagen führen können [AEB+13]. Daher sollten die erhaltenen Temperaturstufen keine signifikante Abweichung in der Kriechvorhersage verursachen.

Bei allen Kurzzeit-Kriechversuchen wurden Temperaturschwankungen um die Solltemperaturen beobachtet. Der Einfluss dieser Schwankungen spiegelt sich in den gemessenen Dehnungen wider. Wie *Achereiner et al.* gezeigt haben, ist die Bestimmung des virtuellen Startzeitpunkts für die SIM empfindlich gegenüber Unregelmäßigkeiten in den Dehnungsdaten [AEB+13]. Daher wurde ein Rauschfilter implementiert, um die Datenqualität zu verbessern, ohne das zugrundeliegende Kriechverhalten zu verändern. Aufgrund dieser Vorverarbeitung der Daten gibt es keinen signifikanten Unterschied zwischen den gefilterten Kurven der beiden Proben.

Beide Proben versagten nach 11,8 und 11,4 Stunden mit Bruchdehnungen von 0,28% und 0,27%. Es wurde festgestellt, dass diese Dehnungen ähnlich der Bruchdehnung sind, die für den Zeitstandversuch unter 65% der Zugfestigkeit ermittelt wurde, was auf eine kritische Dehnung von etwa 0,27 % hindeutet. Nach dem von *Achereiner et al.* und *Thomas et al.* [AEB+13, TN13]beschriebenen Verfahren wurden die SIM-Daten um die thermische Dehnung korrigiert. Die gefilterten Dehnungsdaten wurden vertikal verschoben, indem die thermische Dehnung von der unbelasteten Probe in der Prüfkammer subtrahiert wurde. Die virtuellen Startzeiten (t') für

Zeitstandversuche nach Stepped-Isothermal-Methodik

Fasersenkrechte Belastung (90°)

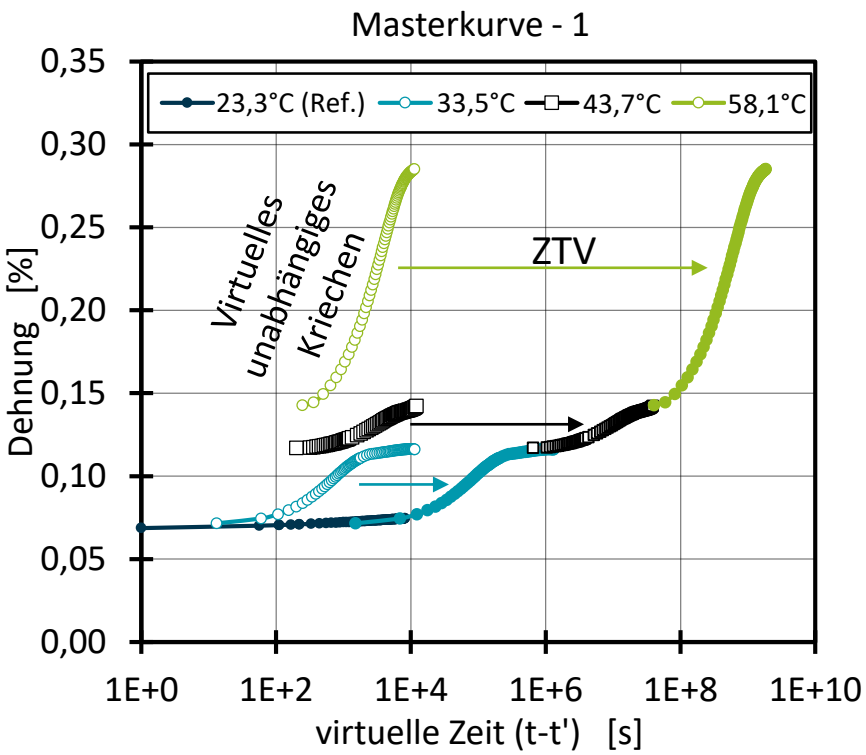


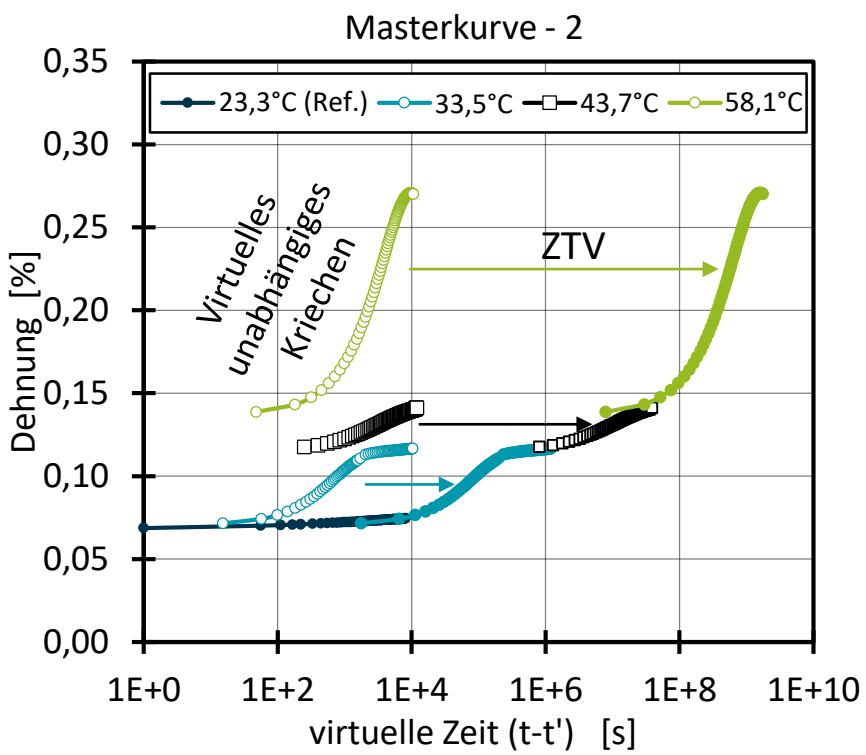
jedes kurzzeitige isotherme Kriechen wurde dann iterativ mit einem selbst geschriebenen Python-Code bestimmt. Dabei entspricht t' einer logarithmischen virtuellen Zeit, bei der die Kriechrate am Ende eines Temperaturschrittes identisch mit der Kriechrate zu Beginn des nächsten Schrittes ist [AEB+13]. Die virtuell unabhängigen Kriechkurven wurden dann durch Umrechnung auf die virtuelle Zeitskala (t-t') ermittelt. Abbildung 5.7 zeigt die virtuell unabhängigen Kriechkurven für beide Proben. Erwartungsgemäß sind die beiden Hauptkurven ähnlich. Streng genommen ist das Boltzmann'schen Überlagerungsprinz nur für kleine Dehnungen anwendbar, da es ein lineares viskoelastisches Verhalten beschreibt. Eine Erweiterung auf größere Dehnungen kann jedoch für technische Zwecke eine sinnvolle Näherung darstellen [PWM+21, TPS98]. Durch horizontales Verschieben nach der ZTV (Gleichung 5.1) wurden aus dem Satz unabhängiger isothermer Kriechkurven eine Kriechhauptkurve erzeugt. Abbildung 5.7 zeigt die Kriechhauptkurven für beide Probekörper. Wie aufgrund der Vorverarbeitung der Daten zu erwarten war, gab es keinen signifikanten Unterschied zwischen den beiden Masterkurven.

Abbildung 5.8 vergleicht die Kriech-Masterkurven mit der Referenz-Kriechkurve (35 % der UTS-2). Eine genauere Betrachtung zeigt eine gute Reproduzierbarkeit für die Referenztemperatur (23,3 °C). Die Masterkurve weicht jedoch bei den Temperaturschritten vom erwarteten Trend ab. Besonders ausgeprägt ist dies beim ersten Temperaturschritt (33,5 °C). Bei den folgenden Temperaturschritten ist ein weicherer Dehnungsübergang und ein klarer Trend zu erkennen. *Achereiner et al.* und *Thomas et al.* weisen darauf hin, dass in den Temperaturübergangsbereichen ein undefiniertes Kriechverhalten aufgrund der nicht sofortigen Erwärmung vorliegt [AEB+13, TN13]. Weiterhin empfehlen Achereiner et al., dass die Zieltemperatur für Polypropylen in weniger als 300 Sekunden erreicht werden sollte, um eine mögliche Divergenz im Langzeit-Kriechverhalten zu vermeiden [AEB+13]. In dieser Studie wurden die Zieltemperaturen im Mittel nach ca. 1500 Sekunden erreicht. Es wird zwar eingeräumt, dass sich der untersuchte kontinuierlich unidirektional faserverstärkten duroplastischen Kunststoffen erheblich von dem von *Achereiner et al.* untersuchten Werkstoff unterscheidet, jedoch könnte der langsame Temperaturanstieg die festgestellte Abweichung erklären. Um diesen Effekt abzuschwächen, sollten Temperaturzwischenschritte eingefügt werden, um die Aufheizzeit zu minimieren. Dies verlängert zwar die Dauer des SIM-Versuchs (insgesamt ca. 15 Stunden), ist aber im Vergleich zur Dauer eines konventionellen Zeitstandversuchs (mehr als 1000 Stunden) immer noch deutlich kürzer.

Virtuell unabhängige Kriechkurven und Masterkurven

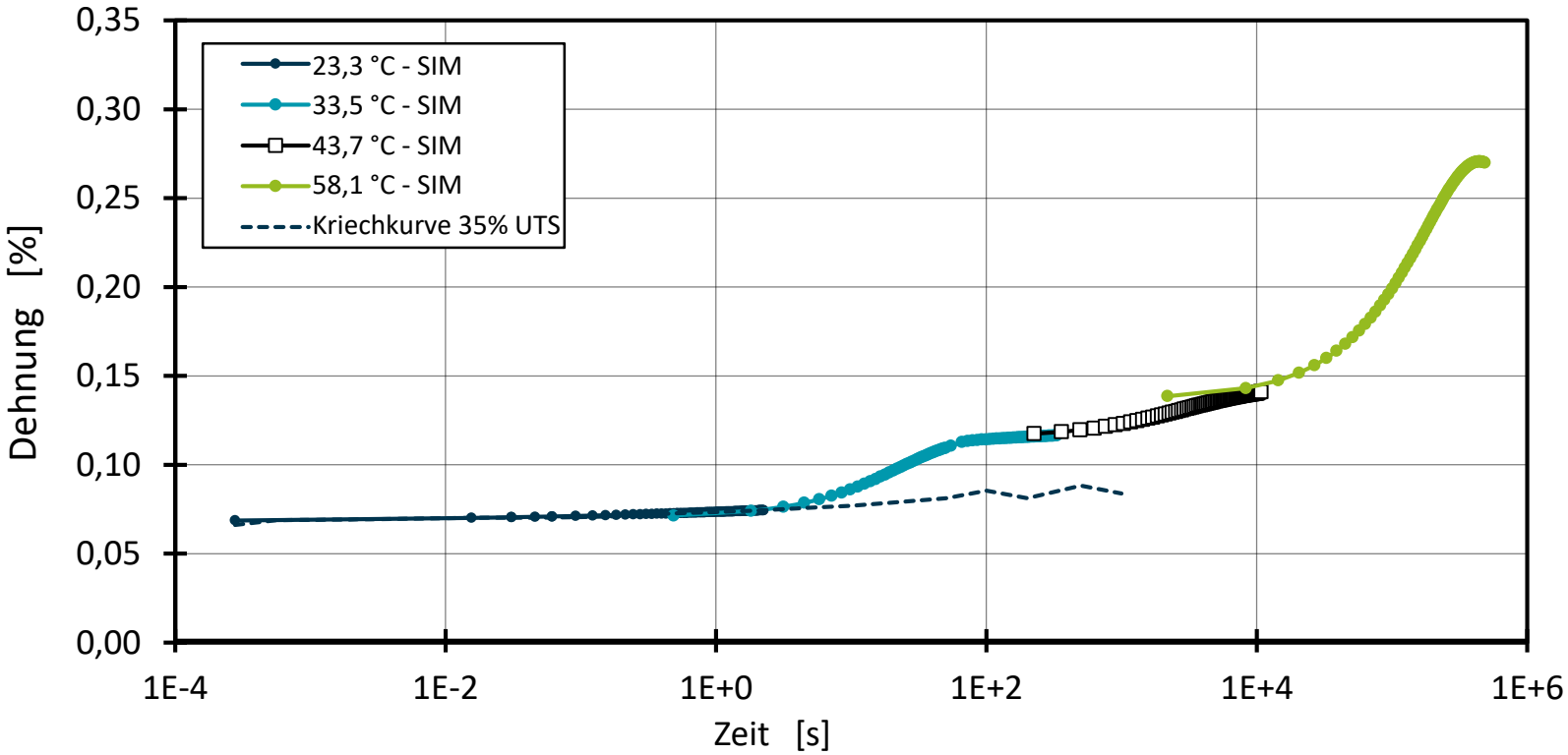
Fasersenkrechte Belastung (90°)





Masterkurven und Referenz-Kriechkurve (35 % der UTS)

Fasersenkrechte Belastung (90°)



6 FAZIT UND AUSBLICK

Zur Überprüfung der Hypothese, dass eine definierte Substitution der dynamisch-zyklischen Ermüdungsprüfungen durch andere zeitraffende experimentelle Prüfverfahren eine Beschleunigung der Kennwertermittlung ermöglicht, wurden umfangreiche experimentelle Prüfungen mittels standardisierter Prüfverfahren sowie der neuartige Prüfansatz zur beschleunigten Charakterisierung des Ermüdungsverhaltens untersucht.

In den Untersuchungen zur Abbildung des Kurzzeitfestigkeitsbereiches unter Verwendung von quasistatischen Zugversuchen mit begleitender Schallemissionsanalyse (SEA) konnte keine eindeutige Mikroschädigungsgrenze ermittelt werden. Sowohl bei faserparalleler als auch bei fasersenkrechter Belastung deuteten die SEA-Ergebnisse darauf hin, dass die Schädigung kurz vor oder zum Zeitpunkt der maximalen Zugfestigkeit auftrat. Weitere Untersuchungen sind demnach erforderlich, um das Verständnis hinsichtlich der Mikroschädigung und deren Auswirkungen auf die Festigkeit zu vertiefen.

Die Ergebnisse der dynamisch-zyklischen Ermüdungsprüfung bei 85% der Zugfestigkeit, sowohl bei faserparalleler als auch bei fasersenkrechter Beanspruchung, deuten darauf hin, dass der Kurzzeitfestigkeitsbereich durch die quasistatischen Zugversuche nicht eindeutig abgedeckt werden konnte. Die beobachtete Streuung der Zugfestigkeit könnte auf verschiedene Faktoren wie Prozessschwankungen bei der Probenherstellung und Kerbeffekte durch die angebrachten Schallemissionssensoren (SES) zurückzuführen sein. Weitere Untersuchungen mit einer höheren Zugfestigkeit, z.B. 90-95% Zugfestigkeit, die einen Zeitbereich von 10^2 Lastspielen abdecken können, werden vorgeschlagen. Eine akzeptable Zeitersparnis für die industrielle Anwendung kann jedoch in Frage gestellt werden.

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurde festgestellt, dass die dynamisch-zyklische Ermüdungsprüfung bei 15 Hz mit Temperaturführung eine ähnliche Versagenszeit wie bei einer Prüffrequenz von 5 Hz erreicht, was zu keiner praktischen Verkürzung der Prüfzeit für den geprüften Werkstoff führt. Es bleibt zu diskutieren, welchen Vorteil eine Erhöhung der Prüffrequenz bietet.

Im Vergleich zur klassischen uniaxialen Ermüdungsprüfung zur Bestimmung des Ermüdungsverhaltens im Langzeitfestigkeitsbereichs konnte eine Substitution mit der SIM den Versuchsaufwand auf bis zu 11 Stunden reduzieren. Daraus resultiert ein großer Vorteil der SIM zu klassischen konventionellen Zeitstandzugversuchen (1000 Stunden), welche mittels ZTV zu einer Masterkurve extrapoliert werden können. Die Genauigkeit der resultierenden Masterkurve hängt jedoch stark von der Qualität der Probe und den experimentellen Rohdaten ab. Außerdem muss die Temperaturführung innerhalb der Prüfungen für die SIM schnell genug sein, um undefiniertes Kriechen in den Temperaturübergangsbereichen zu minimieren. Hierfür

sollten neue Vorgehen zur schnellen und homogenen Temperierung des Prüfkörpers eingebracht werden. Abschließend sei noch einmal erwähnt, dass die Anwendbarkeit der SIM für kontinuierlich unidirektional faserverstärkte duroplastische Kunststoffe nur in fasersenkrechter Belastungsrichtung gewährleistet ist. In faserparalleler Richtung hingegen nicht, da hier keine signifikante Kriechverformung resultiert.

7 EINSATZ VON GERÄT UND WISSENSCHAFTLICH-TECHNISCHEM PERSONAL

Zur Durchführung des Forschungsprojekts wurden 24 PM wissenschaftlich-technisches Personal über die gesamte Laufzeit eingesetzt. Der wissenschaftliche Mitarbeiter war erforderlich, um die wissenschaftliche Fragestellung zu erarbeiten, die Problemstellung in Abstimmung mit Vertretern aus Wirtschaft und Industrie zu diskutieren sowie Studenten zu betreuen, die im Rahmen des Projektes wissenschaftliche Arbeiten durchführten. Die geleistete Arbeit war somit notwendig und angemessen.

Die wissenschaftliche Fragestellung sowie die auftretenden Problemstellungen konnten mit den an der Forschungsstelle verfügbaren Geräten bearbeitet werden. Folglich wurden keine zusätzlichen externen Geräte beschafft oder genutzt.

8 WIRTSCHAFTLICHE RELEVANZ FÜR KMU

8.1 Wirtschaftliche Bedeutung der Forschungsergebnisse für KMU

Endlosfaserverstärkte Kunststoffe (FVK) werden in Strukturbauteilen mit hohen Anforderungen an Sicherheit und Betriebsfestigkeit eingesetzt. Der Nachweis der Betriebsfestigkeit kann bisher nur durch zeit- und arbeitsintensiven Ermüdungsversuche erbracht werden. Diese Ermüdungsversuche stellen eine hohe finanzielle und zeitliche Hürde dar, die von kleinen und mittelständischen Unternehmen nur schwer zu bewältigen ist und somit den Einsatz neuer Werkstoffkombinationen verzögert oder verhindert.

Ziel dieses Forschungsvorhabens war es daher, eine Hypothese hinsichtlich einer neuartigen Prüfmethode zur beschleunigten Charakterisierung des Ermüdungsverhaltens von kontinuierlich unidirektional faserverstärkten Kunststoffen zu untersuchen. Die Durchführung von risikobehafteten Forschungsvorhaben mit umfangreichen experimentellen Versuchen zur Entwicklung neuer Prüfmethoden ist für kleine und mittelständische Unternehmen in der Regel zeitlich, personell und finanziell nicht tragbar.

Basierend auf den Ergebnissen dieses Forschungsvorhabens konnte die vorliegende Hypothese einer neuartigen Prüfmethode zur beschleunigten Charakterisierung des Ermüdungsverhaltens von kontinuierlich unidirektional faserverstärkten Kunststoffen nicht allgemeingültig verifiziert werden. Aus den Ergebnissen der Untersuchungen konnte jedoch abgeleitet werden, welche experimentellen Prüfmethoden in Abhängigkeit von den Beanspruchungszuständen (faserparallel & -senkrecht) auch anderweitig eingesetzt werden können und welcher Sensitivität die Messergebnisse hinsichtlich verschiedener Faktoren wie Prüfumfang, Prüfbedingungen aber auch werkstoffspezifischer Eigenschaften unterliegen.

Im Vergleich zur klassischen uniaxialen Ermüdungsprüfung zur Bestimmung des Ermüdungsverhaltens im Langzeitfestigkeitsbereichs konnte eine Substitution mit der SIM den Versuchsaufwand auf bis zu 11 Stunden reduzieren. Daraus resultiert ein großer Vorteil der SIM zu klassischen konventionellen Zeitstandzugversuchen (1000 Stunden), welche mittels ZTV zu einer Masterkurve extrapoliert werden können.

Insgesamt konnte durch das Forschungsvorhaben ein tieferes Verständnis für die dynamisch-zyklische Ermüdung von kontinuierlich unidirektional glasfaserverstärkten Kunststoffen geschaffen werden.

9 PLAN ZUM ERGEBNISTRANSFER IN DIE WIRTSCHAFT

Zur Sicherstellung des Transfers der Forschungsergebnisse sind verschiedene Maßnahmen während der Laufzeit des Projekts und nach dessen Abschluss geplant. Diese werden im Folgenden dargestellt.

Maßnahme: **Projektbegleitender Ausschuss**	Zeitrahmen: 14.10.2020, 30.08.2022, 17.03.2023, 24.05.2023
Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens ist ein intensiver Dialog mit den Teilnehmern des Projektbegleitenden Ausschusses vorgesehen. Um eine breite Umsetzung der Projektergebnisse zu erzielen, spiegelt der Ausschuss den potenziellen Nutzerkreis wider. In diesem sind Ingenieurdienstleistern und Softwareherstellern für die Struktursimulation über Sensorhersteller für Schallemissionsanalysen bis hin zu Epoxid- und Faserherstellern Firmen vertreten. Über die Projektlaufzeit wurden vier Ausschusstreffen durchgeführt, bei denen mit den Teilnehmern die Zielsetzung, die Zwischenergebnisse und Endergebnisse diskutiert wurden. Auf Basis dieses intensiven Dialogs können die Firmen das erworbene Wissen in ihre betriebliche Praxis übernehmen. *In der ersten Sitzung (14.10.2020) wurden die zu untersuchenden Werkstoffe sowie die Herstellungsverfahren für die Probenkörper diskutiert. Als Werkstoffe wurden Harz-Härter-System Hexion RIM R 135 sowie die Härter Hexion RIM H 134 festgelegt.* *In der zweiten Sitzung (30.08.2022) wurden die Ergebnisse der Herstellung von Probenkörper und quasistatischen Zugversuche mit AE vorgestellt und diskutiert.* *In der dritten Sitzung (17.03.2023) wurden die Ergebnisse des Kurzzeitfestigkeitsbereichs sowie des Zeitfestigkeitsbereichs (R = 0,1 bei einer Frequenz von 5 Hz und 15 Hz) vorgestellt. Außerdem wurden die Teilergebnisse des Zeitstandversuchs vorgestellt.* *In der vierten Sitzung (24.05.2023) wurden weitere Ergebnisse der Wöhleruntersuchungen sowie des Langzeitfestigkeitsbereiches vorgestellt. Insbesondere wurde auf die Umsetzung des Ansatzes von Pastukhov eingegangen.*	
Maßnahme: **Fachbeiratsgruppe**	Zeitrahmen: Jährlich im November
In den jährlich stattfindenden Fachbeiratsgruppen werden den Mitgliedern der Fördervereinigung des Instituts für Kunststoffverarbeitung die aktuellen Forschungsvorhaben vorgestellt und gemeinsam diskutiert. Der Teilnehmerkreis umfasst ca. 240 Mitgliedsfirmen, von denen der wesentliche Teil klein- und mittelständisch strukturiert ist. Somit wird der potenzielle Nutzerkreis des Vorhabens direkt angesprochen. Des Weiteren können über die intensive Diskussion in diesem Forum neue Aspekte im Forschungsprojekt berücksichtigt und somit die industrielle Relevanz des Forschungsvorhabens weiter akzentuiert werden.	

Am 09.11.2021 und am 08.11.2022 wurden das Projekt und die Ergebnisse im Rahmen der Fachbeiratsgruppe „Strukturberechnung und Werkstofftechnik“ vorgestellt. Über die intensive Diskussion in diesem Forum konnten neue Aspekte im Forschungsprojekt berücksichtigt und somit die industrielle Relevanz des Forschungsvorhabens weiter akzentuiert werden.	
Maßnahme: **Dialog mit Fachpersonal der Wirtschaft**	Zeitrahmen: Jährlich / zweijährig / dreijährig
Die Ergebnisse des Forschungsprojekts werden mit Ingenieurbüros, Sensorhersteller, Epoxid- und Faserherstellern im Dialog diskutiert. Dies erfolgt durch Besuch vor Ort oder durch turnusmäßig stattfindende Fachgespräche im Rahmen der jährlich durchgeführten Fachbeiratsgruppen, des zweijährig durchgeführten Internationalen Kunststofftechnischen Kolloquiums des IKV, Messen und der vom bzw. mit dem IKV durchgeführten Fachtagungen (z. B. „IKV-Impulse“ oder „CAE in der Kunststofftechnik“). Dabei werden Unternehmen, die zum potenziellen Nutzerkreis dieses Forschungsvorhabens gehören, gezielt angesprochen.	
Maßnahme: **Wissenschaftliche Publikationen**	Zeitrahmen: Zwischenergebnisse während der Laufzeit des Projektes
Die Ergebnisse des Forschungsprojekts werden in Form von Veröffentlichungen in nationalen und internationalen Fachzeitschriften wie z. B. „Kunststoffe“ (Carl Hanser Verlag), „Plastverarbeiter“ (Hüthig Verlag GmbH), „Konstruktion“ (Springer-VDI-Verlag GmbH & Co. KG), „K-Berater“ (Giesel-Verlag GmbH) oder „Journal of Plastics Technology“ (Carl Hanser Verlag) einem breiten Publikum vorgestellt. Bei der Auswahl der jeweiligen Zeitschrift werden sowohl grundlagen- als auch anwendungsorientierte Leserkreise berücksichtigt. Neben der obligatorischen Abschlussveröffentlichung ist die Veröffentlichung von Zwischenergebnissen vorgesehen. *Eine Abschlussveröffentlichung wird in der Ausgabe 12/2023 in der Zeitschrift „Kunststoffe“ mit dem Titel „Beschleunigte Charakterisierung des Ermüdungsverhaltens von unidirektional endlosfaserverstärkten Kunststoffen (UD-FVK): Methodik zur zeit- und kostenoptimierten Werkstoffprüfung“ erscheinen.*	
Maßnahme: **Hinweise in der Fachpresse**	Zeitrahmen: Kontinuierlich während der Laufzeit des Projektes
Über die IKV eigene Abteilung für Öffentlichkeitsarbeit wird das Projekt durch Pressemitteilungen und Fachartikeln einer breiten Öffentlichkeit bekannt gemacht. Derzeit umfasst der Verteiler über 40 Fachzeitschriften im Bereich Kunststofftechnik und Maschinenbau.	

Maßnahme:	Zeitrahmen:
Vorträge und Posterpräsentationen	Während der Laufzeit des Projektes
Durch Vorträge und Posterpräsentationen auf Seminaren, Fachtagungen sowie nationalen und internationalen Konferenzen, wie dem zweijährig durchgeführten Internationalen Kunststofftechnischen Kolloquium des IKV wird das Fachpublikum direkt angesprochen. *Das Forschungsvorhaben wurde auf dem 30. Internationalen Kunststofftechnischen Kolloquium des IKV vom 7. bis 8. September 2022 in Form einer Posterpräsentation vorgestellt. Außerdem wird das Forschungsvorhaben auf dem 32. Internationalen Kunststofftechnischen Kolloquium des IKV vom 28. bis 29. Februar 2024 in Form eines Vortrags vorgestellt.*	
Maßnahme:	Zeitrahmen:
Beratung von Unternehmen	Während der Laufzeit des Projektes
Das im Rahmen dieses Forschungsvorhabens erarbeitete Wissen fließt in die Beratungstätigkeiten des IKV ein. Interessierten Unternehmen wird bereits während der Projektlaufzeit die Möglichkeit gegeben, ergänzende bilaterale Projekte mit der Forschungsstelle durchzuführen, die die Fragestellung der konkreten Umsetzung berücksichtigen.	
Maßnahme:	Zeitrahmen:
Akademische Lehre / Personaltransfer	Während der Laufzeit des Projektes
An der Bearbeitung der Aufgabenstellung sind Studenten als Hilfskräfte beteiligt. Zusätzlich werden Bachelor-, Master- und Projektarbeiten zu dem Themenkomplex angeboten. Das erarbeitete Wissen können die Studenten später als junge Ingenieure in die betriebliche Praxis übernehmen. Darüber hinaus werden im Rahmen der vom IKV durchgeführten Lehrveranstaltungen, wie „Kunststoffverarbeitung II, III“, „Konstruieren mit Kunststoffen“ und „Simulation in der Kunststoff- und Textiltechnik“, an der RWTH Aachen die aktuellen Ergebnisse und Erkenntnisse des Forschungsprojektes den Studierenden verschiedener Fachrichtungen des Studienganges Maschinenbau vermittelt. Die Erkenntnisse werden auch auf diesem Weg Bestandteil der wissenschaftlichen Ausbildung junger Ingenieure. *Im Rahmen des Projektes wurden im Jahr 2022 eine Masterarbeiten und eine Masterarbeit im Jahr 2023 verfasst.*	

10 VERÖFFENTLICHUNGEN UND STUDENTISCH-WISSENSCHAFTLICHE ARBEITEN

Betreute studentisch wissenschaftliche Arbeiten:

[Gar22] GARCIA BAAKEN, D.: *Untersuchung der Wechselwirkung viskoelastischer Matrixeigenschaften auf das Schädigungsverhalten von endlosfaserverstärkten Kunststoffen mittels Schallemissionsanalyse*, Institut für Kunststoffverarbeitung, RWTH Aachen, unveröffentlichte Masterarbeit, 2023 – Betreuer: Richard Frohberg

[Bau23] BAUES, K. S.: *Verifizierung einer Prüfmethodik zur zeit- und kosteneffizienten Bestimmung der Ermüdungsfestigkeiten von endlosendlosfaserverstärkten Kunststoffen im Very-High-Cycle-Fatigue-Bereich mittels beschleunigter Zeitstandfestigkeitsversuchen*, Institut für Kunststoffverarbeitung, RWTH Aachen, unveröffentlichte Masterarbeit, 2023 – Betreuer: Nicolas Rozo Lopez

Masterarbeit der Herr David Garcia Baaken

Untersuchung der Wechselwirkung viskoelastischer Matrixeigenschaften auf das Schädigungsverhalten von endlosfaserverstärkten Kunststoffen mittels Schallemissionsanalyse

Mit dem Ziel der Emissionsreduktion durch Leichtbau stehen Werkstoffe wie endlosfaserverstärkte Kunststoffe (FVK), aufgrund ihrer guten gewichtsspezifischen mechanischen Eigenschaften, immer stärker im Fokus. Für die Dimensionierung von FVK-Bauteilen ist ein tiefes Verständnis für das Werkstoff- und Schädigungsverhalten notwendig. Das Werkstoff- und Schädigungsverhalten von FVK ist sehr komplex, was auf die mikrostrukturelle Werkstoffheterogenität zurückzuführen ist. Insbesondere spielt die Faser/Matrix-Grenzfläche eine wesentliche Rolle für das Verbund- und Schädigungsverhalten von FVK. Aufgrund der Zeitinvarianz des Faserwerkstoffes und der Viskoelastizität des Matrixwerkstoffes wird vermutet, dass diese Effekte die Grenzflächenbeanspruchung bei einer zyklischen Be- und Entlastung des Werkstoffes zusätzlich beeinflussen. Daraus resultiert die Hypothese, dass eine Wechselwirkung zwischen der Viskoelastizität und dem Schädigungsverhalten von endlosfaserverstärkten Kunststoffen besteht. Eine Möglichkeit, dies näher zu untersuchen, bietet die Schallemissionsanalyse (SEA).

Das Ziel dieser Arbeit ist daher die Entwicklung einer Methodik, um den Einfluss der Viskoelastizität auf das mechanische Degradationsverhalten von endlosfaserverstärkten Kunststoffen zu untersuchen. Dabei sollen unidirektionale-kohlenstofffaserverstärkten Probeköper zyklisch belastet werden und der Schädigungsfortschritt mittels der Schallemissionsanalyse bestimmt werden. Somit soll ermöglicht werden, den Einfluss der viskoelastischen Eigenschaften auf das Schädigungsverhalten von FVK zu untersuchen.

Dazu wird Herr David García Baaken eine Literaturrecherche zum Stand der Technik des spezifischen Werkstoff- bzw. Schädigungsverhalten von endlosfaserverstärkten Kunststoffen und der Schallemissionsanalyse durchführen. Darauf aufbauend wird er ein Versuchsplan zur experimentellen Untersuchung des Einflusses der Viskoelastizität auf das Schädigungsverhalten bei Be- und Entlastung mittels Schallemissionsanalyse definieren. Die experimentellen Untersuchungen dieser Abschlussarbeit beinhalten die Fertigung von Prüfkörpern, die Kalibrierung der Schallemissionsmessung und die Durchführung von zyklischen Zugversuchen mit unterstützender Schallemissionsanalyse zur Untersuchung der Hypothese. Des Weiteren beinhaltet diese Arbeit die Verarbeitung und Auswertung der gemessenen Rohdaten, beispielweise durch Clusterbildung der werkstoffspezifischen Schädigungsmoden. Zuletzt wird die Frage geklärt, inwiefern mithilfe der entwickelten Methodik der Einfluss der Viskoelastizität auf das Schädigungsverhalten eines endlosfaserverstärkten Kunststoffs mittels Schallemissionsanalyse hinreichend genau analysiert werden kann.

Masterarbeit der Frau Klara Sophie Baues

Verifizierung einer Prüfmethodik zur zeit- und kosteneffizienten Bestimmung der Ermüdungsfestigkeiten von endlosendlosfaserverstärkten Kunststoffen im Very-High-Cycle-Fatigue-Bereich mittels beschleunigter Zeitstandfestigkeitsversuchen

Der hohe zeitliche und wirtschaftliche Aufwand zur Bestimmung des Schädigungsverhaltens von endlosfaserverstärken Kunstoffen bei dynamisch-zyklischer Beanspruchung erschwert den Einsatz dieser Werkstoffklasse erheblich. Daher strebt die Forschung die Entwicklung neuartiger Methoden zur beschleunigten experimentellen Bestimmung des Werkstoff- und Schädigungsverhaltens an, um die Anwendung von endlosfaserverstärkten Kunststoffen weitreichend in technischen Strukturbauteilen zu ermöglichen.

Die Zielstellung dieser wissenschaftlichen Arbeit ist daher die Verifizierung einer beschleunigten experimentellen Prüfmethodik, welche eine Substitution zeitaufwändiger Schwingprüfungen durch eine beschleunigte Zeitstandfestigkeitsprüfung ermöglichen soll. Die zugrundeliegende Hypothese ist hierbei, dass ein faktorieller Zusammenhang zwischen der Lastspielzahl sowie Prüffrequenz eines Schwingprüfversuches und der Dauer eines Zeitstandfestigkeitsversuches bei vergleichbarer Beanspruchungshöhe besteht. Zur Überprüfung dieser Hypothese werden sowohl dynamisch-zyklische Prüfungen als auch genormte sowie beschleunigte Zeitstandfestigkeitsversuche nach der Stepped-Isothermal-Methodik durchgeführt. Die Überprüfung der Anwendbarkeit der beschleunigten Zeitstandfestigkeitsprüfung entsprechend der Stepped-Isothermal-Methodik auf die Werkstoffklasse der endlosfaserverstärkten Kunststoffe ist ebenfalls Bestandteil dieser wissenschaftlichen Arbeit.

In diesem Kontext ist es die Aufgabe von Frau Baues, die experimentellen Untersuchungen durchzuführen, deren Ergebnisse auszuarbeitenden sowie ein Modell zur Korrelation der unterschiedlichen Prüfverfahren abzuleiten.

11 PARAMETER, ABKÜRZUNGEN, FORMELZEICHEN, INDIZES

11.1 Parameter

Zeit-Temperatur-Verschiebung	
K	12795,64 K^{-1}
T_{ref}	23,0 °C
T_1	30,0 °C
T_2	42,0 °C
T_3	53,0 °C
$\log(a_T(T_1))$	1,411
$\log(a_T(T_2))$	2,861
$\log(a_T(T_3))$	4,567
Zugfestigkeit (UTS) in Faserrichtung (0°)	
UTS	800,00 MPa
85% - UTS	680,00 MPa
65% - UTS	520,00 MPa
55% - UTS	440,00 MPa
45% - UTS	360,00 MPa
Zugfestigkeit (UTS) in Fasersenkrechten (90°)	
UTS	35,00 MPa
85% - UTS	29,75 MPa
65% - UTS	22,75 MPa
60% - UTS	21,00 MPa
50% - UTS	17,50 MPa
45% - UTS	15,75 MPa
35% - UTS	12,25 MPa

Tabelle 11.1 Zeit-Temperatur-Verschiebung Parameter und ermittelte Zugfestigkeiten.

11.2 Abkürzungen

Abkürzung	Bedeutung
CFK	Kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe
DMS	Dehnungsmessstreifen
GFK	Glasfaserverstärkter Kunststoff
FVG	Faservolumengehalt
FVK	Faserverstärkte Kunststoffe
IB	Faser-Matrix-Ablösungen/ Interface-Bruch
IKV	Institut für Kunststoffverarbeitung
KMU	Kleine und mittlere Unternehmen
Pt100	Platin-Thermometer mit 100 Ohm Widerstand
QS	Quasistatisch
SEA	Schallemissionsanalyse
SES	Schallemissionssensoren
SIM	Stepped-Isothermal-Methode
UD-FVK	Kontinuierlich unidirektional faserverstärkte Kunststoffe
UTS	Ultimate Tensile Strength (Zugfestigkeit)
WPF	Weighted Peak Frequency
FB	Faserbruch
Zfb	Zwischenfaserbruch
ZTV	Zeit-Temperatur-Verschiebung

11.3 Formelzeichen

Formelzeichen	Einheit	Bedeutung
a_T	[-]	Horizontaler Verschiebungsfaktor
R	[-]	Spannungsverhältnis
σ	[MPa]	Spannung

σ_a	[MPa]	Amplitudenspannung
σ_m	[MPa]	Mittelspannung
t	[s]	Zeit
t'	[s]	Virtueller Startzeitpunkt
f	[Hz]	Frequenz
N	[-]	Schwingspielzahl
ε	[%]	Dehnung
E	[MPa]	E-Modul
ΔH	[J]	Aktivierungsenergie
R	[J/mol*K]	Universelle Gaskonstante
K	[K^{-1}]	Materialkonstante
T	[°C]	Temperatur
T_{ref}	[°C]	Referenztemperatur

11.4 Indizes

Index	**Bedeutung**
$\overset{+}{\parallel}$	Mechanischen Kennwerte in faserparalleler Richtung
$\overset{+}{\perp}$	Mechanischen Kennwerte in faserparalleler Richtung

12 LITERATUR

[AEB+13] ACHEREINER, F.; ENGELSING, K.; BASTIAN, M.; HEIDEMEYER, P.: Accelerated creep testing of polymers using the stepped isothermal method. *Polymer Testing* 32 (2013) 3, S. 447-454

[Arn13] ARNOLD, B.: *Werkstofftechnik für Wirtschaftsingenieure:* Springer Vieweg, 2013

[BHI+19] BECKER, F.; HOPMANN, C.; Italiano F.; Girelli A.: Fatigue testing of GFRP materials for the application in automotive leaf springs. *Procedia Structural Integrity* (2019), S. 645-654

[Bol74] BOLTZMANN, L.: Zur Theorie der elastischen Nachwirkung. *Berichte der Akademie der Wissenschaften Wien* (1874), S. 275-306

[BP15] BRAUNBAUER, J.; PINTER, G.: Effects of mean stress and fibre volume content on the fatigue-induced damage mechanisms in CFRP. *International Journal of Fatigue* (2015), S. 28-38

[EvG20] ERARTSIN, O.; VAN DRONGELEN, M.; GOVAERT, L. E.: Identification of plasticity-controlled creep and fatigue failure mechanisms in transversely loaded unidirectional thermoplastic composites. *Journal of Composite Materials* (2020), S. 1-19

[EWB+19] ELIASSON, S.; WANNER, S.; BARSOUM, Z.; WENNHAGE, P.: Development of fatigue testing procedure for unidirectional carbon fiber composites. *Procedia Structural Integrity* 19 (2019), S. 81-89

[FBK+09] FEIH, S.; BOIOCCHI, F.; KANDARE, E.; MATHYS, Z.; GIBSON, A. G.; MOURITZ, A. P.: Strength Degradation of Glass and Carbon Fibers at high Temperature. *International Committee on Composite Materials* (2009)

[Fer80] FERRY, J. D.: *Viscoelastic Properties of Polymers,* 1980

[Gam00] GAMSTEDT, E. K.: Effects of debonding and fiber strength distribution on fatigue-damage propagation in carbon fiber-reinforced epoxy. *Journal of applied polymer science* (2000), S. 457-474

[GT99] GAMSTEDT, E. K.; TALREJA, R.: Fatigue damage mechanisms in unidirectional carbon-fibre-reinforced plastics. *Journal of Materials Science* (1999), S. 2535-2546

[Gue08] GUEDES, R. M.: Creep and fatigue lifetime prediction of polymer matrix composites based on simple cumulative damage laws. *Composites Part A* (2008), S. 1716-1725

[HB16] HOPMANN, C.; BRANDT, P.: Beschleunigte Lebensdauervorhersage kurzglasfaserverstärkter Thermoplastbauteile auf Basis von Wöhlerversuchen. Institut für Kunststoffverarbeitung, RWTH Aachen, Abschlussbericht zu IGF-Vorhaben 17857 N (2016)

[HMB17] HOPMANN, C.; MARDER, J.; BECKER, F.: Investigation on the fatigue behavior of carbon fiber reinforced plastics due to micro-damage and effects of the micro-damage on the ply strengths in the very high cycle fatigue regime. *In: . Proceedings of the 7th Conference on Very-High-Cycle-Fatigue. Dresden* (2017)

[KJB+19] KOCH I.; JUST, G.; BROD, M.; CHEN, J.; DOBLIES, A.; DEAN, A.; GUDE, M.; ROLFES, R.; HOPMANN, C., FIEDLER, B.: Evaluation and Modeling of the Fatigue Damage Behavior of Polymer Composites at Reversed Cyclic Loading. *Materials* (2019), S. 1727

[Kno08] KNOPS, M.: *Analysis of Failure in Fiber Polymer Laminates. - The Theory of Alfred Puck:* Berlin: Springer, 2008

[Kon05] KONTOU, E.: Tensile creep behaviour of unidirectional Glass-Fiber Polymer Composites. *Polymer Composites* (2005), S. 287-292

[LMM99] LANDIS, C. M.; MCGLOCKTON, M. A.; MCMEEKING, R. M.: An Improved Shear Lag Model for Broken Fibers in Composite Materials. *Journal of Composite Materials* (1999), S. 667-680

[NN17] N.N: *ASTM D3039/D3039M-17: Standard Test Method for Tensile - Properties of Polymer Matrix Composite Materials*, 17

[NN18] N.N: *DIN EN ISO 899 - 1: Kunststoffe - Bestimmung des Kriechverhaltens - Teil 1: Zeitstand-Zugversuch. Berlin: Beuth-Verlag*, 2018

[NN19] N.N.: *ASTM D3479/D3479M - 19: Standard Test Method for Tension - Tension Fatigue of Polymer Matrix Composite Materials*, 2019

[NN22] N.N: *DIN EN ISO 527-5: Kunststoffe - Bestimmung der Zugeigenschaften -Teil 5: Prüfbedingungen für unidirektional faserverstärkte Kunststoffverbundwerkstoffe*, 2022

[PMP+18] PASTUKHOV, L. V.; MERCX, F.P.M.; PEIJS, T.; GOVAERT, L. E.: Long-term performance and durability of polycarbonate/carbon nanotube nanocomposites. *Nanocomposites* (2018), S. 223-237

[PWM+21] PILZ, G.; WURZER, S.; MORAK, M.; PINTER, G.: Assessment of the stepped isothermal method for accelerated creep testing of high-density polyethylene. *Mechanics of Time-Dependent Materials* (2021), S. 775-790

[RCH20] ROZO LOPEZ, N.; CHEN, J.; HOPMANN, C.: A micromechanical model for loading and unloading behaviour of fiber reinforced plastics under cyclic loading. *Polymer Composites* (2020), S. 3892-3902

[SB91] STINCHCOMB, W. W.; BAKIS, C. E.: Fatigue Behavior of Composite Laminates. *Composite Materials Series* (1991), S. 105-180

[Sch07] SCHÜRMANN, H.: *Konstruieren mit Faser-Kunststoff-Verbunden:* Berlin: Springer, 2007

[SH11] SAUSE, M.G.R.; HORN, S.: Einfluss der Signallaufzeit auf die Unterscheidbarkeit von Schallemissionsquellen in Faserverbundwerkstoffen. *18. Kolloquium Schallemission* (2011)

[Tal81] TALREJA, R.: Fatigue of composites materials: damage mechanisms and fatigue-life diagrams. *Proceedings of The Royal Society A* 378 (1981), S. 461-475

[TN13] THOMAS, R. W.; NELSON, J. A.: The Stepped Isothermal Method for Estimating the Long-Term Creep Strain and Creep Rupture of Polypropylene Resins used in Civil Engineering Applications. *Proceedings of the 2013 Society of Plastics Engineers (SPE) International Polyolefins Conference* (2013) 1

[TPS98] THORNTON, J. S.; PAULSON, J. N.; SANDRI, D.: Conventional and stepped isothermal methods for characterizing long term creep strength of polyester geogrids creep of product. *Proceedings of the Sixth International Conference on Geosynthetics, Atlanta* (1998), S. 691-698

[TS12] TALREJA, R.; Singh. C. V.: Damage and failure of composite materials (2012)

[TX07] TAO, G.; XIA, Z.: An experimental study of uniaxial fatigue behavior of an epoxy resin by a new noncontact real-time strain measurment and control system. *Polymer Engineering and Science* (2007), S. 780-788

[TX08] TAO, G.; XIA, Z.: Fatigue behaviour of an epoxy polymer subject to cyclic shear loading. *Material Science and Engineering* (2008), S. 38-44

[TX09] TAO, G.; XIA, Z.: Biaxial fatigue behaviour of an epoxy polymer with mean stress effect. *International Journal of Fatigue* (2009), S. 678-685

[Vas20] VASSILOPOULOS, A. P.: The history of fiber-reinforced polymer composite laminate fatigue. *International Journal of Fatigue* (2020), S. 105512

[VAT14] VIEILLE, B.; ALBOUY, W.; TALEB, L.: About the creep-fatigue interaction on the fatigue behaviour of off-axis woven-ply thermoplastic laminates at temperatures higher than Tg. *Composite Part B* (2014), S. 478-486