

IVW – Schriftenreihe Band 170

Leibniz-Institut für Verbundwerkstoffe GmbH Kaiserslautern

Torsten Heydt

**Beitrag zur experimentellen Ermittlung
des Dämpfungsverhaltens von Faser-
Kunststoff-Verbunden**

Bibliografische Information Der Deutschen Bibliothek

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <<http://dnb.dnb.de>> abrufbar.

Bibliographic information published by Die Deutsche Bibliothek

Die Deutsche Bibliothek lists this publication in the Deutsche Nationalbibliografie; detailed bibliographic data is available in the Internet at <<http://dnb.dnb.de>>.

Herausgeber: Leibniz-Institut für Verbundwerkstoffe GmbH
Prof. Dr.-Ing. Ulf Breuer
Erwin-Schrödinger-Straße 58
67663 Kaiserslautern
<http://www.leibniz-ivw.de>

Verlag: Leibniz-Institut für Verbundwerkstoffe GmbH

Druck: pri-me Printservice & Medienservice
Eisenbahnstraße 55
67655 Kaiserslautern
D-386

© Leibniz-Institut für Verbundwerkstoffe GmbH, Kaiserslautern 2025

Alle Rechte vorbehalten, auch das des auszugsweisen Nachdrucks, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe (Photographie, Mikroskopie), der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und das der Übersetzung.

Als Manuskript gedruckt. Printed in Germany.
ISSN 1615-021X
ISBN: 978-3-944440-67-5

Beitrag zur experimentellen Ermittlung des Dämpfungsverhaltens von Faser-Kunststoff-Verbunden

Vom Fachbereich Maschinenbau und Verfahrenstechnik
der Rheinland-Pfälzischen Technischen Universität Kaiserslautern-Landau
zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)

genehmigte

Dissertation

von Herrn
Torsten Heydt, M. Sc.
aus Worms

Tag der mündlichen Prüfung: 23.04.2025

Prüfungsvorsitzender: Prof. Dr.-Ing. Ulf Breuer

1. Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. Joachim Hausmann

2. Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. Paul Geiß

D-386

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Leibniz-Institut für Verbundwerkstoffe GmbH (IVW) in der Abteilung Bauteilentwicklung im Kompetenzfeld Bauweisen.

Mein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr.-Ing. Joachim Hausmann für die fachliche Unterstützung und Betreuung meiner Arbeit sowie für die Übernahme des Erstgutachtens. Außerdem danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Paul Geiß, Leiter der Arbeitsgruppe Werkstoff- und Oberflächentechnik Kaiserslautern der Rheinland-Pfälzischen Technischen Universität Kaiserslautern-Landau, für das Interesse an meiner Arbeit und die freundliche Übernahme des Zweitgutachtens. Meinem Institutsleiter Prof. Dr.-Ing. Ulf Breuer danke ich für seine Tätigkeit als Prüfungsvorsitzender.

Weiterhin gilt mein Dank meiner Vorgesetzten Frau Dr.-Ing. Nicole Motsch-Eichmann für die gewährten Freiräume bei der Gestaltung dieser Arbeit. Dies hat maßgeblich zum Gelingen meiner Arbeit beigetragen.

Für die Unterstützung bei unzähligen Dynamisch Mechanischen Analysen, bedanke ich mich ganz besonders bei Petra Volk vom IVW. Ihre unermüdliche Bereitschaft noch eine weitere Untersuchung durchzuführen hat den wissenschaftlichen Grundstein dieser Arbeit gelegt.

Ein besonderer Dank geht an meine BürokollegInnen Ulrich Blass, Valentine Kessler, Thomas Pfaff und Florian Schimmer in dieser Zeit. Bei ihnen möchte ich mich für die zahlreichen fachlichen Diskussionen, die große Hilfsbereitschaft und nicht zuletzt die freundschaftliche Bürogemeinschaft bedanken.

Darüber hinaus gilt mein Dank der gesamten Belegschaft des IVW für die kollegiale Zusammenarbeit und freundschaftliche Arbeitsatmosphäre. Besonders hervorheben möchte ich Andreas Baumann, Christian Becker, Tobias Donhauser Nora Feiden, Stefan Gabriel, Werner Gölzer, Jannis Hüppauff, Alexander Huf, Andreas Kenf Regina Köhne, Janna Krummenacker, Constatin Mehl Vinay Nagaraj, Thomas Rief, Sebastian Schmeer, Tim Schmidt, Uwe Schmitt, Ralph Schneider, und Nithya Sindhe Narayana Rao. Auch den ehemaligen Kollegen Constantin Bauer, Yves Becker, Stefan Buchalik-Bopp, Marcel Bückler, Benedikt Hannemann, Florian Mischo, Jan Rehra, Florian Rieger und Stefan Schmitt sei an dieser Stelle gedankt.

Ein besonders großes Dankeschön geht an Marius Schneider für das Korrekturlesen, die konstruktive Kritik, stets den Finger in die richtig Wunde zu legen und den freundschaftlichen Hinweis, wenn Dinge hinreichend untersucht sind. Sein Zutun hat mir ermöglicht immer wieder einen anderen Blickwinkel auf die Arbeit zu erlangen und aus der ein oder anderen Sackgasse herauszufinden. Durch seine Unterstützung habe ich immer wieder den Fokus auf das Wesentliche dieser Arbeit richten können.

Schließlich möchte ich mich bei meinen Freunden und meiner Familie für ihre uneingeschränkte Unterstützung in allen Lebenslagen und den Ausgleich zum Arbeitsalltag bedanken. Insbesondere danke ich meinen Eltern, die mir meinen akademischen und beruflichen Werdegang überhaupt erst ermöglicht haben. Den größten Dank möchte ich meiner Frau Lisa aussprechen, für die bedingungslose Unterstützung, das Verständnis, die Geduld und den Verzicht, der ein Gelingen der Arbeit überhaupt erst möglich machte.

Darmstadt, Mai 2025

Torsten Heydt

Kurzfassung

Für eine dynamische Auslegung von Faser-Kunststoff-Verbunden ist die Kenntnis der Dämpfungseigenschaften notwendig. Bedingt durch eine Vielzahl von Einflussfaktoren auf das Materialverhalten hat sich bisher keine standardisierte Versuchsmethode zur Ermittlung dieser Kennwerte durchgesetzt. Um diese Forschungslücke zu schließen adressiert die vorliegende Arbeit die Dämpfungsbestimmung durch unterschiedliche Versuchsmethoden. Hierzu werden mittels Dynamisch-Mechanischer Analyse und freien Ausschwingversuchen die Dämpfungseigenschaften von Faser-Kunststoff-Verbunden ermittelt. Geprüft werden Verbundwerkstoffe mit einer duroplastischen und thermoplastischen Matrix, wodurch der Einfluss der Matrix untersucht wird. Zudem werden die Einflussfaktoren Faserorientierung, Belastung, Geometrie, Frequenz und Temperatur für eine umfassende Einordnung der jeweiligen Versuchsmethode analysiert. Aus einem abschließenden Vergleich beider Versuchsmethoden unter Berücksichtigung aller Einflussfaktoren werden Gestaltungshinweise für die Dämpfungsermittlung von Faser-Kunststoff-Verbunden abgeleitet.

Abstract

Knowledge of the damping properties is essential for the dynamic design of fibre-reinforced plastics. Due to the large number of factors influencing the material behaviour, no standardised test method has yet been established to determine these properties. In order to fill this research gap, the present work investigates the determination of damping using different test methods. The damping properties of fibre-reinforced plastics are determined using dynamic mechanical analysis and free vibration tests. Composites with a thermosetting and thermoplastic matrix are tested, whereby the influence of the matrix is investigated. Additionally, the influence of fibre orientation, load, geometry, frequency, and temperature are analyzed to provide a comprehensive classification of the respective test method. Finally, a comparison of the two test methods, taking into account all the influencing factors, is used to derive design guidelines for determining the damping of fibre-reinforced plastics.

Inhaltsverzeichnis

Abstract	i
Inhaltsverzeichnis	ii
Symbolverzeichnis	v
1 Einleitung	1
1.1 Problemstellung	1
1.2 Zielsetzung	2
2 Stand der Technik	3
2.1 Inelastisches Materialverhalten	3
2.1.1 Lineare Viskoelastizität	4
2.1.2 Nichtlineares Materialverhalten	6
2.2 Dämpfung	7
2.2.1 Einteilung der Dämpfungsphänomene	7
2.2.2 Beschreibung der Dämpfung	7
2.2.3 Dämpfung von Metallen	9
2.3 Dämpfung von Faser-Kunststoff-Verbunden	10
2.3.1 Wirkmechanismen der Dämpfung von FKV	11
2.3.2 Experimentelle Bestimmung der Dämpfung	12
2.3.3 Einflussfaktoren auf die Dämpfung	15
2.3.4 Berechnung der Dämpfung von FKV	18
3 Experimentelle Ermittlung der Dämpfung	21
3.1 Dämpfungsermittlung durch Dynamisch-Mechanische Analyse	21
3.1.1 DMA mittels Zugbelastung	22
3.1.2 DMA mittels 3-Punkt-Biegebelastung	26
3.2 Dämpfungsermittlung durch freie Ausschwingversuche	36
3.2.1 Analyse des einseitig eingespannten Biegebalkens	37
3.2.2 Aufbau und Versuchsdurchführung	38
3.2.3 Entwicklung einer Auswertemethodik für freie Ausschwingversuche	40
3.2.4 Validierung des Versuchsstands und der Auswertemethode	47
3.3 Vergleich der Versuchsmethoden und Analyse der Ergebnisse	55
3.3.1 Dynamisch-Mechanische Analyse	55
3.3.2 Ausschwingversuche	56

3.3.3	Vergleich der unterschiedlichen Versuchsmethoden	57
4	Dynamische Untersuchungen von Faser-Duroplast-Verbunden	60
4.1	Probekörperherstellung, Qualitätssicherung und mechanische Kennwerte .	60
4.2	Ausschwingversuche an Cf-EP	62
4.3	DMA mittels Zugbelastung, Frequenzanalyse	65
4.4	DMA mittels 3PB, Frequenzanalyse	67
4.4.1	Frequenzanalyse der EP-Matrix	68
4.4.2	Frequenzanalyse der Faserorientierung von Cf-EP	70
4.4.3	Diskussion der Frequenzanalyse von Cf-EP	76
4.5	Temperaturanalyse von EP und Cf-EP	80
4.5.1	Vergleich der Temperaturanalyse von EP und Cf-EP	83
4.6	Vergleich der Versuchsmethoden an Cf-EP	86
5	Dynamische Untersuchungen von Faser-Thermoplast-Verbunden	89
5.1	Dynamische Untersuchungen der PC-Matrix	89
5.1.1	Ausschwingversuche an Cf-PC	91
5.1.2	Frequenzanalyse von PC und Cf-PC	93
5.1.3	Temperaturanalyse von PC und CF-PC	97
5.1.4	Vergleich der Versuchsmethoden an Cf-PC	103
5.2	Dynamische Untersuchungen der PEEK-Matrix	105
5.2.1	Ausschwingversuche an Cf-PEEK	105
5.2.2	Frequenzanalyse von PEEK und Cf-PEEK	108
5.2.3	Temperaturanalyse von PEEK und CF-PEEK	111
5.2.4	Vergleich der Versuchsmethoden von Cf-PEEK	114
6	Vergleich der Untersuchungen und Diskussion der Ergebnisse	116
6.1	Ausschwingversuche	116
6.1.1	Fazit der Ausschwingversuche	118
6.2	Dynamisch-Mechanische Analyse	118
6.2.1	Frequenzanalyse der unverstärkten Kunststoffmatrix	118
6.2.2	Frequenzanalyse der faserverstärkten Kunststoffe	121
6.2.3	Fazit der Frequenzanalyse	125
6.2.4	Temperaturanalyse der unverstärkten Kunststoffmatrix	125
6.2.5	Temperaturanalyse der faserverstärkten Kunststoffe	128
6.2.6	Fazit der Temperaturanalyse	131
7	Zusammenfassung	132
7.1	Zielerreichung und Fazit	133
7.2	Ausblick	135

Literaturverzeichnis	136
Eigene Veröffentlichungen	146
Betreute studentische Arbeiten	147
Lebenslauf	147

Symbolverzeichnis

Abkürzungen

3PB	3-Punkt-Biegung
AV	Ausschwingversuche
AWOK	Arbeitsgruppe Werkstoff- und Oberflächentechnik
AWV	ausgeglichener Winkelverbund
Cf	kohlenstofffaserverstärkt
Cf-EP	kohlenstofffaserverstärkter Epoxidharz-Verbund
Cf-PC	kohlenstofffaserverstärkter Polycarbonat-Verbund
Cf-PEEK	kohlenstofffaserverstärkter Polyetheretherketon-Verbund
CFK	kohlenstofffaserverstärkter Kunststoffverbund
CLT	klassische Laminattheorie - classical laminate theory
CT	Computertomographie
DMA	Dynamisch-Mechanische Analyse
DMTA	Dynamisch-Mechanisch-Thermische Analyse
EP	Epoxidharz
fc	kraftgeregelt - force controlled
FFT	Fast Fourier Transformation
FKV	Faser-Kunststoff-Verbund
Ga ^A	DMA Gabo Eplexor 500 (Prüfmaschine)

Ga ^I	DMA Gabo Eplexor 100 (Prüfmaschine)
GFK	glasfaserverstärkter Kunststoffverbund
i.d.R.	in der Regel
LDV	Laser-Doppler-Vibrometer
MSV	Mehrschichtverbund
PC	Polycarbonat
PEEK	Polyetheretherketon
rel.	relativ
sc	dehnungsderogelt - strain controlled
sE	steifere Einspannung
TA	TA Instruments DMA 850 (Prüfmaschine)
UD	unidirektional

Griechische Formelzeichen		Einheit
α	Faserorientierung	°
α_0, α_1	Rayleighkoeffizienten	—
δ	Verlustwinkel	°
ε	Dehnung	—
$\varepsilon_0, \hat{\varepsilon}$	Dehnungsamplitude	—
$\dot{\varepsilon}(t)$	Dehnrage	1/s
$\eta, \chi, \tan(\delta)$	Verlustfaktor	—
ϑ	Dämpfungsgrad	—
Λ	logarithmische Dekrement	—

μ	Massenbelegung	g/cm
ν	Querkontraktionszahl	—
ρ	Dichte	g/cm ³
σ	Normalspannung	MPa
$\sigma_0, \hat{\sigma}$	Normalspannungamplitude	MPa
τ	Schubspannung	MPa
ϕ	Porengehalt	%
φ	Faservolumengehalt	%
ψ	spezifischer Verlustfaktor	—
Ω	Kreisfrequenz	rad/s
ω	Eigenkreisfrequenz	rad/s

Indizes

0	Amplitude
a	analytisch
drv	Regelgröße - Drive
d	dynamische Größe
g	maximaler Messwert im Glasübergangsbereich
i, m, n	Zählvariable
max	Maximum
min	Minimum
MSV	Mehrschichtverbund
rt	Messwert bei Raumtemperatur

s	statische Größe
x, y, z	Richtung der Normalspannungen bzw. Dehnung
xz, yz, xy	Richtung der Schubspannungen bzw. Schubverzerrung
$\parallel$	faserparallel
$\perp$	fasersenkrecht

Koordinatensysteme

x, y, z	kartesisches Koordinatensystem
-----------	--------------------------------

Lateinische Formelzeichen		Einheit
b	Probenbreite	mm
c	Federsteifigkeit	N/mm ²
d	Dehnaviskosität	Pa · s
d	Probendicke	mm
d_1	Lagendicke	mm
dt	infinitesimaler Zeitzuwachs	s
E	Elastizitätsmodul	MPa
E^f	Biege-Elastizitätsmodul	MPa
E^t	Zug-Elastizitätsmodul	MPa
$E(t)$	Relaxationssteifigkeit	MPa
E^*	komplexe Steifigkeit	MPa
E'	Speichermodul	MPa
E'_{rel}	relativer Speichermodul	%

E''	Verlustmodul	MPa
E''_{rel}	relativer Verlustmodul	%
F	Kraft	N
f	Frequenz	Hz
I	Flächenträgheitsmoment	mm ⁴
i	Imaginäre Einheit	—
$J(t)$	Kriechnachgiebigkeit	mm ² /N
L	Lagerabstand	mm
l_f	freie Probenlänge	mm
M	Schnittmomente	Nm
m	Masse	kg
n	Auswertebreite	—
Q	Querkraft	N
T	Temperatur	°C
t	Zeit	s
T_g	Glasübergangstemperatur	°C
T_p	Periodendauer	s
U_{ref}	Formänderungsenergie	J
v	Geschwindigkeit	mm/s
$\hat{v}$	Geschwindigkeitsamplitude	mm/s
W_{Dh}	dissipierte Energie	J

Matrizen		Einheit
D	Dämpfungsmatrix	—
K	Steifigkeitsmatrix	—
M	Massenmatrix	—

1 Einleitung

In immer mehr Branchen werden Faser-Kunststoff-Verbunde (FKV) als Werkstoff eingesetzt. Dies liegt einerseits an ihrer hohen spezifischen Steifigkeit und Festigkeit aber auch andererseits an den breit gefächerten und oftmals einstellbaren Materialeigenschaften dieser Werkstoffklasse. Dabei erstreckt sich das Anwendungsspektrum von einfachen und in hohen Stückzahlen hergestellten kurzfaserverstärkten Spritzgussbauteilen bis hin zu Hochleistungs- und Leichtbauteilen für die Luft- und Raumfahrt. Durch eine Vielzahl an unterschiedlichen Fertigungsverfahren können verschiedenste Bauteile effizient hergestellt werden. Der zunehmende Einsatz und das daraus wachsende Anwendungsspektrum erfordern eine umfassende Kenntnis der Werkstoffeigenschaften. Nur diese ermöglicht einen zielgerichteten Einsatz und die Ausschöpfung des gesamten Leichtbau- und Entwicklungspotentials. Für die Auslegung von FKV-Bauteilen ist die Bestimmung der Steifigkeit und Festigkeit hinreichend erforscht. Diese lassen sich sehr gut berechnen und auf den jeweiligen Lastfall anpassen. Zudem haben sich für beide Kennwerte Prüfmethoden etabliert, anhand derer die Materialeigenschaften ermittelt werden können. Im Gegensatz dazu spielen die Dämpfungseigenschaften bei der Auslegung bisher eine untergeordnete Rolle. Diese werden für eine vollständige dynamische Auslegung von Bauteilen jedoch zwingend benötigt. Diese beeinflussen bei schwingenden Belastungen zum einen die Eigenfrequenzen des Bauteils und zum anderen haben sie einen Einfluss auf die Übertragungsfunktion, welche die Überhöhung der gegebenen Belastung angibt. Zudem haben sie einen Einfluss auf die Lebensdauer und das Impaktverhalten. Somit sind die Dämpfungseigenschaften für alle dynamischen Anwendungen von Bedeutung. [1]

1.1 Problemstellung

Um die Dämpfung für die Auslegung von FKV-Bauteilen zu nutzen, muss bei der Bauteilberechnung dieser Kennwert berücksichtigt werden. Für die Berechnung der Dämpfung einer Struktur gibt es in der Literatur verschiedene Ansätze [1, 2]. Diese setzen jedoch die Kenntnis der Dämpfungskennwerte der unidirektionalen (UD) Einzelschicht voraus. Arbeiten, die sowohl ein Berechnungsmodell vorschlagen als auch die jeweilige Kennwertermittlung, erzielen in der Regel auch gute Übereinstimmungen von Berechnung und Experiment [3, 4, 5, 6]. Problematisch ist hierbei, dass sich bisher kein standardisierter Versuchsaufbau für die Bestimmung der Dämpfung durchgesetzt hat [7]. Teilweise zeigen die Ergebnisse auch eine Abhängigkeit zum jeweiligen Versuchsaufbau und ein Vergleich der Kennwerte untereinander gestaltet sich als schwierig [8]. Außerdem gibt es mittlerweile eine Vielzahl

an Untersuchungen zur Dämpfung [1]. Erschwerend kommt hierbei hinzu, dass die Dämpfungsermittlung mit einem hohen experimentellen Aufwand verbunden ist. Es handelt sich um einen sehr sensiblen Messwert, welcher anfällig für äußere Einflüsse ist. Zudem hat eine Vielzahl an Faktoren einen Einfluss auf das Messergebnis [2]. Hierzu zählen materialbedingt die Faser und Matrix, der Faserwinkel und der Faservolumengehalt. Prüfungsbedingt können die Belastung und die Probengeometrie einen Einfluss auf den Kennwert zeigen. Dies führt auch dazu, dass einige Einflussfaktoren auf die Dämpfung nach wie vor kontrovers diskutiert werden und verschiedene Studien hier unterschiedliche Ergebnisse erzielen [8]. Für einen zielgerichteten Einsatz ist daher eine zuverlässige Kennwertermittlung zwingend notwendig.

1.2 Zielsetzung

Aus der dargelegten Problemstellung im Hinblick auf die Untersuchung der Dämpfung können unterschiedliche Forschungsziele für diese Arbeit formuliert werden. Ein allgemeines Ziel ist es einen Beitrag zur experimentellen Bestimmung der Dämpfung von FKV zu leisten und deren Ermittlung zu verbessern. Hierbei ist es entscheidend auf unterschiedliche, bekannte Einflussfaktoren einzugehen und deren Beitrag zur Gesamtdämpfung zu quantifizieren. Des Weiteren sind Kennwerte aufgrund unterschiedlicher Versuchsaufbauten oft nicht direkt vergleichbar. Daher werden in dieser Arbeit unterschiedliche Versuchsaufbauten dargestellt und deren Einflussfaktoren diskutiert. Dazu bedarf es zunächst einer detaillierten Darstellung und Validierung von bestehenden Versuchsaufbauten. Die Forschungsziele dieser Arbeit können dabei wie folgt zusammengefasst werden:

- Detaillierte Untersuchung und Vergleich der Dynamisch-Mechanischen Analyse und der freien Ausschwingversuche zur Dämpfungsbestimmung von FKV
- Ableitung von Gestaltungshinweisen durch die Untersuchung von unterschiedlichen Einflussfaktoren auf die Versuchsdurchführung
- Untersuchung von FKV mit einer duroplastischen und thermoplastischen Matrix zur Erweiterung der Datenbasis für Dämpfungskennwerte
- Der Einfluss der Temperatur auf die Dämpfung von FKV soll systematisch genutzt werden um die Dämpfungsbestimmung bei Raumtemperatur zu verbessern

2 Stand der Technik

In diesem Kapitel wird der Stand der Technik bezüglich der Untersuchungen der Dämpfung von Faser-Kunststoff-Verbunden dargestellt. FKV haben eine Vielzahl an Parametern, die das Dämpfungsverhalten beeinflussen können. Diese unterschiedlichen Einflussgrößen werden dargelegt, ebenso wie die experimentelle Bestimmung der Dämpfung. Die Ursache von Dämpfung liegt im Materialverhalten, welches zuerst betrachtet wird.

2.1 Inelastisches Materialverhalten

Weicht das Werkstoffverhalten von festen Werkstoffen vom Modell des ideal elastischen Körpers ab, wird dies als inelastisches Materialverhalten bezeichnet. Kriechen und Relaxieren sind zwei typische Eigenschaften von inelastischem Materialverhalten und in Abbildung 2.1 dargestellt. Beim Kriechen folgt auf einen Spannungssprung ein Dehnungssprung mit einer weiteren Zunahme der Dehnung mit der Zeit. Das Relaxieren beschreibt eine Abnahme der Spannung mit der Zeit infolge eines Dehnungssprungs. [9]

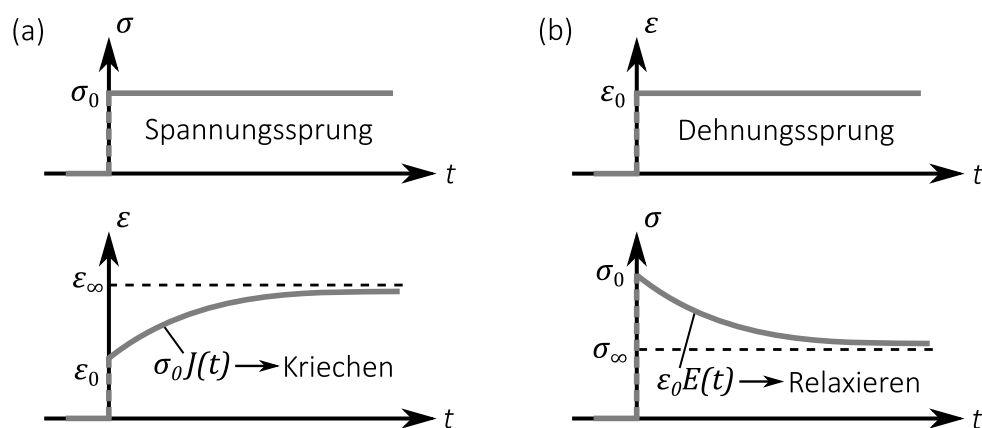


Abbildung 2.1: Inelastisches Materialverhalten: (a) Dehnungsantwort (Kriechen) nach einem Spannungssprung (σ_0), beschrieben durch die Kriechnachgiebigkeit $J(t)$. (b) Spannungsantwort (Relaxieren) nach einem Dehnungssprung (ϵ_0), beschrieben durch die Relaxationssteifigkeit $E(t)$.

Eine zyklische Beanspruchung eines inelastischen Werkstoffs hat hierbei einen Verlust an mechanisch nutzbarer Energie (Hysterese) zur Folge. Inelastisches Materialverhalten ist daher eine Ursache der Dämpfung im Werkstoff.

2.1.1 Lineare Viskoelastizität

Die einfachste Form von inelastischem Materialverhalten ist die Lineare Viskoelastizität. Während Elastizität und Plastizität ein zeitunabhängiges Materialverhalten beschreiben, wird das zeitabhängige Materialverhalten durch Viskoelastizität und Viskoplastizität beschrieben [10]. Bei polymeren Werkstoffen (somit auch bei FKV) tritt bereits bei niedrigen Temperaturen ein Werkstoffverhalten in Abhängigkeit von Zeit, Frequenz, Geschwindigkeit und Belastung auf. Das viskoelastische Werkstoffverhalten wird hauptsächlich durch die Matrix bedingt, die Fasern haben nur ein sehr eingeschränktes Kriechverhalten [11].

Zur Ermittlung der viskoelastischen Eigenschaften sind Versuche mit transienter und dynamischer Erregung notwendig. Durch transiente Versuche können Relaxationssteifigkeits- und Kriechnachgiebigkeitsmoduln des Werkstoffs bestimmt werden. Diese stellen ein Maß für die zeitlich veränderliche Steifigkeit des Werkstoffs dar. Zur Ermittlung frequenzabhängiger Moduln ist ein Versuch mit dynamischer, harmonischer Erregung notwendig, dargestellt in Abbildung 2.2 am Beispiel eines Zugstabes. Die Kreisfrequenz Ω gibt den zurückgelegten Phasenwinkel pro Zeitspanne der Schwingung an. Bei viskoelastischen Werkstoffeigenschaften kommt es zu einer Phasendifferenz δ (Verlustwinkel) zwischen den Erregerdehnungen $\varepsilon(t)$ und den Antwortspannungen $\sigma(t)$. Anhand der Phasendifferenz können Rückschlüsse auf die Eigenschaften des Werkstoffs gemacht werden und es wird zwischen rein-elastischem, rein-viskosem und viskoelastischem Materialverhalten unterschieden [11].

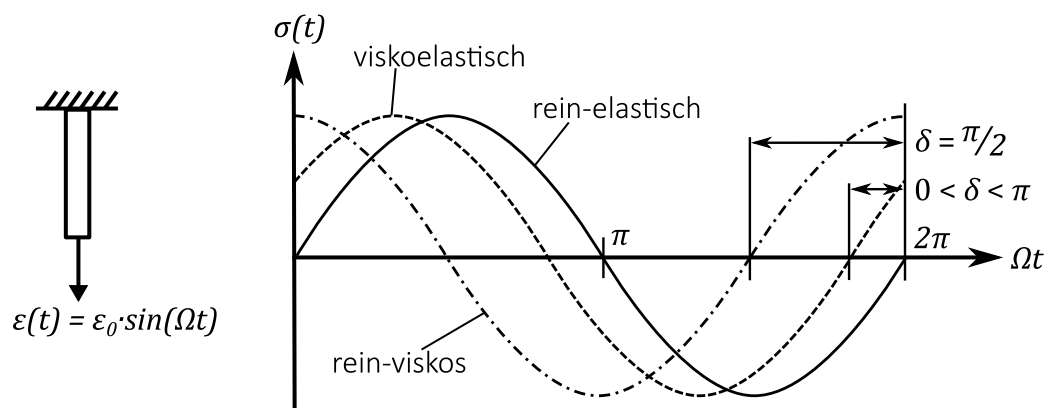


Abbildung 2.2: Antwortspannungen $\sigma(t)$ bei sinusförmiger Dehnungserregung $\varepsilon(t)$ am Beispiel eines Zugstabes. Schematische Darstellung von rein-elastischem, rein-viskosem und viskoelastischem Materialverhalten über eine Schwingungsperiode.

Phänomenologische Betrachtung

Die phänomenologische Betrachtungsweise ist die Modellierung des zeitabhängigen Werkstoffgesetzes durch Integrationsgleichungen. In Abbildung 2.2 wird ein Zugstab durch eine zyklisch dynamische Dehnung $\varepsilon(t)$ erregt. Bei einem viskoelastischen Material hat die Dehnungserregung eine phasenverschobene Antwortspannung $\sigma(t)$ zur Folge. Alternativ zur trigonometrischen Ausdrucksweise können Erregung und Antwort mit Hilfe der EULERSchen Formel durch komplexe Funktionen wie folgt ausgedrückt werden

$$\begin{aligned}\varepsilon(t) &= \varepsilon_0 \cdot \sin(\Omega t) = \varepsilon_0 \cdot e^{i(\Omega t)} \\ \sigma(t) &= \sigma_0 \cdot \sin(\Omega t + \delta) = \sigma_0 \cdot e^{i(\Omega t + \delta)}\end{aligned}\quad (2.1)$$

Durch diese Ausdrucksweise kann die komplexe Steifigkeit $E^*(\Omega)$ wie folgt definiert werden

$$E^*(\Omega) = \frac{\sigma(t)}{\varepsilon(t)} = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} \cdot e^{i\delta} = \underbrace{\frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} \cos(\delta)}_{\Re\{E^*(\Omega)\}=E'(\Omega)} + i \underbrace{\left(\frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} \sin(\delta)\right)}_{\Im\{E^*(\Omega)\}=E''(\Omega)} = E'(\Omega) + iE''(\Omega) \quad (2.2)$$

Die Variablen $E'(\Omega)$ und $E''(\Omega)$ werden als Speicher- und Verlustmodul bezeichnet. Der Speichermodul $E'(\Omega)$ ist ein Maß für die elastische Energie, die reversibel als Deformation gespeichert wird. Im Gegensatz dazu beschreibt der Verlustmodul $E''(\Omega)$ die Energiedissipation im Werkstoff. Die komplexe Steifigkeit $E^*(\Omega)$ ist ein komplexer Zeiger und durch den Betrag $|E^*(\Omega)|$ und den Phasenwinkel δ definiert. Somit ergibt sich für Speicher- und Verlustmodul folgender Zusammenhang

$$\tan(\delta) = \frac{E''(\Omega)}{E'(\Omega)} \quad (2.3)$$

$\tan(\delta)$ ist als Verlustfaktor definiert und ein Maß für die Dämpfung. Die genannten Parameter können durch Versuche experimentell bestimmt werden. [11, 12, 13]

Modelltheoretische Betrachtung

Die modelltheoretische Betrachtung beschreibt das Materialverhalten mit Hilfe mechanischer Grundelemente in Form von z. B. Feder- und Dämpferelementen. Sie hat sich in der Praxis, neben der universell anwendbaren phänomenologischen Betrachtung, zur Modellierung des zeitabhängigen Werkstoffgesetzes etabliert. Die Feder-Dämpferelemente können

mathematisch wie folgt beschrieben werden:

$$\begin{aligned}\text{HOOKEsche Feder : } \sigma(t) &= c\varepsilon(t) \\ \text{NEWTONscher Dämpfer : } \sigma(t) &= d\dot{\varepsilon}(t)\end{aligned}\tag{2.4}$$

Durch eine Reihen- oder Parallelschaltung von unterschiedlichen mechanischen Grundelementen können beliebig komplexe Differentialgleichungssysteme (DGL-Systeme) erstellt werden. Um aus diesen ein Werkstoffgesetz zu generieren, werden die variablen Parameter (Federsteifigkeiten und Dämpfungskonstanten) der DGL-Systeme angepasst, um die experimentellen Ergebnisse abzubilden [11, 14]. Dabei ist zu beachten, dass die Gleichungen eine Modellierung der realen Physik sind und somit eine Annäherung des realen Materialverhaltens darstellen. Für umfangreichere Diskussion zu rheologischen Modellen bei polymeren Werkstoffen und FKV sei an dieser Stelle auf die entsprechende Fachliteratur [11, 14, 15] verwiesen.

2.1.2 Nichtlineares Materialverhalten

Ein physikalisch nichtlineares Material zeigt im Zugversuch einen nichtlinearen Zusammenhang zwischen der Spannung $\sigma(t)$ und der Dehnung $\varepsilon(t)$. Bei großen Verzerrungen zeigen fast alle Werkstoffe dieses Verhalten. Ausgenommen sind hierbei ideal spröde Werkstoffe (Keramiken). In der Kontinuumsmechanik gibt es Ansätze, die das nichtlineare Materialverhalten durch integrale Zustandsgleichungen beschreiben. Jedoch wird auf Grund der hohen Komplexität der Gleichungen in der Praxis das Materialverhalten durch Modellrheologie angenähert. Nichtlinearitäten können bei einem viskoelastischen Körper sowohl im rein elastischen (zeitunabhängigen) als auch im rein viskosen (zeitabhängigen) Anteil des Materials auftreten. Durch diese Betrachtung entstehen zwei Grenzfälle, die statische Hysterese und die nichtlineare Viskoelastizität. [9]

Die statische Hysterese ist eine spezielle Art der Nichtlinearität, bei der die Hystereseschleife der Belastungs-Entlastungskurve im Spannungs-Dehnungs-Diagramm ausgeprägte Spitzen vorweist. Das Material kann modellrheologisch durch eine Kombination von Elastizitäts- und Coulombelementen ausgedrückt werden. Ein gängiges Modell für die Beschreibung ist das Masing-Modell [9]. Allgemeinere Modelle zur Beschreibung des Werkstoffverhaltens sind in [16] umfangreich betrachtet.

Das Abweichen der Hystereseschleife von einer ellipsenähnlichen Form wird als nichtlineare Viskoelastizität beschrieben. Der viskose Anteil des Materials ist somit keine Konstante, sondern eine Funktion von unterschiedlichen Parametern. Die Berechnung der Dämpfung erfolgt durch eine Modifikation der Theorie der linearen Viskoelastizität und ist in [9] zu

finden. Für weitere Ausführungen wird auf die entsprechende Fachliteratur verwiesen [17, 18].

2.2 Dämpfung

Dämpfung ist ein dynamischer Strukturparameter [11]. VDI 3830-1 beschreibt den Begriff Dämpfung als zeitabhängige Vorgänge mit irreversibler Umwandlung mechanischer Energie in andere Energieformen [19]. Bei der Werkstoffdämpfung erfolgt diese Umwandlung hauptsächlich in thermische Energie.

2.2.1 Einteilung der Dämpfungsphänomene

In VDI 3830-1 werden die physikalischen Ursachen der Dämpfung in zwei Hauptgruppen unterteilt, in innere Dämpfung und äußere Dämpfung (Tabelle 2.1). Die innere Dämpfung wirkt innerhalb der Systemgrenzen der Probe oder des Bauteils. Äußere Einflüsse, wie beispielsweise die Luftreibung, wirken als äußere Dämpfung auf das System.

Tabelle 2.1: Gliederung der Dämpfung nach physikalischen Ursachen nach VDI 3830-1 [19]

Dämpfung	
innere Dämpfung	äußere Dämpfung
- Werkstoffdämpfung	- Reibung mit den umgebenden Medien
- Dämpfung durch Reibung	- Schallabstrahlung in die Luft
- Umwandlung mechanischer Schwingungsenergie in elektrische Energie	- Körperschallabstrahlung in den Boden

Phänomenologisch betrachtet kann die Dämpfung in die Bestandteile Werkstoff-, Kontaktflächen- und Strukturdämpfung aufgeteilt werden. Energiedissipation innerhalb des Werkstoffs durch Verformung bzw. Verschiebung wird durch Werkstoffdämpfung beschrieben. Kontaktflächendämpfung entsteht durch Reibung oder Relativbewegung zwischen zwei Kontaktflächen und ist für Bauteile oder Baugruppen interessant. Dämpfung in Führungen, Elektromechanische Dämpfung und die Energieabgabe an das umgebende Medium (z. B. Luftreibung) werden durch die Strukturdämpfung beschrieben. [19]

2.2.2 Beschreibung der Dämpfung

Sowohl viskoelastisches als auch nichtlineares Materialverhalten können Ursache für Werkstoffdämpfung sein. Beide Verhalten führen zu einer Phasendifferenz von Erregung und

Antwort. Die Dissipation im Werkstoff kann in Form einer Hysterese im σ - ε -Diagramm veranschaulicht werden (Abbildung 2.3). Nichtlineares Materialverhalten hat eine Abweichung von der idealen Ellipse zur Folge, wie in Kapitel 2.1.2 beschrieben.

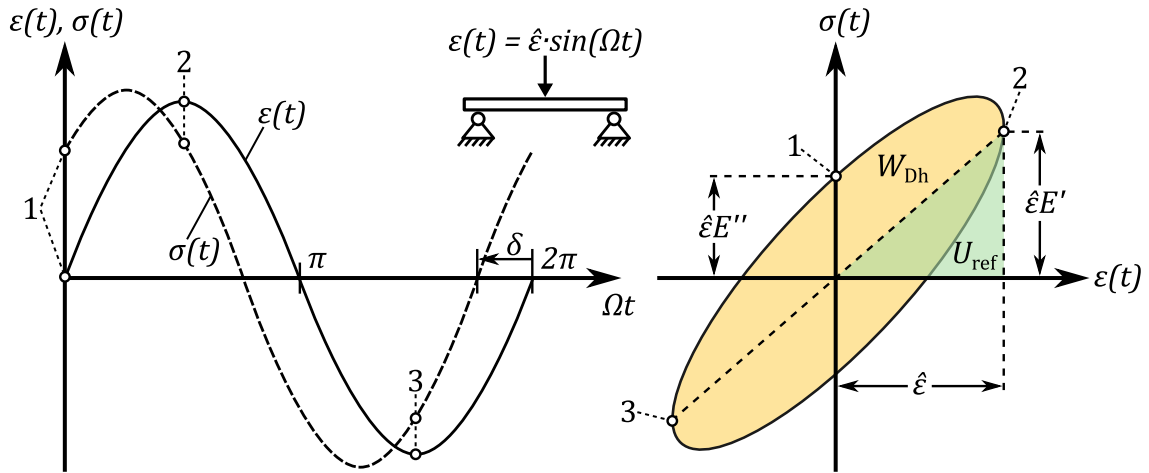


Abbildung 2.3: Spannungsantwort $\sigma(t)$ nach einer Dehnungsanregung $\varepsilon(t)$ unter der Annahme von linearer Viskoelastizität. Resultierende Hysterese fläche bezogen auf einen Belastungszyklus.

In VDI 3830-2 wird die Dämpfung durch den Werkstoffverlustfaktor χ beschrieben. Er beschreibt das Verhältnis der im Werkstoff dissipierten Energie W_{Dh} und der Referenzformänderungsenergie U_{ref} , bezogen auf einen Belastungszyklus der Periodendauer T_p [9]. Der Werkstoffverlustfaktor χ wird nach folgender Gleichung berechnet

$$\chi = \frac{W_{Dh}}{2\pi U_{ref}} = \frac{\int_0^{T_p} \sigma(t) \dot{\varepsilon}(t) dt}{2\pi U_{ref}} \quad (2.5)$$

Neben dem Werkstoffverlustfaktor χ gibt es eine Vielzahl an Kenngrößen, mit denen die Dämpfung in der Literatur beschrieben wird. Ein weiterer Verlustfaktor ist η [1, 20, 21]. Die spezifische Dämpfungskapazität ψ steht über den Normierungsfaktor 2π im Zusammenhang mit χ [22]. Zwischen der Dehnung und Spannung eines viskoelastischen Materials liegt der Phasenwinkel δ . Der Tangens aus dem Phasenwinkel ($\tan(\delta)$) wird ebenfalls als Verlustfaktor beschrieben [9, 23]. Für die Beschreibung der Dämpfung von Ausschwingversuchen wird häufig der Dämpfungsgrad ϑ verwendet [22]. Dieser kann über das logarithmische Dekrement Λ berechnet werden, welches wiederum durch das Ausschwingverhalten bestimmt wird [22, 23]. Die vorgestellten Beschreibungsgrößen können wie in Gleichung (2.6) ineinander umgerechnet werden. Eine Umrechnungstabelle der gängigsten Größen ist zudem in [22] zu finden.

$$\chi = \eta = \frac{\psi}{2\pi} = \tan(\delta) = 2 \cdot \vartheta \quad (2.6)$$

2.2.3 Dämpfung von Metallen

Die Werkstoffdämpfung ist bei Metallen i.d.R. eine isotrope Eigenschaft und von der Belastungsrichtung unabhängig. Verursacht wird diese durch innere Gleitvorgänge. Die Werkstoffdämpfung von metallischen Werkstoffen ist sehr gering und stark vom jeweiligen Gefüge abhängig [24]. In [25] schwankt die Angabe für den Dämpfungsgrad ϑ unterschiedlicher Stähle von 0,0003 bis 0,0025. Eine Zusammenfassung aus verschiedenen Quellen gibt in [26] den Verlustfaktor η über einen Bereich von 0,2 bis 0,0001 an. Somit variiert der angegebene Werkstoffwert teilweise über mehrere Größenordnungen hinweg. In wissenschaftlichen Arbeiten zur Dämpfung steht meist die Systemdämpfung im Vordergrund, der Beitrag der Werkstoffdämpfung ist dabei sehr gering. Zur Beschreibung der Dämpfung von strukturdynamischen Systemen ist der Begriff der Modalen Dämpfung weit verbreitet. Die Modale Dämpfung wird durch eine Dämpfungsmatrix $\mathbf{D}$ modelliert, die zur Schließung von DGL der Strukturdynamik notwendig ist [1, 27]. Sie wird modelliert, da oftmals reale Werte zur Beschreibung des Problems fehlen [25]. Durch eine lineare Kopplung der Massen- $\mathbf{M}$ und Steifigkeitsmatrix $\mathbf{K}$ wird die Dämpfungsmatrix $\mathbf{D}$ modelliert. Dieser Ansatz wird auch Bequemlichkeitshypothese oder Rayleigh-Dämpfung genannt [28]

$$\mathbf{D} = \alpha_0 \mathbf{M} + \alpha_1 \mathbf{K} . \quad (2.7)$$

Dabei gilt für den Dämpfungsgrad der jeweiligen Eigenfrequenz

$$\vartheta_i = \frac{1}{2} \left(\frac{\alpha_0}{\omega_i} + \alpha_1 \omega_i \right) . \quad (2.8)$$

Die Koeffizienten α_0 und α_1 können durch zwei experimentell ermittelte Dämpfungsgrade ϑ_m und ϑ_n bestimmt werden [28]. Der Massen-proportionale Anteil der Dämpfung $\alpha_0 \mathbf{M}$ wirkt bei niedrigen Frequenzen. Hingegen steigt mit zunehmender Frequenz der Einfluss der Steifigkeits-proportionalen Dämpfung $\alpha_1 \mathbf{K}$ (Abbildung 2.4).

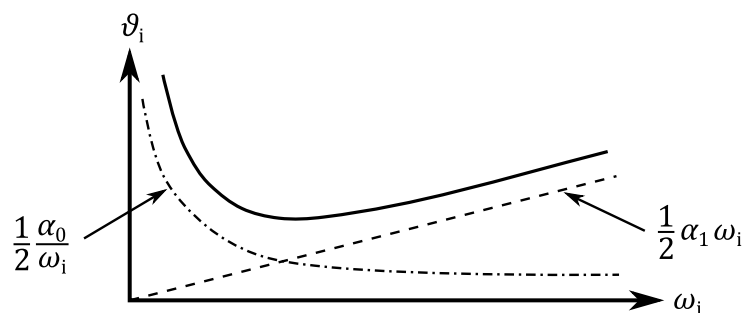


Abbildung 2.4: Zusammenhang von Dämpfungsgrad ϑ_i und zugeordneten Eigenkreisfrequenzen ω_i bei der Rayleigh-Dämpfung [28].

2.3 Dämpfung von Faser-Kunststoff-Verbunden

Faser-Kunststoff-Verbunde bestehen allgemein aus Fasern eingebettet in eine Kunststoffmatrix. Durch diese Kombination ergeben sich Eigenschaften für den Verbund, welche durch die Einzelkomponenten nicht erreicht werden können. Dabei übernehmen die Fasern die anliegenden mechanischen Lasten und sorgen für die notwendige Steifigkeit und Festigkeit. Die Matrix hingegen fixiert die Fasern in der vorgegebenen Position und ist für die Krafteinleitung in die Fasern zuständig. Zudem stützt die Matrix die Fasern gegen Ausknicken und dient als Schutz vor äußere Umgebungseinflüsse. Grundlegend werden FKV in kurz-, lang- oder endlosfaserverstärkt unterteilt und mit zunehmender Faserlänge nehmen die mechanischen Eigenschaften des Verbundes zu. Weiterhin erfolgt eine Unterscheidung abhängig von der eingesetzten Faser und Matrix. [14]

Die am häufigsten verwendeten Verstärkungsfasern sind dabei Glas-, Kohlenstoff- und Aramidfasern. Glasfasern zeichnen sich durch ihre hervorragende Verarbeitbarkeit und ihr sehr gutes Preis-Leistungs-Verhältnis aus. Nachteil der Glasfasern ist die für Strukturbauteile geringe Steifigkeit und Festigkeit sowie die vergleichsweise hohe Dichte.

Exzellente mechanische Eigenschaften und eine geringe Dichte machen die Kohlenstofffaser zu einem idealen Leichtbauwerkstoff. Als Nachteile sind die hohen Kosten, das spröde Bruchverhalten und die Anisotropie der Faser zu nennen.

Die Aramidfaser hat die geringste Dichte der Fasern und die mechanischen Eigenschaften liegen zwischen denen der Kohlenstoff- und Glasfaser. Vorteil ist die hohe Zähigkeit und der damit verbundene Widerstand gegen Rissausbreitung. Gleichzeitig führt die hohe Zähigkeit zu Nachteilen bei der Verarbeitung.

Eine umfassende Betrachtung aller Eigenschaften der Faserwerkstoffe sowie weitere Verstärkungsfasern sind in [14] zu finden.

Als Matrixsystem für FKV werden Duroplaste, Thermoplaste oder Elastomere eingesetzt. Duroplaste zeichnen sich durch eine chemische Vernetzungsreaktion aus. Dadurch entsteht ein engmaschig vernetzter Werkstoff mit einer amorphen (ungeordneten) Molekülkettenanordnung. Dabei ist die Vernetzungsreaktion irreversibel und ein erneutes Aufschmelzen nicht möglich. Duroplaste haben eine hohe Steifigkeit, geringe Kriechneigung und zeigen ein eher sprödes Bruchverhalten.

Thermoplaste haben eine amorphe oder teilkristalline (teilweise geordnete) Struktur der Makromoleküle. Eine räumliche Vernetzung liegt nicht vor. Daher liegt eine höhere Kriechneigung vor und ein wiederholtes Aufschmelzen des Werkstoffes ist möglich. Die mechanischen Eigenschaften von teilkristallinen Thermoplasten sind höher als die von Amorphen. Mit zunehmender Kristallinität steigen die Steifigkeit und Festigkeit, gleichzeitig nimmt die Schlagzähigkeit ab.

Elastomere sind zu einem hohen Grad reversibel verformbar und haben eine sehr hohe Reißdehnung. Die Dehnfähigkeit resultiert aus einer schwachen räumlichen Vernetzung der Makromoleküle, welche gleichzeitig zu einer geringen Steifigkeit und Festigkeit führt. [14]

2.3.1 Wirkmechanismen der Dämpfung von FKV

Die Dämpfungseigenschaften von FKV sind richtungsabhängig (orthotrop). Daher müssen sie in Abhängigkeit der Faserorientierung α und Belastung ermittelt werden. Das Dämpfungsmaximum der UD-Einzelschicht liegt im Gegensatz zur Steifigkeit in Schubrichtung und das Minimum parallel zu den Fasern [29]. In Schubrichtung ist das Werkstoffverhalten der UD-Einzelschicht nichtlinear. Durch den Mehrschichtverbund (MSV) können zusätzlich Kopplungseffekte auftreten, speziell bei unsymmetrischen Laminaten. Hinzu kommt der Einfluss von Feuchtigkeits- und Quelleffekten, besonders bei der Verwendung thermoplastischer Matrizen [2]. Die wirkenden Mechanismen der Energiedissipation von FKV sind im Vergleich zu Metallen grundlegend unterschiedlich. Chandra führt in [2] die Dämpfungsmechanismen auf fünf Haupteinflüsse zurück:

- **viskoelastisches Materialverhalten:** Der Hauptanteil der Dämpfung wird durch das viskoelastische Materialverhalten der Matrix verursacht. Die Verstärkungsfasern leisten nur einen geringen Beitrag zur Gesamtdämpfung
- **Zwischenphase Faser/Matrix:** Die Phase zwischen Faser und Matrix (z. B. Faserbeschichtung) führt zu zusätzlicher Dämpfung des Verbunds [30]. Unterscheidet sich der Elastizitätsmodul der Zwischenphase stark von dem der Matrix, ist der Einfluss auf die Gesamtdämpfung nicht mehr vernachlässigbar [31].
- **Defekte und Mikroschädigungen:** An Matrixrissen oder gebrochenen Fasern entsteht durch Relativbewegung Reibungsdämpfung. Die Defekte verursachen Energiedissipation im Material und erhöhen damit die Werkstoffdämpfung. [7, 32]
- **viskoplastisches Materialverhalten:** Bei hohen Verzerrungs- bzw. Spannungsamplituden entsteht nichtlineare Dämpfung. Verursacht wird die Dämpfung durch das elasto-plastische, mikromechanische Verhalten des Werkstoffs. [33]
- **thermomechanisches Materialverhalten:** Dämpfung entsteht durch zyklischen Wärmestrom von druck- zu zugbelasteten Bereichen im Material [34]. Dieser Effekt kann bei FKV mit thermoplastischer Matrix auftreten [33]. Hauptsächlich zum Tragen kommt der Effekt bei Metall-Verbundwerkstoffen auf [30].

Je nach Belastung und Werkstoffbeschaffenheit können ein oder mehrere dieser Mechanismen gleichzeitig wirken. Dadurch wird eine präzise Abgrenzung der einzelnen Dämpfungsursachen bei den experimentellen Untersuchungen erschwert.

2.3.2 Experimentelle Bestimmung der Dämpfung

Eine Vielzahl an Faktoren hat einen Einfluss auf das Dämpfungsverhalten von FKV. Grundlage für eine getrennte Betrachtung unterschiedlicher Einflussfaktoren ist die experimentelle Versuchsdurchführung. Folgend wird ein Überblick der Entwicklung der Versuchsmethodik für FKV gegeben.[1, 8]

Erste experimentelle Dämpfungsuntersuchungen an FKV wurden von Schultz und Tsai in [35, 36] veröffentlicht. Untersucht werden mittig an einem Shaker eingespannte Biegebalken, bei denen beide Balkenenden frei sind. Über den Shaker erfolgt die Anregung in Eigenfrequenz, bis sich ein stationärer Schwingzustand im Balken eingestellt hat. Anschließend wird die Anregung weggenommen und das Ausschwingverhalten der Proben aufgezeichnet und ausgewertet. Für die Auswertung werden unterschiedlich viele Ausschwingzyklen für die Dämpfungsberechnung berücksichtigt. Hierbei werden teilweise deutliche Unterschiede in den Ergebnissen festgestellt, welche auf Einflüsse der Umgebung auf den Versuch zurückgeführt werden. Die ersten Untersuchungen von Adams in [37] sind ebenfalls von Einflüssen der Umgebung auf den Versuch gekennzeichnet. In [38] wird von Adams und Bacon der entwickelte Versuchsaufbau vorgestellt, der eine zuverlässige Dämpfungsermittlung ermöglicht. Umgebungseinflüsse werden durch eine temperierte Vakuumkammer eliminiert und zusätzlich kann der Temperatureinfluss auf die Dämpfung untersucht werden. Die Anregung und gleichzeitige Messung der Balkenproben erfolgten über einen mittig befestigten Dorn, welcher über einen Elektromagneten angetrieben wird. Die Proben werden in ihrer Eigenfrequenz angeregt und die Schwingungsknoten werden zusätzlich unterstützt. Aufgrund des geringen relativen Gewichtsunterschieds zwischen Dorn und Probe muss der Masseneffekt berücksichtigt werden. Zudem muss bei der Einspannung darauf geachtet werden, dass keine Schädigung im Einspannbereich entsteht [39]. Die ersten Untersuchungen von Gibson [40, 41] basieren ebenfalls auf dem mittig eingespannten und angeregten Biegebalken mit freien Enden. Über einen Shaker werden die Proben in Eigenfrequenz angeregt und die Dämpfungsermittlung erfolgt durch die Phasendifferenz von Anregung und Antwort. Zur Untersuchung großer Amplituden wird der Versuch im Vakuum durchgeführt. Schädigungen im Einspannbereich beeinflussen das Ergebnis und es folgt eine Weiterentwicklung der Versuchsmethodik.

Von Suarez et al. [42], Suarez und Gibson [43] sowie Crane und Gillespie [44] wird die Impulsmethode (oder Modalanalyse) für FKV entwickelt. Der Versuchsaufbau besteht aus einer einseitig eingespannten Balkenprobe, die durch einen elektromagnetischen Hammer mit einem Impuls angeregt wird (Abbildung 2.5). Durch die Verwendung eines elektromagnetischen Hammers wird die Reproduzierbarkeit des Versuchs erhöht. Die Versuchsaufzeichnung erfolgt am freien Probenende, die höchste Messgenauigkeit kann hierbei

durch Laser-Doppler-Vibrometer erreicht werden [45]. Zur Auswertung des Versuchs wird die Übertragungsfunktion aus Antwort und Anregung gebildet. Diese wird mittels einer Fast Fourier Transformation (FFT) in den Frequenzbereich übertragen und die Dämpfung der Eigenfrequenzen wird durch Halbwertsbreite bestimmt [23]. Zur Variation der Eigenfrequenzen wird unter anderem in Untersuchungen von Berthelot die freie Balkenlänge variiert [46]. Dadurch kann das Dämpfungsverhalten über einen Frequenzbereich analysiert werden.

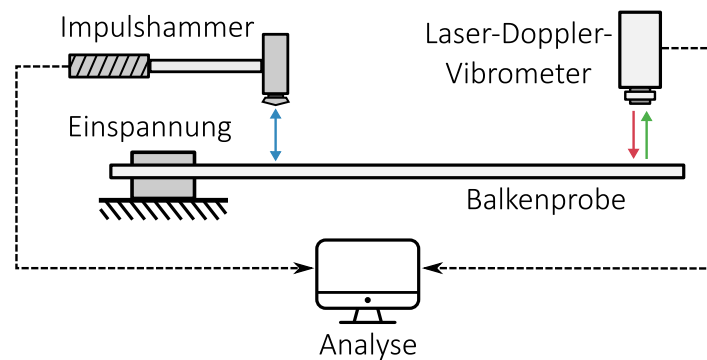


Abbildung 2.5: Versuchsaufbau der Impulsmethode nach [46]. Einseitig eingespannte Balkenprobe, die durch einen Impulshammer angeregt wird. Aufzeichnung der Probenreaktion durch einen Laser-Doppler-Vibrometer.

Ein weiterer Versuch an einem einseitig eingespannten Biegebalken ist der freie Ausschwingversuch. Hierbei wird die Probe ebenfalls initial angeregt und das freie Ausschwingverhalten wird aufgezeichnet. Anhand des logarithmischen Dekrements wird das Dämpfungsverhalten für die erste Eigenfrequenz ausgewertet. [47, 48]

Ein Großteil der wissenschaftlichen Untersuchungen konzentriert sich auf die Untersuchung von Balkenproben unter einer Biegebelastung. Neben den bisher dargestellten Versuchsaufbauten sind in der Literatur noch weitere Möglichkeiten zu finden das Dämpfungsverhalten zu untersuchen.

Eine weitere Möglichkeit besteht darin, zyklische Versuche durchzuführen und die Dämpfung anhand der gemessenen Hysteresefläche auszuwerten (Gleichung (2.5)). Höring wendet in [7, 49] diese Methode an, um an Rohrproben mittels einer Zug-Druck-Torsions Prüfmaschine die Dämpfung zu bestimmen. Rohrproben haben den Vorteil, dass die Beanspruchung der Proben sehr genau eingestellt werden kann, sind jedoch in der Herstellung sehr aufwändig. In den Arbeiten [33, 50, 51] ist die Dämpfungsermittlung durch zyklische Zugversuche beschrieben. Die Proben werden bei diesem Verfahren außerhalb ihrer Resonanz untersucht. Abgesehen davon kann die Prüffrequenz frei gewählt werden. Da die Auswertung auf der Phasendifferenz von Anregung und Antwort basiert, muss die verwendete Messtechnik höchsten Anforderungen gerecht werden. In [7] müssen Laufzeitunterschiede

der Messsignale nachträglich korrigiert werden, um eine Auswertung zu ermöglichen.

Maschinen, in denen dieses Vorgehen und die Auswertung der Dämpfung vollständig hinterlegt sind, sind Maschinen zur Dynamisch-Mechanischen Analyse (DMA). Diese werden vorrangig zur Untersuchung der dynamischen Eigenschaften von polymeren Werkstoffen eingesetzt [12]. Das Werkstoffverhalten kann in Abhängigkeit der Belastung, Temperatur und Frequenz genau geregelt untersucht werden. Bei gleichzeitiger Untersuchung der Temperatur wird auch die Abkürzung DMTA (Dynamisch-Mechanisch-Thermische Analyse) verwendet. Im Rahmen der Beschreibungen wird jedoch einheitlich DMA verwendet. DMA haben den Vorteil, dass eine große Anzahl an Versuchen auf Probekörperebene automatisiert durchgeführt werden kann. Sie bringen jedoch den Nachteil mit sich, dass nur Teile der Messdaten zur Erstellung der Auswertung zugänglich sind. Daher kann ein fehlerhafter Eindruck von der Güte der Versuchsergebnisse entstehen. Für den Einsatz bei der Dämpfungsermittlung von FKV spielen die Maschinen bisher eine untergeordnete Rolle [30]. Oftmals werden diese verwendet, um entweder zusätzlich den Temperatureinfluss zu überprüfen [52] oder es werden grundlegende Kennwerte als Basis eines Berechnungsmodells gemessen [53].

In [54, 55] werden Versuche an Biegeproben im freien Fall vorgestellt. Hierbei wird eine Vorrichtung entwickelt, welche die Proben definiert durchbiegt und anschließend durch einen "Launcher" (Startvorrichtung) in die Luft katapultiert. Für den Zeitraum, den die Probe in der Luft ist, wird das freie Schwingverhalten untersucht. Die Versuche finden in einer Vakuumkammer statt.

Ein Vergleich unterschiedlicher Versuchsaufbauten wird von Suarez und Gibson in [42] diskutiert. Untersucht wird der Doppelträgerbalken mit einer mittigen Sinusanregung sowie mit einer zufälligen Anregung. Zudem werden Biegebalken durch einen Impuls angeregt und untersucht. Dabei sind die Balken entweder einseitig fest eingespannt oder in ihren Schwingungsknoten an Fäden aufgehängt. Die Versuche werden sowohl an Aluminium als auch an unterschiedlichen FKV durchgeführt. Lediglich die Ergebnisse der Fadenaufhängung weichen von dem Gesamtbild ab. Bei allen weiteren Versuchsmethoden kommt es zu einer guten Übereinstimmung der jeweiligen Ergebnisse.

Strukturdämpfung

Die dynamische Versuchsdurchführung zur Dämpfungsermittlung führt zu Reibung der Proben mit dem Umgebungsmedium Luft. Dies verursacht eine zusätzliche Dämpfung (Strukturdämpfung) durch Luftreibung, welche das Versuchsergebnis verfälschen kann [35, 37]. Der konkrete Einfluss der Luftreibung wird in den Studien [38, 55, 56] durch den Ein-

satz einer Vakuumkammer quantifiziert und diskutiert. In den Studien [38, 56] wird eine lineare Abhängigkeit der Strukturdämpfung von der maximalen Probenamplitude ermittelt. Eine lineare Abhängigkeit von der ermittelten Dämpfung zum Atmosphärendruck wird zudem in [55] festgestellt. Im Falle von schwach gedämpften Materialien ist ein maximaler Einfluss der Luftdämpfung von bis zu 50 % der gemessenen Werkstoffverlustfaktoren nachweisbar [38]. Eine analytische Einordnung der Effekte der Luftreibung ist ebenfalls in [38, 56] zu finden. Zwei Punkte verhindern dabei die genaue analytische Beschreibung des Einflusses der Luftreibung. Zum einen ist die Probengeschwindigkeit im Schwingzustand nicht konstant, sondern variabel entlang der Biegeachse. Je höher die Auslenkung, desto höher ist auch die Probengeschwindigkeit im Versuch. Zum anderen gelten die Gleichungen, um den Luftwiderstand zu berechnen, für stationäre Vorgänge und somit bei konstanter Probengeschwindigkeit [38]. Jedoch verändert sich die Probengeschwindigkeit im Schwingversuch ebenfalls periodisch. Um den Einfluss der Luftreibung niedrig zu halten, wird in [42] empfohlen die maximale Auslenkung der Probe auf die Probendicke zu beschränken. Eine Vielzahl an Versuchsaufbauten setzt bei der Untersuchung von größeren Amplituden auf eine Vakuumkammer.

2.3.3 Einflussfaktoren auf die Dämpfung

Viele Einflussfaktoren, abhängig von dem Werkstoff, der Belastung oder der Geometrie, können das Dämpfungsverhalten von FKV beeinflussen. Da im Verbund unterschiedliche Dämpfungsmechanismen mit unterschiedlicher Gewichtung zusammenwirken, ist eine genaue Untersuchung der verschiedenen Einflussgrößen schwierig.

Faserwinkel und Laminataufbau

Faserwinkel α und Laminataufbau haben den größten Einfluss auf die globalen Eigenschaften eines Laminates. Dies gilt ebenfalls für den Verlustfaktor und in einer Vielzahl an Veröffentlichungen wird dieser Einfluss untersucht [8]. Der Verlustfaktor der orthotropen UD-Einzelschicht ist richtungsabhängig und zur Beschreibung müssen drei Verlustfaktoren bestimmt werden. Ein Verlustfaktor entlang der Faserorientierung $\eta_{\parallel}$, ein Verlustfaktor senkrecht der Faserorientierung $\eta_{\perp}$ und einer in Schubrichtung $\eta_{\parallel\perp}$ [1].

Grundlegende Untersuchungen hierzu werden von Adams und Bacon in [3] vorgestellt. Hierbei werden unterschiedliche Faserwinkel von UD-Verbunden und ausgeglichenen Winkelverbunden (AWV) untersucht. Unter Biegebelastung liegt das Maximum des Verlustfaktors von UD-Proben bei 30° und bei AWV zwischen 40° und 50°. Bei einer Torsionsbelastung liegt das Maximum der Dämpfung bei 45°-Faserorientierung. Diese Erkenntnisse werden in den Arbeiten [20, 43, 57, 58] grundlegend bestätigt, wobei das Dämpfungsmaximum nicht

immer bei den genannten Winkeln liegt. Zudem hat die Wahl der Verstärkungsfasern einen Einfluss auf den Winkel für die maximale Dämpfung [46, 59, 60]. Die Ergebnisse zeigen eine starke Abhängigkeit der Dämpfung in Folge von Schubbelastung. In Schubrichtung liegt das Maximum der Dämpfung. Durch eine Maximierung der Schubspannungskomponenten werden gleichzeitig die Dämpfungseigenschaften maximiert [61, 62]. Gleiches gilt für den Laminataufbau. Durch die Platzierung schubweicher Einzelschichten im Bereich der maximalen Schubbeanspruchung, werden die Dämpfungseigenschaften des gesamten Laminats erhöht [58, 63].

Faser- und Matrixmaterial

Auf den Werkstoffverlustfaktor haben Faser- und Matrixmaterial einen unterschiedlichen Einfluss. Ein großer Anteil des Verlustfaktors folgt aus dem viskoelastischen Materialverhalten der polymeren Matrix. Bei der Faserverstärkung werden in der Literatur bei dem Vergleich von Glas- und Kohlenstofffasern qualitativ unterschiedliche Ergebnisse berichtet. In [11, 37] werden keine Unterschiede im Dämpfungsverhalten beider Fasern festgestellt. Hingegen werden in [44, 64, 65] höhere Werkstoffdämpfungen von Glas- im Vergleich zu Kohlenstofffasern gemessen. Aramidfasern haben im Vergleich zu Glas- und Kohlenstofffasern eine deutlich höhere Werkstoffdämpfung. Je nach Faserorientierung wird von [46, 6] ein etwa vierfach höherer Dämpfungswert im Vergleich zu Glasfasern gemessen. Untersuchungen aus [66] ergeben sogar einen zehnfach höheren Verlustfaktor.

Das größte Potential bzgl. der Werkstoffdämpfung haben FKV mit einer Elastomermatrix [67]. Thermoplaste mit amorpher Struktur und einer Glasübergangstemperatur unterhalb der Raumtemperatur weisen eine höhere Werkstoffdämpfung als Duroplaste auf [68, 69]. Dies liegt am Entschlaufungsprozess der vernetzten Struktur unter Belastung [70]. Untersuchungen am teilkristallinen PEEK haben eine geringere Werkstoffdämpfung als Proben aus EP gezeigt [71, 72].

Faservolumengehalt

Mit zunehmendem relativen Faservolumenanteil φ nimmt die Werkstoffdämpfung ab [37, 52, 73]. Dabei ist der Einfluss auf den Verlustfaktor quer zur Faser größer als faserparallel [1]. Begründet ist dies durch die höhere Energiedissipation der Matrix. Steigt der relative Faservolumenanteil des Verbundes, steht weniger Matrixmaterial zur Energiedissipation zur Verfügung [8]. Eine analytische Betrachtung der Zusammenhänge ist in [74] auf Basis einer modifizierten Mischungsregel dargestellt.

Faserlänge

Unterschiedliche Untersuchungen kommen übereinstimmend zu der Erkenntnis, dass kurzfaserverstärkte FKV eine erhöhte Dämpfung aufweisen im Vergleich zu endlosfaserverstärkten FKV [75, 76, 77]. Begründet wird der Effekt durch die zusätzliche Energiedissipation der Matrix. Die von der viskoelastischen Matrix übernommene Lastübertragung von Faser zu Faser führt zu zusätzlichen Schubspannungskonzentrationen an den freien Faserenden. Diese zusätzlichen Schubspannungen resultieren in einer höheren Dämpfung des FKV. [78, 79]

Belastungsfrequenz

Um den Einfluss der Belastungsfrequenz zu untersuchen, werden in der Literatur zwei unterschiedliche Methoden verwendet. Zum einen werden Proben mittels der Modalanalyse untersucht. Es wird die Übertragung einer Impulsanregung auf Peaks der jeweiligen Eigenfrequenzen in einem bestimmten Frequenzbereich untersucht. Zusätzlich wird hierbei die Balkenlänge variiert und dadurch der untersuchte Frequenzbereich verfeinert. Zum anderen kann der Frequenzbereich durch erzwungene Schwingungen untersucht werden. Der untersuchbare Frequenzbereich wird hierbei durch die Frequenz der Probenanregung limitiert.

Bei der Frequenzuntersuchung mittels Modalanalyse wird in [80, 81] kein Einfluss der Frequenz auf die Werkstoffdämpfung ermittelt. Untersuchungen aus [46, 54] zeigen hingegen eine leichte Zunahme der Dämpfung mit zunehmender Frequenz. Diese Beobachtungen werden durch weitere Untersuchungen in [44, 59, 71] bestätigt. Dabei ist die Höhe der Zunahme abhängig vom untersuchten Faserwinkel. Je höher der Faserwinkel ist, desto ausgeprägter ist die Zunahme. Zudem hat die Materialkombination einen Einfluss auf den Effekt [44, 71].

Dieses ambivalente Ergebnis spiegelt sich in Frequenzuntersuchungen wider. In [7] wird eine Frequenzunabhängigkeit der Dämpfung bis zu einer Frequenz von 40 Hz ermittelt. Hingegen zeigen Untersuchungen in [51] eine Zunahme der Dämpfung mit der Erregerfrequenz. Untersucht werden hierbei Frequenzen von bis zu 10 Hz.

Temperatur

Das Maximum der Dämpfung wird im Bereich der Glasübergangstemperatur erreicht [14, 38, 81]. Dieses fällt mit einem starken Abfall der Steifigkeit zusammen. Bei dem Vergleich von faserverstärkten Kunststoffen mit den jeweiligen reinen Kunststoffen in [52] fällt das absolute Maximum bei den faserverstärkten Proben jedoch deutlich geringer aus.

Zudem wird durch die Faserverstärkung das Dämpfungsmaximum zu höheren Temperaturen verschoben. Je höher der Faservolumengehalt ist, desto ausgeprägter ist dieser Effekt. Untersuchungen an PEEK in [72] zeigen durch mehrmalige Versuchsdurchführung, dass die thermische Historie einen Einfluss auf das Ergebnis hat. Dieser Effekt wird mit der teilkristallinen Struktur von PEEK begründet. Gleiche Versuche am amorphen Polyethersulfon wiesen diesen Effekt nicht auf.

Belastungsamplitude

In den Arbeiten [38, 54] kann kein Einfluss der Amplitude auf die Dämpfung festgestellt werden. Zudem wird in [51] kein Einfluss einer zusätzlichen Vorspannung der Proben auf die Werkstoffdämpfung festgestellt. Hingegen zeigen Untersuchungen aus [81] eine leichte Zunahme der Dämpfung mit zunehmender Amplitude. Speziell die Dämpfung in Schubrichtung ($\eta_{\parallel\perp}$) zeigt in [3] eine Abhängigkeit von der Belastungsamplitude.

Versuche über einen größeren Amplitudenbereich werden in [7, 33, 40] durchgeführt. Diese kommen übereinstimmend zu dem Ergebnis, dass die Dämpfung bis zu einer Schädigungsgrenze unabhängig von der Amplitude ist. Übersteigt die Amplitude diese Grenze, nimmt die Dämpfung aufgrund von Mikroschädigungen zu. Höring verdeutlicht in [7] den darauf folgenden Zusammenhang von Belastungshistorie und Dämpfung.

Probekörpergeometrie

Zur Minimierung von Schubeinflüssen werden bei Versuchen an Balkenproben die Schlankheit, das Verhältnis von Längen zu Dicken, untersucht. Mit zunehmender Schlankheit der Balken sinkt der gemessene Verlustfaktor bis zu einem Grenzwert, an dem die Schlankheit keinen Einfluss mehr hat. Je nach Faserorientierung ergeben sich unterschiedliche Grenzwerte. Bei Proben mit einer Faserorientierung von 0° muss die Schlankheit höher sein als bei Proben mit einer Faserorientierung von 90° . [82, 83]

Eine numerische Analyse zur Balkenbreite ist in [84] zu finden. Hierbei werden über die Ritz-Methode verschiedene Breiten auf ihren Einfluss auf die Dämpfung untersucht. Mit einem Verhältnis von Längen zu Breiten von 10 werden hierbei die besten Übereinstimmungen von experimentellen Ergebnissen und Berechnung erzielt.

2.3.4 Berechnung der Dämpfung von FKV

Parallel zu den experimentellen Methoden werden Verfahren zur Berechnung der Dämpfung von FKV entwickelt. Diese setzen die Annahmen der klassischen Laminattheorie (CLT)

voraus, bestehend aus einer idealen Haftung der Schichten, einem ebenen Spannungszustand und kleinen Deformationen [14]. Bei der Berechnung gibt es zwei grundlegende Konzepte, die Energiemethode und das Korrespondenzprinzip.

Die Grundlage für die Energiemethode wird von Ungar und Kerwin in [85] gelegt und beschränkt sich auf akustische Problemstellungen. Die Dämpfung eines Mehrschichtverbundes wird über das Verhältnis der dissipierten Energie W_{Dh}^{MSV} und der elastischen Formänderungsenergie U_{ref}^{MSV} bestimmt. Die Energien des Mehrschichtverbundes setzen sich wiederum aus den Energien der jeweiligen Einzelschichten zusammen. Für die Einzelschicht müssen die Formänderungsenergien parallel und senkrecht zur Faser sowie in Schubrichtung bekannt sein. Alle strukturellen Anwendungen der Energiemethode basieren auf der Grundlage aus [85] und unterscheiden sich in ihren Berechnungsansätzen für die jeweiligen Schichtenergien. Von Adams und Bacon wird in [3] die Energiemethode auf strukturelle FKV angewendet. Die Schichtenergien werden hierbei durch Gleichungen der Spannungs- und Nachgiebigkeitsterme berechnet. Diese Methode hat den Nachteil, dass sie numerisch sehr aufwändig ist. Eine Weiterentwicklung der Methode folgt von Ni und Adams in [65]. Durch zusätzliche Annahmen, wodurch die Anwendung auf Biegebalken beschränkt wird, kann der numerische Aufwand deutlich reduziert werden. Außerdem wird durch die Annahmen eine bessere Übereinstimmung mit den experimentellen Ergebnissen erzielt. Ebenfalls auf Basis der Energiemethode entwickeln Saravanos und Chamis in [4] eine weitere Methode zur Dämpfungsberechnung. Verwendet werden hierbei Steifigkeit- und Dehnungsterme zur Berechnung der Dämpfung. Unbekannte Größen werden durch einen mikromechanischen Ansatz der Einzelkomponenten des Laminates ermittelt. Durch den Ansatz werden interlaminare Effekte bei der Berechnung berücksichtigt [86]. Zudem wird von den Autoren in [87] ein Modell für dicke Lamine aufgestellt.

Das Korrespondenzprinzip wird parallel zur Energiemethode von Hashin entwickelt und in [88, 89] vorgestellt. Durch die Gleichung (2.3) wird die Werkstoffdämpfung aus dem Verlust- und Speichermodul bestimmt. Dabei legt die Korrespondenzmethode eine Berechnungsgrundlage für die komplexen Moduln von FKV. Bisherige Ansätze gelten nur für isotrope Werkstoffe. Eine Anwendung der Korrespondenzmethode wird von Yim in [90, 91] vorgestellt. Basierend auf der CLT werden zusätzliche Parameter in der Berechnung verwendet, um eine Anpassung an die jeweiligen Versuchsergebnisse vornehmen zu können. Verglichen wird das Modell mit den Ergebnissen aus dem Modell von Ni und Adams. In [83] folgt eine Erweiterung des Modells, um transversale Schubspannungen bei der Berechnung zu berücksichtigen. Weitere Anwendungen der Korrespondenzmethode sind in [36, 40, 41, 78, 79] dargestellt.

Eine Zusammenfassung der unterschiedlichen Berechnungsmethoden sowie ein Vergleich

der Ergebnisse ist in [92] zu finden. Hierbei wird die größte Übereinstimmung der Berechnung mit den experimentellen Ergebnissen durch das Modell von Saravanos und Chamis erzielt. Des Weiteren ist eine detaillierte Übersicht der unterschiedlichen Berechnungsansätze in [1, 93] zusammengefasst.

3 Experimentelle Ermittlung der Dämpfung

In diesem Kapitel werden unterschiedliche Prüfstände zur Dämpfungsermittlung untersucht. Ziel ist es eine Versuchsmethodik herauszuarbeiten, mit der das Dämpfungsverhalten zuverlässig ermittelt werden kann. Für die Bestimmung des Dämpfungsverhaltens werden in diesem Kapitel zwei Versuchsmethodiken betrachtet und deren Tauglichkeit für die Versuchsdurchführung beurteilt. Zum einen wird die Dämpfung mittels Maschinen zur Dynamisch Mechanischen Analyse bestimmt. Zum anderen werden durch Ausschwingversuche das logarithmische Dekrement ermittelt und darauffolgend Rückschlüsse auf die Dämpfung gezogen. Ergänzend zu der experimentellen Betrachtung der jeweiligen Versuchsstände werden die Belastungen und Beanspruchungen der Proben während der Prüfung analytisch untersucht und die Einflussparameter herausgearbeitet. Zur Validierung der Versuchsaufbauten werden in diesem Kapitel Messungen an Proben aus Stahl durchgeführt. Diese sind aufgrund ihres isotropen Materialverhaltens und der bekannten eng begrenzten Elastizitätskennwerte besser geeignet die Plausibilität der Versuchsergebnisse zu überprüfen. Eine Betrachtung der Dämpfung von Faser-Kunststoff-Verbunden folgt in den nächsten Kapiteln.

3.1 Dämpfungsermittlung durch Dynamisch-Mechanische Analyse

Die Dämpfungsermittlung anhand der DMA wird in diesem Abschnitt untersucht. Das prinzipielle Vorgehen einer DMA ist bereits in Kapitel 2.3.2 erklärt und wird in diesem Kapitel an unterschiedlichen Proben angewandt. Der Fokus der Arbeit liegt dabei auf den in Abbildung 3.1 dargestellten Untersuchungen.

Bei einer *Frequenzanalyse* (Abbildung 3.1 links) wird bei gleichbleibender mittlerer Belastung die Probe bei unterschiedlichen Frequenzen zyklisch belastet und untersucht. Die Prüftemperatur wird zu Beginn des Versuchs eingestellt und über den Versuch konstant gehalten. Genutzt wird die Analyse zur Beurteilung des Dämpfungsverhaltens in Abhängigkeit der Frequenz. Des Weiteren ist es möglich bei gleichbleibender mechanischer Belastung die Temperatur zu verändern. Diese *Temperaturanalyse* (Abbildung 3.1 rechts) kann unter anderem genutzt werden um die Glasübergangstemperatur von polymeren Werkstoffen

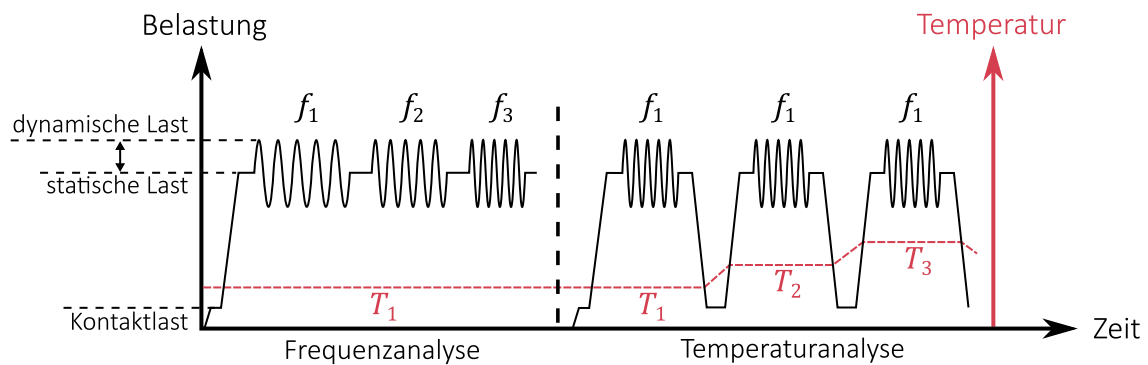


Abbildung 3.1: Prinzipielle Vorgehen einer DMA. Analyse der Belastungsfrequenz (links) und Einfluss der Temperatur (rechts).

zu bestimmen. Im Rahmen dieser Arbeit werden DMA mit Zugbelastung und 3-Punkt-Biegebelastung durchgeführt und analysiert.

3.1.1 DMA mittels Zugbelastung

In diesem Abschnitt werden die DMA-Versuche mit einer Zugbelastung der Proben untersucht. Durch die Zugbelastung entsteht ein homogener Spannungszustand innerhalb der Probe, der weitergehende Analysen vereinfacht. Es entstehen zudem keine Überlagerungseffekte unterschiedlicher Belastungen und von den Versuchsergebnissen kann direkt auf die Werkstoffdämpfung geschlossen werden [7, 94]. Speziell für die angestrebten Untersuchungen von FKV mit unterschiedlicher Faserorientierung ist dieses Vorgehen besonders geeignet. Dadurch können die Faserorientierungen unabhängig voneinander untersucht und die jeweilige Werkstoffdämpfung bestimmt werden. Zur Überprüfung des Versuchsaufbaus werden zunächst Messungen an Proben aus Stahl durchgeführt.

Die dynamischen Zug-Versuche werden an dem Modell *DMA Gabo Eplexor 100* des Herstellers *Netzsch* durchgeführt, im Folgenden abgekürzt durch Ga^I . Die Prüfmaschine ist auf 100 N dynamische und 150 N statische Prüfkraft ausgelegt. Dynamische Verformungen können bis zu 1,5 mm mit einer Genauigkeit von $\pm 1 \mu\text{m}$ geprüft werden. Weitere Untersuchungen werden in Zusammenarbeit mit der Arbeitsgruppe Werkstoff- und Oberflächentechnik (AWOK) der RPTU Kaiserslautern durchgeführt. Die Untersuchungen werden ebenfalls auf einer Maschine des Herstellers *Netzsch* durchgeführt. Hierbei wird das Modell *DMA Gabo Eplexor 500* verwendet, welches dynamisch bis zu einer Prüfkraft von 500 N prüfen kann und im Folgenden durch Ga^A abgekürzt wird. Bei Ga^A können dynamischen Verformungen bis zu 3 mm mit einer Genauigkeit von $\pm 10 \text{ nm}$ untersucht werden. Beide Maschinen können über einen Frequenzbereich von 0,01 Hz bis 100 Hz prüfen. Für die Untersuchungen der Stahlproben werden die Prüfungen auf den Frequenzbereich beschränkt. Die Versuche werden bei Raumtemperatur durchgeführt. Zudem werden un-

terschiedliche Probendicken untersucht. Dadurch soll sichergestellt werden, dass anhand des Versuchsaufbaus die Werkstoffdämpfung bestimmt wird und es bei der Kennwertermittlung zu keinem Einfluss der Geometrie kommt. Die unterschiedlichen Proben der Untersuchungen sind in Tabelle 3.1 zusammengestellt. In Abbildung 3.2 sind die Ergebnisse der Untersuchung dargestellt.

Tabelle 3.1: Untersuchte Probengeometrien durch die DMA mit Zugbelastung. Angabe der Breite b , Dicke d und freien Länge l_f der Probe.

Probe	b in mm	d in mm	l_f in mm	Prüfmaschine
St2	9,97	0,20	50,14	Ga ^I
St3	9,97	0,30	50,00	Ga ^I
St05	8,20	0,05	31,16	Ga ^A

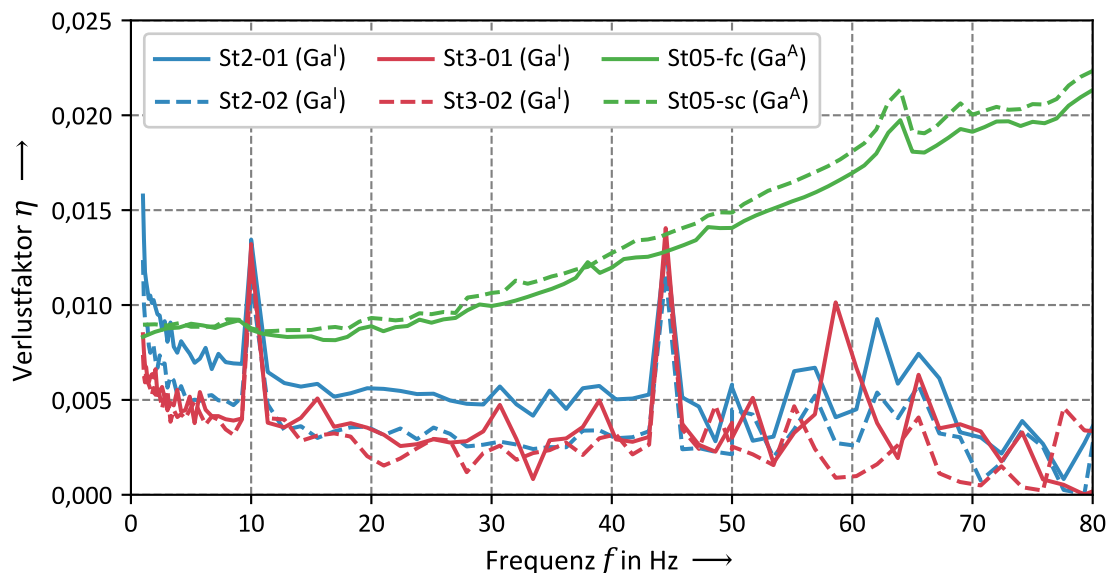


Abbildung 3.2: Darstellung des Verlustfaktors η über der Frequenz ermittelt durch DMA mit Zugbelastung. Untersuchung unterschiedlicher Stahlproben an zwei Prüfmaschinen. An Ga^I werden die Proben jeweils zweimal geprüft, beide Messungen sind dargestellt. Die Prüfungen an Ga^A werden sowohl kraft- (fc) als auch dehnungsgeregelt (sc) durchgeführt.

In Abbildung 3.2 ist der Verlauf des Verlustfaktors η über dem gemessenen Frequenzbereich von 1 Hz bis 80 Hz dargestellt. Untersuchungen von drei unterschiedlich dicken Probekörpern (Tabelle 3.1) sind in der Grafik zu erkennen. Zudem werden die Proben an zwei unterschiedlichen Prüfmaschinen geprüft. An Ga^I werden die Proben mit einer statischen Kraft von 40 N und einer dynamischen Kraft von 20 N untersucht. Durch die höhere Maximalkraft von Ga^A werden hierbei die Proben mit einer statischen Kraft von 100 N und einer dynamischen Kraft von 50 N belastet. Durch die Prüfung an unterschiedlichen Maschinen fallen deutliche Unterschiede im Ergebnis auf. Die Messungen an Ga^A werden sowohl kraft- (fc) als auch dehnungsgeregelt (sc) durchgeführt. Ein Einfluss der Regelung

von Ga^A auf das Versuchsergebnis ist nicht zu erkennen. Bis zu einer Prüffrequenz von 20 Hz zeigt η einen konstanten Verlauf. Anschließend kommt es bis zum Prüfungsende bei 80 Hz zu einer kontinuierlichen Zunahme von η mit der Prüffrequenz. Die Ergebnisse der Messungen an Ga^A stehen im Widerspruch zu den Ergebnissen der Maschine Ga^I . Der an Ga^A ermittelte η -Wert ist deutlich höher als der η -Wert ermittelt mit Ga^I . Bei Ga^I kommt es bis zu einer Frequenz von 20 Hz zu einer Abnahme von η . Anschließend wird bis zum Prüfungsende kein weiterer Einfluss der Frequenz festgestellt. Über den gesamten Messbereich ist der ermittelte η -Wert sehr unstetig. An Ga^I werden zwei unterschiedliche Dicken untersucht und die Messungen werden jeweils zweimal durchgeführt. Die Messung St02-01 auf der Maschine weicht deutlich von den anderen Messungen an der gleichen Maschine ab. Des Weiteren sind bei den Messungen zwei Peaks im Verlauf zu erkennen. Da diese unabhängig von der Probendicke auftreten werden hierbei Eigenfrequenzen des Messaufbaus vermutet. Zur weiteren Analyse der Ergebnisse werden die bei den Versuchen ermittelten Steifigkeiten untersucht. In Gleichung (2.3) ist die Herleitung des Verlustfaktors durch den Quotienten aus Verlust- und Speichermodul dargestellt. Bei der dynamischen Versuchsdurchführung ist der Speichermodul ein Maß der elastisch gespeicherten Energie und sollte im Bereich des statisch ermittelten Elastizitätsmoduls des geprüften Materials liegen [12]. Abbildung 3.3 fasst die gemessenen Speicher- und Verlustmoduln der unterschiedlichen Messungen an beiden Prüfmaschinen zusammen.

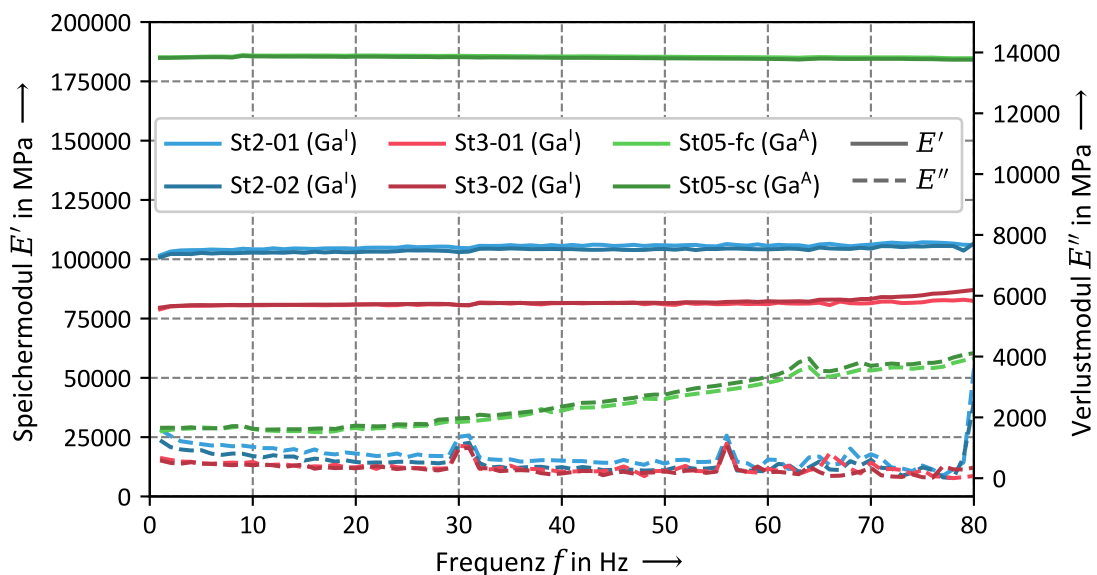


Abbildung 3.3: Darstellung des Speicher- und Verlustmodul über der Frequenz. Messungen der Proben St2 und St3 an Ga^I , sowie St05 an Ga^A .

Der im Datenblatt angegebene Elastizitätsmodul der geprüften Proben liegt bei 210 GPa [95]. In dieser Größenordnung sollte der Speichermodul liegen, der bei der dynamischen Prüfung der Proben ermittelt wird. Anhand von Abbildung 3.3 ist zu erkennen, dass die

Messungen an Ga^I sehr weit entfernt von dieser Erwartung liegen. Der dynamisch ermittelte Speichermodul liegt deutlich darunter. Des Weiteren ist ein Einfluss der Probendicke auf das Ergebnis zu erkennen. Mit abnehmender Probendicke steigt der experimentell ermittelte E' . Der mit Ga^A ermittelte E' liegt deutlich näher am Elastizitätsmodul des Datenblattes. Allgemein zeigt der E' gemessen an beiden Prüfmaschinen einen konstanten und gleichmäßigen Verlauf über den Frequenzbereich. Die in Abbildung 3.2 festgestellten Abhängigkeiten von der Prüffrequenz hängen mit dem ermittelten Verlustmodul E'' zusammen. Die Zunahme von η mit der Frequenz, gemessen an der St05 Probe an Ga^A , ist in Abbildung 3.3 am Verlauf des E'' zu erkennen. Ebenfalls sind die mit Ga^I gemessenen Peaks bei den Frequenzen 10 Hz und 44 Hz in Abbildung 3.3 zu sehen. Zum Vergleich der dynamisch ermittelten Kennwerte können an der Ga^I ebenfalls statische Versuche an den Proben St2 und St3 durchgeführt werden. Statisch können Prüfungen bis 150 N Zuglast durchgeführt werden. Dadurch werden bei den Versuchen maximale Dehnungen bis 0,05 % bei den St3 Proben und 0,07 % bei den St2 Proben erreicht. Der Kraftbereich reicht daher nicht aus, um den Dehnungsbereich nach [96] für die statische Steifigkeitsermittlung vollständig zu erreichen. Daher wird die Steifigkeit über einen kleineren Dehnungsbereich ermittelt und die Ergebnisse der unterschiedlichen Proben sind in Tabelle 3.2 zusammengefasst. Zudem wird der E' aller Prüfungen über den geprüften Frequenzbereich gemittelt und ist ebenfalls in der Tabelle dargestellt.

Tabelle 3.2: Zusammenfassung der statisch und dynamisch geprüften Steifigkeiten, die Standardabweichung ist in Klammern angegeben.

Probe	E in MPa	E' in MPa	Prüfmaschine
St2	130.633 (± 45.450)	105.567 (± 3.058)	Ga^I
St3	87.718 (± 23.231)	82.679 (± 4.088)	Ga^I
St05	-	184.988 (± 556)	Ga^A

Die Ergebnisse in Tabelle 3.2 verdeutlichen, dass mit Ga^I Steifigkeiten ermittelt werden, die erheblich unter dem statischen Elastizitätsmodul liegen. Durch die statisch bestimmten Kennwerte an Ga^I werden im Vergleich zu den dynamischen Versuchen etwas höhere Kennwerte ermittelt. Jedoch nimmt die Standardabweichung sehr stark zu. Es zeigt sich, dass durch Ga^I keine plausiblen Messergebnisse erzielt werden. Bei den Untersuchungen in Abbildung 3.2 werden dynamische Verformungen von maximal 5 μm bei den St02-Proben erreicht. Mit einer Messgenauigkeit von $\pm 1 \mu m$ sind die erreichten Verformungen daher zu gering, um die Dehnung der Proben ausreichend aufgelöst messen zu können. DMA-Maschinen sind für die Untersuchung der viskoelastischen Eigenschaften von Kunststoffen entwickelt [12] und somit auf Proben mit deutlich niedriger Steifigkeit und gleichzeitig höheren Verformungen ausgelegt. Bei der Untersuchung von FKV, deren Steifigkeit bereits deutlich niedriger ist, kann erneut versucht werden mit Ga^I zu messen. Für Stahlproben wird die Maschine aufgrund der zuvor dargestellten Aspekte als ungeeignet eingestuft. Im

Gegensatz dazu liegt E' ermittelt an Ga^{A} mit 185 GPa deutlich näher an der Erwartung für die Steifigkeit. Hierzu haben sowohl die sehr niedrige Probendicke als auch die Prüfmaschine geführt. Die Maschine Ga^{A} hat eine höhere Auflösung der Kraft- und Wegsensoren als Ga^{I} . In Abbildung 3.2 werden bei der St05-Probe dynamische Verformungen von 0,02 mm bei einer Auflösung von ± 10 nm erreicht. Die hierbei ermittelten Kennwerte für η werden in Kapitel 3.3 mit den Ergebnissen weiterer Versuchsaufbauten diskutiert.

3.1.2 DMA mittels 3-Punkt-Biegebelastung

Die in Kapitel 3.1.1 durchgeführten DMA unter Zugbelastung haben zu widersprüchlichen Ergebnissen geführt. Die Schwierigkeit liegt in der sehr hohen Steifigkeit der Proben, wodurch bei der vorhandenen Prüfkraft nur geringe Verformungen unter einer Zugbelastung erreicht werden können. Durch eine entsprechende Wahl der Probendicke können bei einer 3-Punkt-Biegebelastung trotz hoher Probensteifigkeit höhere Dehnungen erzielt werden. Daher werden in diesem Abschnitt DMA mittels einer 3-Punkt-Biegung (3PB) untersucht. Ein Großteil der bisher untersuchten Proben aus FKV wurde ebenfalls mittels einer ähnlichen Belastung untersucht und erleichtert somit die Einordnung der Ergebnisse. Jedoch hat die 3PB einen inhomogenen Spannungszustand zur Folge, welcher bei der Bewertung der Dämpfung berücksichtigt werden muss. Speziell bei FKV wird durch die Belastung eine höhere Dämpfung vermutet, da ein größerer Teil der Belastung über die Matrix getragen wird.

Analyse der 3-Punkt-Biegebelastung

Im Gegensatz zu einer Zugbelastung folgt aus einer 3-Punkt-Biegebelastung eine inhomogene Spannungsverteilung über den Querschnitt der Probe. Zusätzlich zu den Normalspannungen folgen aufgrund der Querkraft Schubspannungen im Querschnitt. In diesem Unterkapitel werden die resultierenden Spannungen aufgeschlüsselt und deren Einfluss auf die Versuchsdurchführung analysiert. Zudem wird der Einfluss der Probengeometrie auf die Spannungsverteilung betrachtet. In Abbildung 3.4 ist schematisch die 3PB dargestellt sowie die aus der Belastung folgenden Verläufe der Querkraft Q und Biegemomente M .

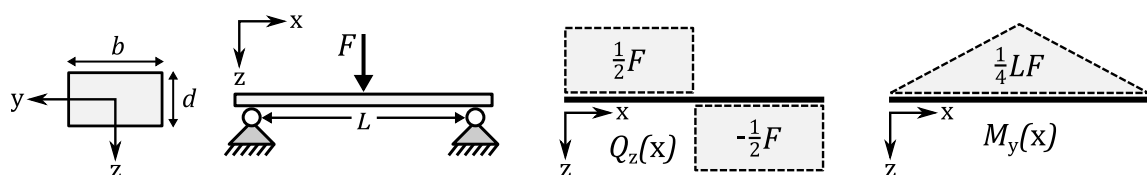


Abbildung 3.4: Schematische Darstellung des Querkraft- und Biegemomentenverlaufs aus einer 3-Punkt-Biegebelastung.

Im Rahmen dieser Arbeit werden Balkenproben mit einem rechteckigen Querschnitt un-

tersucht. Der Querschnitt ist durch die Breite b und Dicke d definiert. Somit wird das Flächenträgheitsmoment mit $I_y = \frac{bd^3}{12}$ bestimmt. Es werden die Annahmen von BERNOULLI zu schubstarren Balken (Theorie 1.Ordnung) zu Grunde gelegt. Somit können die Biegespannung und die Schubspannung aus einer 3PB mit den folgenden Gleichungen [97] berechnet werden

$$\tau_{xz}(x, z) = \frac{6Q_z(x)}{bd^3} \left(\left(\frac{d}{2} \right)^2 - z^2 \right) ; \quad \sigma_x(x, z) = \frac{12M_y(x)}{bd^3} z . \quad (3.1)$$

Wie aus Gleichung (3.1) ersichtlich ist, stehen sowohl die Schubspannung als auch die Normalspannung in Abhängigkeit von den Koordinaten x und z (Abbildung 3.4). Entlang der Probenachse (x -Achse) erreicht in der Mitte der beiden Auflager ($x = L/2$) das Biegemoment $M_y(x)$ sein Maximum. Die Biegespannung erreicht jeweils am Rand der Probe ($z = \pm d/2$) ihr Maximum bzw. Minimum. Hingegen ist die Querkraft entlang der Probenachse von ihrem Betrag konstant, wodurch entlang der Achse eine konstante Schubspannung folgt. Das Maximum der Schubspannung tritt unabhängig von der Probendicke in der Probenmitte bei $z = 0$ auf. Die Probenränder ($z = \pm d/2$) sind hingegen schubspannungsfrei. Daraus ergeben sich die Maximalspannungen

$$\tau_{\max} = \frac{3F}{4bd} ; \quad \sigma_{\max} = \frac{3LF}{2bd^2} . \quad (3.2)$$

Wie in Kapitel 3.1.2 und Tabelle 3.3 definiert, werden bei den Untersuchungen der DMA in 3PB die Proben dehnungsgeregelt geprüft. Dadurch kann eine bessere Vergleichbarkeit der unterschiedlichen Versuche sichergestellt werden. Speziell bei Proben aus FKV treten vergleichsweise häufig Abweichungen in der Probendicke auf. Aufgrund von teilweise unterschiedlichen Halbzeugen ist nicht immer die gewünschte Dicke exakt einstellbar. Daher wird der Einfluss unterschiedlicher Probendicken analysiert. In Gleichung (3.2) ist das Maximum der Biegespannung angegeben. Unter Anwendung des HOOKEschen Gesetzes folgt somit für die Randfaserdehnung in der Probenmitte

$$\varepsilon_{\max} = \frac{3LF}{2bd^2E} . \quad (3.3)$$

Werden Versuche am gleichen Material mit unterschiedlichen Dicken durchgeführt, folgt aus einer größeren Probendicke bei gleicher Randfaserdehnung eine höhere Prüfkraft. Auf die maximalen Biegespannungen hat dies keinen Einfluss, denn der Quotient $\frac{F}{d^2}$ bleibt konstant. Jedoch hat eine unterschiedliche Probendicke einen Einfluss auf die maximale Schubspannung in der Probe. Wird die Gleichung (3.3) nach der Kraft F umgestellt und in Gleichung (3.2) für die maximale Schubspannung eingesetzt, folgen aus einer zunehmenden

Dicke eine zunehmende Schubspannung und es gilt

$$\tau_{\max} = \frac{Ed}{2L} \cdot \varepsilon_{\max} \quad (3.4)$$

Neben der Analyse der Probenbeanspruchung wird in diesem Abschnitt die Berechnung der Eigenfrequenz beschrieben. Diese soll neben den Belastungen ebenfalls zur Auswahl der Probengeometrie herangezogen werden. Zusätzlich sollen bei erzwungenen Schwingungen Prüfungen im Bereich der Eigenfrequenz vermieden werden, da diese einen erheblichen Einfluss auf das Probenverhalten haben. In [27] wird für die analytische Berechnung der Eigenfrequenz folgende Gleichung hergeleitet

$$\omega_n = 2\pi f_n = (k_n L)^2 \sqrt{\frac{EI_y}{\mu L^4}} \quad (3.5)$$

äquivalente Herleitungen sind zudem in [1, 22, 30] zu finden. Bei einem Balken mit homogener Massenbelegung μ ergibt sich diese aus der jeweiligen Dichte und dem Querschnitt des Balkens ($\mu = \rho \cdot b \cdot d$). Zu beachten ist hierbei, dass die Breite des Balkens sowohl in der Massenbelegung als auch im Flächenträgheitsmoment linear vorkommt. Damit hebt sich b aus Gleichung (3.5) auf und hat daher keinen Einfluss auf die Eigenfrequenz. Bedingt durch die Randbedingungen des Balkens ergeben sich die dimensionslosen Konstanten ($k_n L$) aus den Nullstellen der Frequenzgleichung. Bei der vorliegenden 3-Punkt-Biegung ist die Probe auf beiden Seiten gestützt gelagert. Diese Randbedingungen führen zu folgender Frequenzgleichung

$$\sin(k_n L) = 0 \quad (3.6)$$

Die ersten drei Eigenfrequenzen können anhand der Nullstellen von Gleichung (3.6) bestimmt werden. Für die dimensionslosen Konstanten werden folgende Nullstellen [27] bestimmt

$$k_1 L = \sqrt{1}\pi ; k_2 L = \sqrt{4}\pi ; k_3 L = \sqrt{9}\pi \quad (3.7)$$

Versuchsaufbau und Durchführung

Durchgeführt werden die dynamischen 3PB Versuche an einer Maschine mit der Modellbezeichnung *DMA 850* von *TA Instruments*, im Folgenden durch TA abgekürzt. Diese hat eine maximale Kraft von 18 N, mit der sowohl statisch als auch dynamisch geprüft werden kann. Die Wegauflösung liegt bei $\pm 0,1$ nm. Durch die Biegebelastung folgt ein inhomogener Spannungszustand innerhalb der Probe, welcher in Kapitel 3.1.2 genauer betrachtet wurde. Der Versuchsaufbau ist in Abbildung 3.5 mit einer eingespannten FKV-Probe abgebildet. Hierbei ist zu erkennen, dass die Auflager des Versuchsaufbaus aus gelenkig

gelagerten Rollen bestehen. Durch diese Lagerung können Unebenheiten der Probekörper ausgeglichen und zusätzliche Verdrehungen entlang der Probenachse kompensiert werden. Allerdings kann bei diesem Aufbau die Probe in der Einspannung auch verrutschen. Wenn bei FKV-Proben eine Biege-Drill-Kopplung vorliegt, sollte dies beachtet werden. Zudem müssen die Proben eine Mindestbreite überschreiten, um die Möglichkeit des Verrutschens zu minimieren. Eine Breite größer als 7,5 mm hat sich in Vorversuchen als zielführend erwiesen. Bei Proben mit einer geringeren Breite kam es vermehrt zum Verrutschen innerhalb der Einspannung.

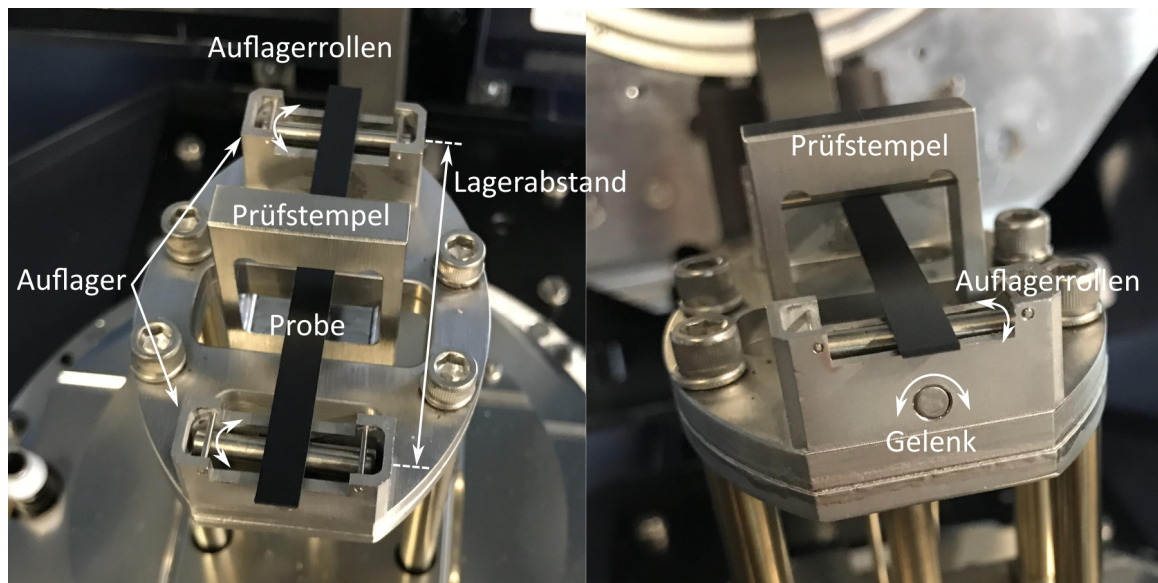


Abbildung 3.5: Einspannung für 3PB mit einem Lagerabstand von 50 mm auf der TA. Eingespannt ist eine FKV-Probe mit den Maßen $0,65 \times 5 \times 65 \text{ mm}^3$. Die Auflagerrollen sind gelenkig gelagert.

Für die dynamische Prüfung der Proben müssen mehrere Prüfparameter definiert werden, anhand derer die Prüfung durchgeführt werden kann. Damit im Fall der 3PB stets Kontakt zwischen Probe und Prüfstempel besteht, muss zunächst die Kontaktkraft festgelegt werden, mit welcher die Probe durchgehend belastet wird. Die Lasten während der sinusförmigen Belastung der Probe werden durch die statische und dynamische Last beschrieben. Für die Belastung gibt es unterschiedliche mögliche Definitionen. Sie kann als Kraft, absolute Verschiebung, Spannung oder Dehnung aufgebracht werden. Im Rahmen der Arbeit werden die Versuche dehnungsgeregelt durchgeführt, um eine gute Vergleichbarkeit der unterschiedlichen Materialien, die geprüft werden, zu gewährleisten. Dabei wird festgelegt, die Versuche nur im linear elastischen Bereich der Proben zu prüfen. Bei der Definition der statischen und dynamischen Lasten werden in dieser Arbeit bestimmte Konfigurationen festgelegt und bei allen Frequenzuntersuchungen gleich gehalten. Zusammengefasst und veranschaulicht sind diese in Tabelle 3.3 sowie in Abbildung 3.6.

Tabelle 3.3: Zusammenfassung der untersuchten Belastungen für die DMA mit 3PB. Darstellung der statischen ε_s und dynamischen Dehnung ε_d sowie der daraus resultierenden minimalen $\varepsilon_{\min}$ und maximalen $\varepsilon_{\max}$ Dehnung.

	ε_s	ε_d	$\varepsilon_{\min}$	$\varepsilon_{\max}$
L1	0,050 %	0,025 %	0,025 %	0,075 %
L2	0,100 %	0,025 %	0,075 %	0,125 %
L3	0,075 %	0,050 %	0,025 %	0,125 %

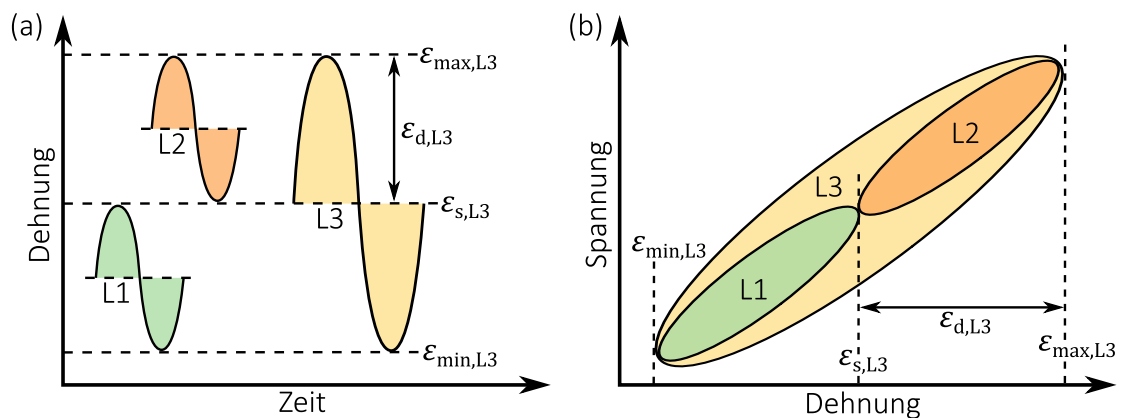


Abbildung 3.6: Schematische Darstellung der unterschiedlichen Belastungen bei den DMA-Versuchen unter der Annahme linearer Viskoelastizität: (a) Dehnungs-Zeit Verlauf, (b) Spannungs-Dehnungs Verlauf.

Darstellung der Versuchsergebnisse

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse der dynamischen Versuche an unterschiedlichen Stahlproben diskutiert. Untersucht werden Proben zurechtgeschnitten aus Fühlerlehrenband [98]. Diese haben jeweils eine Breite von 12,7 mm und eine Länge von 60 mm. Die Proben unterscheiden sich in der Dicke, es werden 0,4 mm (St4) und 0,8 mm (St8) dicke Proben in diesem Abschnitt untersucht. Neben der unterschiedlichen Geometrie werden die zwei Belastungen L1 und L3, definiert in Tabelle 3.3, bei den Untersuchungen berücksichtigt. Es wird der Frequenzbereich von 1 Hz bis 40 Hz in 0,5 Hz Schritten untersucht. Die Ergebnisse der dynamischen Untersuchungen sind in Abbildung 3.7 dargestellt.

Aufgetragen ist in Abbildung 3.7 der Verlustfaktor η über der Messfrequenz. Die Untersuchungen werden für beide Probendicken, mit jeweils vier Proben durchgeführt, und deren Mittelwert sowie Standardabweichung bestimmt. In der Grafik ist jeweils die Mediankurve der Messung aufgetragen und die Standardabweichung ist schattiert als Bereich hinterlegt. Bei den Messungen ist die Standardabweichung sehr gering, sodass der Bereich in Abbildung 3.7 kaum sichtbar ist. An der Darstellung wird deutlich, dass die unterschiedlichen Probendicken einen Einfluss auf η haben. Eine höhere Probendicke führt bei der Messung ebenfalls zu einem höheren η -Wert über den gesamten Messverlauf. Dies widerspricht

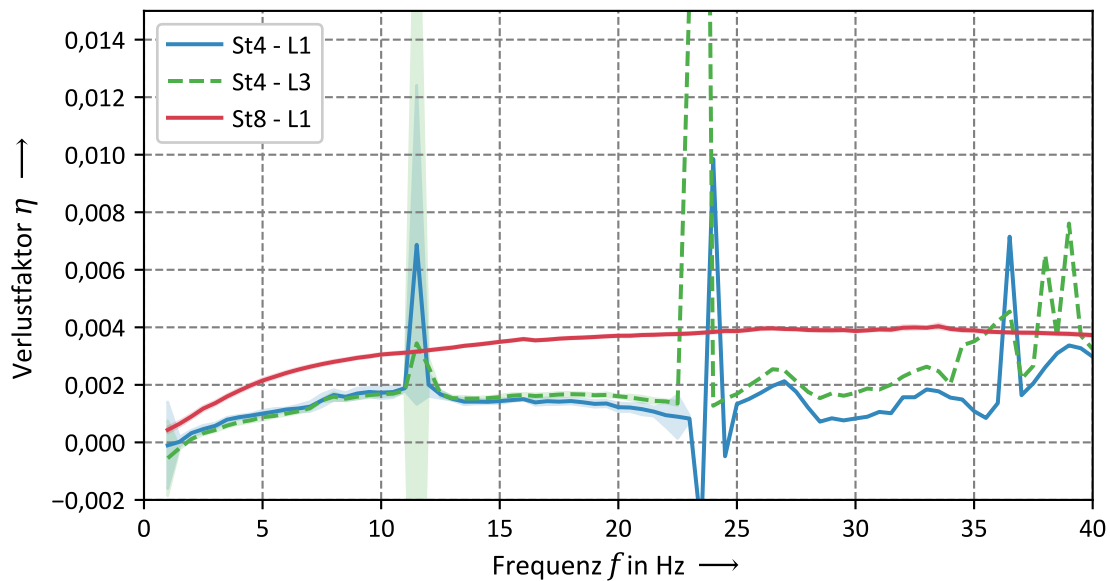


Abbildung 3.7: 3PB-DMA der Proben St4 und St8 mit den Belastungen L1 und L3. Darstellung des Verlustfaktors η über der Frequenz.

zunächst der Erwartung, dass die Geometrie keinen Einfluss auf das Ergebnis hat. Eine Einordnung der unterschiedlichen η -Werte ist in Kapitel 3.3.3 dargestellt.

Unabhängig von der Probendicke kommt es im niedrigen Frequenzbereich zu einem Anstieg von η , anschließend folgt ein konstanter Verlauf. Dabei kommt es bei den St4-Proben bis zu einer Frequenz von 10 Hz und bei den St8-Proben bis zu 20 Hz zu einer Zunahme von η . Zudem ist der erste gemessene Wert für die St4-Proben negativ, was physikalisch nicht möglich ist. Nach wenigen Messstellen sind die Werte nicht mehr negativ. Werden die Annahmen der Rayleigh-Dämpfung zu Grunde gelegt, widerspricht dieser Verlauf den Erwartungen. Diese geht von einer Abnahme der Dämpfung bei geringen Frequenzen und einer kontinuierlichen Zunahme der Dämpfung bei höheren Frequenzen aus [28]. Des Weiteren ist zu beachten, dass η absolut sehr niedrig ist, und die Messung somit im Grenzbereich der Maschine erfolgt. Der Messverlauf im niedrigen Frequenzbereich kann wie folgt erklärt werden. Werden die Messkurven gedanklich bis zu $f = 0$ Hz extrapoliert, laufen diese im Ursprung des Koordinatensystems zusammen. Der Grenzwert einer dynamischen Prüfung bei $f = 0$ Hz ist der statische Versuch. Durch einen statischen Versuch ist es wiederum nicht möglich die Dämpfung zu bestimmen, da diese eine dynamische Messgröße ist. Somit ist eine Abnahme von η mit kleiner werdender Frequenz durch diese Grenzwertbetrachtung folgerichtig. Dieser Zusammenhang wird folgend als Nullpunkthypothese bezeichnet.

An den Proben St4 ist zu erkennen, dass die unterschiedlichen Belastungen keinen Ein-

fluss auf η haben. L1 und L3 konnten nur bei St4 untersucht werden, für die Belastung L3 bei der Probe St8 ist die Maximalkraft der Prüfmaschine zu niedrig. Bei den St4 Proben sind bei der Frequenz 13 Hz und 23 Hz zwei unterschiedliche Peaks zu sehen, bei denen Eigenfrequenzen des Versuchsaufbaus vermutet werden. Nach Gleichung (3.5) und (3.7), der Probengeometrie sowie der Annahme einer Steifigkeit von 210 GPa, liegt die erste Eigenfrequenz der Proben mit 376 Hz deutlich außerhalb der Messung. Es ist zu beachten, dass für die Berechnung der Eigenfrequenz die Auflager der Probe als ideal steif angenommen werden. Bei dem tatsächlichen Versuchsaufbau, dargestellt in Abbildung 3.5, liegen die Proben auf Rollen auf. Diese können sich einerseits entlang der Probenachse drehen, zusätzlich sind diese gelenkig gelagert und haben somit mehr Freiheitsgrade als in der Auslegung angenommen. Nach dem Peak bei 13 Hz verläuft die Messung weiterhin sehr glatt und der Einfluss auf die gesamte Messung ist gering. Hingegen ist der Verlauf der Messungen nach dem zweiten Peak bei 23 Hz sehr unstet. Bei dem Peak werden drei der vier durchgeführten Messungen von der Prüfmaschine abgebrochen, da die vorgegebenen Toleranzen für die Dehnungsregelung nicht mehr eingehalten werden können. Sowohl die Peaks bei den St4-Proben als auch die Unterschiede in η beider Probendicken müssen weitergehend untersucht werden. Zur genaueren Analyse dieser Unterschiede werden weitere Versuchsparameter betrachtet. Hierzu sind in Abbildung 3.8 die Ergebnisse des Speicher- und Verlustmoduls dargestellt, die Standardabweichung ist als Bereich hinterlegt.

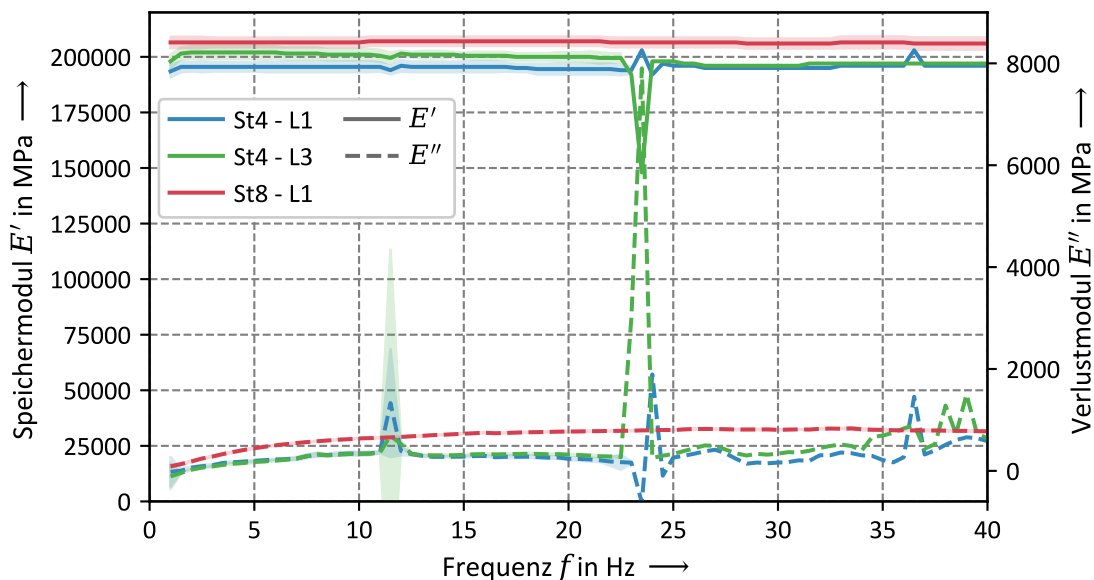


Abbildung 3.8: Darstellung des Speicher- und Verlustmoduls über der Frequenz. Untersuchung von unterschiedlichen Probendicken bei verschiedenen Belastungen.

In Gleichung (2.3) ist der Zusammenhang beider Moduln dargelegt. Die dynamischen Untersuchungen ergeben Unterschiede im Speichermodul der jeweiligen Proben. Zudem ist bei den St4-Proben ein Einfluss der Belastung zu erkennen. Ein Einfluss der Frequenz ist für

beide Probendicken nicht zu erkennen, abgesehen von dem Peak der St4-Proben bei 23 Hz. Zur besseren Beurteilung der Ergebnisse wird der Speichermodul über den Frequenzbereich gemittelt und ist in Tabelle 3.4 zusammengefasst. Dabei erfolgt die Mittelung der St4-Proben bis zu dem Peak bei 23 Hz. Zusätzlich zu den dynamischen Untersuchungen werden im Vorfeld die Proben auf der DMA-Maschine statisch geprüft. Hierbei wird in Anlehnung an [99] die Steifigkeit der Proben in der 3PB bestimmt. Hierbei ist zu beachten, dass auf Grund der maximalen Prüfkraft von 18 N die St8 Proben nur bis 0,09 % gedehnt werden können und somit die Steifigkeit nur bis zu diesem Bereich bestimmt werden kann. Die Ergebnisse der statischen Untersuchungen sind in Tabelle 3.4 dargestellt.

Tabelle 3.4: Zusammenfassung des statisch ermittelten Elastizitätsmoduls sowie des dynamisch ermittelten Speichermoduls der St4- und St8-Proben.

Probe	E in MPa	E' in MPa	Belastung
St4	205.158 (± 2.401)	195.200 (± 2.277)	L1
		200.256 (± 2.252)	L3
St8	204.690 (± 2.090)	206.971 (± 2.200)	L1

Bei der statisch ermittelten Steifigkeit kommt es zu einer sehr guten Übereinstimmung der Ergebnisse. Die Differenzen der unterschiedlichen Probendicken liegen im Bereich der Standardabweichung. Im Gegensatz dazu zeigt der dynamisch ermittelte Speichermodul größere Abweichungen zwischen den Proben. Eine höhere Probendicke führt zu einem höheren E' -Wert über den Messbereich. Dabei kommt es bei den St8-Proben zu einer guten Übereinstimmung zwischen statisch und dynamisch ermittelten Steifigkeiten. E' der St4-Proben zeigt einen Einfluss der dynamischen Belastung auf das Messergebnis. Durch die höhere Belastung bei L3 steigt ebenfalls der ermittelte Speichermodul. Somit liegen beide Werte weiter von der statisch ermittelten Steifigkeit entfernt, als es bei den dickeren St8 Proben der Fall ist. Wie auch bei η ist beim Verlustmodul (E'') ein Abweichen im Ergebnis durch die unterschiedlichen Probendicken deutlich zu erkennen. Zudem wird ebenfalls ein leichter Anstieg des E'' bis 15 Hz gemessen. Die Peaks der St4 Proben sind in Abbildung 3.8 klar zu erkennen. Der erste Peak bei 13 Hz ist bei E'' deutlich ausgeprägt und gut zu erkennen, im E' ist hingegen nur ein kleiner Knick zu sehen. Im Gegensatz dazu ist der zweite Peak bei 23 Hz bei beiden Steifigkeiten eindeutig vorhanden. Speziell der Peak im E' bei 23 Hz ist ein Hinweis darauf, dass es sich hierbei um eine Eigenfrequenz des Versuchsaufbaus handeln kann. Auch die Betrachtung der Steifigkeiten liefert keine abschließende Erklärung der Versuchsergebnisse. Jedoch kann festgehalten werden, dass die Ergebnisse der St8 Proben deutlich näher an den Ergebnissen der statischen Versuche liegen. Eine zunehmende Steifigkeit bedingt durch eine zunehmende Belastung für Proben aus Stahl wird als unrealistisch eingeschätzt. Zudem werden die dynamischen Versuche weit im linear elastischen Bereich, mit einer maximalen Dehnung von 0,125 %, durchge-

führt. Im zweiten Peak bei den St4 Proben wird eine Eigenfrequenz des Versuchsaufbaus vermutet. Die Unterschiede in η treten bei beiden Steifigkeiten auf. Die Ursache dafür muss weiterhin untersucht werden. Dazu werden im folgenden Schritt die dynamischen Dehnungen, die Prüfkraft sowie die geregelte Prüfkraft untersucht (Abbildung 3.9).

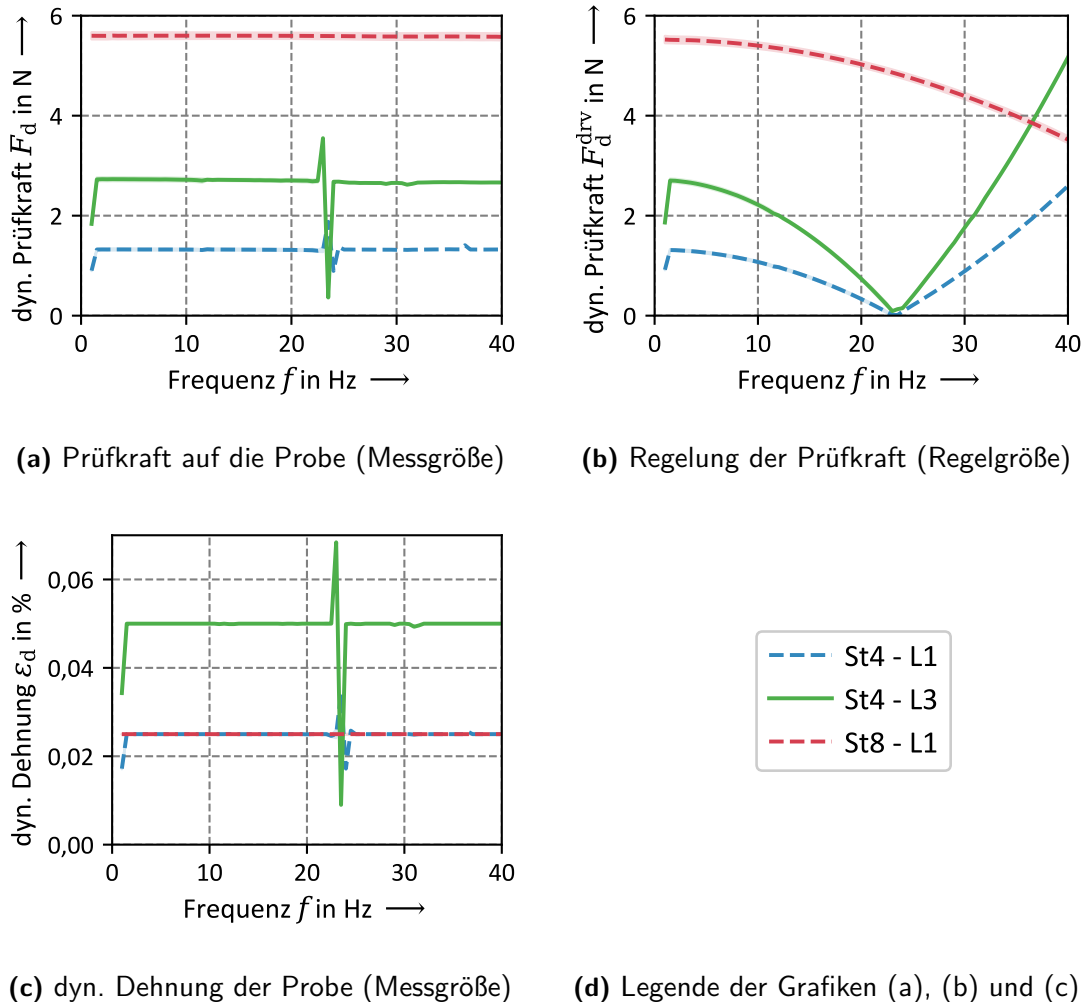


Abbildung 3.9: Mess- und Regelgrößen der Versuchsdurchführung. Alle Messgrößen zeigen bei den Proben mit einer Dicke von 0,4 mm einen Peak.

In Abbildung 3.9 ist der zweite Peak von η der St4 Proben bei 23 Hz direkt in allen drei Grafiken deutlich zu erkennen. Der erste η -Peak bei 13 Hz ist in keiner Grafik ersichtlich. Bei der dynamischen Prüfkraft werden von der Maschine zwei unterschiedliche Kräfte erfasst. Die in Abbildung 3.9 (a) über die Prüffrequenz abgebildete F_d ist die dynamische Prüfkraft auf die jeweilige Probe und ist eine gemessene Größe des Versuchs. Hingegen ist F_d^{drv} aus Abbildung 3.9 (b) die für den Versuch notwendige Regelkraft der Maschine. Für die St4-Proben geht die Regelung F_d^{drv} von 1 Hz bis 23 Hz stetig bis auf 0 N herunter. Im Umkehrschluss bedeutet dies, dass bei 23 Hz keine Prüfkraft nachgeregelt werden muss, um die Schwingung der Probe St4 aufrecht zu erhalten. Somit schwingt der gesamte Versuchsaufbau bei 23 Hz in Eigenfrequenz. Dies belegt die Vermutung von

zuvor, dass die analytisch berechnete Eigenfrequenz der Probe von 376 Hz nicht mit dem realen Versuchsaufbau übereinstimmt. Die zusätzlichen Rollen, Gelenke und die magnetische Führung des Prüfstempels des Versuchsaufbaus senken die erste Eigenfrequenz mit 23 Hz deutlich herab. Eine mit zunehmender Frequenz sinkende F_d^{drv} ist ebenfalls bei den St8 Proben gut zu erkennen. Da bei einer Messung bis 40 Hz die F_d^{drv} nicht auf null sinkt, muss die erste Eigenfrequenz oberhalb von 40 Hz liegen. Bei den St4 Proben steigt F_d^{drv} oberhalb von 23 Hz wieder deutlich an. Zu Beginn der Messung sind für die Dehnung 3 N notwendig. Bis 40 Hz steigt dieser Wert auf über 5 N an und übersteigt damit die F_d^{drv} für die doppelt so dicken St8 Proben. Somit kommt es oberhalb dieser Frequenz zu einer dynamischen Versteifung des Versuchsaufbaus. Messungen oberhalb der Eigenfrequenz sind wegen dieser Versteifung daher mit Vorsicht zu betrachten. Spätestens wenn F_d^{drv} die anfängliche Prüfkraft übersteigt, sollten die Ergebnisse kritisch hinterfragt werden. Bei den Prüfungen der St4 Proben bricht die Prüfmaschine drei der vier Messungen bei der Eigenfrequenz ab. Die Messung, welche bis 40 Hz durchgelaufen ist, zeigt oberhalb von 23 Hz einen sehr unsteten Verlauf von η . Für die Auswertung wird sich daher auf den Bereich unterhalb der Eigenfrequenz konzentriert. Durch die Darstellung der Messgrößen in Abbildung 3.9 kann der zweite η -Peak bei 23 Hz der St4 Proben erklärt werden. Aufschluss darüber, was beim ersten η -Peak passiert, enthalten auch diese Messgrößen nicht. Da der erste Peak bei etwa der halben ersten Eigenfrequenz des Prüfaufbaus auftritt, wird hierbei ein Unterton der ersten Eigenfrequenz vermutet. Darüber hinaus lassen sich keine Rückschlüsse auf Basis der Grafiken hinsichtlich der verschiedenen η -Werte in Verbindung mit den unterschiedlichen Probengeometrien ziehen.

3.2 Dämpfungsermittlung durch freie Ausschwingversuche

Eine weitere Möglichkeit das Dämpfungsverhalten zu bestimmen sind freie Ausschwingversuche. Bei diesem Versuch werden Proben an einem Ende fest eingespannt oder an ihren Schwingungsknoten aufgehängt (z.B. über eine Fadenaufhängung). Die Proben werden initial angeregt. Anschließend wird das Ausschwingverhalten aufgezeichnet und ausgewertet. Der Versuchsaufbau ist durch verschiedene Normen und Richtlinien [22, 23, 100] dokumentiert und die Basis zahlreicher Dämpfungsuntersuchungen in der Literatur. Abbildung 3.10 zeigt schematisch den Kurvenverlauf eines Ausschwingversuchs.

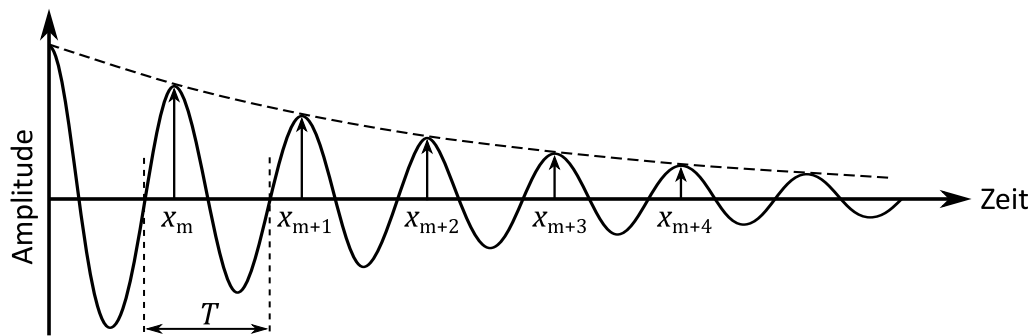


Abbildung 3.10: Schematische Darstellung des Ausschwingverhaltens mit einer kontinuierlichen Abnahme der maximalen Schwingungsamplitude x_m über der Zeit.

Anhand der Ausschwingkurve (Abbildung 3.10) kann Dämpfungsverhalten des Versuchs bestimmt werden. Hierzu wird das Abklingverhalten durch das logarithmische Dekrement analysiert, welches wie folgt berechnet wird

$$\Lambda = \ln\left(\frac{x_m}{x_n}\right) = \frac{1}{n} \ln\left(\frac{x_m}{x_{(m+n)}}\right) . \quad (3.8)$$

Aus dem logarithmischen Dekrement kann das Dämpfungsmaß berechnet werden. Es hängt zudem mit dem Verlustfaktor über (2.6) zusammen

$$\vartheta = \frac{\Lambda}{\sqrt{4\pi^2 + \Lambda^2}} . \quad (3.9)$$

Im Rahmen der Masterarbeit von Herrn Dickheuer [101] wird ein Versuchsstand für die Durchführung von freien Ausschwingversuchen konzipiert und gefertigt. Hierbei wird ein Probenende fest eingespannt und das freie Ende durch eine initiale Verschiebung angeregt. Der Versuchsaufbau, die Versuchsdurchführung und eine Validierung der Ergebnisse werden in den folgenden Kapiteln dargestellt.

3.2.1 Analyse des einseitig eingespannten Biegebalkens

In diesem Abschnitt wird die Analytik zu einem einseitig eingespannten Biegebalken dargestellt. Durch die einseitige Einspannung und die Belastung des freien Endes folgen die in Abbildung 3.11 dargestellten Verläufe der Querkraft und des Biegemoments.

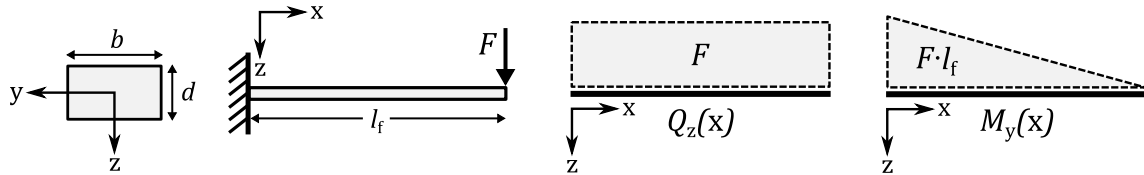


Abbildung 3.11: Einseitig eingespannter Biegebalken mit der freien Balkenlänge l_f . Verlauf der Querkraft und des Biegemoments folgend aus der Belastung F am freien Ende der Probe.

Biegespannung und Schubspannung werden über die Gleichung (3.1) berechnet. Die Querkraft ist über die gesamte Balkenlänge konstant und resultiert somit in einer konstanten Schubspannung entlang des Balkens. Das Maximum der Schubspannung liegt in der Mitte des Querschnitts bei $z = 0$. Das Maximum der Biegespannung ergibt sich bei $x = 0$ direkt an der Einspannung des Balkens. Beide Maximalspannungen werden über die Gleichung (3.2) berechnet.

Speziell für die Auslegung der freien Ausschwingversuche spielen die Eigenfrequenzen des Biegebalkens eine entscheidende Rolle, da diese die Frequenzen sind, in denen der Balken ausschwingt. Zur Berechnung der Eigenfrequenz gilt Gleichung (3.5). Der einseitig fest eingespannte Biegebalken mit einem freien Ende hat nach [27] folgende Frequenzgleichung

$$1 + \cos(k_n l_f) \cosh(k_n l_f) = 0 \quad . \quad (3.10)$$

Somit können mit den Nullstellen aus Gleichung (3.10) die ersten drei Eigenfrequenzen des einseitig eingespannten Biegebalkens berechnet werden

$$k_1 l_f = \sqrt{0,357\pi} ; k_2 l_f = \sqrt{2,233\pi} ; k_3 l_f = \sqrt{6,251\pi} \quad . \quad (3.11)$$

Ziel der Ausschwingversuche ist es, dass der Balken in seiner ersten Eigenfrequenz ausschwingt. Dennoch kann es bei der Versuchsdurchführung zu Überlagerungen von mehreren Eigenschwingungen kommen. Somit ist neben der Höhe der ersten Eigenfrequenz auch der jeweilige Abstand zu der zweiten Eigenfrequenz für die Auslegung zu beachten. Dieser nimmt mit zunehmender freien Probenlänge ab. Die ersten drei Eigenformen sind in Abbildung 3.12 dargestellt.

Anhand des Ausschwingverhaltens können über eine FFT die bei der Versuchsdurchfüh-

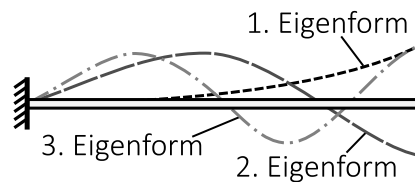


Abbildung 3.12: Schematische Darstellung der ersten drei Biegeeigenformen von einseitig eingespannten Balken.

rung auftretenden Frequenzen bestimmt werden. Die Ergebnisse können in Kombination mit der gemessenen Probengeometrie und Masse durch die Gleichung (3.5) zur experimentellen Berechnung der Probensteifigkeit genutzt werden. Die Steifigkeit kann wiederum als Plausibilitätsprüfung für die Versuchsdurchführung herangezogen werden.

3.2.2 Aufbau und Versuchsdurchführung

In Abbildung 3.13 ist der Versuchsaufbau für die Ausschwingversuche dargestellt. Der Versuchsstand wird vertikal an einem Spannfeld für Crashversuche montiert. Der Betonklotz, an dem das Spannfeld befestigt ist, hat eine Masse von 12 Tonnen. Die vertikale Probenaufhängung hat den Vorteil, dass die Erdbeschleunigung entlang der Probenachse wirkt und daher keinen Einfluss auf die Durchbiegung der Proben hat. Zur Versuchsaufzeichnung werden ein Laser-Doppler-Vibrometer (OFV 525) und ein Controller (OFV 5000) von der Firma *Polytec* verwendet. Das Vibrometer wird auf die maximale Geschwindigkeit von 1000 mm/s eingestellt, diese hat sich aus Vorversuchen als maximal notwendige ergeben. Des Weiteren wird der *Low Pass Filter* des Controllers auf 20 kHz eingestellt. Somit werden alle Frequenzen oberhalb von 20 kHz herausgefiltert, da diese keine technische Relevanz für die Versuchsdurchführung haben. Die Spannungssignale des *Polytec* Controllers werden mittels eines Messlabors von *Meilhaus* und der Software *DAQami* mit einer Aufnahmefrequenz von 25 kHz (25000 Samples pro Sekunde) aufgezeichnet.

Der Versuchsaufbau wird anhand der festen Position des Laser-Doppler-Vibrometers (LDV) ausgerichtet. Zuvor wird das LDV fest in der Schlittenführung des Crashprüfstandes fixiert und senkrecht auf das Spannfeld des Prüfstandes ausgerichtet (Abbildung 3.13 (a)). Im Rahmen der Vorversuche werden unterschiedliche Messpositionen auf der Probe untersucht, ebenso wie unterschiedliche Probelängen. Hierzu wird die Messposition mit einem Reflektormarker auf der Probe markiert. Anschließend wird die Probe in der Einspannung rechtwinklig zur Messachse des LDV fixiert. Nachfolgend wird die Einspannung von dem Spannfeld gelöst und so positioniert, dass das LDV an der gewünschten Stelle misst und die Einspannung mittels einer Wasserwaage horizontal ausgerichtet ist. Nach korrekter Versuchsausrichtung werden alle Bauteile festgezogen. Die Auslöseeinheit wird anhand

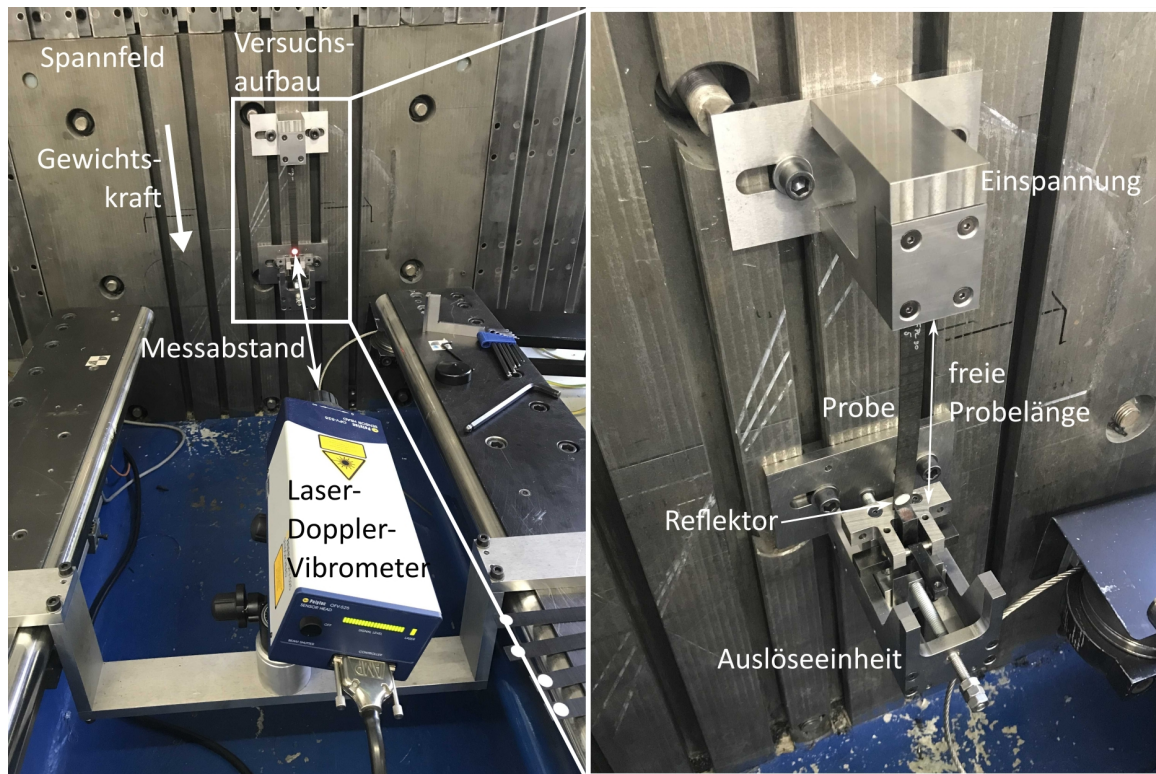


Abbildung 3.13: Gesamter Versuchsaufbau für die Ausschwingversuche, Vergrößerung einer eingespannten FKV Probe.

der eingespannten Proben positioniert und ebenfalls horizontal ausgerichtet. Für jede neu eingespannte Probe wird das LDV erneut auf den Messbereich fokussiert. Die maximale Auslenkung der Proben wird im Rahmen von Vorversuchen ermittelt. Hierbei wird die maximale Probengeschwindigkeit so gewählt, dass die ersten Schwingdurchläufe nach Beginn des Versuchs bei etwa 1000 mm/s liegen. Somit kann der Messbereich des LDV vollständig ausgenutzt werden und die zeitliche Dauer des Versuchs maximiert werden.

Sind Einspannung und Auslöseeinheit ausgerichtet und fixiert, wird bei der Versuchsdurchführung wie folgt vorgegangen. Zunächst wird die Probe eingespannt, hierbei wird sie mit Hilfe eines rechten Winkels in der Einspannung ausgerichtet. Die seitliche Ausrichtung erfolgt auf Basis des Laserstrahls. Anschließend wird das LDV erneut auf den Messbereich fokussiert. Zur Versuchsdurchführung wird die Probe ausgelenkt und mit der Auslöseeinheit in der ausgelenkten Position fixiert. Mit der Software *DAQami* wird ein neues Messprojekt angelegt. Die Messung der Software wird gestartet, gleichzeitig wird die Auslöseeinheit betätigt und die Probe beginnt zu schwingen. Nach vollständigem Abklingen der Schwingungen wird die Messaufzeichnung beendet. Pro Probe wird der Ausschwingversuch fünfmal wiederholt. Für die Versuchsserien mit Stahlproben werden vier Proben geprüft - bei der Versuchsreihe mit FKV Proben werden in Summe fünf Proben verwendet.

3.2.3 Entwicklung einer Auswertemethodik für freie Ausschwingversuche

Für die Auswertung der Ausschwingversuche wird eine einheitliche Vorgehensweise entwickelt, anhand derer alle Versuchsreihen ausgewertet werden. Hierzu werden unterschiedliche Versuchsreihen mit Stahlproben durchgeführt, eine genauere Beschreibung der Versuche folgt in Kapitel 3.2.4. Durch die unterschiedlichen Versuchsreihen wird es möglich, Einflüsse der Probengeometrie und Messtechnik auf die Versuchsauswertung zu identifizieren. Ziel der Auswertemethode ist es diese Einflüsse zu eliminieren, ohne dabei die Ergebnisse zu beeinflussen und durch die Versuchsdurchführung auf die Werkstoffdämpfung zu schließen. Im Folgenden werden eine Auswertung für eine spezielle Stahlprobe schrittweise dargestellt, die Versuchseinflüsse diskutiert und eine Auswertemethode definiert. Für die Darstellungen in diesem Kapitel werden die Ergebnisse der Versuchsreihe S1 (Tabelle 3.6) verwendet. Die Probe hat eine freie Länge von 115,7 mm, eine Breite von 12,7 mm und ist 0,4 mm dick. Die analytisch bestimmte Eigenfrequenz liegt bei 25,0 Hz.

Im ersten Schritt der Auswertung werden Rohdaten einer Messreihe in eine Auswerterroutine in der Programmiersprache Python geladen. Für die Messreihen an Stahlproben werden jeweils vier Proben verwendet und der Versuch wird mit jeder Probe fünfmal durchgeführt. Die Versuchsaufzeichnung beginnt unmittelbar vor dem manuellen Start des Versuchs. Für die weitere Auswertung der Versuche werden die Aufzeichnungen vor dem ersten Schwingvorgang gelöscht. In Abbildung 3.14 sind die auf den Auswertebereich zu rechtgeschnittenen Auswertedaten dargestellt. Über den gesamten Messverlauf zeigt die Kurve ein deutliches und stetiges Ausschwingverhalten. In den Detaildarstellungen der Versuche können einige Herausforderungen in der Aufzeichnung identifiziert werden, die bei der Auswertung zu berücksichtigen sind. Im Folgenden werden diese Herausforderungen im Einzelnen diskutiert.

Die erste Vergrößerung (Abbildung 3.14 (a)) zeigt einen Ausschnitt zu Beginn der Auswertung. Es ist anzumerken, dass neben den Messaufzeichnungen vor dem Auslösen der Schwingvorgänge auch der Einschwingvorgang der Probe bereits von der Auswertung abgeschnitten ist. Die Vergrößerung zeigt somit einige Schwingungsspeaks bei der Zeit 1 s der Auswertung. Wie in Abbildung 3.14 (a) zu erkennen ist, kommt es in diesem Bereich zu keiner stetigen Abnahme der maximalen Schwingungsspeaks. Dies stellt für die Auswertung des logarithmischen Dekrements benachbarter Peaks ein Problem dar. Dies kann u.a. folgende Ursachen haben:

1. Bei der Schwingung der Probe kommt es zu einer Überlagerung (Modulation) von der ersten und einer höheren Eigenfrequenz.

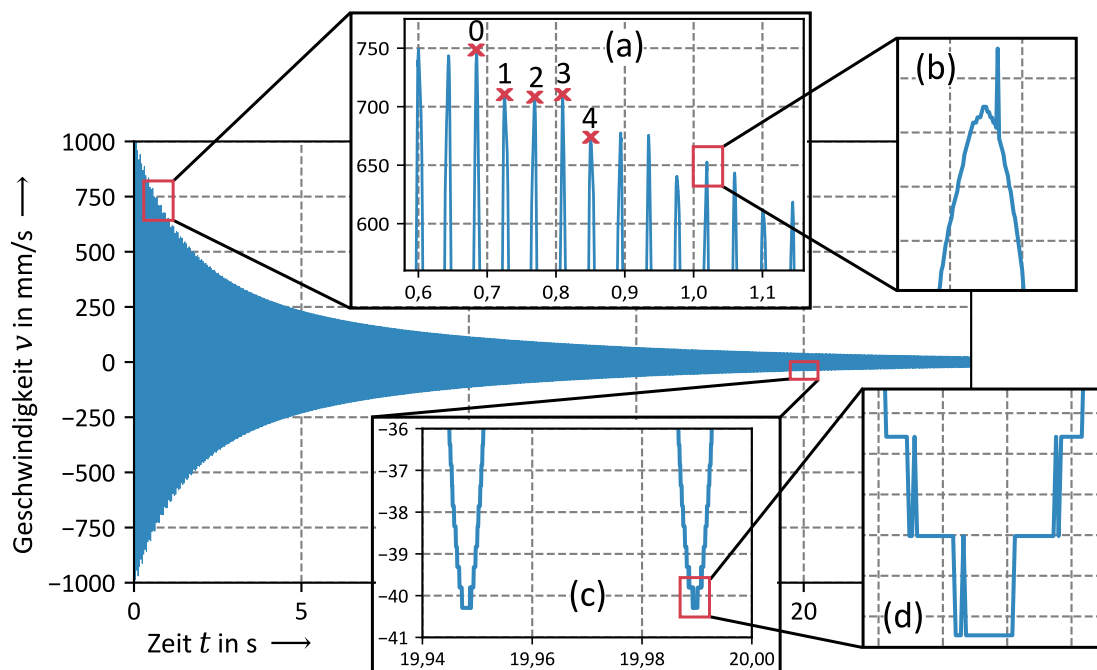


Abbildung 3.14: Geschwindigkeitsaufzeichnung einer ausschwingenden Probe über der Zeit. Die Vergrößerungen zeigen Artefakte der Messaufzeichnung, die in der Auswertung der Versuche beachtet werden müssen.

2. Der Einschwingvorgang der Probe ist noch nicht abgeschlossen.
3. Die Probe schwingt im nicht linearen Bereich.

Anhand einer FFT kann überprüft werden, ob es zu einer Modulation mehrere Eigenformen kommt (Punkt 1). Bei einer FFT wird das Messsignal vom Zeitbereich in den Frequenzbereich transformiert. Anhand dieser Transformation können die Schwingfrequenzen des Messsignals ermittelt werden. Im Idealfall ist in der FFT ein Peak bei der ersten Eigenfrequenz des Versuchs zu erkennen. Dies ist das Ziel des Versuchs, das Ausschwingverhalten der Probe in der ersten Eigenfrequenz aufzuzeichnen und auszuwerten. Sind in der FFT weitere Peaks zu erkennen, müssen diese in Relation zu den Eigenschaften der ersten Eigenfrequenz gesetzt werden. Hierbei ist die Höhe des zweiten Peaks sowie der Abstand beider Eigenfrequenzen entscheidend. Ob es zu einer signifikanten Überlagerung beider Frequenzen kommt, wird im jeweiligen Versuch analysiert. Eine solche Analyse wird entsprechend in die Auswertung integriert. Zur Beurteilung der Punkte 2 und 3 muss zunächst die Dämpfung über den gesamten Versuch ausgewertet werden.

Des Weiteren wird in der Detaildarstellung 3.14 (b) eine einzelne Messungenauigkeit abgebildet, in diesem Fall im Bereich des Maximums. Bei diesen Stellen handelt es sich um Störungen im Messsignal des Laser-Doppler-Vibrometers, welche die Auswertung der Extremstellen beeinflussen. Die Peaks der Maxima und Minima werden durch eine Python Funktion ermittelt, die dargestellte Störstellen führen zu einer fehlerhaften Ermittlung der

Extremstellen.

In Abbildung 3.14 (c) sind im Bereich der Peaks bereits diskrete Werte der Messaufzeichnung zu erkennen. Die weitere Vergrößerung der Minimalstelle zeigt, dass eine eindeutige Ermittlung der Extremstelle aufgrund der geringen Auflösung nicht möglich ist. Zudem gibt es eine minimale Geschwindigkeit, ab welcher die Amplituden in der Größenordnung der Messauflösung liegen und die Schwingung nicht mehr aufgelöst werden kann.

Mit Hilfe eines Filters können die Artefakte und Stufen des Messsignals, dargestellt in Abbildung 3.14 (b,c,d), geglättet werden. Vor diesem Hintergrund wird in der Auswertoutine ein *Savitzky-Golay-Filter* implementiert. Dieser erstellt über einen Bereich von 31 Stützstellen (Messwerten) ein kubisches Regressionspolynom. Eine vollständig gefilterte Messung besteht somit aus einer Vielzahl an zusammengesetzten kubischen Regressionspolynomen. Zudem wird eine minimale Geschwindigkeit im Betrag von 20 mm/s definiert. Die Auflösung der Geschwindigkeitsmessung, dargestellt in Abbildung 3.14 (d), beträgt 0,488 mm/s. Bezogen auf ein Maximum von 20 mm/s entspricht dies 2,4 %. Unterhalb der definierten minimalen Geschwindigkeit werden die Versuche nicht weiter ausgewertet.

Anhand der gefilterten Messdaten werden im nächsten Schritt die Minima und Maxima des Ausschwingverhaltens bestimmt. Durch die Geschwindigkeit benachbarter Extremwertstellen wird die Dämpfung nach den Gleichungen (3.8), (3.9) und (2.6) bestimmt. Für eine Stahlprobe ergibt sich ein Verlauf für η über der Geschwindigkeit, wie in Abbildung 3.15 (unten) dargestellt.

Der Verlauf von η schwankt über den gemessenen Geschwindigkeitsbereich stark (Abbildung 3.15, unten). Daher kann aus der Auswertung kein einzelner Dämpfungswert ermittelt werden. Der Verlauf von η wird für die folgenden Untersuchungen in drei Teilbereiche unterteilt. In einen Anfangsbereich (A-1) in dem die Probe mit einer hohen Geschwindigkeit schwingt. In diesem Bereich schwankt der η -Wert stark und es werden teilweise negative Dämpfungswerte ermittelt. Es folgt ein Bereich mit mittlerer Geschwindigkeit (A-2). Mit zunehmender Geschwindigkeit nimmt η zu und es liegt ein proportionaler Zusammenhang vor. Die Streuung ist geringer als in den Bereichen A-1 und A-3. Der Bereich mit einer niedrigen Schwinggeschwindigkeit (A-3) ist gekennzeichnet durch eine erneute Zunahme des Streubandes. In Abbildung 3.15 im Bereich A-2 wird vor allem die Abhängigkeit von η von der Schwinggeschwindigkeit der Probe deutlich. Ursache hiervon ist die Luftreibung, welche auf die Probe wirkt ([38, 41, 56]). Mit abnehmender Geschwindigkeit nimmt der Einfluss der Luftreibung ab, wodurch gleichzeitig der Wert für η sinkt. Die schwankenden Dämpfungswerte bei hohen Absolutgeschwindigkeiten der Messung lassen sich darüber nicht ableiten. Es bleibt weiterhin unklar, wie diese zustande kommen. Um eine weitere

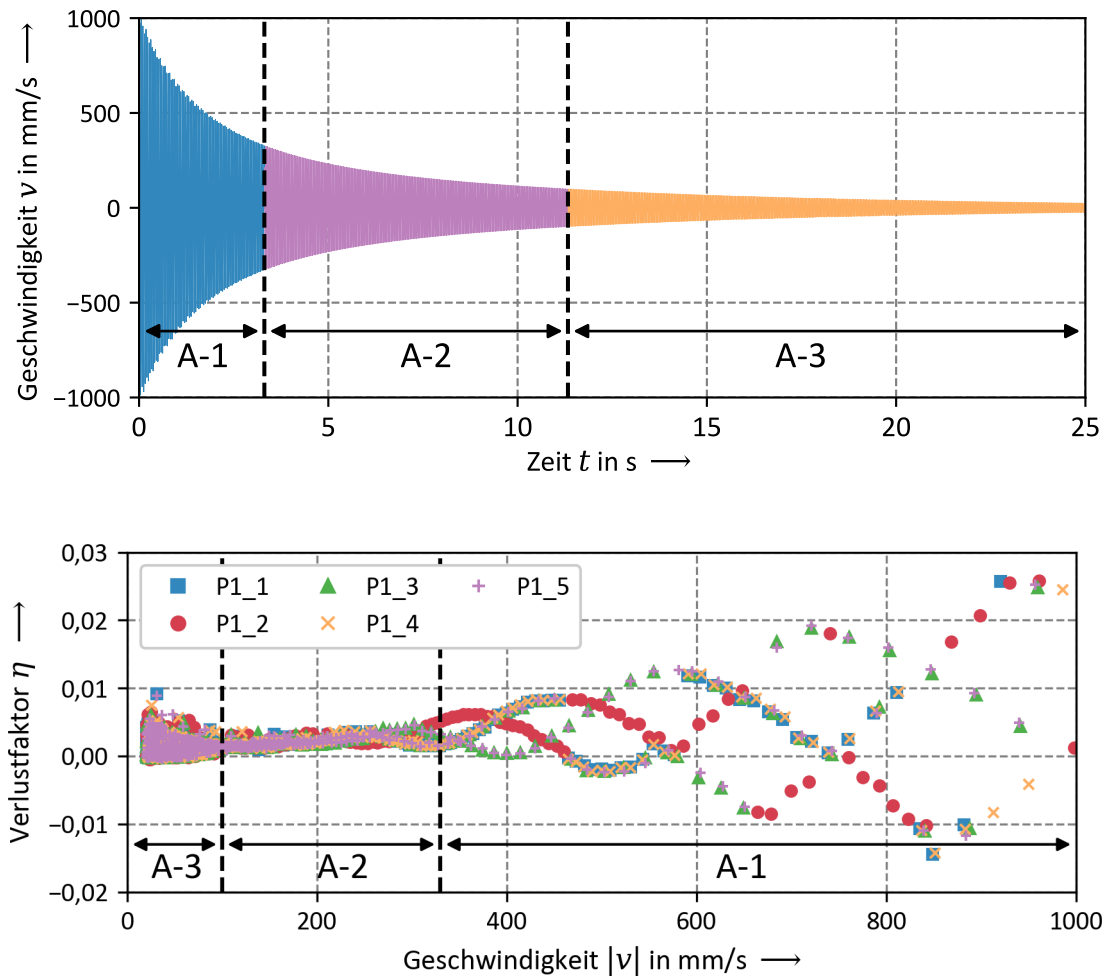


Abbildung 3.15: Oben: Unterteilung des Ausschwingverhaltens einer Probe in drei Geschwindigkeitsbereiche (A-1, A-2 und A-3). Unten: Berechneter Verlustfaktor η einer Probe mit fünf Versuchsdurchführungen in Abhängigkeit der Proben- geschwindigkeit. Der Verlauf ist äquivalent zum Ausschwingverhalten in die drei Geschwindigkeitsbereiche unterteilt.

Beurteilung der Ergebnisse zu ermöglichen, ist die Auswertung entsprechend durch weitere Parameter anzupassen.

Ziel der Versuchsdurchführung ist es, einen Wert für die Dämpfung zu ermitteln, welcher der Werkstoffdämpfung entspricht. Sofern durch die Versuchsdurchführung noch Einflüsse der Umgebung auf die Kennwertbestimmung bestehen, müssen diese im Zuge der Auswertung eliminiert werden. Um die deutlichen Schwankungen von η zu verringern, besteht die Möglichkeit nicht jede benachbarte Extremstelle auszuwerten, sondern einzelne Stützstellen hierbei auszulassen [22]. Für Abbildung 3.15 wurden die benachbarten Extremstellen ausgewertet, dies ist außerdem in Abbildung 3.14 (a) zu erkennen. Hierbei werden die Extremstellen markiert mit 0 und 1 ausgewertet und die Dämpfung bestimmt. Da bei diesem Vorgehen immer die folgende Extremstelle ausgewertet wird, wird dies mit $n = 1$

beschrieben. Für die weiteren Auswertungen werden die η -Werte für $n = 2$, $n = 4$, und $n = 8$ zusätzlich bestimmt (Abbildung 3.16), wobei jeweils die zweite, vierte oder achte Extremstelle vom Startpunkt ausgehend ausgewertet wird.

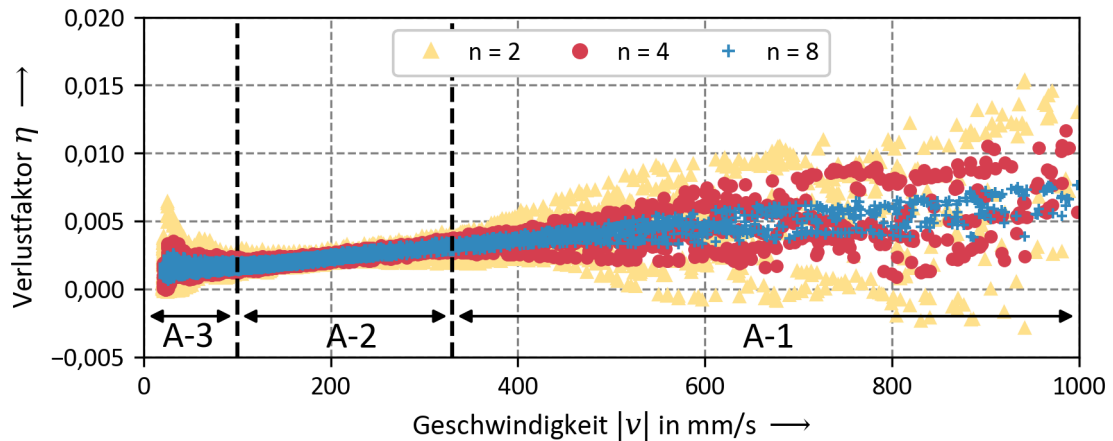


Abbildung 3.16: Vergleich des berechneten η der unterschiedlichen Auswertebreiten von $n = 2$, $n = 4$ und $n = 8$ über den gesamten Messverlauf.

Durch die Anpassung der Auswertebreite, anhand derer η ermittelt wird, können die extremen Abweichungen gefiltert werden. Die Abhängigkeit des Wertes von der Ausschwinggeschwindigkeit der Probe bleibt weiterhin bestehen. Ebenfalls bestehen bleiben die drei unterschiedlichen Geschwindigkeitsbereiche wie in Abbildung 3.15 dargestellt. Durch die Abnahme des Betrages der Geschwindigkeit kommt es zu einer kontinuierlichen Abnahme von η . Erst bei geringen Geschwindigkeiten (Bereich A-3) nimmt der Wert nicht mehr ab und die Streuung des Wertes nimmt erneut zu. Eine Vergrößerung der Geschwindigkeitsbereiche A-2 und A-3 ist in Abbildung 3.17 dargestellt.

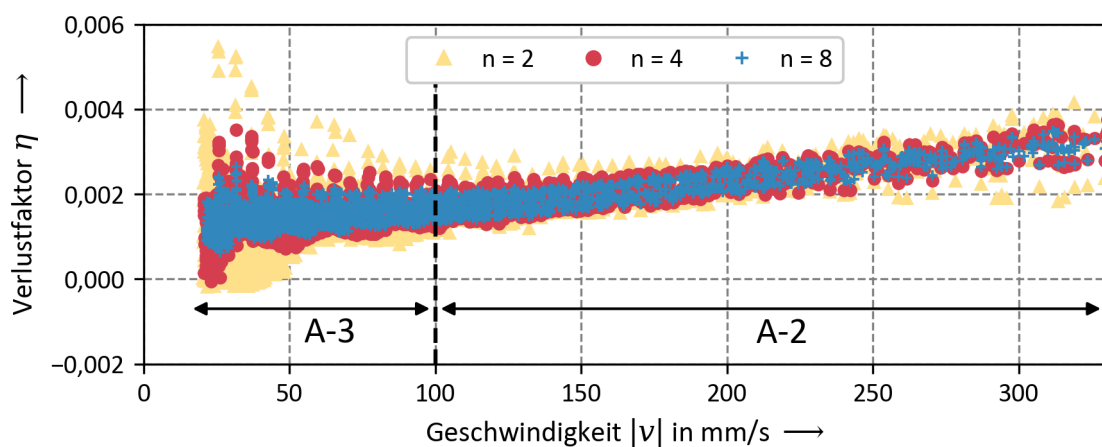


Abbildung 3.17: Vergrößerung des Vergleichs der unterschiedlichen Auswertebreiten auf den berechneten η .

Die Vergrößerung der Geschwindigkeitsbereiche A-2 und A-3 zeigt in Abbildung 3.17 deutlich die Abhängigkeit von η im Bereich A-2 von der Probengeschwindigkeit. Für den Bereich A-3 ist, bis auf ein allgemeines Rauschen des η -Wertes, keine Abhängigkeit von η von der Geschwindigkeit zu erkennen. Die Geschwindigkeit von 100 mm/s wird daher anhand des Kurvenverlaufs für die Dämpfungsauswertung gewählt. Für weitere Versuchsreihen muss die Geschwindigkeitsgrenze, ab der die Dämpfung unabhängig von der Geschwindigkeit ist, erneut ermittelt werden. Es bleibt zu erwähnen, dass dadurch lediglich der auszuwertende Geschwindigkeitsbereich deutlich verkleinert wird. Bezogen auf das gesamte Ausschwingverhalten bleibt ein Großteil des Auswertebereich dadurch erhalten und ist vergleichend in Abbildung 3.15 dargestellt. Zur Bestimmung eines aggregierten Werts für den durchgeführten Versuch wird η für den Geschwindigkeitsbereich A-3 gemittelt.

Zur Diskussion wird die Verteilung der Ergebnisse als Violinplot in Abbildung 3.18 dargestellt. Dieser beinhaltet den Median der Ergebnisse. Das maximale und minimale Ergebnis der Auswertung wird ebenfalls durch den Violinplot dargestellt. Zudem wird durch die Darstellung die Verteilung der Ergebnisse visualisiert. Diskutiert werden die unterschiedlichen Auswertebreiten, welche für die Berechnung von η verwendet wurden. Weiterhin wird die manuell ermittelte Geschwindigkeitsgrenze von 100 mm/s um jeweils 20 % nach oben und unten verschoben um deren Einfluss zu untersuchen.

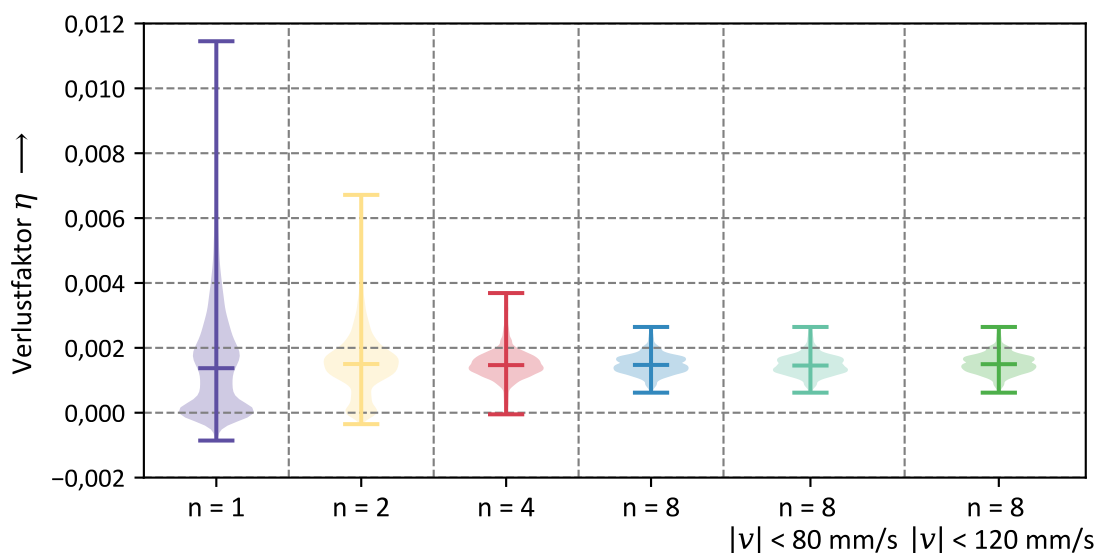


Abbildung 3.18: Verteilung von η in Abhängigkeit der Auswertebreite der Versuchsreihe S1. Ermittlung des Verlustfaktors für $|v| < 100$ mm/s. Zusätzlicher Vergleich der Geschwindigkeitsgrenzen $|v| < 80$ mm/s und $|v| < 120$ mm/s für $n = 4$.

Der Vergleich der unterschiedlichen Auswertebreiten in Abbildung 3.18 zeigt eine Abnahme der Streuung mit zunehmendem n . Speziell die Auswertungen mit $n = 1$ und $n = 2$ zeigen

eine sehr breite Streuung der η -Werte. Hierbei liegen die minimalen Werte der Auswertung jeweils im negativen Bereich. Zudem zeigen sie eine sehr unsymmetrische Verteilung der Ergebnisse. Dies belegt, dass für geringe Geschwindigkeiten einzelne η -Werte berechnet werden, die teilweise deutlich von den restlichen Versuchsergebnissen abweichen. Mit einer zunehmenden Auswertebreite der Auswertung wird die Streuung der Ergebnisse deutlich geringer. Zudem ist die Streuung ab $n = 4$ symmetrisch um den Median. Bis auf die Auswertung bei $n = 1$ kommt es bei den restlichen Auswertebreiten zu einer guten Übereinstimmung der Mediane. Der Vergleich von $n = 4$ und $n = 8$ zeigt lediglich geringe Unterschiede im Gesamtergebnis. Zudem wird für die Auswertung von $n = 8$ die Geschwindigkeit variiert, ab der die Ergebnisse für η betrachtet werden. Die Grenze wird um 20 % nach oben und unten verschoben, um deren Einfluss auf die Auswertung zu analysieren. Trotz unterschiedlicher Geschwindigkeitsgrenzen zeigt die Darstellung in Abbildung 3.18 keinen Unterschied im Ergebnis. Für Geschwindigkeiten kleiner 100 mm/s wird zuvor angenommen, dass η konstant ist. Somit belegt das Ergebnis in Abbildung 3.18 diese Annahme. Bei Geschwindigkeiten größer als 100 mm/s zeigt S1 nur eine geringe Zunahme von η (Abbildung 3.17). Diese geringe Zunahme weniger η -Werte ist nicht ausreichend, um einen Einfluss auf das Ergebnis zu zeigen. Zudem wird ein Großteil der η -Werte bei deutlich geringeren Geschwindigkeiten aufgezeichnet und beeinflusst dadurch maßgeblich das Ergebnis. Zur weiteren Analyse werden der Median und die Standardabweichung in Tabelle 3.5 zusammengefasst.

Tabelle 3.5: Zusammenfassung von η für S1 und der Vergleich unterschiedlicher Auswertebreiten. Bestimmung des Medians und der Standardabweichung ab $|v| < 100$ mm/s.

	$n = 1$	$n = 2$	$n = 4$	$n = 8$
η	0,00137 ($\pm 1,40 \cdot 10^{-3}$)	0,00150 ($\pm 8,37 \cdot 10^{-4}$)	0,00147 ($\pm 4,07 \cdot 10^{-4}$)	0,00147 ($\pm 2,88 \cdot 10^{-4}$)

Ab einer Auswertebreite von $n = 2$ kommt es zu einer sehr guten Übereinstimmung der Versuchsergebnisse. Für die unterschiedlichen Auswertebreiten ergeben sich nur sehr geringe Abweichungen im Median. Lediglich die Ergebnisse von $n = 1$ weichen ab. Zudem liegt die Standardabweichung in der Größenordnung des η -Wertes und kennzeichnen somit eine erhöhte Unsicherheit. Eine Auswertung der Versuchsergebnisse mit $n = 1$ wird daher nicht empfohlen. Durch eine höhere Auswertebreite folgt eine Glättung der η -Werte und ist bildlich in Abbildung 3.17 dargestellt. Folgerichtig werden der Bereich der Standardabweichung durch eine zunehmende Auswertebreite kleiner. Basierend auf den bisherigen Erkenntnissen wird eine Auswerteroutine programmiert, anhand derer alle Proben nach dem folgenden, einheitlichen Vorgehen ausgewertet werden:

- Laden der Versuchsdaten und Definition des Auswertebereiches. Die Grenzen werden für jeden Versuch separat ermittelt.

- Eine FFT bestimmt die erste Eigenfrequenz des Versuchs, welche unter anderem für die Bestimmung der Extrema notwendig ist. Außerdem können anhand der FFT Überlagerungen von weiteren Eigenschwingungen erkannt werden.
- Die Maxima und Minima der Abklingkurve werden bestimmt.
- Anhand der Extremstellen (Minima und Maxima) wird die Dämpfung in Form von η bestimmt, dies wird mit unterschiedlichen Auswertebreiten zwischen den Extremwerten ermittelt.
- Über den Bereich, in dem der η -Wert unabhängig von der Probengeschwindigkeit ist, wird der Median und die Standardabweichung für η bestimmt.

3.2.4 Validierung des Versuchsstands und der Auswertemethode

Zur Validierung des Versuchsstands und der entwickelten Auswertemethode werden unterschiedliche Versuchsreihen an Proben aus Stahl durchgeführt. Bevor die Versuchsreihe durchgeführt wird, werden bei laufendem Versuch Geschwindigkeitsmessungen auf der Einspannung und dem Spannfeld vorgenommen, um eventuelle Umgebungseinflüsse auf die Versuchsdurchführung zu identifizieren. Hierbei hat sich ergeben, dass es zu keiner Beeinflussung der Ausschwingversuche durch die Einspannung oder das Spannfeld kommt. Der Einfluss der Luftreibung wurde bereits im Kapitel zuvor angesprochen und diskutiert. Bei der Auslegung der Versuchsreihen werden unterschiedliche Probenparameter (vgl. Tabelle 3.6) variiert, die einen Einfluss auf die Versuchsdynamik haben. Zudem werden, wie auch bei den DMA Versuchen, unterschiedlich dicke Proben untersucht, um eine Vergleichbarkeit mit den vorherigen Versuchsreihen zu ermöglichen. Die unterschiedlichen Versuchsreihen der Stahlproben sind in Tabelle 3.6 zusammengefasst:

Tabelle 3.6: Übersicht der Probekörper und Versuchsreihen für die Validierungsversuche. Die Eigenfrequenz (f_1^a) wird nach Gleichung (3.5) und (3.11) analytisch berechnet mit der Annahme $E = 210 \text{ GPa}$.

Versuch	l_f in mm	b in mm	d in mm	Messpunkt	f_1^a in Hz	f_2^a in Hz
S1	115,7	12,7	0,4	Ende	25,0	156,4
S2	115,7	12,7	0,4	Mitte	25,0	156,4
S3	163,7	12,7	0,8	Ende	25,0	156,4
S4	163,7	12,7	0,8	Mitte	25,0	156,4
D1	100,0	12,7	0,4	Ende	33,5	209,5
D2	100,0	12,7	0,8	Ende	67,0	419,0
B1	70,0	12,7	0,4	Ende	68,3	427,5
B2	70,0	15,0	0,4	Ende	68,3	427,5

Durch die Wahl der unterschiedlichen Probekörpergeometrien werden verschiedene Einflüsse auf die Ausschwingversuche analysiert. Außerdem werden Versuche mehrmals durchgeführt und an unterschiedlichen Messpunkten aufgezeichnet. Somit können Einflüsse der

Geometrie und der Umgebung identifiziert werden und basierend darauf eine zuverlässige Bestimmung der Werkstoffdämpfung erarbeitet werden. Zudem können Empfehlungen für die weitere Versuchsdurchführung abgeleitet werden. Um dieses Ziel zu erreichen, wird bei den Versuchsreihen wie folgt vorgegangen:

- Die Versuchsreihen mit den Proben S1 und S2 werden exakt gleich durchgeführt, lediglich die Position des Messpunktes auf der Probe wird verändert. Einmal wird die Geschwindigkeit am Ende der Probe und das zweite Mal in der Mitte der Probe gemessen. Dadurch wird untersucht, welchen Einfluss die Position der Aufzeichnung auf die Versuchsergebnisse hat und wie dieser eliminiert werden kann.
- Die Proben S3 und S4 werden ähnlich geprüft. Hierbei wird ebenfalls die Position des Messpunktes auf der Probe variiert. Hinzu kommt, dass bei S3 und S4 Proben der doppelten Dicke verwendet werden. Um gleiche dynamische Bedingungen zu erreichen, wird die Länge der Proben so angepasst, dass die erste Eigenfrequenz ebenfalls bei 25 Hz liegt.
- Der Vergleich von D1 und D2 basiert auf gleicher Länge und Breite der Proben. Der Unterschied liegt in der Dicke der Proben. Daraus folgend haben die Proben unterschiedliche Eigenfrequenzen.
- In B1 und B2 werden zwei Proben gleicher Dicke und Länge, mit unterschiedlicher Breite, untersucht. Nach den analytischen Berechnungen ist hierbei die Eigenfrequenz gleich. Jedoch ergibt sich durch die unterschiedliche Breite ein Einfluss auf den Luftwiderstand.

Zunächst werden die Ergebnisse der Messreihe S1 und S2 analysiert. Hierbei werden jeweils vier Proben geprüft und an jeder Probe wird der Ausschwingversuch fünfmal durchgeführt. Die maximale Auslenkung der Proben wird nicht verändert und die Versuchsdurchführung ist bis auf die Messposition des Laser-Doppler-Vibrometers identisch. Ausgewertet werden die Versuche wie in Kapitel 3.2.3 beschrieben und die Ergebnisse sind für eine Auswertebreite von $n = 8$ der jeweiligen Einzelversuche in Abbildung 3.19 dargestellt.

Durch die unterschiedlichen Messpositionen sind in Abbildung 3.19 deutliche Unterschiede im Verlauf von η zu erkennen. Während S1 ab einer Probengeschwindigkeit im Betrag kleiner 100 mm/s keine Änderung von η zeigt, ist bei S2 η über den gesamten Messbereich abhängig von der Probengeschwindigkeit. Daher kann keine Geschwindigkeitsgrenze für die Messreihe S2 gesetzt werden, ab der ein Mittelwert für η unabhängig der Probengeschwindigkeit bestimmt werden kann. Für eine geschwindigkeitsunabhängige Auswertung der Versuchsreihe S2 wäre eine höher aufgelöste Geschwindigkeit für den Bereich kleiner 20 mm/s notwendig. Dementsprechend wird für S2 kein η -Mittelwert bestimmt. Die Auswertung von S1 wird in Kapitel 3.2.3 ausführlich diskutiert.

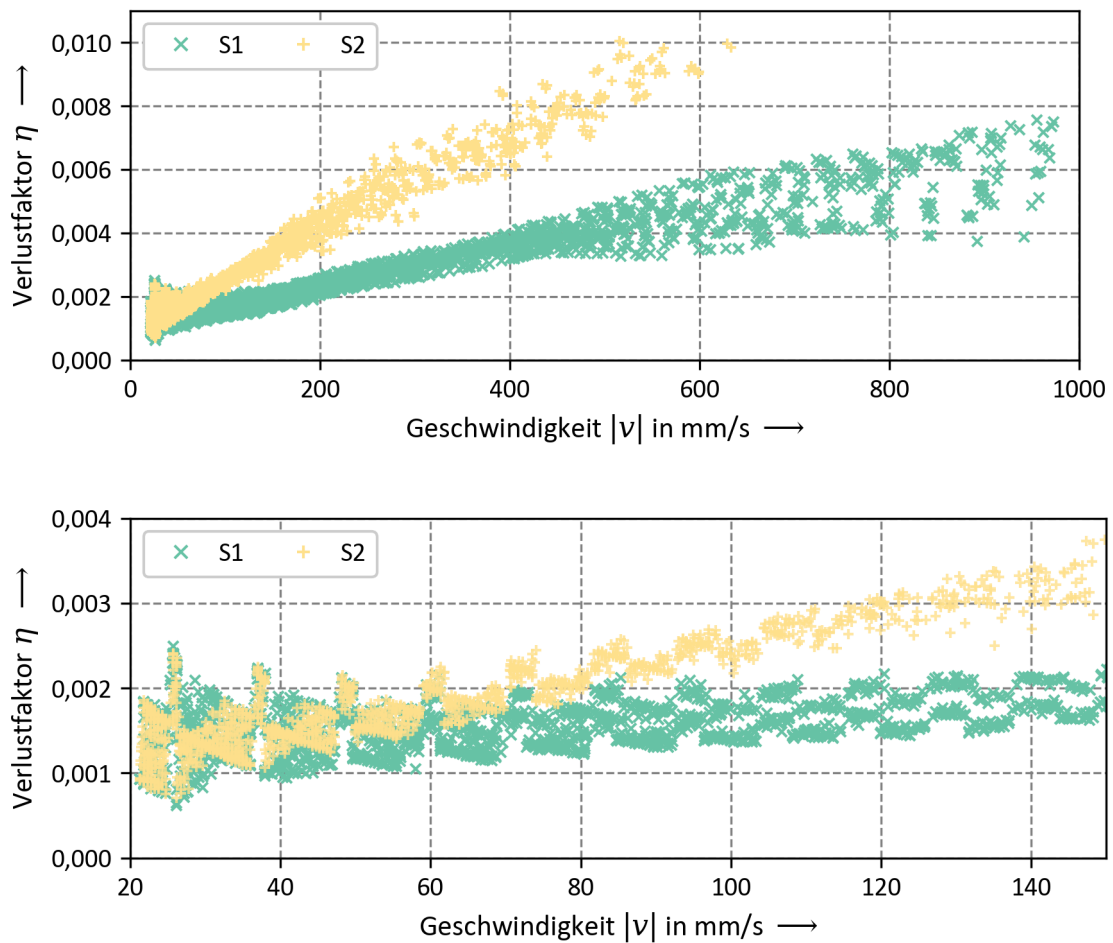


Abbildung 3.19: Vergleich der Versuchsreihen S1 und S2. Darstellung des Verlustfaktors η über die gemessenen Probengeschwindigkeit $|v|$ im Betrag bei einer Auswertbreite von $n = 8$. Oben: Darstellung des gesamten Messverlauf. Unten: Vergrößerung des niedrigen Geschwindigkeitsbereichs.

Im nächsten Schritt werden die Versuchsreihen S3 und S4 ausgewertet und diskutiert. Diese haben ebenfalls eine erste Eigenfrequenz von 25 Hz und somit gleiche dynamische Bedingungen wie die Versuchsreihen S1 und S2. Durch die höhere Probendicke ($d = 0,8 \text{ mm}$) nimmt auch die freie Länge der Biegeproben zu (Tabelle 3.6). Untersucht werden neben der unterschiedlichen Dicke wieder die Messpositionen am Probenende und in der Probenmitte.

Abbildung 3.20 fasst die Versuchsergebnisse der Versuchsreihen S3 und S4 zusammen. An dem Verlauf von η über die Geschwindigkeit ist erneut ein Einfluss der Probengeschwindigkeit zu erkennen. In beiden Versuchsreihen nimmt mit abnehmender Geschwindigkeit die Dämpfung η ab. Die Vergrößerung des Geschwindigkeitsbereichs bis 200 mm/s zeigt für die Versuchsreihe S3 einen sehr großen Bereich mit einem konstanten Verlauf von η .

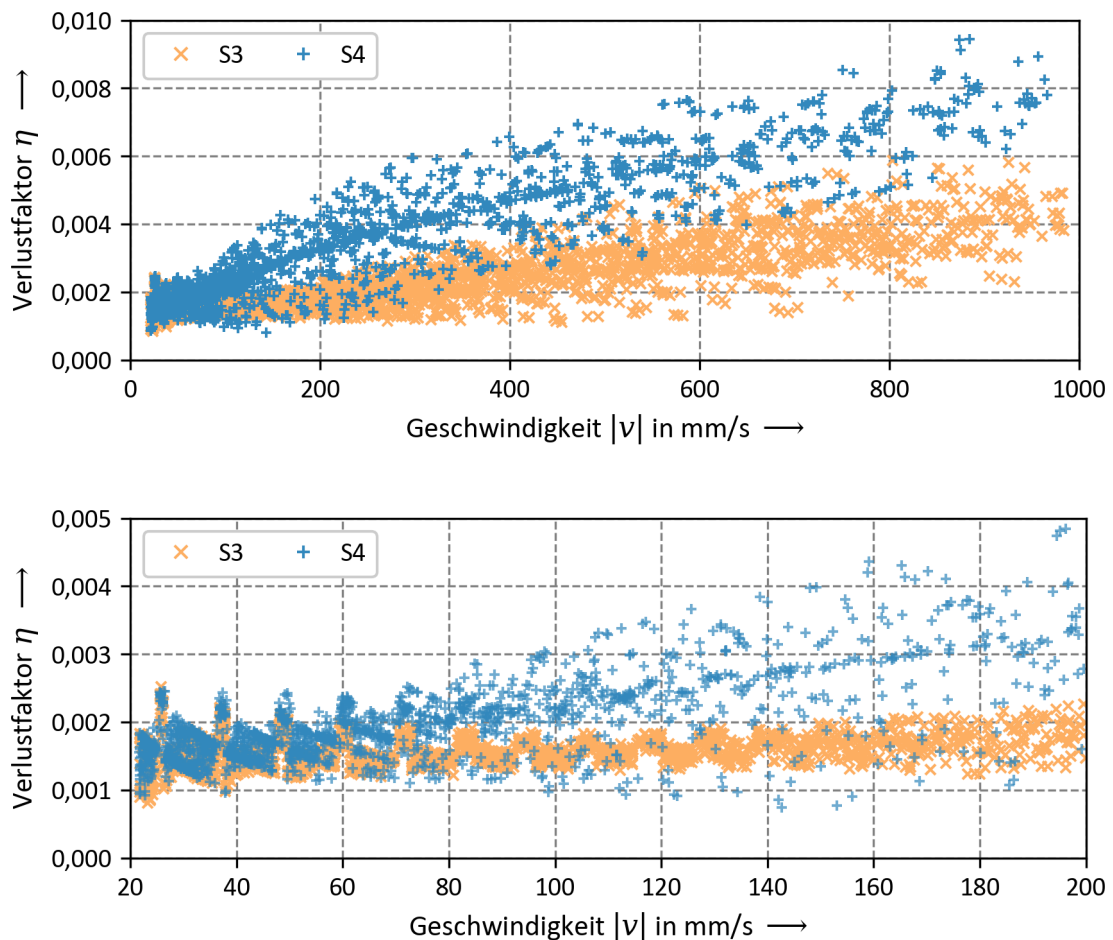


Abbildung 3.20: Vergleich der Versuchsreihen S3 und S4. Darstellung des Verlustfaktors η über die gemessenen Probengeschwindigkeit $|v|$ im Betrag bei einer Auswertbreite von $n = 8$. Oben: Darstellung des gesamten Messverlauf. Unten: Vergrößerung des niedrigen Geschwindigkeitsbereichs.

Bis zu einer Grenzggeschwindigkeit von etwa 150 mm/s ist η unabhängig von der Probengeschwindigkeit. Für diesen Bereich kann ein Mittelwert für η bestimmt werden. Trotz der hohen Auswertbreite von $n = 8$, welche bei den Versuchsreihen zuvor zu einer Glättung der Versuchsergebnisse geführt hat, ist das Streuband der Versuchsreihe S4 auch im niedrigen Geschwindigkeitsbereich sehr breit. Dennoch kann für S4 ab einer Geschwindigkeit kleiner 70 mm/s ein Bereich mit einem konstanten η -Verlauf festgestellt werden. Für diesen Bereich wird ein Mittelwert für η erstellt. Zur Analyse des breiten Streubandes werden für beide Versuchsreihen zunächst das Ausschwingverhalten im Frequenzbereich untersucht.

Anhand der FFT kann analysiert werden, welche Eigenfrequenzen im Ausschwingverhalten der Probe hauptsächlich auftreten. Die zuvor analytisch bestimmten Eigenfrequenzen liegen bei $f_1^A = 25 \text{ Hz}$ und $f_2^A = 156,4 \text{ Hz}$ für die Versuchsreihen S3 und S4. Sowohl die

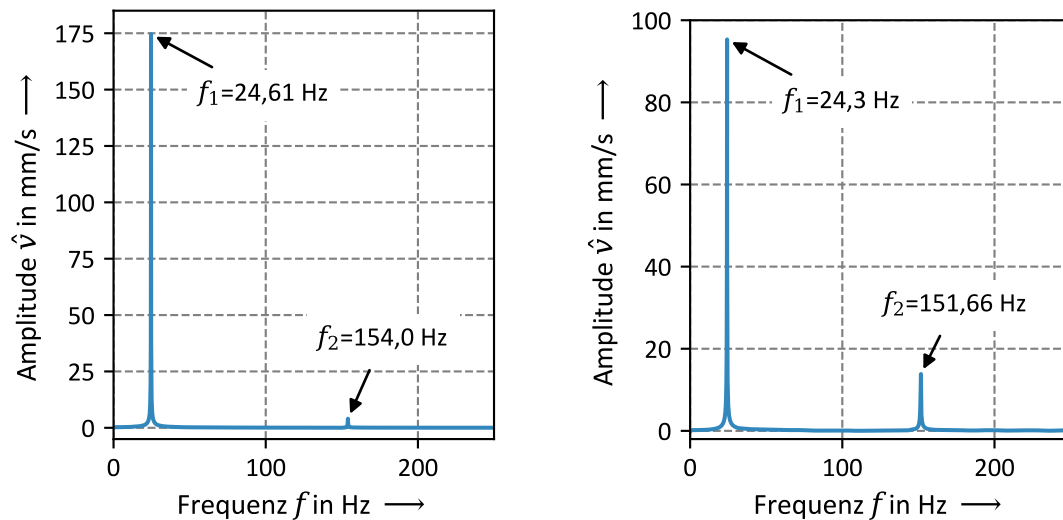


Abbildung 3.21: Vergleich der FFT der Versuchsreihen S3 (links) und S4 (rechts). Markiert sind jeweils die erste (f_1) und zweite Eigenfrequenz (f_2) der Versuchsdurchführung.

erste als auch die zweite Eigenfrequenz können aus den Messungen eindeutig identifiziert werden und diese weichen nur gering von der Auslegung ab. Hierbei ist zu beachten, dass in Abbildung 3.21 nur die Ergebnisse einer einzelnen Probe abgebildet sind, die Mediane sind in Tabelle 3.7 zusammengefasst. Ein deutlicher Unterschied zwischen den beiden Messreihen ist die jeweilige Amplitude der Geschwindigkeit bei der Eigenfrequenz sowie das Verhältnis der Geschwindigkeiten von erster und zweiter Eigenfrequenz. Die Versuche unterscheiden sich lediglich durch den Punkt der Versuchsaufzeichnung, daher hängen die Unterschiede mit den jeweiligen Eigenformen zusammen. Die erste Biegeeigenform ist eine kontinuierliche Biegung der Probe entlang der Probenachse. Am Probenende ($x = L$), an dem bei der Versuchsreihe S3 die Geschwindigkeit aufgezeichnet wird, ist die Auslenkung und somit die Geschwindigkeit im Ausschlagversuch am größten. Somit nehmen bis zur Probenmitte Auslenkung und Geschwindigkeit kontinuierlich ab. Die zweite Biegeeigenform hat einen Schwingungsknoten bei ca. $x = \frac{2}{3}L$. Die maximale Auslenkung entsteht am Probenende sowie in der Mitte der Probe (vgl. Abbildung 3.12). Dementsprechend ist dort auch die Geschwindigkeit am größten. Somit werden mit der Aufzeichnung von S4 Geschwindigkeiten aufgezeichnet, die in ihrem Betrag bezogen auf ihr jeweiliges Maximum unterschiedlich ausgeprägt sind. Für die erste Eigenform wird eine Geschwindigkeit aufgezeichnet, die deutlich unter dem Maximum des Versuchs liegt. Hingegen wird für die zweite Eigenform eine Geschwindigkeit aufgezeichnet, welche sich an das Maximum für die zweite Eigenform annähert. Zur weiteren Analyse wird für die Auswertung das Verhältnis der Amplituden der Geschwindigkeiten $\hat{v}_2$ und $\hat{v}_1$ gebildet. Des Weiteren kann, wie in Gleichung (3.5) und (3.11) hergeleitet, aus der gemessenen ersten Eigenfrequenz die Probensteifigkeit berechnet werden. Die durch den Versuch ermittelte Steifigkeit dient

zur Plausibilitätsprüfung der Versuchsdurchführung. In Tabelle 3.7 sind die Ergebnisse aus den Vergleichen von S1, S2, S3 und S4 zusammengefasst.

Tabelle 3.7: Zusammenfassung der Ergebnisse der Versuchsreihen S1, S3 und S4. Ermittlung von η für $n = 8$ und dem jeweiligen Geschwindigkeitsbereich, der Speichermodul wird aus der ermittelten f_1 sowie der Probengeometrie bestimmt.

Versuch	η	f_1 in Hz	f_2 in Hz	$\hat{v}_2/\hat{v}_1$ in %	E' in MPa
S1	0,00147 ($\pm 2,88 \cdot 10^{-4}$)	23,67 ($\pm 0,32$)	150,06 ($\pm 1,72$)	1,03 ($\pm 0,15$)	183.253 (± 5.573)
S2	- (-)	24,35 ($\pm 0,16$)	152,10 ($\pm 0,8$)	5,67 ($\pm 0,85$)	193.978 (± 4.321)
S3	0,00150 ($\pm 2,02 \cdot 10^{-4}$)	24,35 ($\pm 0,17$)	152,54 ($\pm 0,99$)	2,57 ($\pm 0,29$)	198.313 (± 4.200)
S4	0,00167 ($\pm 2,79 \cdot 10^{-4}$)	24,39 ($\pm 0,08$)	151,95 ($\pm 0,31$)	9,38 ($\pm 2,86$)	198.878 (± 3.419)

Ein Vergleich von η der unterschiedlichen Versuchsreihen zeigt eine sehr gute Übereinstimmung der ermittelten Dämpfung. Die Unterschiede des bestimmten η -Wertes zwischen den Versuchsreihen S1, S3 und S4 liegen im Bereich der jeweiligen Standardabweichung. Auch wenn die Versuchsreihen S3 und S4 gleich durchgeführt werden, zeigt der Vergleich, dass der Messpunkt einen Einfluss auf das Ergebnis hat. Wichtig ist hierbei zu erwähnen, dass der Unterschied im Ergebnis ein Resultat der unterschiedlichen Messpunkte ist. Durch eine Versuchsaufzeichnung in der Probenmitte wird der Einfluss der zweiten Eigenfrequenz auf die Auswertung erhöht. Dies wird vor allem am Verhältnis der Geschwindigkeiten der jeweiligen Eigenfrequenzen zueinander deutlich. Liegt bei S3 das Verhältnis der Geschwindigkeiten bei geringen 2,57 %, steigt das Verhältnis bei S4 auf 9,38 %. In dieser Modulation kann die Ursache für das breite Streuband von S4 in Abbildung 3.20 liegen. Demzufolge könnte dies ebenfalls der Grund für den etwas höheren η -Wert von S4 im Vergleich zu S1 und S3 sein. Für weitere Versuche wird eine Versuchsaufzeichnung am Probenende umgesetzt. Bei den experimentell ermittelten Eigenfrequenzen f_1 und f_2 kommt es zu einer guten Übereinstimmung mit den zuvor analytisch bestimmten Eigenfrequenzen (Tabelle 3.6). Gleiches gilt für den ermittelten Speichermodul E' , dieser liegt im Bereich der Erwartungen.

Zum Abschluss der Validierung werden weitere zwei Probengeometrien vergleichend untersucht. Es wird an einer Probe der Versuch jeweils fünfmal durchgeführt. In diesen Vergleichen wird jeweils ein Parameter der Geometrie verändert. Eine genauere Beschreibung der Versuche ist zuvor in Tabelle 3.6 erfolgt. Die Zusammenfassung dieser vergleichenden Versuche ist in Abbildung 3.22 dargestellt.

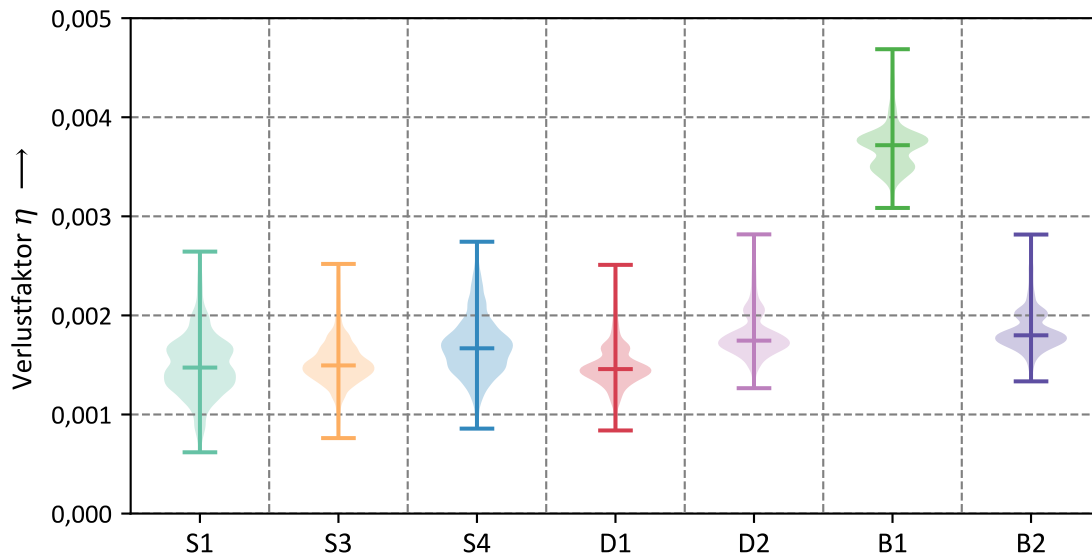


Abbildung 3.22: Vergleich von η der durchgeführten Versuchsreihen, ermittelt für $n = 8$ und der jeweiligen Geschwindigkeitsgrenze der Versuche.

In Abbildung 3.22 fällt die Abweichung der Versuchsergebnisse von B1 im Vergleich zu den restlichen Versuchsreihen auf. Hier wird für η ein deutlich höherer Wert ermittelt als bei B2 oder den anderen Versuchsreihen. Bei dem für B1 verwendeten Material handelt es sich um das Gleiche wie auch bei den Versuchsreihen S1, S2 und D1. Daher können die Unterschiede nicht durch das Material erklärt werden, sondern der Grund für die Abweichung muss in der Versuchsdurchführung liegen. Neben der zu hohen Dämpfung fallen bei der Auswertung noch weitere Abweichungen von den restlichen Versuchsreihen auf. Der Speichermodul E' ist im Vergleich zu den weiteren Versuchen deutlich niedriger (vgl. Tabelle 3.8). Außerdem tritt bei dem Versuch eine zweite Eigenfrequenz bei 127 Hz auf. Im Vergleich dazu wird bei B2 keine zweite Eigenfrequenz ermittelt. Analytisch sollten bei beiden Versuchsreihen die zweite Eigenfrequenz bei etwa 428 Hz liegen. Speziell die bei B1 gemessene zweite Eigenfrequenz von 127 Hz ist ein Hinweis darauf, dass beim Aufbau oder der Durchführung ein systematischer Fehler auftritt. Hierfür kommen entweder eine zu kurze Einspannlänge der Probe oder eine nicht ausreichend angezogene Probeneinspannung in Frage. Daher werden die Ergebnisse von B1 nicht weiter betrachtet.

Der Vergleich der unterschiedlichen Probendicken von D1 und D2 zeigt insgesamt eine gute Übereinstimmung. Sowohl η als auch E' liegen dicht bei den zuvor ermittelten Kennwerten. Die höhere Probendicke (D2) führt zu einer etwas höheren Dämpfung und Steifigkeit als die dünneren Proben (D1). Durch die unterschiedliche Probendicke ergeben sich unterschiedliche erste Eigenfrequenzen der Versuchsreihen. Diese deutlich unterschiedlichen dynamischen Bedingungen für den Versuchen spiegeln sich nicht in den Ergebnissen wider. Der mit zunehmender Probendicke gering erhöhte η - und E' -Wert ist ebenfalls bei einem

Tabelle 3.8: Zusammenfassung der Ergebnisse der Versuchsreihen D1, D2, B1 und B2. Ermittlung von η für $n = 8$, der Speichermodul wird aus der ermittelten f_1 sowie der Probengeometrie bestimmt.

Versuch	η	f_1 in Hz	f_2 in Hz	$\hat{v}_2/\hat{v}_1$ in %	E' in MPa
D1	0,00146 ($\pm 1,98 \cdot 10^{-4}$)	31,88 ($\pm 0,01$)	203,50 ($\pm 0,01$)	0,59 ($\pm 0,02$)	181.078 (± 149)
D2	0,00175 ($\pm 2,00 \cdot 10^{-4}$)	64,69 ($\pm 0,01$)	- -	- -	190.079 (± 88)
B1	0,00372 ($\pm 2,02 \cdot 10^{-4}$)	63,57 ($\pm 0,02$)	126,98 ($\pm 0,11$)	0,61 ($\pm 0,09$)	169.480 (± 93)
B2	0,00180 ($\pm 1,84 \cdot 10^{-4}$)	66,43 ($\pm 0,03$)	- -	- -	179.387 (± 157)

Vergleich von S1 und S3 zu erkennen und beschränkt sich auf geringe Abweichungen.

Neben dem Ausreißer von B1, bei dem eindeutig durch die FFT ein Fehler in der Durchführung ermittelt wurde, zeigen alle weiteren Ergebnisse eine sehr gute Übereinstimmung. Der ermittelte η -Wert schwankt zwischen einem Wert von 0,00148 bis 0,00184 (Tabelle 3.7 und 3.8), zudem ist die Standardabweichung der Versuche gering. Die Validierungsversuche belegen, dass durch die gewählte Auswertemethode unterschiedliche Versuchsreihen miteinander vergleichend geprüft werden können.

3.3 Vergleich der Versuchsmethoden und Analyse der Ergebnisse

In diesem Kapitel werden die vorgestellten Versuchsmethoden zur Ermittlung der Dämpfungseigenschaften abschließend zusammengefasst. Des Weiteren werden die Methoden und die jeweils ermittelten Kennwerte miteinander verglichen. Die Fragestellung hierbei ist, welchen Einfluss die Versuchsmethode auf das jeweilige Ergebnis hat.

3.3.1 Dynamisch-Mechanische Analyse

In Kapitel 3.1 wurden die Dämpfungseigenschaften mittels Dynamisch-Mechanischer Analyse bestimmt. Hierbei wurden DMA sowohl unter Zugbelastung (Kapitel 3.1.1) als auch unter 3-Punkt-Biegebelastung (Kapitel 3.1.2) analysiert.

Die DMA unter Zugbelastung führt dabei zu einer homogenen Probenbelastung. Dadurch werden Einflüsse minimiert, die eine Auswirkung auf das Ergebnis haben. Ziel dieser Untersuchung ist es, von den Versuchsergebnissen direkt auf die Werkstoffdämpfung schließen zu können. Dabei stellt die sehr hohe Probensteifigkeit eine Herausforderung für den Versuchsaufbau dar. Die bisher durchgeführten Experimente an der Maschine Ga^I führen zu keinem konsistenten Ergebnis. Der Speichermodul, der als Plausibilitätsprüfung für die Versuche herangezogen wird, schwankt stark in Abhängigkeit der Probengeometrie und Versuchsdurchführung. Zudem ist die gemessene Steifigkeit deutlich zu gering im Vergleich zu den Werten aus den Werkstoffdatenblättern. Im Gegensatz dazu werden an Ga^A Steifigkeiten ermittelt, die im Bereich der Erwartungen liegen. Daher werden diese Ergebnisse auch für den folgenden Vergleich der Versuchsmethoden mit aufgenommen.

In Kapitel 3.1.2 werden Proben unterschiedlicher Dicke über einen Frequenzbereich von 1 Hz bis 40 Hz mittels 3PB-DMA geprüft. Hierbei werden neben der Geometrie auch unterschiedliche Belastungen untersucht. Abbildung 3.7 verdeutlicht, dass speziell die Probendicke einen Einfluss auf das Versuchsergebnis hat. Eine höhere Probendicke führt bei der Versuchsdurchführung zu einem höheren η -Wert über den gesamten Messbereich. Zur Analyse dieses Effekts werden weitere Ergebnisse der dynamischen Prüfungen betrachtet. Konkret wird die komplexe Steifigkeit, bestehend aus dem Speicher- und Verlustmodul, analysiert. Diese sind über den Verlustwinkel δ direkt miteinander verknüpft und zeigen auch einen geringen Einfluss der Probendicke. Die Prüfmaschine ermittelt die jeweiligen Steifigkeiten aus den Messgrößen der Prüfung und der Probengeometrie nach [99]. Daher sollte die Geometrie keinen Einfluss auf das Ergebnis haben. Bei der statischen Untersuchung der unterschiedlichen Probendicken ergeben sich lediglich Unterschiede im Bereich

der Standardabweichung bei den ermittelten Steifigkeiten. Dabei liegen bei den dickeren St8-Proben die Ergebnisse von statischer und dynamischer Untersuchung näher zusammen. Zudem zeigen bei den dynamischen Versuchen die unterschiedlichen Belastungen einen Einfluss auf das Ergebnis des Speichermoduls der St4-Proben. Da sich beide Belastungen weit im linear elastischen Bereich befinden, können Einflüsse des Materials ausgeschlossen werden. Die Analyse der Mess- und Regelgrößen ergibt, dass die St4-Proben bei 23 Hz eine Eigenfrequenz des Versuchsaufbaus durchlaufen. Hierbei geht die zu regelnde Kraft auf null zurück und bei höheren Frequenzen kommt es zu einem Effekt der dynamischen Versteifung des Versuchsaufbaus. Mit Zunahme der Frequenz kommt es zu einem deutlichen Anstieg der Regelkraft. Durch die Eigenfrequenz kann der zweite Peak der St4-Proben in Abbildung 3.7 erklärt werden. Die Ursache für den ersten Peak bei 13 Hz kann durch die Maschinendaten nicht festgestellt werden. In dem ersten Peak wird ein Unterton der ersten Eigenfrequenz des Prüfaufbaus vermutet. Bei niedrigen Frequenzen kommt es bei beiden Dicken zu einer geringen Zunahme der Dämpfung, welche durch die untersuchten Maschinendaten nicht zu erklären ist. Dieser Verlauf ist laut [28] auch widersprüchlich zu den Annahmen der Rayleigh-Dämpfung. Zur Beschreibung der zunehmenden Dämpfung im niedrigen Frequenzbereich wird die Nullpunkthypothese aufgestellt. Diese besagt, dass der Grenzwert von η mit sinkender Frequenz im Ursprung liegt. Die Prüfung bei 0 Hz entspricht einem statischen Versuch, wodurch wiederum keine Dämpfung bestimmt werden kann. Abhängig von der Probendicke erfolgt die Zunahme von η über unterschiedliche Frequenzbereiche, anschließend ist ein konstanter Verlauf der Messung zu beobachten. Die Ergebnisse weisen darauf hin, dass allgemein die Versuchsdurchführungen der DMA für Proben dieser Steifigkeit mit geringer Dämpfung eine Herausforderung darstellen. Speziell bei den St4-Proben treten mehrere Unregelmäßigkeiten auf. Allgemein zeigen die Proben mit einer Dicke von 0,8 mm sehr konsistente Messergebnisse und werden daher zu diesem Zeitpunkt als realistischer eingeschätzt. Die Annahme lässt sich durch die Übereinstimmung des Speichermoduls von statischen und dynamischen Versuchen, dem glatten Messverlauf über den Frequenzbereich und der extrem geringen Streuung der Versuchsergebnisse begründen. Für eine abschließende Beurteilung werden die Messergebnisse beider Probendicken für den Vergleich mit den anderen Versuchsmethoden mit aufgenommen.

3.3.2 Ausschwingversuche

In Kapitel 3.2 wurde die Ermittlung der Dämpfungseigenschaften durch freie Ausschwingversuche dargestellt. Hierbei wurden Balkenproben initial angeregt und das freie Ausschwingverhalten aufgezeichnet. Durch das Abklingverhalten wurde der Verlustfaktor η über der Probengeschwindigkeit v ermittelt. Dabei zeigten die durchgeführten Ausschwingversuche einen Einfluss der Probengeschwindigkeit auf η . Dieser Einfluss wird der Luftreibung zugeschrieben. Mit abnehmender Probengeschwindigkeit wird dieser Einfluss kleiner.

Anhand der Versuchsaufzeichnung wird eine Geschwindigkeitsgrenze ermittelt, ab der η unabhängig von v ist. Für diesen Bereich wird ein aggregierter Wert für η gebildet. Die in Kapitel 3.2.4 durchgeführte Validierung des Versuchsaufbaus zeigte eine sehr gute Übereinstimmung unterschiedlicher Messreihen. Hierbei führte die Untersuchung unterschiedlicher Probengeometrien zu ähnlichen Kennwerten.

3.3.3 Vergleich der unterschiedlichen Versuchsmethoden

In diesem Abschnitt werden die unterschiedlichen Versuchsmethoden und die jeweils ermittelten Kennwerte verglichen. Dabei ist zu beachten, dass die Versuchsmethoden sich erheblich voneinander unterscheiden und daher müssen zunächst Möglichkeiten diskutiert werden, wie ein Vergleich ermöglicht werden kann. Die Ausschwingversuche sind freie Schwingversuche, die maßgeblich in ihrer ersten Eigenfrequenz schwingen. Das Abklingverhalten der Schwingungen dient als Maß der Dämpfung. Somit nimmt durch das Ausschwingen kontinuierlich die Beanspruchung der Proben ab. Ergebnis der Ausschwingversuche ist ein einzelner Kennwert für die Dämpfung. Wie in Kapitel 2.3.3 dargestellt, werden bei Untersuchungen von schwingenden Balkenproben die Ergebnisse für die Dämpfung der jeweiligen Eigenfrequenz zugeordnet. Dieses Vorgehen wird für die weitere Analyse und den Vergleich übernommen. Im Gegensatz dazu wird bei DMA-Versuchen das dynamische Verhalten basierend auf erzwungenen Schwingungen beurteilt. Die Beanspruchung der Probe wird gezielt vorgegeben und über einen definierten Frequenzbereich untersucht. Somit liefert die DMA Dämpfungswerte in Abhängigkeit der untersuchten Frequenz und Belastung. Für den Vergleich beider Versuchsmethoden können daher die Ergebnisse der DMA bei den entsprechenden Frequenzen verwendet werden.

Für den Vergleich beider Versuchsmethoden werden für die Ausschwingversuche die Ergebnisse der Versuchsreihen S1 und S3 herangezogen. Diese werden auf eine erste Eigenfrequenz von 25 Hz ausgelegt und experimentell liegt diese bei etwa 24 Hz. Demzufolge werden für die DMA Versuche ebenfalls Ergebnisse in einem Bereich um 24 Hz ausgewählt. Um einen Vergleichswert für die Frequenzmessung der DMA zu erhalten, werden die Einzelergebnisse über einen Frequenzbereich von 22 Hz bis 26 Hz gemittelt. Dies ist für die DMA unter Zugbelastung in Abbildung 3.2 und die 3PB-DMA der St8-Proben aus Abbildung 3.7 möglich. Wie die Untersuchungen in Kapitel 3.1.2 gezeigt haben, zeigen die St4-Proben bei etwa 24 Hz eine Eigenfrequenz. Diese hat einen Ausschlag des η -Wertes der Messung zur Folge. Daher ist eine Mittelung der Dämpfung über $f = 24$ Hz nicht zielführend und die St4-Proben werden über den Frequenzbereich direkt vor der Eigenfrequenz (20 Hz – 22 Hz) gemittelt. Zum Vergleich der ermittelten Kennwerte werden in Abbildung 3.23 alle Ergebnisse dargestellt.

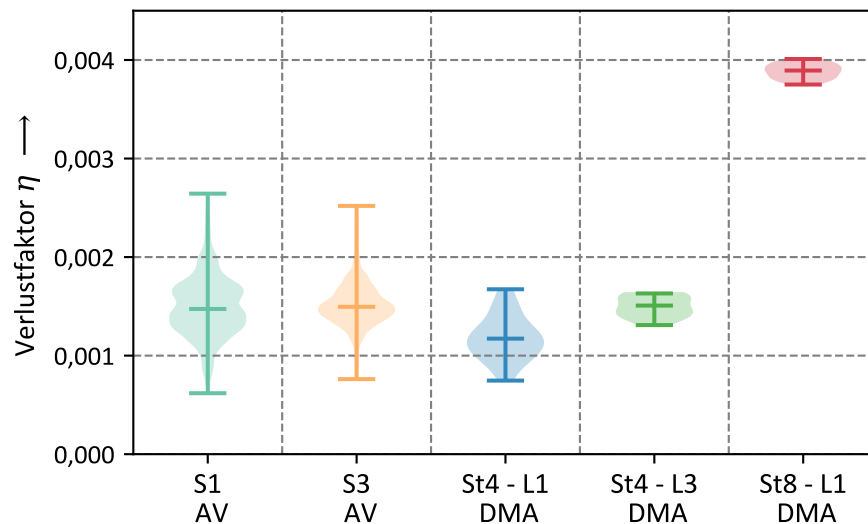


Abbildung 3.23: Vergleich der unterschiedlichen Versuchsmethoden zur Ermittlung des Verlustfaktors η . Ergebnisdarstellung der Ausschwingversuche (AV) und der DMA mittels 3PB.

Abbildung 3.23 zeigt eine sehr gute Übereinstimmung der Ergebnisse der Ausschwingversuche mit den DMA an den St4 Proben. Hierbei kommt es nur zu geringen Unterschieden im ermittelten Median. Die Ergebnisse der S1- und S3-Versuchsreihen zeigen dabei eine sehr gute Übereinstimmung, wie auch schon bei der Validierung. Dabei werden in den Versuchsreihen unterschiedliche Probengeometrien untersucht. Allgemein zeigen die Ausschwingversuche einen größeren Ergebnisbereich für die jeweiligen Versuche als die der DMA. Dies führt zu einer höheren Standardabweichung, die in Tabelle 3.9 dargestellt ist. Die unterschiedlichen Belastungen der St4-Proben zeigen nur einen geringen Einfluss auf das Ergebnis. Für beide Belastungen kommt es zu einer sehr guten Übereinstimmung der Ergebnisse mit den Resultaten von S1 und S3. Das Ergebnis der St8-Proben, ebenfalls gemessen an Maschine TA, liegen oberhalb der Ergebnisse der Ausschwingversuche. Dabei liegt der Median etwa doppelt so hoch wie bei den Vergleichsmessungen von S1, S3 und St4. Dies ist im Vergleich zu den Referenzen aus [25, 26] eine geringe Abweichung des Kennwertes. Zu einer noch größeren Abweichung kommt es bei den Ergebnissen der DMA unter Zugbelastung an Maschine Ga^A. Diese Ergebnisse sind lediglich in Tabelle 3.9 dargestellt, da ihr Median deutlich oberhalb aller weiteren Messungen liegt und den Vergleich in Abbildung 3.23 verzerren würde. Zur weiteren Beurteilung der Ergebnisse werden in Tabelle 3.9 neben dem Resultat für η die Ergebnisse der jeweiligen Speichermoduln mit aufgenommen.

Die Zahlenwerte in Tabelle 3.9 belegen die sehr gute Übereinstimmung von η der Versuchsreihen S1 und S3 mit den Versuchen an St4. Ebenfalls in Tabelle 3.9 dargestellt ist der Speichermodul, welcher bei der jeweiligen Versuchsreihe ermittelt wird. Bei dem

Tabelle 3.9: Ergebniszusammenfassung der Ausschwingversuche und der DMA, Darstellung des Verlustfaktors η sowie des Speichermoduls E' in Abhängigkeit der jeweiligen Probengeometrie, Belastung und Prüffrequenz.

AV	η -	E' in MPa	f_1 in Hz	DMA	η -	E' in MPa	f in Hz
S1	0,00147 ($\pm 2,88 \cdot 10^{-4}$)	183.002 (± 5.573)	23,67 ($\pm 0,32$)	St4 - L1	0,00117 ($\pm 2,22 \cdot 10^{-4}$)	194.500 (± 2.073)	20-22 -
	-	-	-	St4 - L3	0,00151 ($\pm 1,01 \cdot 10^{-4}$)	201.000 (± 2.161)	20-22 -
	-	-	-				
S3	0,00150 ($\pm 2,02 \cdot 10^{-4}$)	198.842 (± 4.200)	24,35 ($\pm 0,17$)	St8 - L1	0,00384 ($\pm 7,27 \cdot 10^{-5}$)	207.000 (± 1.971)	22-26 -
-	-	-	-	St05 (Ga ^A)	0,00924 ($\pm 2,70 \cdot 10^{-4}$)	185.074 (± 556)	22-26 -

Vergleich der Steifigkeiten kommt es zu der besten Übereinstimmung zwischen S3 und den Versuchen an St4. Hierbei werden kaum Unterschiede in den Steifigkeiten ermittelt. Dabei ist zu beachten, dass S3 Proben der Dicke 0,8 mm, während bei St4 Proben mit einer Dicke von 0,4 mm geprüft werden. Beide Prüfmethode ermitteln für die dickeren Proben einen leicht höheren Speichermodul im Vergleich zu den dünneren Proben. Dabei ist zu erwähnen, dass für die Ausschwingversuche die Geometrie der Proben von S3 näher an den Empfehlungen der Norm [100] liegen.

Nach der Analyse der DMA in Kapitel 3.1.2 werden die Ergebnisse der St8-Proben als realistischer eingestuft. Der Vergleich mit den Ausschwingversuchen zeigt hingegen eine deutlich bessere Übereinstimmung mit den St4-Proben. Obwohl diese bei der Untersuchung in Kapitel 3.1.2 einige Herausforderungen für den Messaufbau zeigen. Die Dämpfung, bestimmt durch DMA mittels Zugbelastung, liegen deutlich oberhalb der anderen ermittelten Kennwerte. Hier liegt fast eine Größenordnung zwischen den Ergebnissen gemessen an Ga^A im Vergleich zu den Ausschwingversuchen oder der Prüfserie St4. Sowohl der Verlauf in Abbildung 3.2 als auch der Vergleich zu den anderen Versuchsaufbauten führt dazu, dass die Ergebnisse von η als unrealistisch eingestuft werden. Die sehr gute Übereinstimmung der Versuche an St4 mit den Ausschwingversuchen S1 und S3 belegt, dass durch die ausgewählte Prüfmethode ein Kennwert unabhängig von der Geometrie ermittelt werden kann. Sowohl die ermittelte Dämpfung als auch die gemessenen Steifigkeiten zeigen trotz unterschiedlicher Geometrien sehr gute Übereinstimmungen. Für die weiteren Untersuchungen an FKV werden daher alle Versuchsmethoden weiter berücksichtigt. Die Ausschwingversuche zeigen die zuverlässigsten Ergebnisse. Daher werden diese Versuche für die weiteren Untersuchungen als Referenz herangezogen.

4 Dynamische Untersuchungen von Faser-Duroplast-Verbunden

Ziel des Kapitels ist es das dynamische Werkstoffverhalten von kohlenstofffaserverstärkten Epoxidharzverbunden zu ermitteln. Hierzu ist es notwendig unterschiedliche Faserorientierungen des Verbundes zu untersuchen. Zu besseren Einordnung der Ergebnisse werden zusätzlich Untersuchungen an unverstärkten Kunststoffproben durchgeführt. Für die Untersuchungen werden die in Kapitel 3 vorgestellten Versuchsmethoden verwendet. Es wurde gezeigt, dass durch unterschiedliche Versuchsmethoden eine Ermittlung des Verlustfaktors von isotropem Stahl möglich ist. Inwieweit die Versuchsmethoden auf anisotrope FKV übertragen werden können, wird in diesem Abschnitt untersucht. Dazu werden alle in Kapitel 3 vorgestellten Versuche an FKV-Proben angewendet. Zudem zeigen Kunststoffe eine starke Abhängigkeit ihres Werkstoffverhalten von der Temperatur, welche ebenfalls in diesem Kapitel untersucht wird.

4.1 Probekörperherstellung, Qualitätssicherung und mechanische Kennwerte

Ein Großteil der in Kapitel 2.3 dargestellten experimentellen Untersuchungen basiert auf FKV mit einer EP-Matrix. Es existiert eine Vielzahl an wissenschaftlichen Untersuchungen zu dieser Matrix. Zudem wird der Einfluss der Verstärkungsfasern einschlägig als sehr gering eingestuft (vgl. Kapitel 2.3.3). Für die dynamischen Versuche dieser Arbeit wird ein kohlenstofffaserverstärkter Epoxidharzverbund (Cf-EP) untersucht. Die Proben werden dabei aus einem Prepreg-Material mit unidirektionaler Faserverstärkung hergestellt. Verwendet wird das Prepreg mit der Bezeichnung *Torayca T700S-DT120-150* vom Hersteller *Delta-Preg*. Die Einzellagendicke (d_1) beträgt dabei laut Herstellerdatenblatt 0,15 mm und die Proben werden in einem Autoklavprozess hergestellt. Weitere Kennwerte des Materials sind im Datenblatt des Herstellers zu finden [102, 103].

Zur Charakterisierung des Materials werden zunächst quasistatische Zugversuche nach [96] durchgeführt. Bei den Zugversuchen werden Proben mit einer Faserorientierung von 0° und 90° geprüft. Die hierbei ermittelten Steifigkeitskennwerte sind in Tabelle 4.1 zusammengefasst. Diese werden als Referenz für die dynamisch ermittelten Kennwerte herangezogen.

Tabelle 4.1: Nach [96] ermittelter Elastizitätsmodul der Cf-EP Proben.

α	E in MPa
0°	122.000 (± 4.920)
90°	7.620 (± 243)

Für die dynamischen Untersuchungen des Materials sind unterschiedliche Versuche vorgesehen, welche in Kapitel 3 vorgestellt werden. Je nach Versuch werden die entsprechenden Normen als Orientierung für die Probenherstellung gewählt. Dabei stellt jeder Versuch unterschiedliche Anforderungen an die Probengeometrie. Um eine Vergleichbarkeit der Versuche untereinander zu gewährleisten wird versucht, soweit dies möglich ist, Proben gleicher Dicke zu untersuchen. Für die DMA mittels Zugversuch wird die Probengeometrie an [96] angelehnt. Hierbei wird die Schlankheit der Proben entsprechend der DIN-Norm bestimmt. Bedingt durch die maximale Prüfkraft der Maschine werden die Proben so dünn wie möglich gestaltet. Ebenfalls wird die Schlankheit der Proben aus [99] für die DMA mittels 3PB übernommen. Hierbei wird zusätzlich die Probenbreite variiert, um unterschiedlich dicke Proben bestmöglich auf den Kraftbereich der Prüfmaschine anzupassen. Die Probengeometrie für die freien Ausschwingversuche wird aus [100] übernommen. Die Probendicke wird hierbei gleich zu den Untersuchungen der DMA 3PB gehalten, wodurch die Vergleichbarkeit beider Kennwerte vereinfacht wird.

Für eine vollständige Charakterisierung der UD-Einzelschicht sind die Verlustfaktoren $\eta_{||}$, $\eta_{\perp}$ und $\eta_{||\perp}$ notwendig. Daher werden Proben mit einer Faserorientierung von 0°, 90° und $\pm 45^\circ$ untersucht. Trotz unterschiedlicher Faserorientierungen und folglich unterschiedlicher Steifigkeiten werden für die jeweiligen Versuche gleiche Probengeometrien verwendet. Die Untersuchungen in Abbildung 3.7 haben bereits gezeigt, dass bei isotropen Stahlproben die Geometrie einen Einfluss auf das Ergebnis haben kann. Für die Faserorientierungen 0° und 90° können Proben unterschiedlicher Probendicke mit einer Differenz von jeweils 0,15 mm hergestellt werden. Die unidirektionale Faserorientierung ermöglicht eine beliebige Anzahl von Einzellagen. Die Herstellungen der $\pm 45^\circ$ -Proben ist hingegen an weitere Randbedingungen geknüpft. In [104] wird für die Zugprüfung von Proben mit einer $\pm 45^\circ$ -Faserorientierung ein mittensymmetrischer Lagenaufbau vorgeschlagen. Dieser ist zwingend notwendig, da es ansonsten zu Verzug und somit einem unebenen Laminat bei der Fertigung kommt. Ein $\pm 45^\circ$ -Lagenpaar besteht aus zwei einzelnen Lagen. Daher ergibt sich eine minimale Anzahl von vier Lagen für einen mittensymmetrischen $\pm 45^\circ$ -Aufbau.

Um für die DMA unter Zugbelastung Proben mit einer möglichst geringen Dicke herstellen zu können, werden für die Versuche Platten aus vier Lagen hergestellt. Dadurch können Proben mit einer 0°, 90°- und $\pm 45^\circ$ -Faserorientierung bei gleicher Probendicke

untersucht werden. Die reale Probendicke liegt bei etwa 0,65 mm und somit etwas oberhalb der Angaben des Datenblattes. Aus den Platten, bestehend aus vier Lagen, werden Proben sowohl für die DMA mittels Zugbelastung als auch Proben für die DMA mit 3PB zurecht gesägt. Die exakte Angabe der Probengeometrie erfolgt in den jeweiligen Abschnitten der Untersuchungen.

Zur weiteren Untersuchung der DMA mittels 3PB sind Proben mit einer höheren Biegesteifigkeit notwendig. Daher werden Platten aus sechs Einzellagen hergestellt. Diese stellen für die Versuche an der TA den besten Kompromiss zur Untersuchung der Faserorientierung 0° und 90° sowie der Einhaltung der Schlankheit der Proben aus [99]. Durch die Anzahl der Lagen ist kein mittensymmetrischer Laminataufbau mit einer $\pm 45^\circ$ -Faserorientierung möglich und diese wird nicht untersucht. Proben bestehend aus acht Lagen würden bei einer 0° -Faserorientierung die Kraftgrenzen bei den gegebenen Belastungen überschreiten. Zudem wäre die Schlankheit aus [99] nicht mehr eingehalten. Die Proben hergestellt aus sechs Lagen haben eine reale Dicke von 1,03 mm. Aus diesen Platten werden ebenfalls Proben für die freien Ausschwingversuche präpariert.

Zur Analyse der jeweiligen Platten wird der Faservolumengehalt φ bestimmt. Dieser ist ein entscheidender Faktor, neben der Verstärkungsfasern und Faserorientierung, der die Steifigkeit der Proben beeinflusst. Zur Bestimmung von φ werden Schliffbilder von unterschiedlichen Ausschnitten der Probenplatten erstellt. Diese werden durch Aufnahmen mit 200-facher Vergrößerung optisch ausgewertet. Der jeweilige Wert von φ ist in den entsprechenden Probentabellen zu finden.

4.2 Ausschwingversuche an Cf-EP

Zur Untersuchung unterschiedlicher Faserorientierungen werden in diesem Abschnitt freie Ausschwingversuche analysiert. Für die Versuche werden die Proben, dargestellt in Tabelle 4.2, verwendet. Hierbei werden Proben mit einer 0° - und 90° -Faserorientierung unter gleichen geometrischen Bedingungen untersucht. Sie haben jeweils eine Gesamtlänge von 250 mm und werden über einen Bereich von 60 mm eingespannt. Die freie Länge der Ausschwingversuche beträgt somit 190 mm.

Tabelle 4.2: Cf-EP-Proben unterschiedlicher Faserorientierung für die freien Ausschwingversuche, Probengeometrie nach [100].

Probe	d in mm	b in mm	l in mm	m in g	φ in %
$[0^\circ_6]$	1,02 ($\pm 0,02$)	15,02 ($\pm 0,02$)	249,87 ($\pm 0,01$)	5,34 ($\pm 0,05$)	48,57 ($\pm 4,11$)
$[90^\circ_6]$	1,01 ($\pm 0,01$)	15,02 ($\pm 0,01$)	250,24 ($\pm 0,03$)	5,40 ($\pm 0,02$)	48,57 ($\pm 4,11$)

Die Versuchsdurchführung wurde in Kapitel 3.2.3 vorgestellt und in Kapitel 3.2.4 validiert. Es wird dieselbe Vorgehensweise analog für FKV-Proben verwendet. Für die Untersuchung einer Faserorientierung werden jeweils fünf Proben geprüft. An jeder Probe wird der Ausschwingversuch fünfmal durchgeführt. Der durch das Ausschwingverhalten bestimmte Verlustfaktor η wird in Abbildung 4.1 für beide Faserorientierungen und in Abhängigkeit der Probengeschwindigkeit dargestellt.

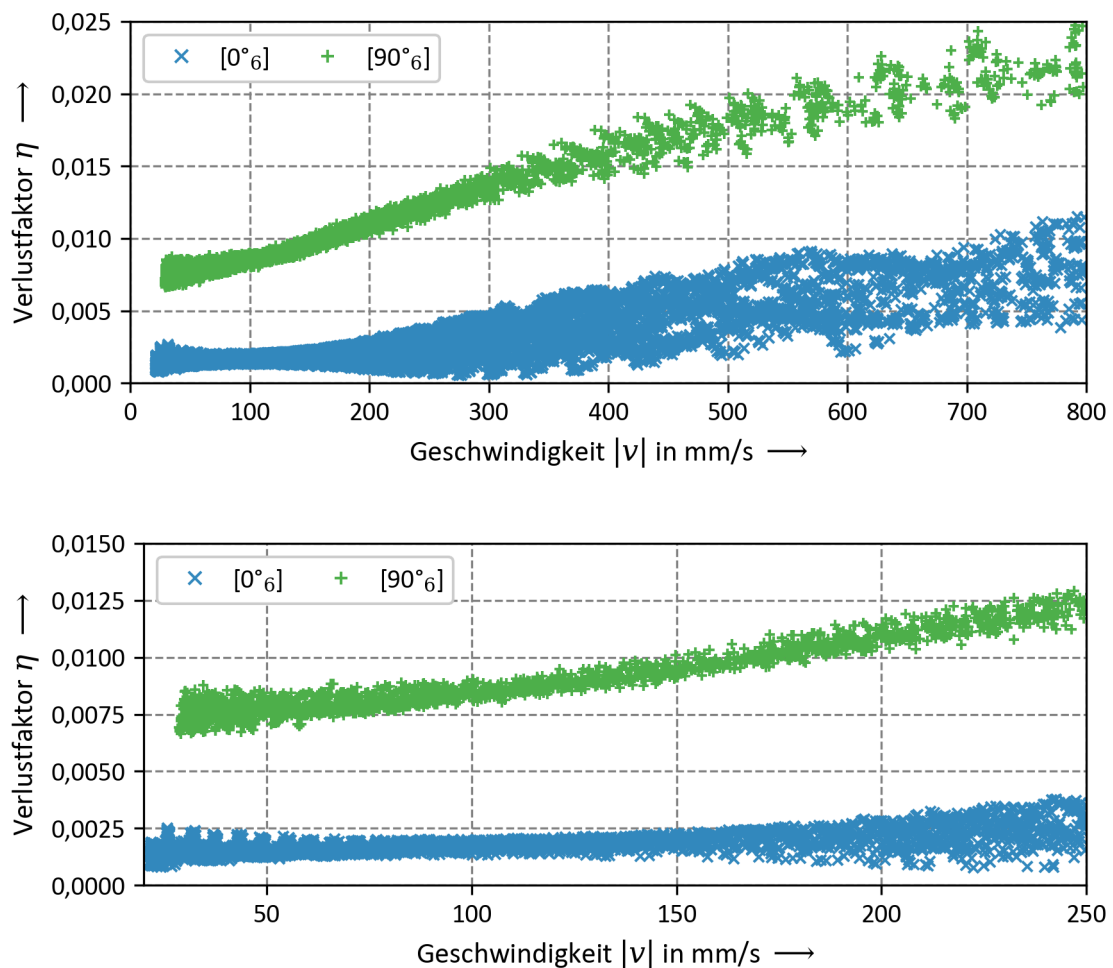


Abbildung 4.1: Vergleich der Faserorientierungen 0° und 90° . Darstellung des Verlustfaktors η über den Betrag der Probengeschwindigkeit $|v|$ bei einer Auswertbreite von $n = 8$. Gesamter Messverlauf (oben) und Vergrößerung des niedrigen Geschwindigkeitsbereichs (unten).

In Abbildung 4.1 ist ein deutlicher Unterschied zwischen den geprüften Faserorientierungen zu erkennen. Durch eine 0° -Faserorientierung entlang der Balkenachse wird eine geringere Dämpfung als bei einer Faserorientierung von 90° gemessen. Dies ist, bestätigt durch unterschiedliche Quellen und dargestellt in Kapitel 2.3.3, zu erwarten. Beide Messungen zeigen einen Einfluss der Geschwindigkeit auf η . Für beide Messungen kann ein Bereich identifiziert werden, in dem der gleitende Mittelwert von η unabhängig von der Probengeschwindigkeit ist. Unterhalb einer Geschwindigkeit von 125 mm/s ist für eine Faserori-

entierung von 0° kein Einfluss der Geschwindigkeit auf η zu erkennen. Bei 90° liegt diese Grenze bei 75 mm/s. Für diese Bereiche werden jeweils aggregierte Werte für η bestimmt. Das Ergebnis ist in Abbildung 4.2 dargestellt.

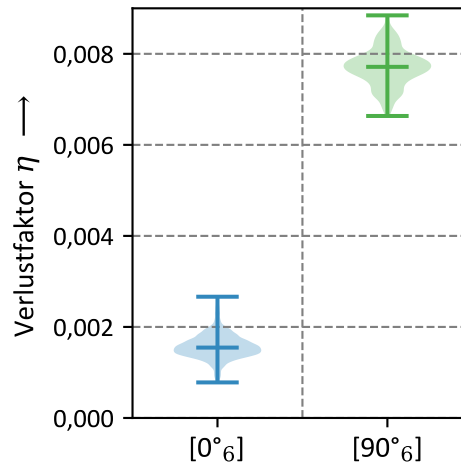


Abbildung 4.2: Vergleich von η für die $[0^\circ]_6$ - und $[90^\circ]_6$ -Proben. Ermittlung von η mit der jeweiligen Geschwindigkeitsgrenze bei $n = 8$.

Durch die Darstellung in Abbildung 4.2 wird der deutliche Unterschied von η der verschiedenen Faserorientierungen deutlich. Die jeweiligen Mediane und die entsprechende Standardabweichung sind in Tabelle 4.3 zusammengefasst. Für beide Faserorientierungen ergibt sich ein relativ weiter Ergebnisbereich. Insgesamt treten Messwerte über einen Bereich von 0,002 auf. Der Unterschied ist hierbei, dass die $[0^\circ]_6$ -Proben absolut eine geringere Streuung um den Median aufweisen. Ein Großteil der Werte konzentriert sich symmetrisch um den Median. Hingegen kommt es bei den $[90^\circ]_6$ -Proben zu einer Verteilung der Ergebnisse über den gesamten Bereich. Dies spiegelt die in Tabelle 4.3 aufgeführte Standardabweichung wider. Neben η sind in Tabelle 4.3 die durch die FFT bestimmten Eigenfrequenzen sowie die daraus ermittelten Steifigkeiten der $[0^\circ]_6$ - und $[90^\circ]_6$ -Proben aufgetragen.

Tabelle 4.3: Zusammenfassung der Ergebnisse der unterschiedlichen Faserorientierungen. Ermittlung von η für $n = 8$ und den jeweiligen Geschwindigkeitsbereich. Der Speichermodul wird aus der ermittelten f_1 sowie der Probengeometrie bestimmt.

Probe	η	f_1 in Hz	f_2 in Hz	$\hat{v}_2/\hat{v}_1$ in %	E' in MPa
$[0^\circ]_6$	0,00155 ($\pm 2,37 \cdot 10^{-4}$)	35,83 ($\pm 0,55$)	225,88 ($\pm 3,17$)	2,69 ($\pm 0,47$)	84.913 (± 2.420)
$[90^\circ]_6$	0,00771 ($\pm 3,89 \cdot 10^{-4}$)	9,16 ($\pm 0,10$)	57,61 ($\pm 0,72$)	2,66 ($\pm 0,28$)	5.828 (± 228)

Wie durch die Literaturrecherche zu erwarten ist, werden unterschiedliche Dämpfungen für die jeweiligen Faserorientierungen gemessen. Hierbei führt ein höherer Faserwinkel zu

einer höheren Dämpfung. Durch Abbildung 4.2 wird veranschaulicht und durch die Zahlenwerte in Tabelle 4.3 belegt, dass die $[90^\circ_6]$ -Proben eine höhere Standardabweichung haben. Zur Validierung des Versuchsaufbaus in Kapitel 3.2.4 wird die durch den Versuch ermittelte Steifigkeit als Plausibilitätsprüfung herangezogen. Die durch den Ausschwingversuch ermittelten Steifigkeiten der unterschiedlichen Faserorientierungen sind ebenfalls in Tabelle 4.3 aufgeführt. Die im statischen Zugversuch ermittelten Kennwerte sind zudem in Tabelle 4.1 dargestellt. Hierbei ist zu erwähnen, dass die durch den Ausschwingversuch ermittelten Steifigkeiten unterhalb der statisch ermittelten Steifigkeit liegen. Diese Beobachtung ist bereits bei unterschiedlichen Stahlproben gemacht worden, wobei hierbei die Abweichung geringer war. Die Steifigkeit wird in Kapitel 4.5.1 weiter diskutiert. Die Prüfung gleicher Probengeometrien hat bei unterschiedlichen Faserorientierungen und dadurch unterschiedlicher Steifigkeit auch verschiedene Eigenfrequenzen zur Folge. Für den Vergleich der Ausschwingversuche mit weiteren Versuchsergebnissen wird η der jeweiligen ersten Eigenfrequenz zugeordnet. Abschließend ist zu erwähnen, dass das Verhältnis der Amplituden der Geschwindigkeiten ($\hat{v}_2/\hat{v}_1$) der ersten und zweiten Eigenfrequenz bei der Messung sehr gering ist. Daher kann ein Einfluss weiterer Eigenfrequenzen auf das Ergebnis als vernachlässigbar betrachtet werden.

4.3 DMA mittels Zugbelastung, Frequenzanalyse

In diesem Abschnitt werden die unterschiedlichen Faserorientierungen durch DMA mit Zugbelastung untersucht. Zur Untersuchung werden die in Kapitel 3.1.1 vorgestellten Maschinen Ga^I und Ga^A verwendet. Durch eine homogene Zugbelastung wird ermöglicht von den ermittelten Kennwerten direkt auf die Werkstoffdämpfung zu schließen. Die Validierungsversuche aus Kapitel 3.1.1 haben kein plausibles Ergebnis ergeben. Die Unstimmigkeiten der Untersuchungen werden auf die sehr hohe Steifigkeit der verwendeten Stahlproben und die bei Ga^I unzureichende Wegauslösung zurückgeführt. Die in diesem Abschnitt untersuchten Proben weisen, wie in Tabelle 4.1 dargestellt, eine deutlich niedrigere Steifigkeit auf. Für die Untersuchungen werden Proben mit der geringstmöglichen Dicke verwendet. Diese sind in Tabelle 4.4 zusammengefasst.

Tabelle 4.4: Proben unterschiedlicher Faserorientierung für die DMA-Untersuchungen durch Zugbelastung. Verhältnis von b/d der Probengeometrie orientiert an [96].

Probe	d in mm	b in mm	l in mm	φ in %
$[0^\circ_4]$	0,65 ($\pm 0,01$)	4,96 ($\pm 0,05$)	60,00	52,42 ($\pm 2,79$)
$[\pm 45^\circ]_S$	0,71 ($\pm 0,02$)	4,95 ($\pm 0,04$)	60,00	-
$[90^\circ_4]$	0,65 ($\pm 0,02$)	4,97 ($\pm 0,04$)	60,00	52,42 ($\pm 2,79$)

Zudem werden bei den $[0^\circ_4]$ -Proben mit einer weiteren, steiferen Einspannung (sE) Unter-

suchungen durchgeführt. Durch diese Einspannung werden zwei Maßnahmen umgesetzt, welche die Krafteinleitung in die Probe verbessern. Zum einen wird die Klemmfläche vergrößert und zum anderen werden die Proben zusätzlich in der Klemmung verklebt. In Abbildung 4.3 sind die Ergebnisse der durchgeführten Untersuchungen zusammengeführt. Dargestellt sind die Untersuchungen von unterschiedlichen Faserorientierungen sowie die zusätzlichen Untersuchungen mit veränderter Einspannung an beiden Prüfmaschinen. Für die jeweilige Konfiguration ist die Mediankurve dargestellt, die Standardabweichung ist als Bereich hinterlegt.

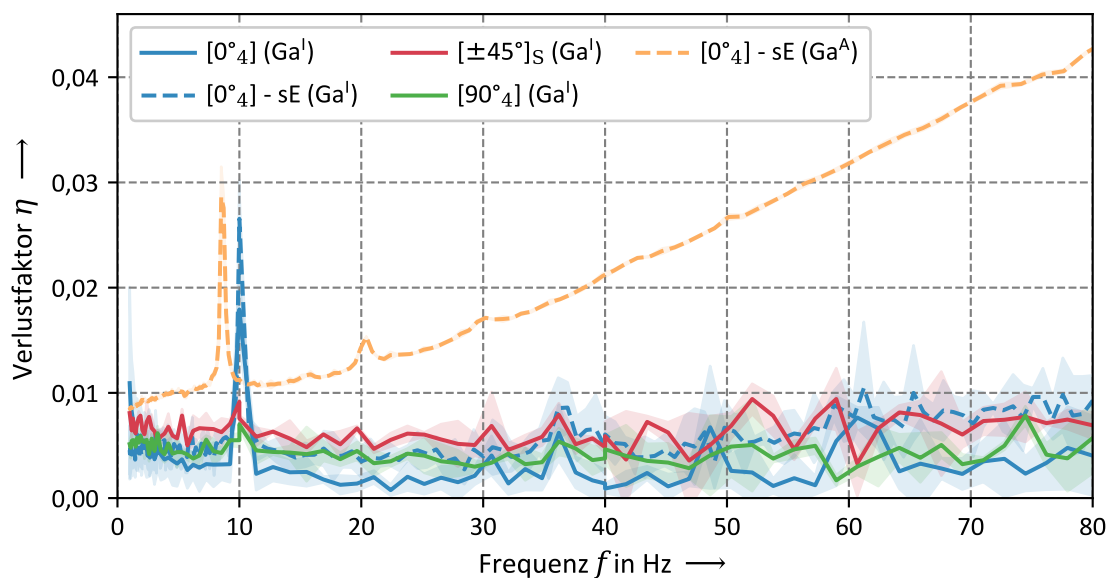


Abbildung 4.3: Verlustfaktor gemessen über der Frequenz für Faserorientierungen 0° , $\pm 45^\circ$ und 90° an Ga^I . Weitere Messung der 0° -Faserorientierung mit versteifter Einspannung an Ga^I und Ga^A .

Abbildung 4.3 zeigt den η -Verlauf über der Frequenz f . An Ga^I werden Messungen mit einem Lagenaufbau von $[0^\circ_4]$, $[\pm 45^\circ]_S$ und $[90^\circ_4]$ durchgeführt. Die Darstellung in Abbildung 4.3 zeigt, dass an Ga^I kein signifikanter Unterschied in η durch die unterschiedlichen Faserorientierungen gemessen wird. Dies widerspricht sowohl den Messungen aus Kapitel 4.2 als auch den Darstellungen aus Kapitel 2.3.3. Insgesamt ist der gesamte Messverlauf an Ga^I sehr unstat. Die steifere Einspannung zeigt keinen signifikanten Einfluss auf das Ergebnis der $[0^\circ_4]$ -Proben. Zur weiteren Analyse werden Messungen an Ga^A durchgeführt. Hierbei werden lediglich die $[0^\circ_4]$ -Proben untersucht, welche auf Grund ihrer Steifigkeit die größte Herausforderung für die Messung darstellen. Die Messung in Abbildung 4.3 zeigt an Ga^A eine deutliche Zunahme von η mit der Frequenz. Dieser Effekt ist bereits bei den Messungen in Abbildung 3.2 bei den Referenzmessungen an Stahlproben aufgetreten. Bei hohen Frequenzen liegen die Ergebnisse von Ga^A im Vergleich zu Ga^I bei deutlich höheren η -Werten.

Um die Plausibilität der Prüfung zu untersuchen, werden die im Versuch ermittelten dynamischen Steifigkeiten betrachtet. Ergänzend werden an Ga^I statische Versuche durchgeführt, anhand denen die Steifigkeit bestimmt wird. Für den Speichermodul wird eine Mittelung über den gesamten Frequenzbereich erstellt. Dies ist möglich, da über den gesamten Messbereich nur geringe Abweichungen der Steifigkeit auftreten. Die Ergebnisse der statischen Versuche sowie eine Mittelung der Speichermoduln ist in Tabelle 4.5 zusammengefasst.

Tabelle 4.5: Statisch (E) und dynamisch (E') ermittelte Steifigkeiten der Faserorientierungen 0° , $\pm 45^\circ$ und 90° .

Probe	E in MPa	E' in MPa	Prüfmaschine	Einspannung
$[0^\circ_4]$	67.670 (± 11.215)	105.405 (± 3.054)	Ga^I	-
$[0^\circ_4]$	-	93.831 (± 1.681)	Ga^I	sE
$[\pm 45^\circ]_S$	9.698 (± 413)	10.550 (± 203)	Ga^I	-
$[90^\circ_4]$	5.843 (± 492)	6.842 (± 70)	Ga^I	-
$[0^\circ_4]$	-	111.105 (± 777)	Ga^A	sE

Der Vergleich von E und E' an Ga^I zeigt deutliche Unterschiede in der gemessenen Steifigkeit. Der statisch ermittelte Elastizitätsmodul E ist deutlich niedriger als die Ergebnisse aus Tabelle 4.1. Hingegen liegt der dynamisch ermittelte Speichermodul E' nah an den Ergebnissen aus Tabelle 4.1. Die zusätzlich versteifte Einspannung zeigt bei Ga^I sogar einen negativen Einfluss auf das Ergebnis. Trotz einer Steifigkeit, die im Bereich der Erwartung liegt, zeigen die Ergebnisse für η aus Abbildung 4.3 keinen konsistenten Verlauf. Dass durch die Maschine kein Unterschied bei den unterschiedlichen Faserorientierungen gemessen werden kann, schließt diese für weitere Untersuchungen aus. Daher werden die Messungen an Ga^I für die weitere Auswertungen nicht weiter betrachtet.

E' ermittelt an Ga^A liegt nicht weit von den statischen Versuchen aus Tabelle 4.1 entfernt. Jedoch fällt bei allen Messungen an Ga^A die starke Abhängigkeit des ermittelten η von der Frequenz auf. Dies ist sowohl bei den Messungen an Stahl in Abbildung 3.2 als auch bei den Messungen an $[0^\circ_4]$ aufgefallen. Der ermittelte η an Ga^A liegt deutlich höher als η ermittelt durch die Ausschwingversuche in Tabelle 4.3. Dieser Effekt ist ebenfalls beim Vergleich unterschiedlicher Stahlproben aufgetreten (Kapitel 3.3). Daher werden auch die Messungen an Ga^A für weitere Analysen nicht weiterverwendet.

4.4 DMA mittels 3PB, Frequenzanalyse

Zur weiteren Untersuchung des Materials werden DMA mittels 3PB an der TA-Maschine durchgeführt. Bei den Untersuchungen wird der Einfluss der Faserorientierung, der Be-

lastung, der Geometrie sowie der Frequenz untersucht. Alle Versuche werden mit den in Tabelle 3.3 definierten Lasten durchgeführt. Zusätzlich werden in diesem Abschnitt auch Proben ohne Faserverstärkung (Tabelle 4.6) untersucht.

4.4.1 Frequenzanalyse der EP-Matrix

Begonnen werden die Analysen der 3PB-DMA mit den Untersuchungen an der unverstärkten Epoxidharz-Matrix. Durch die Prüfung der unverstärkten Matrix können Eigenschaften identifiziert werden, die sich auf die Eigenschaften des Verbundes auswirken. Bei den EP-Proben ist es nicht möglich die Schlankheit der Biegeproben aus [99] einzuhalten. Zum einen ist eine Herstellung der entsprechenden Probendicke aufgrund des spröden Materialverhaltens nur mit sehr hohem Aufwand zu realisieren. Zum anderen würden sehr dünne EP-Proben aufgrund ihrer niedrigen Biegesteifigkeit zu Problemen bei der DMA-Messung führen. Daher wird im Fall der EP-Proben die Probendicke auf den Kraftbereich der TA angepasst. Zudem können dadurch die gleichen Belastungen wie auch bei den Cf-EP-Proben untersucht werden. Hergestellt werden die Proben aus dem Epoxidharzsystem *RI004N2* von *Delta-Preg* [105]. Das EP-Harz ist ähnlich zu dem im Prepreg verwendeten *DT120* und ist als Shim für den Autoklavprozess mit dem Prepreg freigegeben. Zur Analyse der EP-Proben und Bestimmung des Porengehalts wird deren Querschnitt mittels Computertomographie (CT) untersucht. Hierbei wird pro Probe ein Volumen von 40 mm^3 mit einer Auflösung von $6,5 \mu\text{m}$ untersucht. Geprüft werden drei Proben und das Volumen der ermittelten Poren wird auf das jeweilige Testvolumen bezogen. Der hierbei ermittelte Porengehalt ϕ sowie die Geometrie der Proben ist in Tabelle 4.6 angegeben.

Tabelle 4.6: Geometrie und Porengehalt der EP Proben für die 3PB-DMA.

d in mm	b in mm	l in mm	ϕ in %
4,65 ($\pm 0,11$)	9,98 ($\pm 0,03$)	60,00	0,51 ($\pm 0,05$)

Bei der dynamischen Untersuchung werden die in Tabelle 3.3 definierten Lasten über einen Frequenzbereich von 1 Hz bis 40 Hz geprüft. Die Untersuchungen werden bei Raumtemperatur durchgeführt. In einer Versuchsreihe werden jeweils sechs Proben geprüft. Die Ergebnisse sind in Abbildung 4.4 zusammengefasst. Dargestellt ist hierbei jeweils die Mediankurve der Versuchsreihe, die Standardabweichung ist schattiert als Bereich hinterlegt.

In Abbildung 4.4 ist η über der Prüffrequenz von 1 Hz bis 40 Hz aufgetragen. Bei niedrigen Frequenzen sind bei allen Belastungen große Standardabweichungen zu erkennen. Ein ähnlicher Effekt ist bereits bei den Messungen an Stahlproben in Abbildung 3.7 aufgetreten. Daher werden die Messwerte bei niedrigen Frequenzen nicht weiter berücksichtigt. Eine Abhängigkeit von η von der Belastung kann durch die Versuche an EP-Proben nicht

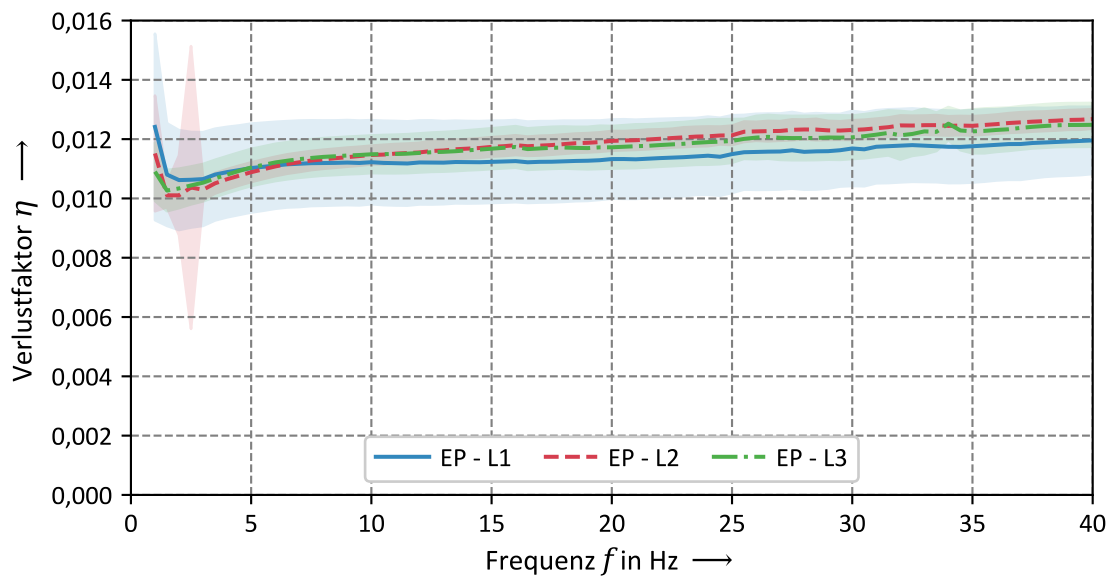


Abbildung 4.4: 3PB-DMA der EP-Proben bei den Belastungen L1, L2 und L3. Darstellung des Verlustfaktors über der Frequenz.

festgestellt werden. Die in Abbildung 4.4 geringe Abweichung der Belastung L1 liegt über den Messbereich im Bereich der Standardabweichung. Allgemein zeigen die Proben bei allen Belastungen eine kontinuierliche Zunahme von η mit der Frequenz. Diese Zunahme ist über den gesamten Prüfbereich gering. Des Weiteren werden zur Plausibilitätsprüfung die Steifigkeiten der EP-Proben untersucht. Zur Ermittlung von E werden an der TA statische Versuche durchgeführt. Der Speichermodul E' wird für die jeweilige Belastung über den gesamten Frequenzbereich gemittelt. Die ermittelten Kennwerte sind in Tabelle 4.7 zusammengefasst.

Tabelle 4.7: Zusammenfassung des statisch ermittelten Elastizitätsmoduls sowie des dynamisch ermittelten Speichermoduls der EP-Proben.

E in MPa	E' in MPa	Belastung
-	3.186 (± 90)	L1
3.080 (± 79)	3.332 (± 70)	L2
-	3.239 (± 43)	L3

Das Datenblatt des Herstellers [102] macht für das verwendete Harzsystem keine speziellen Angaben zur Steifigkeit. In der Regel liegt diese bei warm härtenden Epoxidharzen bei etwa 3400 MPa [14]. Die Untersuchungen aus Tabelle 4.7 ergeben einen geringen Unterschied zwischen der statisch und dynamisch ermittelten Steifigkeit. Beide liegen dennoch im Bereich der Erwartungen. Für die unterschiedlichen Belastungen werden keine signifikanten Unterschiede in E' festgestellt.

4.4.2 Frequenzanalyse der Faserorientierung von Cf-EP

Bei der Frequenzuntersuchung der kohlenstofffaserverstärkten Epoxidharz-Verbunde werden zwei unterschiedliche Probendicken untersucht. Zusammengefasst sind die Proben der Untersuchungen in Tabelle 4.8 und 4.10 dargestellt. Des Weiteren wird der Einfluss der Faserorientierung auf η analysiert. Zunächst werden die Untersuchungen der Proben bestehend aus vier Lagen (Tabelle 4.8) vorgestellt.

Tabelle 4.8: Cf-EP-Proben mit einer 0° -, $\pm 45^\circ$ - und 90° -Faserorientierung für die DMA-Untersuchungen mittels 3PB. Verhältnis von l/d und b/d der Probengeometrie orientiert an [99].

Probe	d in mm	b in mm	l in mm	φ in %
$[0^\circ_4]$	0,65 ($\pm 0,01$)	9,97 ($\pm 0,01$)	60,00	52,42 ($\pm 2,79$)
$[\pm 45^\circ]_S$	0,73 ($\pm 0,02$)	9,97 ($\pm 0,01$)	60,00	-
$[90^\circ_4]$	0,66 ($\pm 0,01$)	9,99 ($\pm 0,01$)	60,00	52,42 ($\pm 2,79$)

Für Proben mit vier Lagen sind Untersuchungen von drei unterschiedlichen Faserorientierungen möglich. Es werden Proben mit einer 0° - und einer 90° -Faserorientierung untersucht. Zudem wird ein mittensymmetrischer $\pm 45^\circ$ -Lagenaufbau untersucht. Geprüft werden die Proben über einen Frequenzbereich von 1 Hz bis 20 Hz und die Ergebnisse sind in Abbildung 4.5 dargestellt. Für die Untersuchungen werden jeweils acht Proben geprüft. Dargestellt ist jeweils die Mediankurve sowie die Standardabweichung als Bereich hinterlegt.

In Abbildung 4.5 sind die Untersuchungen der unterschiedlichen Faserorientierungen und Belastungen zusammengefasst. Hierbei sind zwei Punkte auffällig. Zum einen zeigen die Proben mit einer Faserorientierung von 90° und $\pm 45^\circ$ einen wellenförmigen Messverlauf von η über der Frequenz. Des Weiteren sind die Messungen nur bis 11 Hz bzw. 15 Hz dargestellt. Grund für die Analyse über einen geringeren Frequenzbereich sind die jeweiligen Eigenfrequenzen des Versuchsaufbaus. Sowohl die $[90^\circ_4]$ - als auch die $[\pm 45^\circ]_S$ -Proben durchlaufen im Prüfbereich ihre erste Eigenfrequenz. Wie in Kapitel 3.1.2 dargestellt ist die Eigenfrequenz des Prüfaufbaus durch eine auf Null absinkende dynamische Regelprüfkraft F_d^{drv} gekennzeichnet. Anschließend folgt eine stark ansteigende F_d^{drv} . Die Kurven von $[90^\circ_4]$ und $[\pm 45^\circ]_S$ werden jeweils nur bis zu dem Punkte dargestellt, an dem F_d^{drv} ihren anfänglichen Wert erreicht. Im Gegensatz dazu liegt die erste Eigenfrequenz für die Messung der $[0^\circ_4]$ -Proben nicht im Bereich bis 20 Hz. Der Messverlauf für η der $[90^\circ_4]$ - und $[\pm 45^\circ]_S$ -Proben hängt nicht mit der jeweiligen Eigenfrequenz zusammen. Das Maximum und Minimum der Wellenform, bei etwa 6,5 Hz und 10 Hz, der jeweiligen Messung liegt unabhängig von der Faserorientierung oder Belastung bei der gleichen Frequenz. Bereits beim Einrichten der Maschine ist die Wellenform von η bei unterschiedlichen Pro-

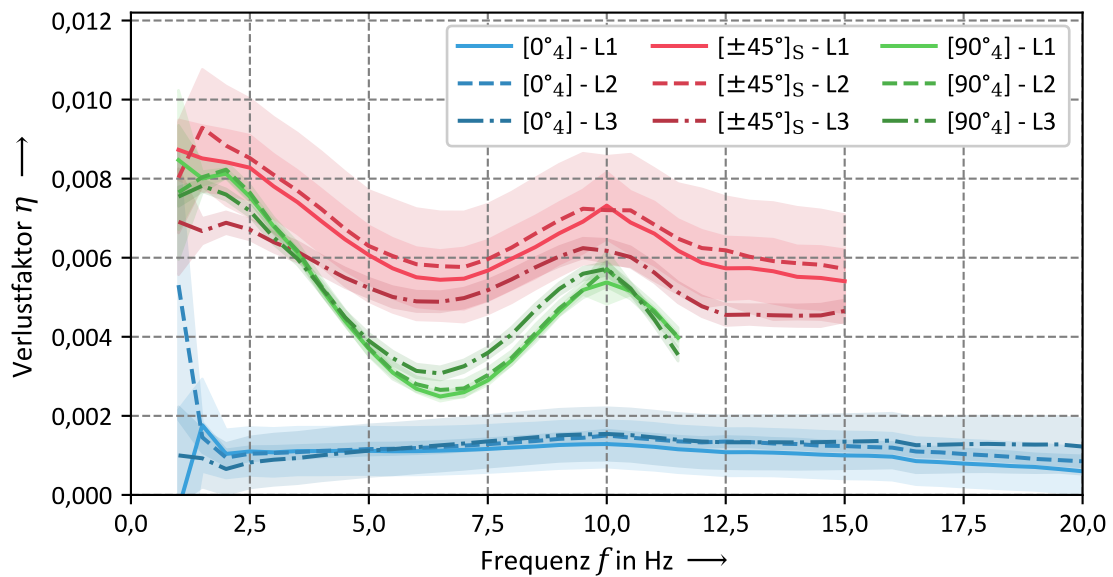


Abbildung 4.5: Untersuchung der 0°-, $\pm 45^\circ$ - und 90°-Faserorientierung mittels 3PB-DMA bei den Belastungen L1, L2, und L3. Darstellung des Verlustfaktors über der Frequenz.

ben aufgetreten. Auch hierbei lag unabhängig vom Material das Maximum und Minimum bei den gleichen Frequenzen. Durch eine erneute Phasenkalibrierung vor jeder Messreihe kann die Amplitude minimiert aber nicht eliminiert werden. Eine mögliche Ursache für den wellenförmigen Messverlauf ist die niedrige Biegesteifigkeit der Proben. Bei gleicher Geometrie und einer niedrigeren Steifigkeit ist die Amplitude größer. Im Gegensatz zu den faserverstärkten Proben kam es bei den unverstärkten EP-Proben zu keinem wellenförmigen Messverlauf. Diese haben auf Grund ihrer Geometrie eine höhere Biegesteifigkeit. Der Verlauf wird nicht durch das Matrixmaterial ausgelöst, sondern ist ein Messfehler der Prüfmaschine und tritt bei sehr niedrigen Biegesteifigkeiten auf. Für eine weitere Auswertung der beiden Faserorientierungen wird zusätzlich η bei einer definierten Frequenz betrachtet. Hierfür wird der Wendepunkt der wellenförmigen Messkurve ausgewählt, welcher bei etwa $f = 8,25 \text{ Hz}$ liegt. Die Frequenzmessung wird ab 1 Hz in Frequenzschritten von 0,5 Hz durchgeführt. Daher liegen diskrete Messwerte für die Frequenzen 8 Hz und 8,5 Hz vor. In Abbildung 4.6 werden alle Messwerte für diese Frequenzen zusammengefasst und deren Verteilung dargestellt.

In Abbildung 4.5 und 4.6 ist ein deutlicher Unterschied in η für die unterschiedlichen Faserorientierungen zu erkennen. Erwartungsgemäß führt eine 0°-Faserorientierung zur niedrigsten Dämpfung und eine $\pm 45^\circ$ -Faserorientierung zur höchsten Dämpfung der Versuchsreihe. Bei den $[0^\circ_4]$ -Proben wird kein signifikanter Einfluss der Belastung gemessen. Wie bereits bei den EP-Proben weicht der erste Messwert vom Gesamtverlauf ab. Insgesamt kann über den Messbereich kein Einfluss der Frequenz auf η festgestellt werden.

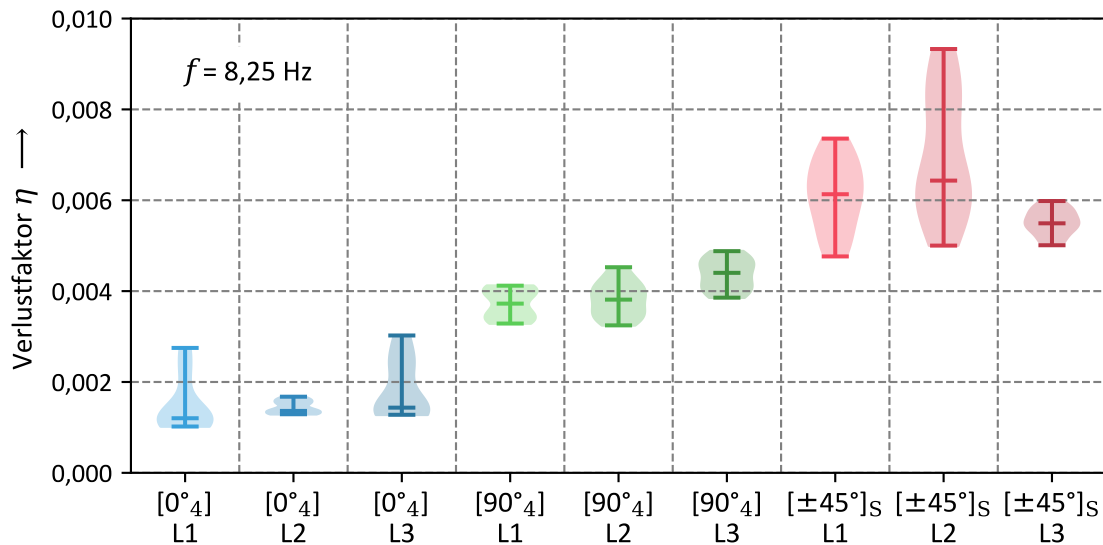


Abbildung 4.6: Verlustfaktor der Cf-EP-Proben mit einer 0°, ±45°- und 90°-Faserorientierung. Darstellung der Belastungen L1, L2 und L3 bei $f = 8,25$ Hz.

Durch Abbildung 4.6 wird verdeutlicht, dass einzelne Proben der Messung stark abweichen. Daher folgt in Abbildung 4.6 eine unsymmetrische Verteilung und in Abbildung 4.5 eine hohe Standardabweichung. Die Darstellung der [90°]4-Proben in Abbildung 4.6 lässt einen geringen Einfluss der Belastung vermuten. Hierbei ist jedoch zu berücksichtigen, dass dies nur ein geringer Ausschnitt des untersuchten Frequenzbereichs ist. Zudem zeigt η der 90°-Faserorientierung einen wellenförmigen Messverlauf über den Messbereich. Über den gesamten Messbereich haben die [90°]4-Proben eine sehr geringe Standardabweichung.

Die höchste Dämpfung wird bei den [±45°]s-Proben gemessen. Wie in [2] dargestellt sind zwei Hauptursachen für die Dämpfung von FKV die Schubbelastung sowie Faser-Matrix-Übergänge. Bei den [±45°]s-Proben treten durch die Biegebelastung beide Effekte verstärkt auf. Zum einen wird durch die Matrix die Schubbelastung der Biegebelastung aufgenommen. Die Zug-Druck-Spannungen resultierend aus der Biegebelastung werden durch die Einzellagen aufgenommen. Die Einzellagen haben durch ihre 45°-Faserorientierung eine Vielzahl an Faser-Matrix-Übergängen, welche einen zusätzlichen Beitrag zur Dämpfung des Verbundes liefern. Insgesamt haben sowohl die Messungen mit der L1- als auch mit der L2-Belastung eine sehr hohe Streuung. Die Messung mit der L3-Belastung zeigt wiederum eine geringere Streuung, welche im Bereich der anderen Faserorientierungen liegt. Aufgrund der allgemein hohen Streuung der [±45°]s-Proben ist keine signifikante Aussage über Unterschiede der Belastungen möglich. Des Weiteren werden für alle Faserorientierungen die Steifigkeiten bestimmt und in Tabelle 4.9 zusammengefasst.

E' zeigt über den gesamten Messbereich keinen Einfluss der Frequenz, daher werden die

Tabelle 4.9: Zusammenfassung der statisch und dynamisch ermittelten Steifigkeiten der Cf-EP-Proben unterschiedlicher Faserorientierung. E' ist mit der Belastung L3 ermittelt und über den Frequenzbereich gemittelt.

Probe	E in MPa	E' in MPa
$[0^\circ_4]$	98.943 (± 13.419)	103.000 (± 2.669)
$[\pm 45^\circ]_S$	9.698 (± 515)	9.195 (± 673)
$[90^\circ_4]$	6.681 (± 192)	6.747 (± 262)

Werte über den Bereich gemittelt. Im Gegensatz zu η kommt es bei E' zu keinem wellenförmigen Messverlauf. Auch die untersuchten Belastungen haben keinen Einfluss auf das Ergebnis und daher sind in Tabelle 4.9 die Ergebnisse für L3 zusammengefasst. Die Ergebnisse der weiteren Belastungen weichen nicht vom dargestellten Ergebnis ab. Neben den dynamischen Untersuchungen werden die Proben statisch geprüft. Die Ergebnisse der statisch ermittelten Steifigkeiten sind ebenfalls in Tabelle 4.9 dargestellt. Für alle Faserorientierungen kommt es zu einer sehr guten Übereinstimmung der statischen und dynamischen Untersuchungen. Zudem liegen die ermittelten Steifigkeiten im Bereich der Erwartungen.

Zur weiteren Untersuchung des Dämpfungsverhalten werden Frequenzuntersuchungen an Proben bestehend aus sechs Lagen durchgeführt. Diese haben daher eine größere Dicke und dementsprechend eine höhere Biegesteifigkeit als die Proben aus vier Lagen (Tabelle 4.10).

Tabelle 4.10: Cf-EP-Proben mit einer 0° - und 90° -Faserorientierung für die DMA-Untersuchungen mittels 3PB. Verhältnis von l/d und b/d der Probengeometrie orientiert an [99].

Probe	d in mm	b in mm	l in mm	φ in %
$[0^\circ_6]$	1,03 ($\pm 0,01$)	7,99 ($\pm 0,03$)	60,00	48,57 ($\pm 4,11$)
$[90^\circ_6]$	1,03 ($\pm 0,02$)	7,99 ($\pm 0,01$)	60,00	48,57 ($\pm 4,11$)

Das Ziel der Untersuchungen ist es, den wellenförmigen Messverlauf der Versuchsergebnisse der Proben mit einer 90° -Faserorientierung durch die höhere Probendicke zu reduzieren. Die Untersuchungen werden hierbei auf die Analyse der 0° - und 90° -Faserorientierung reduziert. Ein mittensymmetrischer Lagenaufbau mit einer Faserorientierung von $\pm 45^\circ$ ist durch sechs Lagen nicht möglich und ein alternierender Lageraufbau würde zu einem unebenen Laminat führen. Des Weiteren werden die Untersuchungen auf zwei dynamische Belastungen L1 und L3 reduziert. Bei den bisherigen Untersuchungen konnte kein signifikanter Einfluss der Belastung festgestellt werden. Die höhere Biegesteifigkeit der Proben ermöglicht es einen größeren Frequenzbereich zu untersuchen. In den folgenden Untersuchungen werden die $[0^\circ]_6$ -Proben bis zu einer Frequenz von 40 Hz geprüft. Trotz

der erhöhten Dicke durchlaufen die $[90^\circ]_6$ -Proben erneut eine Eigenfrequenz. Die Kurven werden daher nur bis zu einer maximalen Frequenz von ca. 18 Hz dargestellt. Zusammengefasst sind die Untersuchungen in Abbildung 4.7.

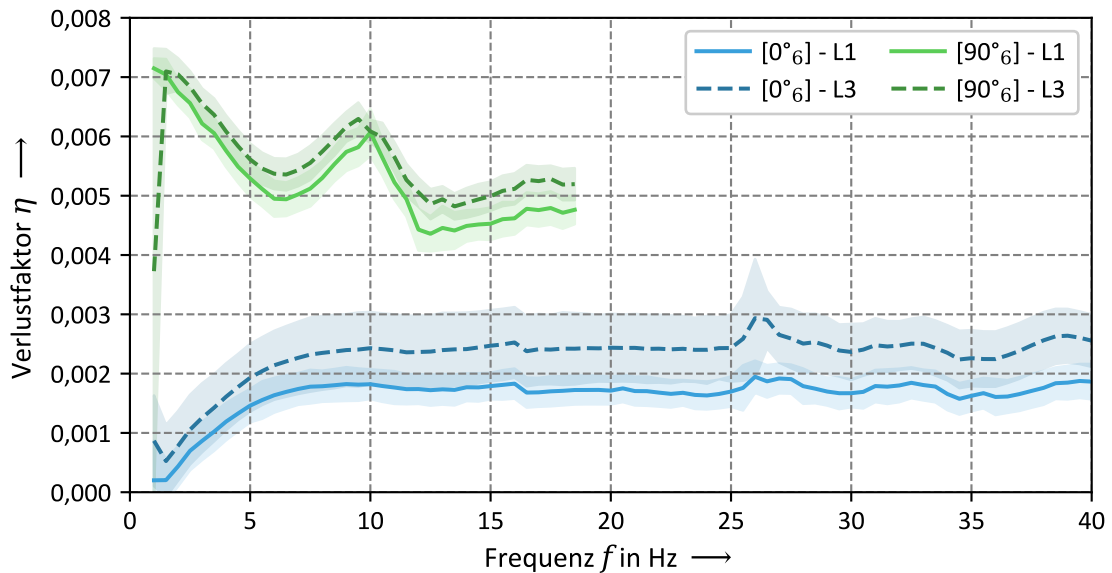


Abbildung 4.7: Untersuchung der 0° - und 90° -Faserorientierung mittels 3PB-DMA bei den Belastungen L1 und L3. Darstellung des Verlustfaktors über der Frequenz.

Die Versuchsreihe zeigt erneut einen deutlichen Unterschied von η der geprüften Faserorientierungen. Somit bestätigen die Ergebnisse die bisherigen Versuche aus Abbildung 4.5. Dennoch gibt es einige Unterschiede zwischen den Ergebnissen aus Abbildung 4.5 und den in Abbildung 4.7 dargestellten Versuchen. Der wellenförmige Messverlauf von η mit zunehmender Prüffrequenz ist erneut bei den Proben mit einer 90° -Faserorientierung zu erkennen. Durch die höhere Probendicke ist die Amplitude geringer. Beide Faserorientierungen zeigen bei den Messwerten bei 1 Hz Abweichungen vom restlichen Messverlauf. Die $[0^\circ]_6$ -Proben zeigen im niedrigen Frequenzbereich eine Zunahme von η mit der Frequenz. Diese erfolgt im Bereich von 1 Hz bis 7 Hz. Anschließend folgt ein konstanter Verlauf von η bis zu einer Prüffrequenz von 40 Hz. Der gesamte Verlauf der $[0^\circ]_6$ -Proben ist dem Prüfverlauf der Stahlproben aus Abbildung 3.7 sehr ähnlich. Somit bestätigt der Verlauf die in Kapitel 3.1.2 aufgestellte Nullpunkthypothese. Abbildung 4.7 zeigt einen geringen Unterschied in η durch die unterschiedlichen Belastungen der $[0^\circ]_6$ -Proben. Zur weiteren Beurteilung werden an einer einzelnen Frequenz die Ergebnisse dargestellt (Abbildung 4.8). Hierfür wird erneut die Frequenz $f = 8,25$ Hz ausgewählt, bei welcher der Wendepunkt der Messkurve der $[90^\circ]_6$ -Proben liegt.

Durch Abbildung 4.8 wird verdeutlicht, dass η der $[0^\circ]_6$ -Proben eine geringe Abhängigkeit von der Belastung zeigt. Durch die höhere Belastung steigt die Schubspannung über den

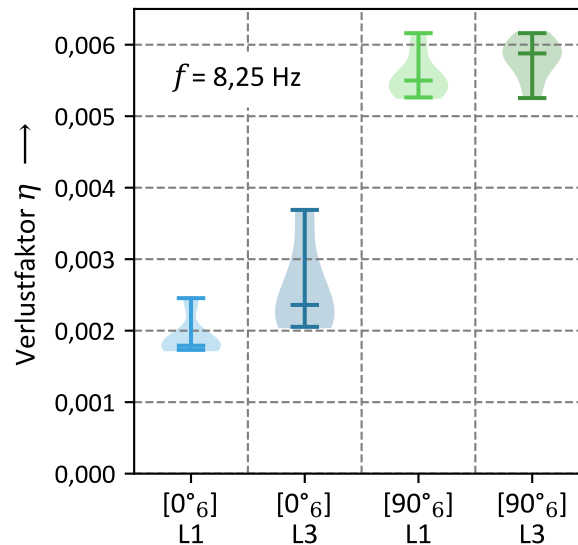


Abbildung 4.8: Verlustfaktor der Cf-EP-Proben mit einer 0° - und 90° -Faserorientierung. Darstellung der Belastungen L1 und L3 bei $f = 8,25$ Hz.

Probenquerschnitt. Diese ist bei einer 0° -Faserorientierung der Hauptgrund für die Dämpfung des Materials. Eine Abhängigkeit der Dämpfung von der Belastung wird zudem in [46, 51] beschrieben. Zudem wird in Abbildung 4.8 verdeutlicht, dass die erhöhte Standardabweichung der $[0^\circ]_6$ -Proben durch einzelne abweichende Proben verursacht wird. Im Gegensatz dazu kommt es bei den $[90^\circ]_6$ -Proben nur zu geringen Abweichungen der Ergebnisse vom Median. Eine Abhängigkeit von der Belastung kann für η der $[90^\circ]_6$ -Proben nicht festgestellt werden. Abschließend werden die Steifigkeiten der Proben untersucht. Die Ergebnisse der hierzu durchgeführten statischen und dynamischen Versuche sind in Tabelle 4.11 dargestellt.

Tabelle 4.11: Zusammenfassung der statisch und dynamisch ermittelten Steifigkeiten der Cf-EP-Proben unterschiedlicher Faserorientierung. E' ist mit der Belastung L3 gemessen und über den Frequenzbereich gemittelt.

Probe	E in MPa	E' in MPa
$[0^\circ]_6$	87.504 (± 4.479)	90.335 (± 1.632)
$[90^\circ]_6$	5.942 (± 365)	5.953 (± 280)

Die statisch und dynamisch ermittelten Steifigkeiten der Proben aus sechs Lagen stimmen gut überein. Dies gilt für beide Faserorientierungen und ist in Tabelle 4.11 dargestellt. Im Vergleich zu den dünneren Proben aus Tabelle 4.9 werden geringere Steifigkeiten gemessen.

4.4.3 Diskussion der Frequenzanalyse von Cf-EP

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse der Frequenzuntersuchungen zusammengeführt und diskutiert. In den bisherigen Darstellungen wurden unterschiedliche Probendicken und Faserorientierungen verglichen. In diesem Abschnitt folgt ein Vergleich der unterschiedlichen Geometrien. Zudem werden die Ergebnisse der unverstärkten EP-Matrix mit den faserverstärkten Proben verglichen. Der übergeordnete Zusammenhang zu den Ergebnissen der Ausschwingversuche wird in Kapitel 4.6 dargestellt.

Zur Analyse der Geometrie werden in Abbildung 4.9 unterschiedliche Messungen zusammengeführt. Hierbei erfolgt ein Vergleich unterschiedlicher Faserorientierungen und Probengeometrien bei gleicher Belastung. Der Einfluss der Belastung wurde bereits bei den jeweiligen Versuchen diskutiert. Zudem ist der Einfluss der Belastung bei unterschiedlichen Geometrien qualitativ gleich. Wie bereits dargestellt, werden durch unterschiedliche Faserorientierungen Unterschiede in η verursacht. Die Ergebnisse der Faserorientierungen werden in Abbildung 4.9 zudem in Zusammenhang zu den Ergebnissen der EP-Messungen gebracht.

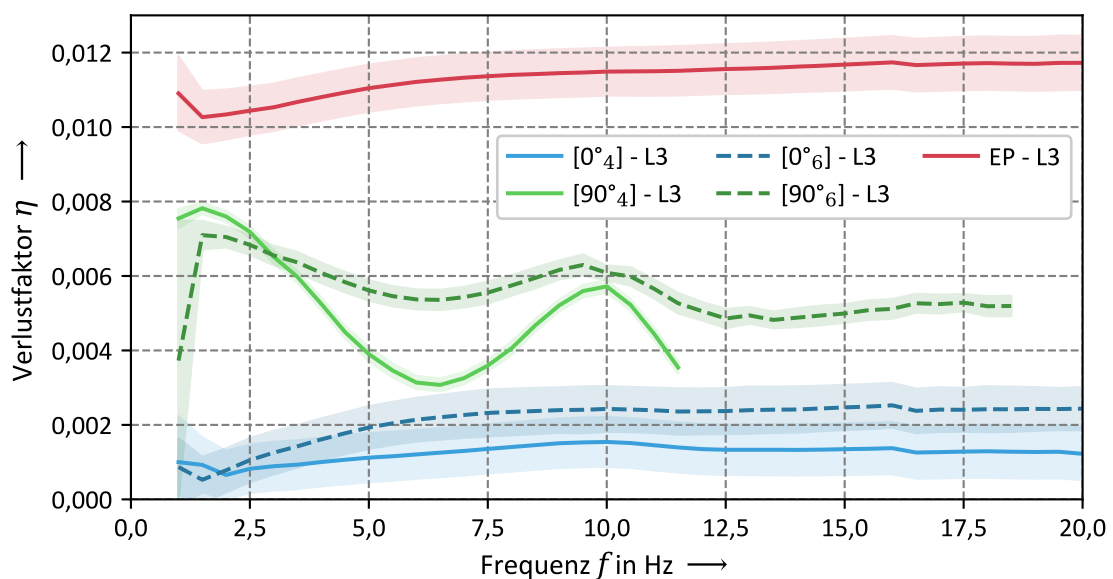


Abbildung 4.9: Vergleich der Cf-EP-Proben unterschiedlicher Lagenaufbauten jeweils mit einer 0°- und 90°-Faserorientierung. Zudem ist die Referenzmessung an EP-Proben abgebildet. Der Verlustfaktor ist über der Frequenz dargestellt und wird bei der L3 Belastung gemessen.

In Abbildung 4.9 sind die Ergebnisse der 0°- und 90°-Faserorientierung für beide Probendicken sowie die Ergebnisse der EP-Proben dargestellt. Dargestellt sind jeweils die Ergebnisse bei der Belastung L3. Für die Belastung L1 ergeben sich die gleichen Unterschiede zwischen den Prüferien. Diese werden in Abbildung 4.10 dargestellt. Bei den unverstärkten

EP-Proben wird eine deutliche höhere Dämpfung als bei den faserverstärkten Proben gemessen. Da die viskoelastische Matrix die Hauptursache der Dämpfung des Verbundwerkstoffes ist, wird ein erhöhtes η für die unverstärkte Matrix erwartet. Die Unterschiede in η durch eine Faserorientierung von 0° und 90° wurden bei den Einzelversuchen bereits dargestellt. Auf den grundlegenden Einfluss der Faserorientierung haben die unterschiedlichen Probengeometrien keinen Einfluss. Beim Vergleich der jeweiligen Probendicken können jedoch einzelne Unterschiede festgestellt werden.

Bei beiden Probendicken hat die Messung an den 90° -Proben zu Herausforderungen geführt. Auf Grund der Faserorientierung und der geringen Dicke haben die Proben eine niedrige Biegesteifigkeit. Diese verursacht Schwankungen von η in Abhängigkeit der Frequenz. Der Vergleich beider Proben verdeutlicht, dass die Maxima und Minima der wellenförmigen Messergebnisse bei gleichen Frequenzen auftreten. Dies ist ein weiterer Hinweis darauf, dass es sich dabei um eine Fehlmessung der Prüfmaschine handelt. Durch die Verwendung der dickeren Proben ist die Wellenamplitude kleiner, dennoch gut zu erkennen. Daher ist auch eine Beurteilung des Einflusses der Geometrie bei den 90° -Proben nur teilweise möglich. Zwischen den beiden Probendicken sind Unterschiede im Verlauf von η über der Messfrequenz zu erkennen. Bei sehr niedrigen Frequenzen (bis 3 Hz) haben die $[90^\circ_4]$ -Proben eine höhere Dämpfung. Ab 3 Hz kehrt sich das Verhältnis bis zum Ende der Messung um und die $[90^\circ_6]$ -Proben zeigen eine höhere Dämpfung. Durch den wellenförmigen Messverlauf von η ändert sich das Verhältnis beider Werte. Der maximale Unterschied beider Dämpfungswerte liegt im Minimum der Wellenform bei 6,5 Hz. Hingegen liegt im Maximum der Wellenform bei 10 Hz der minimale Unterschied. Somit zeigen die $[90^\circ_6]$ -Proben über einen Großteil des Messverlaufs eine höhere Dämpfung als die $[90^\circ_4]$ -Proben.

Der Verlauf der Einzelmessungen der 0° -Proben ist aufgrund der höheren Biegesteifigkeit unbeeinflusst von Messfehlern. Daher kann in diesem Fall auch besser ein Vergleich der unterschiedlichen Probendicken gezogen werden. In Abbildung 4.9 sind geringe Unterschiede von η der unterschiedlichen Geometrie zu erkennen. Bis auf die ersten zwei Messwerte ist η der $[0^\circ_6]$ -Proben höher als bei den $[0^\circ_4]$ -Proben. Zudem verdeutlicht die Darstellung das unterschiedliche Verhalten beider Proben in Abhängigkeit der Frequenz. Bei den $[0^\circ_6]$ -Proben ist eine geringe Zunahme der Dämpfung im Bereich 1 Hz bis 7,5 Hz zu erkennen. Im Gegensatz dazu zeigen die $[0^\circ_4]$ -Proben keinen Einfluss der Frequenz. Allgemein liegen die Unterschiede noch im oder gerade außerhalb des Bereichs der Standardabweichung der 0° -Proben. Zur weiteren Beurteilung der Ergebnisse werden diese an einem Punkt dargestellt. Für die Darstellung wird, wie bei der Auswertung der Einzelversuche, der Wendepunkt der Wellenform der 90° -Proben gewählt.

Für die Prüffrequenz $f = 8,25 \text{ Hz}$ sind in Abbildung 4.10 der Verlustfaktor der 0° - und

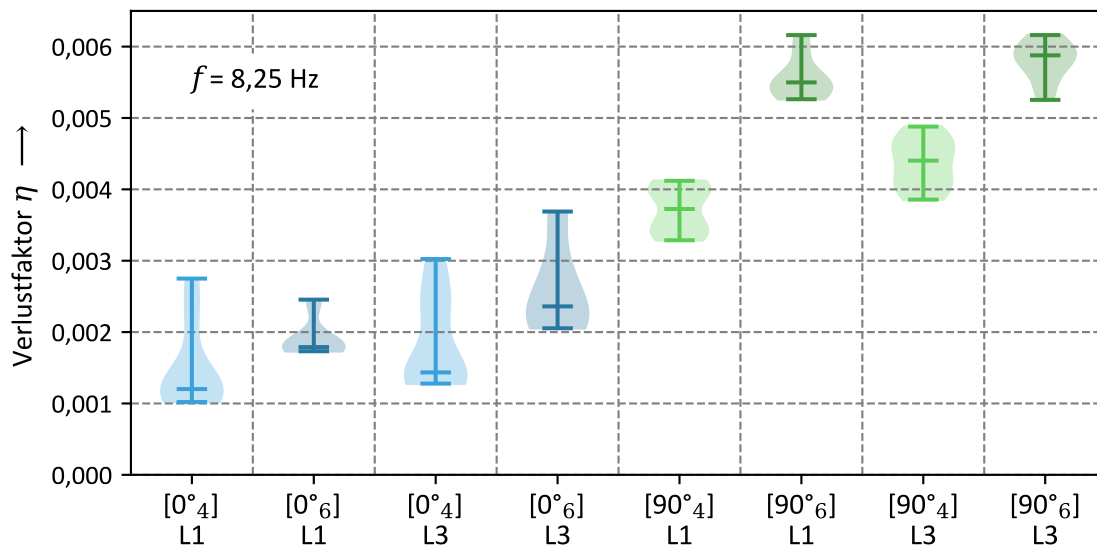


Abbildung 4.10: Vergleich des Verlustfaktors der Cf-EP-Proben unterschiedlicher Lagenaufbauten jeweils mit einer 0°- und 90°-Faserorientierung. Darstellung der Belastungen L1 und L3 bei $f = 8,25 \text{ Hz}$.

90°-Faserorientierung dargestellt. Hierbei sind die Prüflasten L1 und L3 jeweils aufgetragen. Bei allen Proben mit einer 0°-Faserorientierung fällt auf, dass die Verteilung des Verlustfaktors unsymmetrisch ist. Der Median liegt jeweils im unteren Bereich der Verteilung. Daher sind alle Prüfserien dieser Faserorientierung von einzelnen abweichenden Messergebnissen gekennzeichnet. Dies ist die Hauptursache für die erhöhte Standardabweichung der Prüfung. Zwei Punkte werden durch die Darstellung in Abbildung 4.10 für die 0°-Faserorientierung verdeutlicht. Zum einen wird der Einfluss der Belastung auf die jeweilige Probengeometrie veranschaulicht. Durch eine höhere dynamische Belastung folgt eine Zunahme von η der Proben. Zum anderen zeigen beide Belastungen einen Einfluss der Probendicke. Eine höhere Probendicke führt bei beiden Belastungen zu einem höheren η .

Der Vergleich der 90°-Proben zeigt ebenfalls eindeutig einen Unterschied von η bei den verschiedenen Probendicken. Eine höhere Probendicke führt ebenfalls zu einer höheren gemessenen Dämpfung. Für den Vergleich der Belastungen L1 und L3 ergeben sich unterschiedliche Resultate. Bei den [90°₄]-Proben werden geringe Unterschiede im Median von η durch die unterschiedliche Belastung gemessen. Der Einfluss der Belastung nimmt bei den [90°₆]-Proben ab und es sind nur sehr geringe Unterschiede im Median zu erkennen. Allgemein ist bei den 90°-Proben zu beachten, dass der Verlustfaktor stark über den gemessenen Frequenzbereich variiert. Im wellenförmigen Messverlauf der Ergebnisse wird ein Messfehler der Prüfmaschine vermutet, verursacht durch die niedrige Biegesteifigkeit der Proben. Für einen repräsentativen Vergleich der Probendicken wird daher der Wende-

punkte der Messkurve dargestellt. Jedoch können über den gesamten Messverlauf sowohl Punkte gefunden werden an denen die Unterschiede größer als auch geringer ausgebildet sind (vgl. Abbildung 4.9).

Sowohl durch Abbildung 4.9 als auch Abbildung 4.10 können geringe Unterschiede zwischen den unterschiedlichen Probengeometrien beider Faserorientierungen festgestellt werden. Dabei werden für beide Faserorientierungen die gleichen Tendenzen gemessen. Eine höhere Dicke oder eine höhere Belastung führen jeweils zu einem höheren η . Zum abschließenden Vergleich beider Proben ist es sinnvoll die jeweils ermittelten Steifigkeiten ebenfalls miteinander zu vergleichen. Diese wurde für die Beurteilung der Einzelversuche als Plausibilitätsprüfung herangezogen. Für den Vergleich sind in Tabelle 4.12 alle ermittelten Kennwerte zusammengefasst.

Tabelle 4.12: Zusammenfassung der statisch und dynamisch ermittelten Steifigkeiten der Cf-EP-Proben unterschiedlicher Probendicke und Faserorientierung. E' ist bei der Belastung L3 gemessen und über den Frequenzbereich gemittelt.

Probe	d in mm	E in MPa	E' in MPa	φ in %
$[0^\circ_4]$	0,65 ($\pm 0,01$)	98.943 (± 13.419)	103.000 (± 2.669)	52,42 ($\pm 2,79$)
$[90^\circ_4]$	0,66 ($\pm 0,01$)	6.681 (± 192)	6.747 (± 262)	52,42 ($\pm 2,79$)
$[0^\circ_6]$	1,03 ($\pm 0,01$)	87.504 (± 4479)	90.335 (± 1.632)	48,57 ($\pm 4,11$)
$[90^\circ_6]$	1,03 ($\pm 0,02$)	5.942 (± 365)	5.953 (± 280)	48,57 ($\pm 4,11$)

Der Vergleich der unterschiedlichen Probendicken zeigt für beide Faserorientierungen Unterschiede in den ermittelten Steifigkeiten. Dies gilt sowohl für den statisch ermittelten Elastizitätsmodul, als auch für den dynamisch bestimmten Speichermodul. Jeweils werden bei den Proben bestehend aus sechs Lagen niedrigere Steifigkeiten ermittelt als bei den dünneren Proben. Ein signifikanter Einfluss der Belastung auf die Steifigkeiten wird nicht festgestellt. Diese Unterschiede im Speichermodul können ebenfalls eine Ursache des zunehmenden η mit der Probendicke sein.

Neben den unterschiedlichen Steifigkeiten, werden Unterschiede im Faservolumengehalt gemessen. Dieser ist, neben der Faserorientierung, maßgeblich für die Steifigkeit des Verbundes verantwortlich. Für die Proben bestehend aus vier Lagen wird ein höheres φ gemessen als für die Proben aus sechs Lagen. Daher bestätigen die ermittelten φ die Unterschiede in der Steifigkeit. Abschließend können folgende Ergebnisse der Frequenzuntersuchung festgehalten werden:

- Die Faserorientierung zeigt einen deutlichen Einfluss auf η .
- Für unterschiedliche Probendicken ist ein Einfluss der Belastung zu erkennen. Mit zunehmender Probendicke wird dieser größer.

- Unterschiedliche Probengeometrien zeigen einen Einfluss auf η . Zudem werden unterschiedliche Steifigkeiten ermittelt. Daher ist eine eindeutige Zuordnung der Ursache nicht möglich.

4.5 Temperaturanalyse von EP und Cf-EP

In diesem Abschnitt wird der Einfluss der Temperatur auf das Werkstoffverhalten untersucht. Hierbei werden erneut Proben aus der unverstärkten Kunststoffmatrix sowie faserverstärkte Proben untersucht. Allgemein ist das thermische Werkstoffverhalten von Kunststoffen in zwei Bereiche unterteilt, in einen energieelastischen Bereich unterhalb der Glasübergangstemperatur T_g sowie in einen entropieelastischen Bereich oberhalb von T_g . Dabei erreicht die Dämpfung des Werkstoffs bei T_g ihr Maximum [14]. Die bisherigen Versuche haben gezeigt, dass die Dämpfung von FKV sehr gering ist. Dementsprechend gering sind auch die Unterschiede verschiedener Messungen. Durch die zusätzliche Erhöhung der Temperatur und die Untersuchung des Materialverhaltens bei der nominell höchsten Dämpfung bei T_g können Unterschiede besser herausgestellt werden. Effekte, die bei Raumtemperatur nicht deutlich abgebildet werden, könnten hier auftreten. Weitere Versuchsparameter wie die Prüffrequenz oder die Belastung werden für die Versuche konstant gehalten. Die Versuche werden in Anlehnung an [106] einheitlich bei einer Prüffrequenz von 1 Hz durchgeführt. Die Belastung der Proben wird dehnungsgeregelt und auf eine Belastung je Versuchsreihe beschränkt. Die Versuche bei Raumtemperatur (RT) zeigen teilweise einen kleinen Einfluss der Belastung. Jedoch ist dieser sehr gering und in diesem Abschnitt wird der Fokus auf den Glasübergangsbereich gelegt. Für die Untersuchungen wird die dynamische Dehnung auf $\varepsilon_d = 0,07\%$ und die statische Dehnung auf $\varepsilon_s = 0,085\%$ festgelegt. Das Ergebnis der Untersuchungen der unverstärkten Epoxidharz-Matrix ist in Abbildung 4.11 dargestellt. Geprüft werden hierbei die in Tabelle 4.6 aufgeführten Proben. Für die Messreihen werden acht Proben untersucht, dargestellt ist jeweils die Mediankurve sowie die Standardabweichung als Bereich hinterlegt.

Für eine T_g -Kurve typisch werden in Abbildung 4.11 die drei Messgrößen η , E' und E'' über der Temperatur T dargestellt. Geprüft werden die Proben über einen Temperaturbereich von 0°C bis 200°C . Zudem sind in Abbildung 4.11 die Maxima mit ihren jeweiligen Werten und der Glasübergangsbereich markiert. Alle Messgrößen zeigen nur eine sehr geringe Streuung der Versuchsergebnisse über den gesamten Messverlauf. Die größte Eigenschaftsänderung ist erwartungsgemäß im Bereich der Glasübergangstemperatur zu erkennen. Diese liegt im Wendepunkt der E' -Kurve bzw. im Maximum von E'' (E''_g) bei $T = 103,8^\circ\text{C}$. Der Speichermodul nimmt bereits bis zum Beginn des Glasübergangsbereich sehr stark ab und sinkt auf einen Wert unterhalb von 2500 MPa . Nach dem Glas-

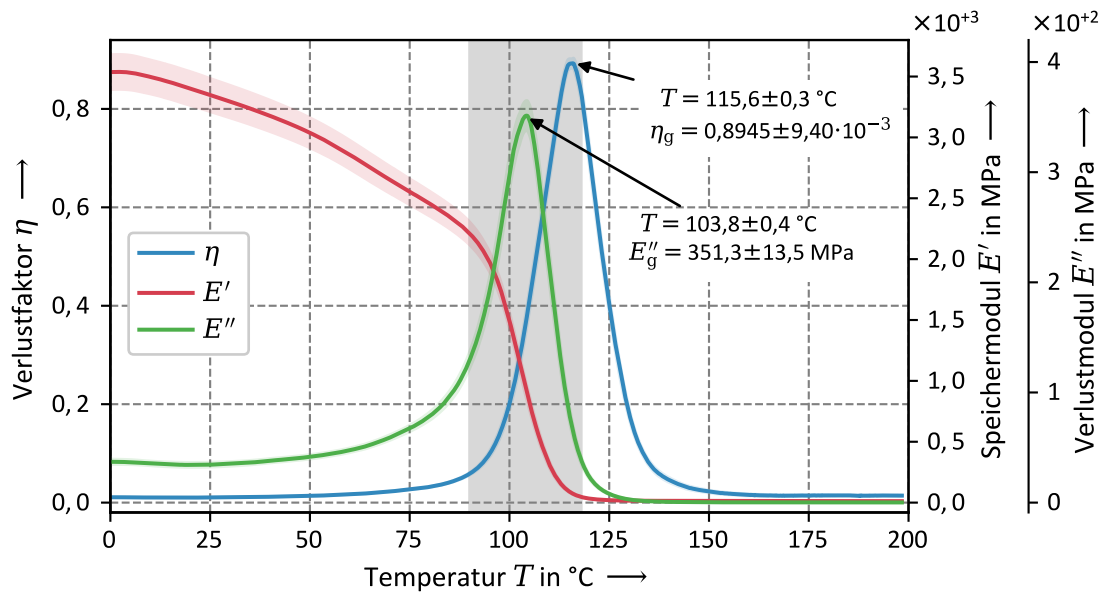


Abbildung 4.11: Tg-Kurve von Epoxidharz gemessen mittels 3PB-DMA. Darstellung von η , E' und E'' über einen Temperaturbereich von 0 °C bis 200 °C. Der Glasübergangsbereich ist grau hinterlegt.

übergangsbereich ist keine Reststeifigkeit der Proben zu messen. Der Verlustmodul hat bei Tg sein Maximum. Bereits ab einer Temperatur von ca. $T = 50$ °C nimmt E'' kontinuierlich zu. Das Maximum liegt bei Tg und nach dem Glasübergangsbereich fällt auch E'' sehr stark ab. Das Maximum von η (η_g) liegt bei $T = 115,6$ °C und somit bei einem höheren T als E'' . Für η lässt sich bis zum Beginn des Glasübergangsbereichs eine geringe Steigerung erkennen. Im Glasübergangsbereich kommt es zum Maximum von η . Für höhere Temperaturen sinkt η wieder deutlich ab. Charakteristische Werte der Tg-Kurve außerhalb des Glasübergangsbereichs sind in Tabelle 4.13 noch einmal zusammengefasst.

Tabelle 4.13: Charakteristische Werte der Tg-Kurve der EP-Proben.

T in °C	η	E'' in MPa	E' in MPa
23,0	0,01031 ($\pm 6,68 \cdot 10^{-4}$)	34,3 ($\pm 2,4$)	3.365,8 ($\pm 138,0$)
160,0	0,01531 ($\pm 2,19 \cdot 10^{-3}$)	0,2 ($\pm 0,0$)	14,0 ($\pm 0,4$)

Durch Tabelle 4.13 und Abbildung 4.11 wird die Überhöhung von η und E'' im Glasübergangsbereich im Vergleich zur Raumtemperatur verdeutlicht. Das Maximum des Verlustfaktors liegt etwa 90-mal höher als der Wert bei Raumtemperatur. Bei dem Verlustmodul liegt die Überhöhung beim Faktor zehn. Sowohl E' als auch E'' liegen oberhalb des Glasübergangsbereichs bei absolut sehr niedrigen Werten. Somit besteht in diesem Bereich keinerlei Reststeifigkeit der Proben. Das Datenblatt des Herstellers [102] gibt ein Tg von 115 °C bis 120 °C an. Der an den EP-Proben ermittelte Tg liegt daher etwas unter den Erwartungen des Datenblattes. Dies lässt auf eine unvollständige Vernetzung der Matrix

schließen.

Des Weiteren werden in diesem Abschnitt Proben mit einer Faserverstärkung untersucht. Hierbei werden die in Tabelle 4.10 dargestellten Proben mit einer Dicke von 1 mm geprüft. Eine Prüfung der $[90^\circ_6]$ über den gesamten Temperaturbereich ist jedoch nicht möglich. Wie bereits die Versuche bei Raumtemperatur gezeigt haben, hat die geringe Biegesteifigkeit der Proben einen Einfluss auf die Messung der Prüfmaschine. Durch den zusätzlichen Einfluss der Temperatur wird im Glasübergangsbereich die Biegesteifigkeit weiter herabgesetzt. Dies führt bei den Proben zu einem Abbruch der Prüfung, da die vorgegebenen Belastungen der Proben nicht geregelt werden können. Für eine Temperaturuntersuchung einer 90° -Faserorientierung sind nach derzeitigem Kenntnisstand Proben mit einer höheren Dicke notwendig. Im Gegensatz dazu konnten Prüfungen der $[0^\circ_6]$ -Proben problemlos durchgeführt werden. Für die Untersuchungen wird die Belastung auf $\varepsilon_d = 0,05\%$ und $\varepsilon_s = 0,0625\%$ festgelegt. Die Ergebnisse der Untersuchung sind in Abbildung 4.12 zusammengefasst. Untersucht werden fünf Proben, der jeweilige Median sowie die Standardabweichung sind dargestellt.

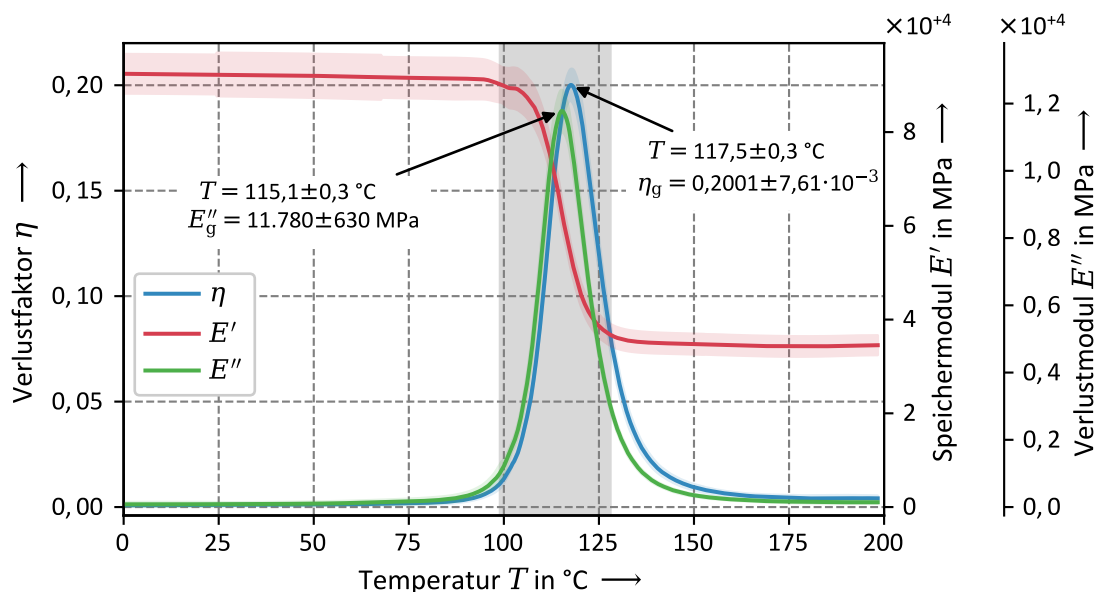


Abbildung 4.12: Tg-Kurve von Cf-EP mit einer 0° -Faserorientierung gemessen mittels 3PB-DMA. Darstellung von η , E' und E'' über einen Temperaturbereich von 0°C bis 200°C . Der Glasübergangsbereich ist grau hinterlegt.

Abbildung 4.12 zeigt die Tg-Kurve für die $[0^\circ_6]$ -Proben aus Tabelle 4.10. Es ist ein Maximum von E'' und η im Glasübergangsbereich zu erkennen. Die Maxima der beiden Kurven liegen dicht zusammen und mit ihren jeweiligen Werten in Abbildung 4.12 dargestellt. Sowohl davor, als auch danach sind die Werte jeweils sehr gering. E' zeigt nur eine sehr geringe Abnahme der Steifigkeit bis zum Beginn des Glasübergangsbereiches. Im

Glasübergangsbereich kommt es über einen Temperaturbereich von 20 °C zu einem sehr starken Abfall der Steifigkeit. Dennoch bleibt oberhalb von T_g eine Reststeifigkeit der Proben von etwa 35 GPa bestehen. Die Reststeifigkeit wird durch die Faserverstärkung verursacht. Diese zeigt im gewählten Temperaturbereich noch keinen Einfluss der Temperatur [14]. Charakteristische Werte der T_g -Kurve außerhalb des Glasübergangsbereichs sind in Tabelle 4.14 zusammengefasst.

Tabelle 4.14: Charakteristische Werte der T_g -Kurve der Cf-EP-Proben mit einer 0°-Faserorientierung.

T in °C	η	E'' in MPa	E' in MPa
23,0	0,00090 ($\pm 6,00 \cdot 10^{-4}$)	83,8 ($\pm 61,5$)	92.303 (± 4.198)
160,0	0,00615 ($\pm 1,03 \cdot 10^{-3}$)	225,5 ($\pm 30,6$)	34.529 (± 2.160)

Bei $T_g = 115,11$ °C liegen die Messungen der faserverstärkten Proben innerhalb des im Datenblatt angegebenen Bereichs. Durch die Darstellung in Tabelle 4.14 fällt die sehr hohe Streuung von η bei RT (η_{rt}) auf. Diese liegt in der Größenordnung der Messung und wird durch einzelne Messungen mit deutlicher Abweichung verursacht. Diese hohe Unsicherheit der Messungen fällt in Abbildung 4.12 nicht auf, da es bei η_g zu einer zweihundertfachen Vergrößerung von η_{rt} kommt. Sowohl η als auch E'' haben im Bereich oberhalb des Glasübergangsbereiches einen Wert, welcher eine Größenordnung über der Referenz bei RT liegt.

4.5.1 Vergleich der Temperaturanalyse von EP und Cf-EP

Dieser Abschnitt diskutiert die Temperaturuntersuchungen der EP-Proben und der Cf-EP-Proben. Wichtig ist es hierbei zu erwähnen, dass fertigungsbedingt zwei unterschiedliche Geometrien miteinander verglichen werden. Zudem gibt es erhebliche Unterschiede in der Steifigkeit der Proben, verursacht durch die Faserverstärkung. Dem entsprechend muss für einen zielführenden Vergleich die Darstellung der Ergebnisse auf zwei Grafiken aufgeteilt werden. In Abbildung 4.13 ist ein Vergleich von η über der Temperatur dargestellt. Dieser wird ohne Veränderungen durchgeführt. Verglichen werden hier, wie auch in Kapitel 4.4.3, die Absolutwerte von η .

Der Vergleich der T_g -Kurve in Abbildung 4.13 zeigt einen höheren η_g -Wert der EP-Proben im Vergleich zu den [0°₆]-Proben. Beide Kurven erreichen ihr jeweiliges Maximum im Glasübergangsbereich. Jedoch liegt das Maximum bei unterschiedlichen Temperaturen. Die Proben mit einer Faserverstärkung erreichen ihr Maximum erst bei einer höheren Temperatur. Neben dem Werkstoffverhalten im Glasübergangsbereich ist auch das Verhalten außerhalb des Bereichs zu analysieren. Abbildung 4.13 (unten) zeigt mit angepasster Skala

für η das Werkstoffverhalten außerhalb des Glasübergangsbereichs.

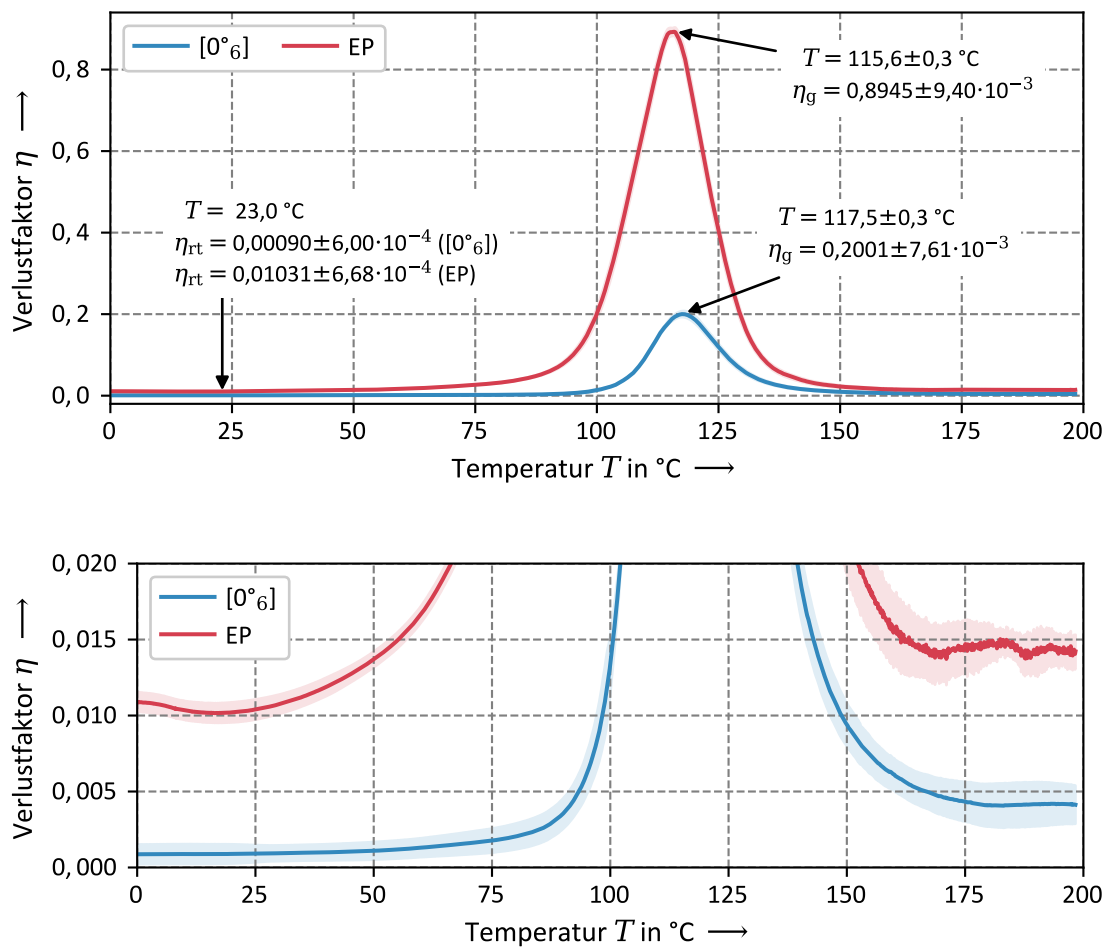


Abbildung 4.13: Vergleich von η der EP- und Cf-EP-Proben ermittelt durch 3PB-DMA über einen Temperaturbereich von 0°C bis 200°C .

Hierbei sind weitere Unterschiede beider Proben zu erkennen. Der Verlustfaktor der EP-Proben zeigt über den gesamten Temperaturbereich eine Abhängigkeit von T . Bis 25°C ist η über den Messbereich am geringsten. Im Temperaturbereich von 25°C bis 50°C kommt es bereits zu einer leichten Zunahme von η . Diese Zunahme steigert sich bis $T = 75^{\circ}\text{C}$ deutlich. Im Gegensatz dazu ist für die $[0^{\circ}_6]$ -Proben bis 50°C bei dieser Skalierung kein Einfluss von T zu erkennen. Ab 50°C bis 80°C nimmt η mit T leicht zu. Anschließend folgt eine starke Zunahme im Glasübergangsbereich. Beide Proben zeigen bei Temperaturen oberhalb der Glasübergangstemperatur einen erhöhten η -Wert im Vergleich zu RT.

Im nächsten Schritt werden die gemessenen Steifigkeiten miteinander verglichen. Für den Vergleich müssen die jeweiligen Daten transformiert werden. Ein Vergleich der Rohdaten ist aufgrund der sehr unterschiedlichen Steifigkeiten nicht zielführend. Daher werden die Steifigkeiten (E' , E'') auf ihr jeweiliges Maximum ($E'_{\max}$, $E''_{\max}$) bezogen. Somit kann die jeweilige Abnahme über den Temperaturbereich beurteilt werden. Ein Vergleich beider

Messungen mit den relativen (rel.) Steifigkeiten (E'_{rel} , E''_{rel}) ist in Abbildung 4.14 abgebildet.

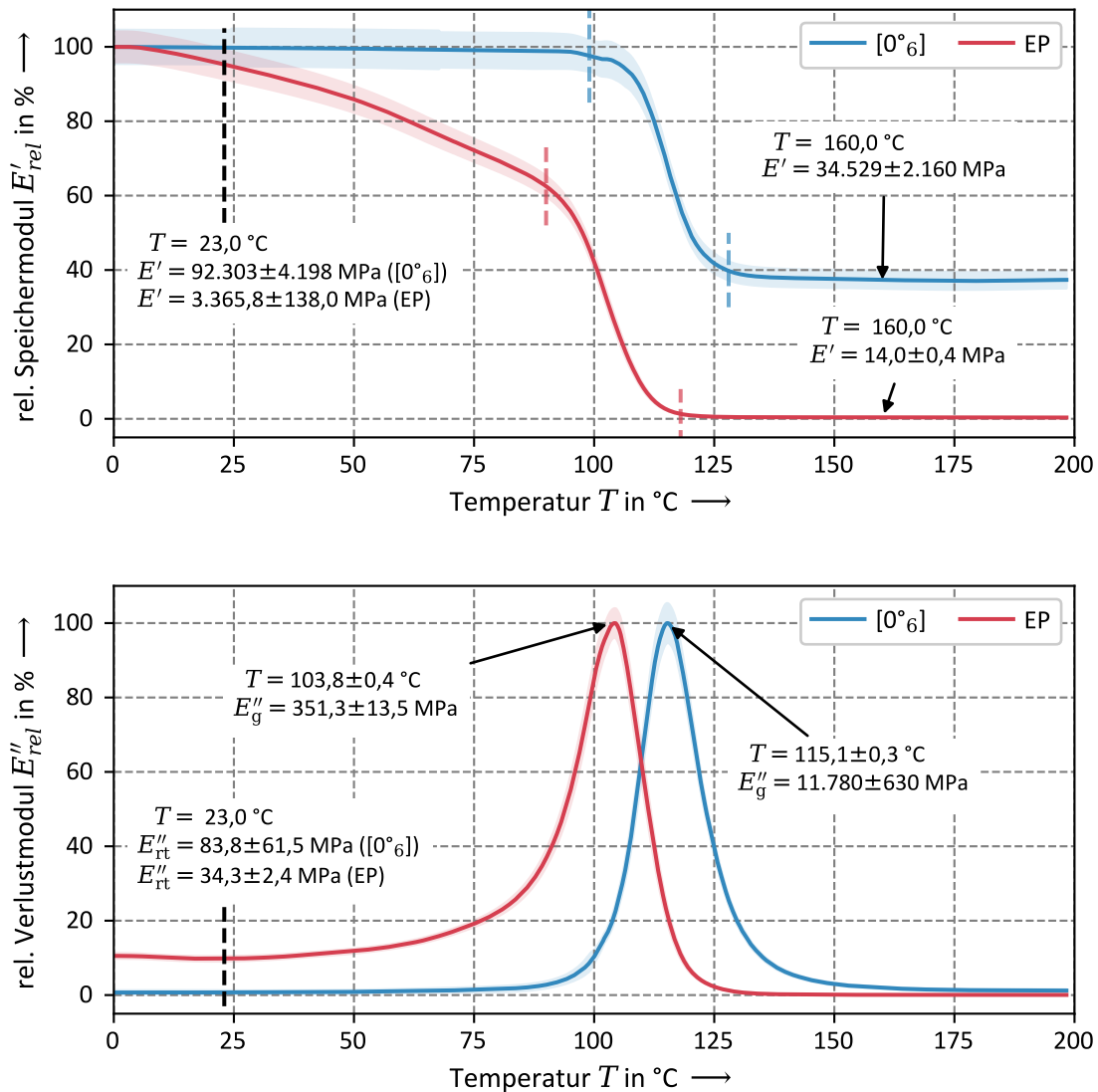


Abbildung 4.14: Vergleich von E'_{rel} (oben) und E''_{rel} (unten) von EP und Cf-EP ermittelt durch 3PB-DMA über einen Temperaturbereich von 0 $^{\circ}\text{C}$ bis 200 $^{\circ}\text{C}$. Die Werte sind auf ihr jeweiliges Maximum bezogen.

In Abbildung 4.14 ist sowohl E'_{rel} als auch E''_{rel} in Abhängigkeit der Temperatur für beide Proben dargestellt. Der Glasübergangsbereich ist an den jeweiligen E'_{rel} -Kurven markiert. Das Maximum von E' liegt hierbei bei beiden Proben bei $T = 0^{\circ}\text{C}$. Für E' ergeben sich für die unterschiedlichen Proben grundlegend verschiedene Messverläufe. Die EP-Proben zeigen bereits bis zum Beginn des Glasübergangsbereichs eine starke Abnahme der Steifigkeit auf etwa 60% ihres Maximums. Im Gegensatz dazu ist bei den faserverstärkten Proben kein Steifigkeitsabfall bis zum Glasübergangsbereich zu erkennen. Oberhalb des Glasübergangsbereichs haben die $[0^{\circ}_6]$ -Proben noch eine Reststeifigkeit von fast 40 %.

Faserverstärkung fällt die Steifigkeit bei den EP-Proben auf nahezu Null ab. Im Gegensatz zum E' -Maximum liegt das Maximum von E'' bei unterschiedlichen Temperaturen. Der Grund dafür ist ein Unterschied in T_g . Für die $[0^\circ_6]$ -Proben wird ein höheres T_g ermittelt. Allgemein kann es durch die zusätzliche Faserverstärkung zu einer moderaten Erhöhung des T_g kommen. Dies wird in [52] ebenfalls dargestellt. Der ermittelte Unterschied liegt jedoch bei über 10°C . Dies ist ein Hinweis auf eine unterschiedliche Aushärtung und Vernetzung der jeweiligen Proben. Eine geringere Vernetzung der Matrix kann dabei zu zusätzlichen Dämpfungseffekten führen [14]. Neben dem Maximum unterscheiden sich die E'' Kurven noch in ihrem Verhalten vor dem Glasübergangsbereich. Sowohl bei niedrigen, als auch bei hohen T ist E'' für die faserverstärkten Proben sehr gering. Lediglich im Glasübergangsbereich kommt es über einen geringen Temperaturbereich zu einer starken Überhöhung des Verlustmoduls. Im Gegensatz dazu zeigen die EP-Proben bereits bei $T < T_g$ ein erhöhtes E'' . Auch die Zunahme von E'' beginnt bereits bei $T = 50^\circ\text{C}$ und somit bei niedrigeren Temperaturen als bei den $[0^\circ_6]$ -Proben. Oberhalb von T_g fällt der Verlauf von E'' ebenfalls auf null ab.

4.6 Vergleich der Versuchsmethoden an Cf-EP

In diesem Abschnitt werden die in Kapitel 4.2 und 4.4 vorgestellten Versuchsmethoden miteinander verglichen. Die Fragestellung hierbei ist, ob durch die unterschiedlichen Versuchsmethoden die gleichen Kennwerte ermittelt werden. Die durch DMA mittels Zugbelastung ermittelten Kennwerte werden in diesem Abschnitt nicht aufgenommen. In Kapitel 4.3 wurde festgestellt, dass die Zug-DMA einen deutlich erhöhten Kennwert im Gegensatz zu den Ausschwingversuchen ergeben. Zudem hat ein Vergleich der Versuchsmethoden bei Stahlproben bereits deutlich erhöhte Kennwerte für die Zug-DMA ergeben. In diesem Abschnitt werden lediglich Proben bestehend aus sechs Lagen miteinander verglichen. Eine Untersuchung der Probendicke für die DMA ist in Kapitel 4.4.3 dargestellt. Zudem werden so Proben mit dem gleichen Faservolumengehalt untersucht und dessen Einfluss auf die Dämpfung eliminiert. Die Ausschwingversuche zeigen bei einer Faserorientierung von 0° eine erste Eigenfrequenz von etwa 36 Hz. Die DMA Untersuchungen in Abbildung 4.7 zeigen für die 0° -Proben einen glatten Verlauf über die Prüffrequenz. Über den gemessenen Frequenzbereich werden keine Eigenfrequenzen festgestellt. Daher können für den Vergleich die DMA-Ergebnisse bei 36 Hz verwendet werden. Die Ausschwingversuche der 90° -Proben haben ihre erste Eigenfrequenz bei etwa 9 Hz. Für den Vergleich der Proben mit den DMA-Ergebnissen ist es jedoch nicht zielführend diese ebenfalls bei 9 Hz auszuwerten. Wie in Abbildung 4.7 dargestellt zeigen die 90° -Proben einen wellenförmigen Messverlauf von η in Abhängigkeit der Frequenz. Die Untersuchungen der unverstärkten EP-Proben und der unterschiedlichen Probendicken mit einer 90° -Faserorientierung zeigen

einen Einfluss der Biegesteifigkeit auf die Ausprägung der Wellenform. Daher ist es nicht zielführend beliebige Frequenzen der Messung auszuwerten. Für den Vergleich werden die Ergebnisse der 90°-Proben vom Wendepunkt des wellenförmigen Messverlaufs bei 8,25 Hz verwendet. Die Ergebnisse für den Vergleich sind in Abbildung 4.15 dargestellt.

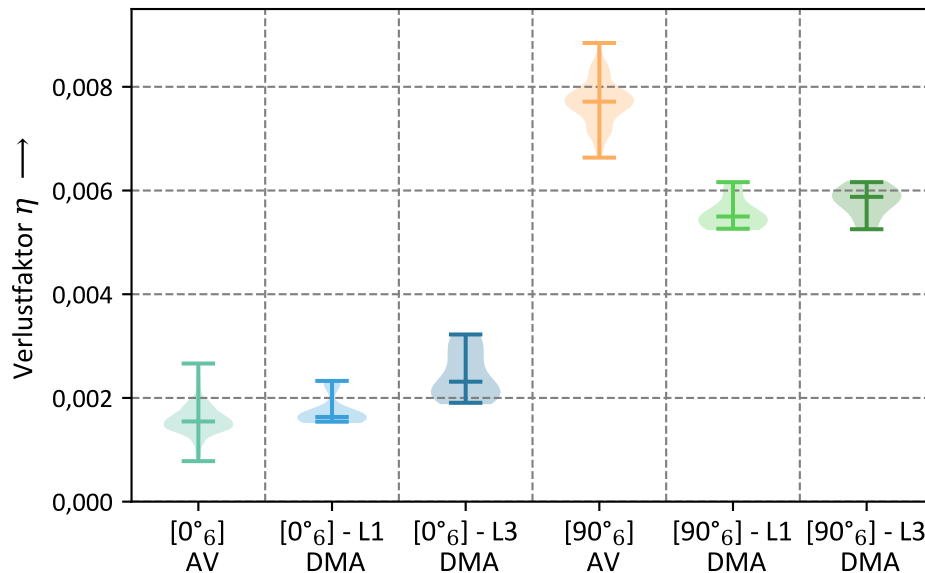


Abbildung 4.15: Vergleich der Ausschwingversuche mit den Ergebnissen der 3PB-DMA an den Cf-EP-Proben unterschiedlicher Faserorientierung. Darstellung der Belastung L1 und L3 der DMA-Untersuchungen.

Abbildung 4.15 zeigt eine gute Übereinstimmung der Ergebnisse der 0°-Proben der Ausschwingversuche und DMA. Dabei stimmen die Ergebnisse der DMA mit einer L1-Belastung ohne signifikante Abweichung mit den Ergebnissen der Ausschwingversuche überein. Die zunehmende Belastung zeigt bei den DMA eine Zunahme von η . Im Gegensatz dazu stehen die Ergebnisse bei den 90° Proben. Hierbei ergibt sich für beide Belastungen ein niedrigerer η -Wert im Vergleich zu den Ausschwingversuchen. Der Vergleich von η sowie der ermittelten Steifigkeit ist in Tabelle 4.15 in Zahlenwerten zusammengefasst.

Tabelle 4.15 belegt die sehr gute Übereinstimmung der Ausschwingversuche und DMA bei den 0°-Proben. Des Weiteren werden durch die Tabelle auch die sehr gute Übereinstimmung der ermittelnden Steifigkeiten verdeutlicht. Hierbei werden für beide Faserorientierungen keine signifikanten Unterschiede ermittelt.

Tabelle 4.15: Ergebniszusammenfassung der Ausschwingversuche und der DMA an den Cf-EP-Proben. Darstellung des Verlustfaktors η sowie des Speichermoduls E' in Abhängigkeit der jeweiligen Faserorientierung, Belastung und Prüffrequenz.

AV	η -	E' in MPa	f_1 in Hz	DMA	η -	E' in MPa	f in Hz
[0° ₆]	0,00155 ($\pm 2,37 \cdot 10^{-4}$)	84.913 (± 2.420)	35,83 ($\pm 0,55$)	[0° ₆] - L1	0,00163 ($\pm 2,56 \cdot 10^{-4}$)	89.904 (± 1.738)	35-37 -
	-	-	-	[0° ₆] - L3	0,00231	90.334	35-37
	-	-	-		($\pm 4,37 \cdot 10^{-4}$)	(± 1.635)	-
[90° ₆]	0,00771 ($\pm 3,89 \cdot 10^{-4}$)	5.828 (± 228)	9,16 ($\pm 0,10$)	[90° ₆] - L1	0,00550 ($\pm 2,88 \cdot 10^{-4}$)	5.917 (± 218)	8-8,5 -
	-	-	-	[90° ₆] - L3	0,00588	5.954	8-8,5
	-	-	-		($\pm 2,77 \cdot 10^{-4}$)	(± 280)	-

5 Dynamische Untersuchungen von Faser-Thermoplast-Verbunden

Basierend auf der Entwicklung einer Versuchsmethodik in Kapitel 3 und den Untersuchungen an duroplastischen Kunststoffen in Kapitel 4 werden in diesem Kapitel FKV mit einer thermoplastischen Matrix untersucht. Die Studienlage zum Dämpfungsverhalten von thermoplastischen Kunststoffen ist begrenzt. Der Fokus des Kapitels liegt auf der Ergebnisdarstellung. Eine Zusammenführung aller Untersuchungen erfolgt in Kapitel 6. Für die Untersuchungen werden zwei thermoplastische Kunststoffe ausgewählt. Zum einen werden Versuche an Polyetheretherketon (PEEK) und zum anderen an Polycarbonat (PC) durchgeführt. Dabei werden jeweils die unverstärkte Matrix sowie faserverstärkte Proben mit einer unidirektionalen Faserorientierung von 0° und 90° untersucht. Da nicht alle dynamischen Untersuchungen erfolgreich angewandt werden können, werden in diesem Kapitel nicht alle Versuchsmethoden diskutiert. Für beide Kunststoffe werden sowohl Frequenz- als auch Temperaturanalysen mittels 3PB-DMA an der TA durchgeführt. Ergänzend werden dynamische Kennwerte durch freie Ausschwingversuche bestimmt. Alle Untersuchungen werden hierbei auf eine Probendicke beschränkt.

5.1 Dynamische Untersuchungen der PC-Matrix

Dieser Abschnitt fasst die dynamischen Untersuchungen an Proben mit einer Polycarbonat-Matrix zusammen. Dabei werden Untersuchung an unverstärkten Kunststoffproben und kohlenstoffaserverstärkten Proben (Cf-PC) durchgeführt.

Die unverstärkten PC-Platten mit der Materialbezeichnung *Makrolon® 2205* werden vom Hersteller *Covestro* bezogen. Die Proben für die Untersuchungen werden aus den Platten gefräst, die Geometrie ist hierbei gleich zu den Untersuchungen in Kapitel 4.4.1. In Tabelle 5.1 sind die für die Untersuchungen wichtigsten Materialkennwerte des Herstellerdatenblattes [107, 108] aufgelistet. Zur weiteren Analyse des Querschnitts werden an Proben CT-Untersuchungen durchgeführt. Eine Beschreibung der CT-Untersuchung ist in Kapitel 4.4.1 zu finden. Mit der gewählten Auflösung werden bei den PC-Proben keine Poren festgestellt (Tabelle 5.4).

Die Cf-PC-Proben werden aus einem unidirektionalen faserverstärkten Tape mit der Ma-

terialbezeichnung *UD Tape CF GP 1000T* von *Covestro* hergestellt. Durch das Zusammenlöten mehrerer Tapes und das Verpressen in einer Heißpresse von sechs UD-Lagen gleicher Faserorientierung werden die Platten gefertigt. Für die jeweiligen Versuche werden Proben mit einer 0° - oder 90° -Faserorientierung zurecht gesägt. Materialkennwerte des Herstellerdatenblattes sind in Tabelle 5.1 zusammengefasst.

Tabelle 5.1: Kennwerte des PC- [108] und Cf-PC-Datenblattes [107] (mit $\varphi = 44\%$). Angaben für den Zug-Elastizitätsmodul (E^t) und den Biege-Elastizitätsmodul (E^f).

Material	Mechanische Eigenschaften		Weitere Kennwerte
PC	$E^t = 2.400 \text{ MPa}$	$E^f = 2.350 \text{ MPa}$	$T_g = 145^\circ\text{C}$
Cf-PC	$E_{\parallel}^t = 105.000 \text{ MPa}$ $E_{\perp}^t = 5.000 \text{ MPa}$	$E_{\parallel}^f = 93.000 \text{ MPa}$ $E_{\perp}^f = 5.000 \text{ MPa}$	$d_1 = 0,17 \text{ mm}$

Zur Analyse der Proben wird der Faservolumengehalt wie in Kapitel 4.1 dargestellt untersucht. Der hierbei ermittelte Faservolumengehalt liegt bei $38,84\%$ mit einer Standardabweichung von $4,41\%$. Dieser ist im Vergleich zu den Angaben des Datenblattes ($\varphi = 44\%$) etwas niedriger. Des Weiteren fallen durch die Schliffbilder Fehlstellen im Tapematerial auf. Exemplarisch sind in Abbildung 5.1 diese für ein Schliffbild markiert.

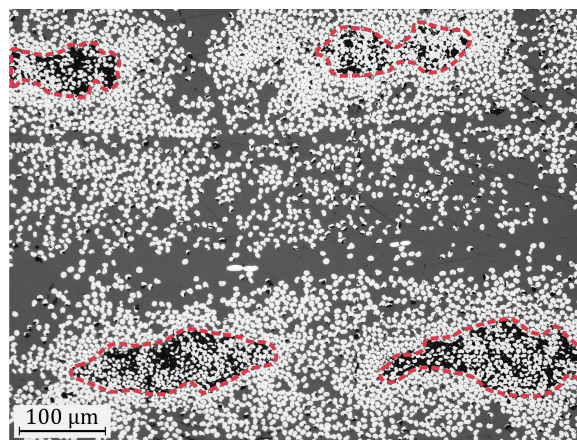


Abbildung 5.1: Schliffbild einer Cf-PC-Probe zur Bestimmung des Faservolumengehalts. Markiert sind nicht durchtränkte Bereiche des Fasertapes.

Abbildung 5.1 zeigt mehrere trockene Bereiche im Fasertape. In diesen Bereichen ist keine Matrix vorhanden und demzufolge sind die Fasern in diesen Bereichen nicht durchtränkt. Des Weiteren wird durch das Schliffbild die sehr inhomogene Verteilung der Fasern über den gemessenen Querschnitt deutlich. Zum einen liegen Bereiche mit einer sehr hohen Faserdichte vor, teilweise direkt angrenzend an die trockenen Bereiche. Zum anderen gibt es Bereiche in denen eine sehr niedrige Faserdichte vorliegt. Sowohl die Faserverteilung, als auch die trockenen Stellen im Material wirken sich negativ auch die Materialeigenschaften aus. Dies wird in den folgenden Messungen festgestellt und diskutiert.

5.1.1 Ausschwingversuche an Cf-PC

Zur Untersuchung unterschiedlicher Faserorientierungen der Cf-PC-Proben werden in diesem Abschnitt freie Ausschwingversuche durchgeführt und analysiert. Für die Versuche werden die Proben dargestellt in Tabelle 5.2 verwendet. Hierbei werden Proben mit einer 0°- und 90°-Faserorientierung und gleicher Probengeometrie untersucht.

Tabelle 5.2: Cf-PC-Proben unterschiedlicher Faserorientierung für die freien Ausschwingversuche, Probengeometrie nach [100].

Probe	d in mm	b in mm	l in mm	m in g	φ in %
[0° ₆]	1,03 (±0,01)	14,98 (±0,03)	250,01 (±0,29)	5,58 (±0,05)	38,84 (±4,41)
[90° ₆]	1,04 (±0,01)	14,96 (±0,04)	250,00 (±0,83)	5,47 (±0,02)	38,84 (±4,41)

Die Versuchsdurchführung ist analog zu den in Kapitel 4.2 durchgeführten Ausschwingversuchen an dem Cf-EP-Material. Dabei werden beide Faserorientierungen mit jeweils fünf Proben, an denen der Ausschwingversuch fünfmal durchgeführt wird, untersucht. Dass durch das Ausschwingverhalten bestimmte η wird in Abbildung 5.2 für beide Faserorientierungen und in Abhängigkeit der Probengeschwindigkeit dargestellt.

Abbildung 5.2 zeigt einen deutlichen Unterschied zwischen den geprüften Faserorientierungen. Erwartungsgemäß führt eine 0°-Faserorientierung entlang der Balkenachse zu einer geringeren Dämpfung als eine Faserorientierung von 90°. Bei Probengeschwindigkeiten oberhalb von 150 mm/s zeigen beide Faserorientierungen eine sehr starke Streuung der Versuchsergebnisse. Für beide Messungen kann ein Bereich identifiziert werden, in dem η unabhängig von der Probengeschwindigkeit ist. Unterhalb einer Geschwindigkeit von 125 mm/s ist für 0° kein Einfluss der Geschwindigkeit auf η zu erkennen. Für 90° liegt diese Grenze bei 75 mm/s. Für den jeweiligen Geschwindigkeitsbereich der Faserorientierungen werden aggregierte Werte für η bestimmt. Das Ergebnis ist in Abbildung 5.3 dargestellt.

Durch die Darstellung in Abbildung 5.3 wird der Unterschied in η der verschiedenen Faserorientierungen deutlich. Die jeweiligen Mediane und die entsprechende Standardabweichung sind in Tabelle 5.3 zusammengefasst. Für beide Faserorientierungen ergibt sich ein sehr großer Ergebnisbereich. Insgesamt treten Messwerte über einen Bereich größer 0,002 auf. Der Unterschied ist hierbei, dass die [0°₆]-Proben insgesamt eine geringere Streuung um den Median aufweisen. Ein Großteil der Werte konzentriert sich symmetrisch um den Median. Hingegen kommt es bei den [90°₆]-Proben zu einem größeren Ergebnisbereich. Dies spiegelt die in Tabelle 5.3 aufgeführte Standardabweichung wider. Neben η sind in Tabelle 5.3 die durch die FFT bestimmten Eigenfrequenzen sowie die daraus ermittelten

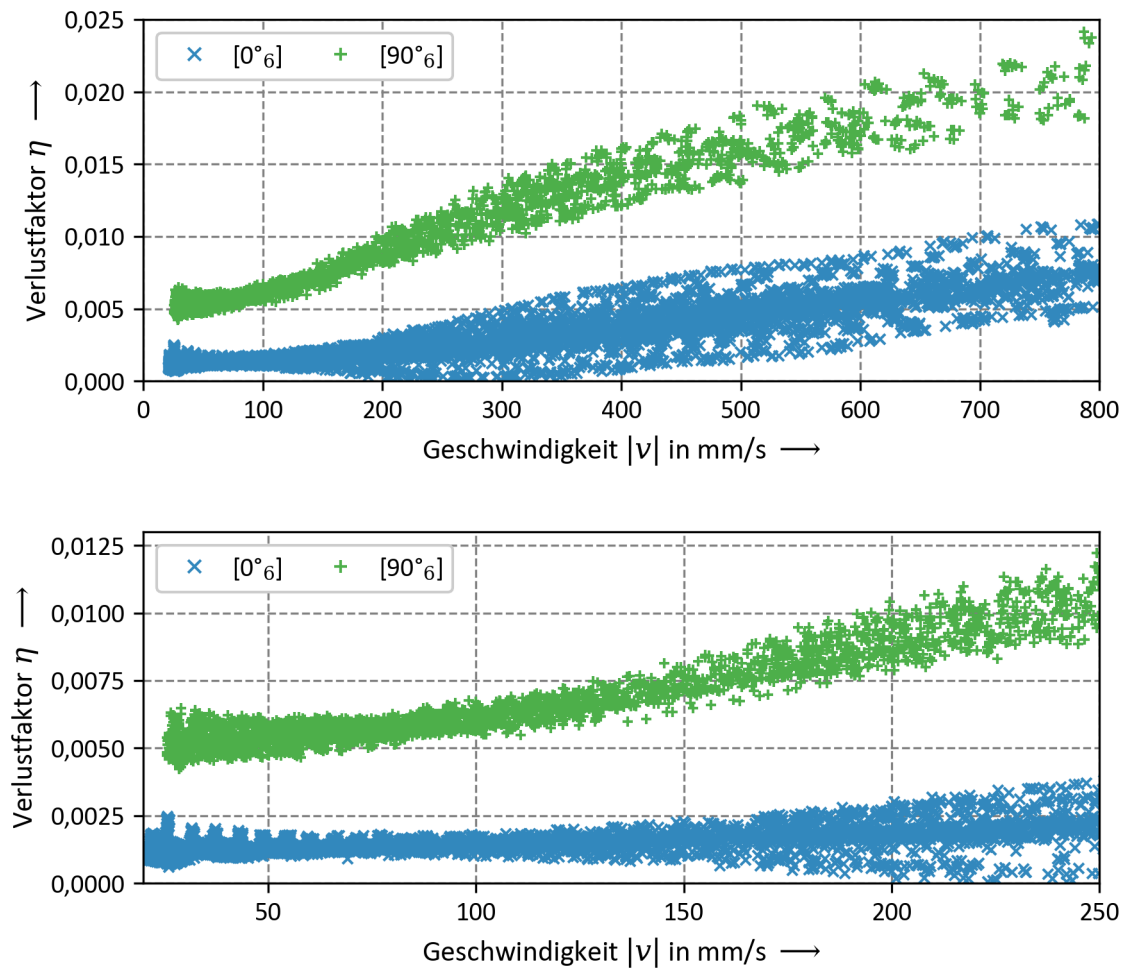


Abbildung 5.2: Vergleich der 0° - und 90° -Faserorientierung der Cf-PC-Proben. Darstellung von η über $|v|$ bei $n = 8$. Gesamter Messverlauf (oben) und Vergrößerung des niedrigen Geschwindigkeitsbereichs (unten).

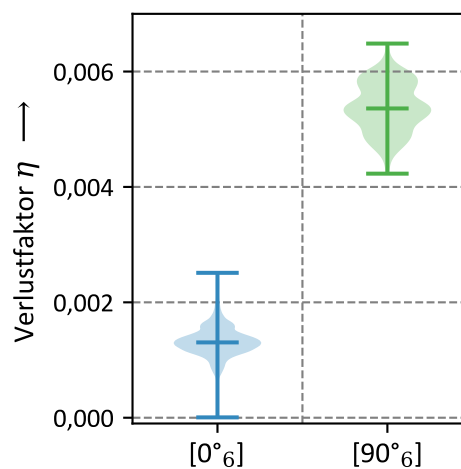


Abbildung 5.3: Vergleich von η für die $[0^\circ]_6$ - und $[90^\circ]_6$ -Proben. Ermittlung von η mit der jeweiligen Geschwindigkeitsgrenze bei $n = 8$.

Steifigkeiten aufgetragen.

Tabelle 5.3: Zusammenfassung der Ergebnisse der Cf-PC-Proben. Ermittlung von η für $n = 8$ und den jeweiligen Geschwindigkeitsbereich, der Speichermodul wird aus der ermittelten f_1 sowie der Probengeometrie bestimmt.

Probe	η	f_1 in Hz	f_2 in Hz	$\hat{v}_2/\hat{v}_1$ in %	E' in MPa
$[0^\circ_6]$	0,00131 ($\pm 2,31 \cdot 10^{-4}$)	36,78 ($\pm 0,90$)	230,82 ($\pm 3,71$)	3,25 ($\pm 0,95$)	91.699 (± 7.110)
$[90^\circ_6]$	0,00536 ($\pm 4,11 \cdot 10^{-4}$)	8,83 ($\pm 0,07$)	55,19 ($\pm 0,34$)	3,52 ($\pm 0,34$)	5.022 (± 52)

Alle Ergebnisse der Ausschwingversuche an den $[0^\circ_6]$ - und $[90^\circ_6]$ -Proben sind in Tabelle 5.3 zusammengefasst. Wie durch die Literaturrecherche zu erwarten ist, werden unterschiedliche Dämpfungen für die jeweiligen Faserorientierungen gemessen. Hierbei führt ein höherer Faserwinkel zu einer höheren Dämpfung. Durch Abbildung 5.3 wird veranschaulicht und durch die Zahlenwerte in Tabelle 5.3 belegt, dass die $[90^\circ_6]$ -Proben eine höhere Standardabweichung haben. Die durch den Ausschwingversuch ermittelten Steifigkeiten der unterschiedlichen Faserorientierungen sind ebenfalls in Tabelle 5.3 aufgeführt. Hierbei kommt es für beide Faserorientierungen zu einer sehr guten Übereinstimmung mit den Kennwerten des Herstellers (Tabelle 5.1). Gleiche Probengeometrien haben bei unterschiedlichen Faserorientierungen und folglich unterschiedlichen Steifigkeiten auch verschiedene Eigenfrequenzen. Für den Vergleich der Ausschwingversuche mit weiteren Versuchsergebnissen wird η der jeweiligen ersten Eigenfrequenz zugeordnet. Abschließend ist zu erwähnen, dass das Verhältnis der Amplituden der Geschwindigkeiten ($\hat{v}_2/\hat{v}_1$) der ersten und zweiten Eigenfrequenz bei der Messung sehr gering ist. Daher kann ein Einfluss weiterer Eigenfrequenzen auf das Ergebnis als vernachlässigbar betrachtet werden.

5.1.2 Frequenzanalyse von PC und Cf-PC

Zur Untersuchung des Frequenzverhaltens werden in diesem Abschnitt Proben aus unverstärktem PC sowie Cf-PC-Proben untersucht. Herstellung und Kennwerte des Materials sind in Kapitel 5.1 dargestellt. Die Geometrie der jeweiligen Proben wird den Untersuchungen der EP- und Cf-EP-Proben gegenübergestellt und ist in Kapitel 4.4 begründet. Abweichend von den Untersuchungen der Cf-EP-Proben wird bei den Cf-PC-Proben lediglich eine Probendicke untersucht. Tabelle 5.4 fasst die untersuchten Proben zusammen.

Bei der dynamischen Untersuchung werden die in Tabelle 3.3 definierten Lasten über einen Frequenzbereich von 1 Hz bis 40 Hz geprüft. Die Untersuchungen werden dabei auf zwei dynamische Belastungen L1 und L3 reduziert. Die Versuche werden bei Raumtemperatur

Tabelle 5.4: PC- und Cf-PC-Proben mit einer 0°- und 90°-Faserorientierung für die DMA-Untersuchungen mittels 3PB. Verhältnisse l/d und b/d der Probengeometrie (Cf-PC) nach [99].

Probe	d in mm	b in mm	l in mm	φ in %	ϕ in %
PC	4,00 ($\pm 0,01$)	10,00 ($\pm 0,01$)	60,00	-	0,00 ($\pm 0,00$)
[0° ₆]	1,07 ($\pm 0,03$)	7,94 ($\pm 0,01$)	60,00	38,84 ($\pm 4,41$)	-
[90° ₆]	1,12 ($\pm 0,02$)	7,93 ($\pm 0,01$)	60,00	38,84 ($\pm 4,41$)	-

durchgeführt. Für die Untersuchungen werden jeweils sechs Proben geprüft. Dargestellt ist jeweils die Mediankurve und die Standardabweichung ist als Bereich hinterlegt.

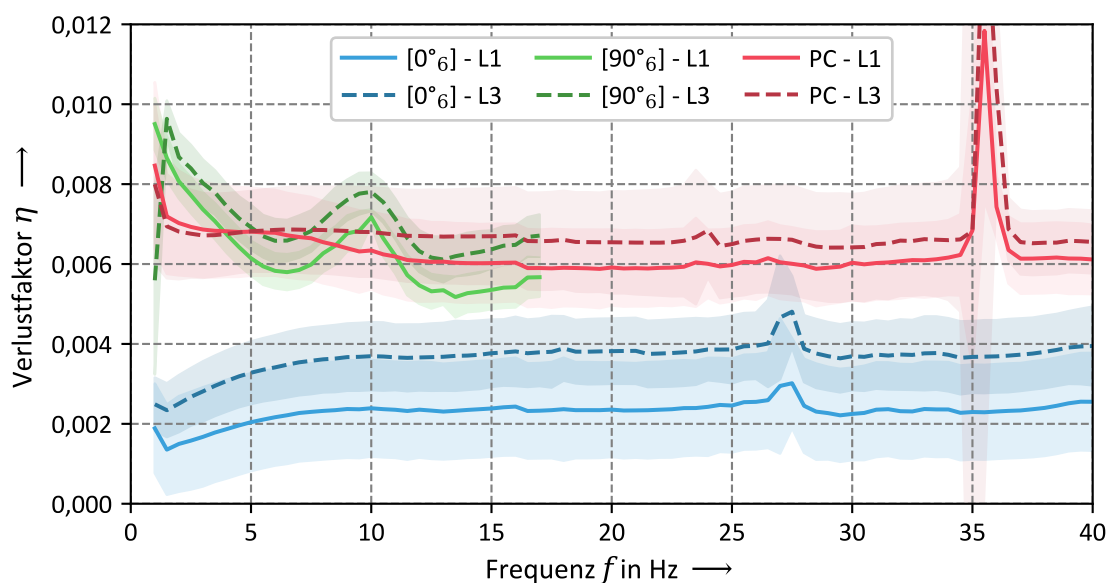


Abbildung 5.4: Untersuchung der 0°- und 90°-Faserorientierung der Cf-PC-Proben mittels 3PB-DMA bei den Belastungen L1 und L3. Darstellung des Verlustfaktors über der Frequenz.

In Abbildung 5.4 sind die Untersuchungen der unterschiedlichen Belastungen zusammengefasst. Dargestellt sind die Ergebnisse der unverstärkten PC-Proben sowie der Cf-PC-Proben mit einer 0°- und 90°-Faserorientierung. Die Versuchsreihe zeigt einen deutlichen Unterschied von η der geprüften Faserorientierungen. Jedoch sind zwischen der 90°-Faserorientierung und den PC-Proben nur geringe Unterschiede zu erkennen. Bedingt durch den wellenförmigen Messverlauf der 90°-Faserorientierung ist eine eindeutige Unterscheidung von η der [90°₆]-Proben im Vergleich zu den PC-Proben nicht möglich. Alle Proben zeigen einen Unterschied in η verursacht durch die unterschiedlichen dynamischen Belastungen. Die sehr hohe Streuung der jeweiligen Versuchsergebnisse fällt bei allen Proben auf. Bei den PC-Proben weicht der Messwert bei $f = 1$ Hz für beide Belastungen vom restlichen Verlauf ab. Des Weiteren fällt bei den PC-Proben ein Peak bei 36 Hz

auf. Bei dieser Frequenz wird durch F_d^{drv} jedoch keine Eigenfrequenz des Versuchsaufbaus festgestellt. Ab einer Prüffrequenz von 8 Hz ist ein leichter Unterschied von η für die unterschiedlichen Belastungen zu erkennen. Abgesehen von dem Peak bei 36 Hz zeigen die PC-Proben einen konstanten Messverlauf bis zu einer Prüffrequenz von 40 Hz. Die $[0^\circ_6]$ -Proben zeigen im niedrigen Frequenzbereich eine Zunahme von η mit der Frequenz. Diese erfolgt im Bereich von 1 Hz bis 7 Hz. Anschließend folgt ein konstanter Verlauf von η bis zu einer Prüffrequenz von 40 Hz. Die Dämpfungszunahme im niedrigen Frequenzbereich wird durch die Nullpunkthypothese erklärt (Kapitel 3.1.2). Des Weiteren zeigt Abbildung 5.4 einen Unterschied in η durch die unterschiedlichen Belastungen der $[0^\circ_6]$ -Proben. Die Proben mit einer 90° -Faserorientierung zeigen einen wellenförmigen Messverlauf von η mit zunehmender Prüffrequenz. Dieser Effekt ist bereits bei den Cf-EP-Proben aufgetreten und wird der niedrigen Biegesteifigkeit zugeschrieben. Zudem durchlaufen die Proben die erste Eigenfrequenz, weshalb der Prüfverlauf lediglich bis zu einer Frequenz von 21 Hz dargestellt wird. Für eine weitere Auswertung der Proben wird zusätzlich η bei einer definierten Frequenz betrachtet. Hierfür wird der Wendepunkt der wellenförmigen Messkurve ausgewählt, welcher bei etwa $f = 8,25$ Hz liegt. Die Frequenzmessung wird ab 1 Hz in Frequenzschritten von 0,5 Hz durchgeführt. Daher liegen diskrete Messwerte für die Frequenzen 8 Hz und 8,5 Hz vor. In Abbildung 5.5 werden alle Messwerte für diese Frequenzen zusammengefasst und deren Verteilung dargestellt.

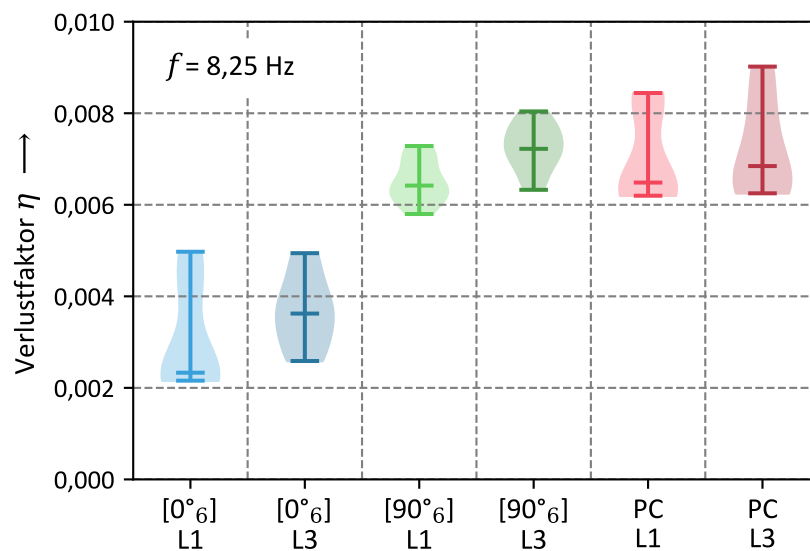


Abbildung 5.5: Verlustfaktor der Cf-PC-Proben mit einer 0° - und 90° -Faserorientierung. Darstellung der Belastungen L1 und L3 bei $f = 8,25$ Hz.

Die Darstellung in Abbildung 5.5 verdeutlicht die Abhängigkeit von η von der jeweiligen Belastung der $[0^\circ_6]$ -Proben. Durch die Darstellung wird sichtbar, dass einzelne Messungen der L1 Belastung stark von den anderen abweichen. Der Median von η liegt im unteren Ergebnisbereich aller Messungen. Daher ist die Verteilung der Ergebnisse der $[0^\circ_6]$ -Proben

bei dieser Belastung unsymmetrisch. Hingegen ist die Verteilung des Verlustfaktors bei der L3-Belastung symmetrisch, woraus eine Verteilung der einzelnen Messergebnisse über den gesamten Ergebnisbereich folgt.

Im Gegensatz dazu zeigen beide Belastungen der $[90^\circ_6]$ -Proben eine symmetrische Verteilung in Abbildung 5.5. Dabei lässt die Darstellung der $[90^\circ_6]$ -Proben einen geringen Einfluss der Belastung erkennen. Hierbei ist jedoch zu bedenken, dass nur ein geringer Ausschnitt des untersuchten Frequenzbereichs dargestellt ist. Zudem zeigt η der 90° -Faserorientierung einen wellenförmigen Verlauf über den Messbereich, wenn auch dies dem Versuchsaufbau geschuldet ist. Auch die PC-Proben lassen einen geringen Einfluss der Belastung erkennen. Dieser nimmt, wie in Abbildung 5.4 zu erkennen, mit steigender Frequenz zu. Durch die Darstellung der Ergebnisse bei $f = 8,25 \text{ Hz}$ kann kein Unterschied in η von den PC-Proben zu den $[90^\circ_6]$ -Proben festgestellt werden. Abschließend werden die Steifigkeiten der Proben bestimmt. Die Ergebnisse der hierzu durchgeführten statischen und dynamischen Versuche sind in Tabelle 5.5 dargestellt.

Tabelle 5.5: Zusammenfassung der statisch und dynamisch ermittelten Steifigkeiten der Cf-PC-Proben unterschiedlicher Faserorientierung. E' ist bei der Belastung L3 bestimmt und über den Frequenzbereich gemittelt.

Probe	E in MPa	E' in MPa
PC	2.427 (± 76)	2.495 (± 62)
$[0^\circ_6]$	84.784 (± 5.186)	83.610 (± 6.818)
$[90^\circ_6]$	3.895 (± 83)	3.952 (± 90)

Zur Analyse von E' werden die Werte über den gesamten Messbereich gemittelt. Im Gegensatz zu η kommt es bei E' zu keinem wellenförmigen Messverlauf. Auch die untersuchten Belastungen haben keinen Einfluss auf das Ergebnis und daher sind in Tabelle 5.5 lediglich die repräsentativen Ergebnisse für L3 dargestellt. Die Ergebnisse mit anderen Belastungen weichen nicht vom dargestellten Ergebnis ab. Neben den dynamischen Untersuchungen werden die Proben statisch geprüft. Die Ergebnisse der statisch ermittelten Steifigkeiten sind ebenfalls in Tabelle 5.5 dargestellt. Für PC-Proben und beiden untersuchten Faserorientierungen kommt es zu einer sehr guten Übereinstimmung der statischen und dynamischen Untersuchungen. Die für PC ermittelten Kennwerte stimmen sehr gut mit den Angaben des Herstellerdatenblattes überein (Tabelle 5.1). Für die Cf-PC werden im Vergleich zu den Angaben in Tabelle 5.1 etwas niedrigere Kennwerte ermittelt. Diese können verschiedene Ursachen haben, welche durch die Schliffbilder festgestellt wurden. Einerseits ist der bestimmte Faservolumengehalt im Vergleich zu den Herstellerangaben etwas niedriger, wodurch die Steifigkeit abnimmt. Des Weiteren sind sowohl die inhomogene Faserverteilung, als auch die trockenen Stellen im Laminat für die sehr hohe Streuung

der Ergebnisse verantwortlich.

5.1.3 Temperaturanalyse von PC und CF-PC

Der Einfluss der Temperatur auf das Werkstoffverhalten der PC- und Cf-PC-Proben wird in diesem Abschnitt untersucht. Eine Beschreibung der Vorgehensweise ist in Kapitel 4.5 zu finden. Zunächst werden die unverstärkten PC-Proben untersucht (Tabelle 5.4). Für die Untersuchungen wird die dynamische Dehnung auf $\varepsilon_d = 0,07\%$ und die statische Dehnung auf $\varepsilon_s = 0,085\%$ festgelegt. Das Ergebnis der Untersuchungen ist in Abbildung 5.6 dargestellt. Für die Messreihen werden fünf Proben untersucht, dargestellt ist jeweils die Mediankurve sowie die Standardabweichung als Bereich hinterlegt.

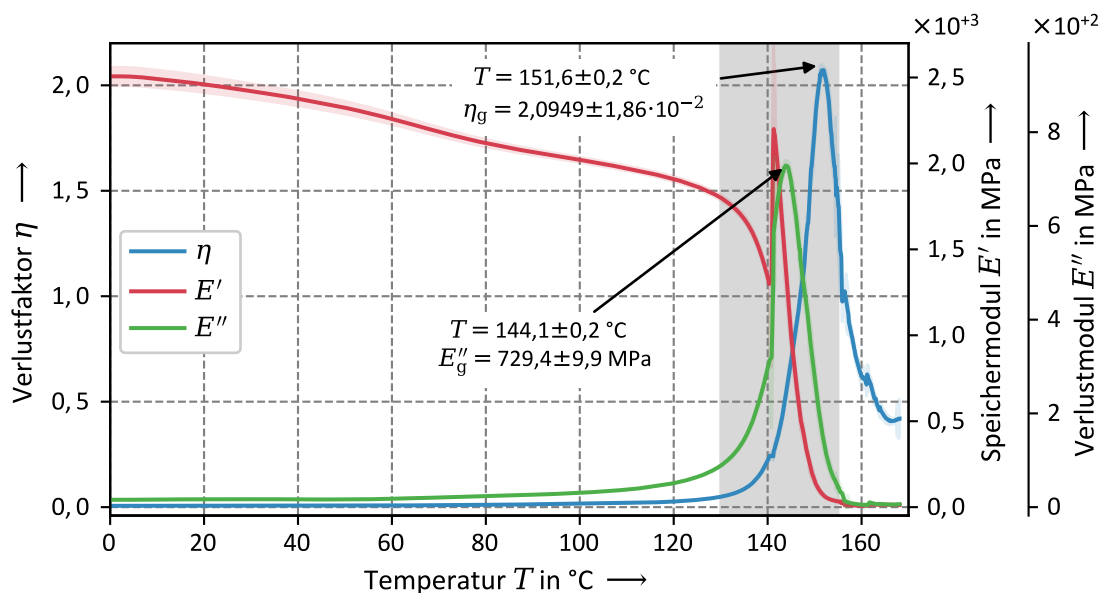


Abbildung 5.6: Tg-Kurve der PC-Proben ermittelt durch 3PB-DMA. Darstellung von η , E' und E'' über einen Temperaturbereich von 0 °C bis 170 °C. Der Glasübergangsbereich ist grau hinterlegt.

Für eine Tg-Kurve typisch werden in Abbildung 5.6 die drei Messgrößen η , E' und E'' über der Temperatur T dargestellt. Alle Messgrößen zeigen eine sehr geringe Streuung der Versuchsergebnisse über den gesamten Messverlauf. Zu Beginn des Glasübergangsbereichs (grau hinterlegt) kommt es zu einer plastischen Verformung der Proben. Mit zunehmender Temperatur nimmt diese zu und ist an der zunehmenden absoluten Prüfstempelposition erkennbar. Daher werden die Messkurven bei 170 °C einheitlich abgeschnitten und es ist der Temperaturbereich von 0 °C bis 170 °C dargestellt. Der Speichermodul nimmt bis zu Beginn des Glasübergangsbereichs ab und sinkt auf einen Wert unterhalb von 2000 MPa. Zudem lässt sich am Verlauf von E' eine Nachkristallisation der PC-Proben erkennen. Zu Beginn des Glasübergangsbereichs kommt es zu einer deutlichen Absenkung von E'

mit zunehmendem T . Darauf folgt ein sprunghafter Anstieg von E' über einen geringen Temperaturbereich, welcher die Nachkristallisation kennzeichnet. Anschließend kommt es zu einem steilen Abfall der Steifigkeit und nach dem Glasübergangsbereich ist keine Reststeifigkeit der Proben zu messen. Die Nachkristallisation zeigt in Abbildung 5.6 keinen Einfluss auf die η - und E'' -Werte. Der Verlustmodul hat bei T_g sein Maximum. Bereits ab einer Temperatur von ca. $T = 70^\circ\text{C}$ ist eine kontinuierliche Zunahme von E'' festzustellen. Sein Maximum liegt bei T_g und nach dem Glasübergangsbereich fällt auch E'' sehr stark ab. Das Maximum von η liegt bei $T = 151,6^\circ\text{C}$ und somit bei einem höheren T als E''_g . Für η lässt sich bis zum Beginn des Glasübergangsbereichs eine geringe Steigerung erkennen. Im Glasübergangsbereich kommt es zum Maximum von η . Für höhere Temperaturen fällt η wieder ab. Durch die plastische Verformung und den daher eingeleiteten Abbruch der Prüfung verbleibt η auf einem Wert deutlich oberhalb der Werte gemessen vor dem Glasübergangsbereich. Charakteristische Werte der T_g -Kurve außerhalb des Glasübergangsbereichs sind in Tabelle 5.6 zusammengefasst.

Tabelle 5.6: Charakteristische Werte der T_g -Kurve der PC-Proben.

T in $^\circ\text{C}$	η	E'' in MPa	E' in MPa
23,0	0,00693 ($\pm 4,27 \cdot 10^{-4}$)	16,8 ($\pm 0,8$)	2.449,2 ($\pm 46,7$)
160,0	0,65236 ($\pm 4,44 \cdot 10^{-2}$)	5,3 ($\pm 0,3$)	8,1 ($\pm 0,9$)

Durch Tabelle 5.6 und die Darstellung in Abbildung 5.6 wird die Überhöhung von η_g und E''_g im Glasübergangsbereich im Vergleich zur Raumtemperatur verdeutlicht. Das Maximum des Verlustfaktors liegt etwa 350-mal höher als der Wert bei RT. Bei dem Verlustmodul liegt die Überhöhung beim Faktor 40. Sowohl E' als auch E'' liegen bei Temperaturen oberhalb des Glasübergangsbereichs bei absolut sehr niedrigen Werten. Somit besteht in diesem Bereich keinerlei Reststeifigkeit der Proben. Das Datenblatt des Herstellers gibt ein T_g von 145°C (Tabelle 5.1) an. Mit einem gemessenen T_g von $144,1^\circ\text{C}$ zeigen die Versuche keine Abweichung zu den Angaben des Herstellers.

Des Weiteren werden in diesem Abschnitt Proben mit einer Faserverstärkung untersucht. Hierbei werden die in Tabelle 5.4 dargestellten Proben mit einer 0° -Faserverstärkung untersucht. Für die Untersuchungen wird die Belastung auf $\varepsilon_d = 0,05\%$ und $\varepsilon_s = 0,0625\%$ festgelegt. Die Ergebnisse der Untersuchung sind in Abbildung 5.7 zusammengefasst. Untersucht werden fünf Proben, der jeweilige Median sowie die Standardabweichung sind dargestellt.

Abbildung 5.7 zeigt die T_g -Kurve für die $[0^\circ_6]$ -Proben aus Tabelle 5.4. Es ist ein Maximum von E'' und η im Glasübergangsbereich zu erkennen und die jeweiligen Werte sind markiert. Dabei liegen die Maxima der beiden Kurven dicht zusammen. Vor dem Glas-

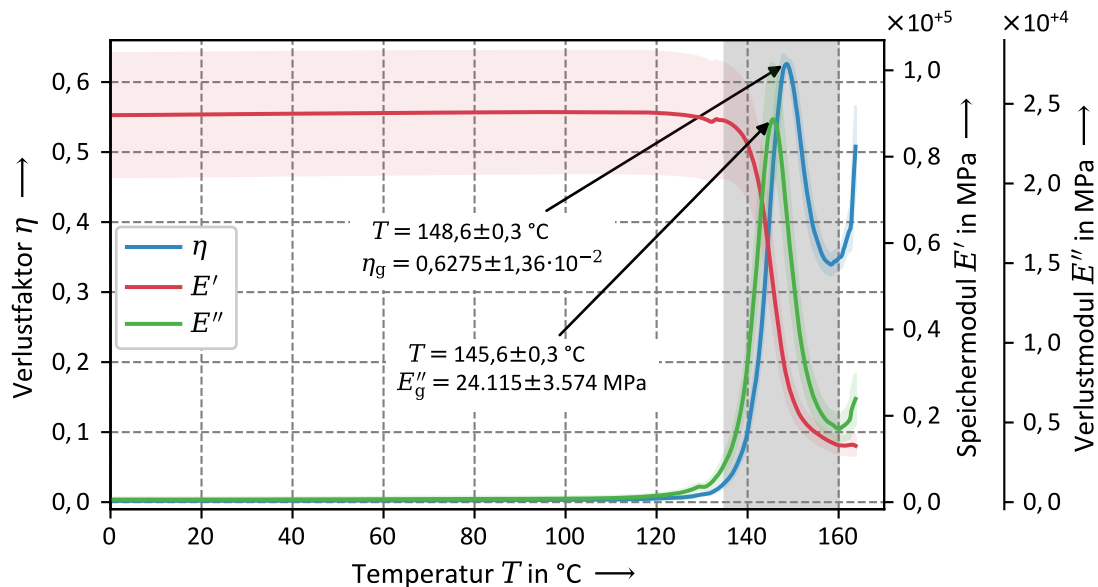


Abbildung 5.7: T_g-Kurve der Cf-PC-Proben mit einer 0°-Faserorientierung ermittelt über 3PB-DMA. Darstellung von η , E' und E'' über einen Temperaturbereich von 0 °C bis 170 °C. Der Glasübergangsbereich ist grau hinterlegt.

übergangsbereich sind beide Messwerte sehr gering. Bei der verwendeten Skalierung ist ein Anstieg erst ab einer Temperatur von etwa 120 °C zu erkennen. Oberhalb von T_g verbleiben η und E'' bei hohen Werten. Diese liegen mehrere Größenordnungen oberhalb der Werte von RT. Zudem kommt es für beide Messwerte zu einem erneuten Anstieg mit zunehmender Temperatur. Die Ursache hiervon ist die zunehmende plastische Verformung der Proben. Diese führt zu einem Ende der Prüfung bei etwa 165 °C. E' zeigt nur eine sehr geringe Abnahme der Steifigkeit bis zum Beginn des Glasübergangsbereiches. Auffällig ist das sehr große Streuband von E' der [0°₆]-Proben. Die Versuchsreihe besteht aus fünf Prüfungen. Hierbei weicht eine sehr stark zu höheren und eine sehr stark zu niedrigeren Steifigkeiten ab. Die daraus resultierende sehr hohe Standardabweichung ist in Tabelle 5.7 angegeben. Im Glasübergangsbereich kommt es über einen Temperaturbereich von 20 °C zu einem sehr starken Abfall der Steifigkeit. Oberhalb der Glasübergangstemperatur zeigen die Proben eine geringe Reststeifigkeit. Diese liegt, trotz Faserverstärkung, bei nur etwa 13 GPa. Charakteristische Werte der T_g-Kurve außerhalb des Glasübergangsbereichs sind in Tabelle 5.7 zusammengefasst.

Tabelle 5.7: Charakteristische Werte der T_g-Kurve der Cf-PC-Proben mit einer 0°-Faserorientierung.

T in °C	η	E'' in MPa	E' in MPa
23,0	0,00201 ($\pm 1,38 \cdot 10^{-3}$)	165,0 ($\pm 117,2$)	89.791 (± 14.267)
160,0	0,34750 ($\pm 1,60 \cdot 10^{-2}$)	4.623,7 ($\pm 821,4$)	13.195 (± 1.972)

Vergleich der Temperaturanalysen von PC und Cf-PC

Als nächstes wird der Vergleich der Temperaturuntersuchungen der PC-Proben und der Cf-PC-Proben diskutiert. Wie in Kapitel 4.5.1 erläutert wird der Vergleich auf zwei Grafiken aufgeteilt. In Abbildung 5.8 ist ein Vergleich von η über der Temperatur dargestellt. Dieser wird ohne Veränderungen an den Messdaten durchgeführt.

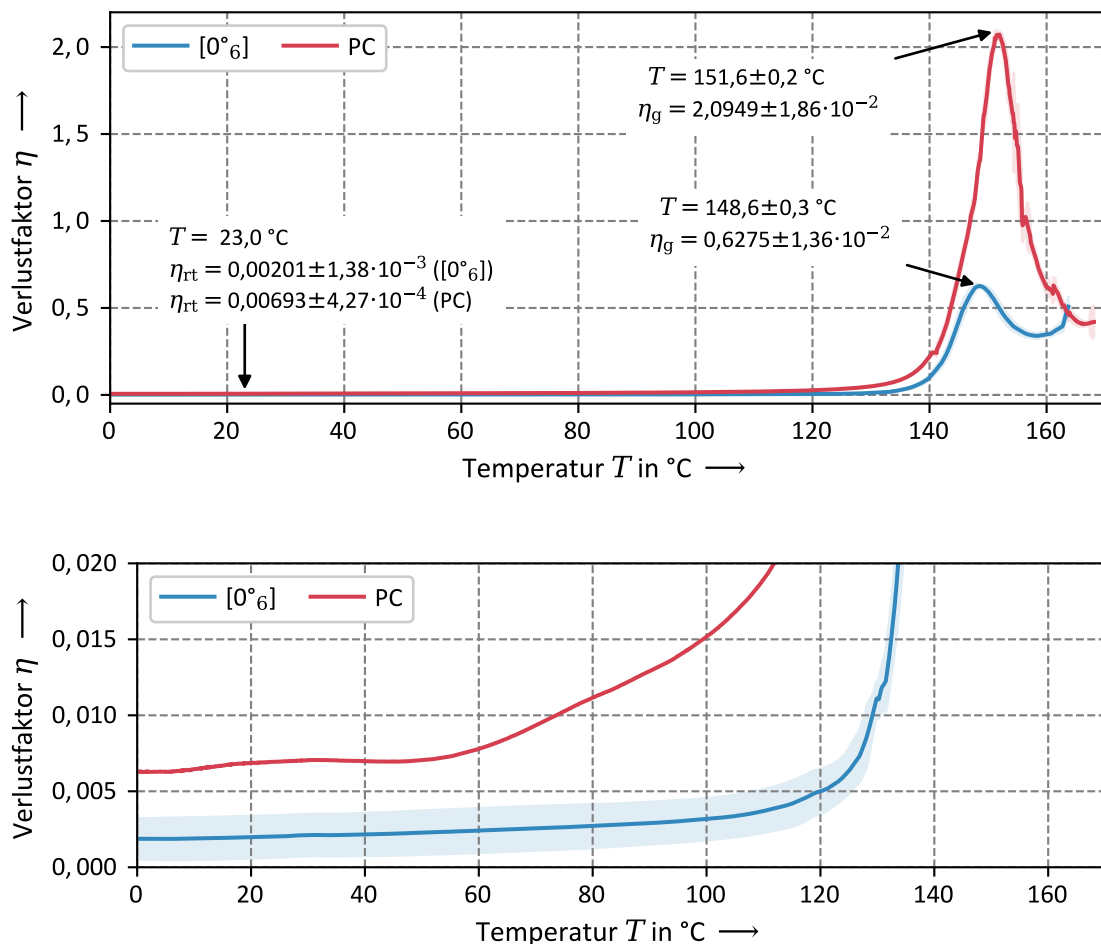


Abbildung 5.8: Vergleich von η von PC und Cf-PC ermittelt durch 3PB-DMA über einen Temperaturbereich von 0°C bis 170°C . Darstellung des gesamten Messverlaufs (oben) und mit angepasster η -Skalierung (unten).

Der Vergleich der T_g -Kurve in Abbildung 5.8 zeigt einen höheren η_g -Wert der PC-Proben im Vergleich zu den $[0^{\circ}_6]$ -Proben aus Cf-PC. Beide Kurven erreichen ihr jeweiliges Maximum im Glasübergangsbereich. Jedoch liegt das Maximum bei unterschiedlichen Temperaturen. Die Proben mit einer Faserverstärkung erreichen ihr Maximum bereits bei einer etwas niedrigeren Temperatur. Neben dem Werkstoffverhalten im Glasübergangsbereich ist auch das Verhalten außerhalb des Bereichs zu analysieren. Abbildung 5.8 (unten) zeigt mit angepasster Skala η außerhalb des Glasübergangsbereichs.

Hierbei sind weitere Unterschiede beider Proben zu erkennen. Die PC-Proben zeigen über den gesamten Temperaturbereich eine Abhängigkeit von T . Bis 50 °C ist η über den Messbereich am geringsten. Im Temperaturbereich von 50 °C bis 100 °C kommt es bereits zu einer leichten Zunahme von η . Diese Zunahme ist in Abbildung 5.8 (oben) aufgrund der Gesamtüberhöhung nicht zu erkennen. Bezogen auf die Gesamtkurve kann eine Zunahme von η der PC-Proben erst ab etwa 120 °C erkannt werden. Im Gegensatz dazu zeigen die $[0^\circ_6]$ -Proben bis 100 °C eine konstant geringe Zunahme von η mit wachsendem T . Anschließend folgt eine starke Zunahme im Glasübergangsbereich. Beide Proben zeigen bei Temperaturen oberhalb der Glasübergangstemperatur η deutlich erhöht im Vergleich zu RT.

Zum Vergleich der gemessenen Steifigkeiten werden diese auf ihr jeweiliges Maximum bezogen. Dadurch kann die jeweilige Abnahme über den Temperaturbereich beurteilt werden. Beide Messungen mit den bezogenen Steifigkeiten und in Abhängigkeit der Temperatur sind in Abbildung 5.9 dargestellt.

Das Maximum von E' liegt hierbei bei beiden Proben zu Beginn der Messung bei $T = 0^\circ\text{C}$. Für E' ergeben sich für die unterschiedlichen Proben grundlegend verschiedene Messverläufe. Die PC-Proben zeigen bis zum Beginn des Glasübergangsbereichs eine starke Abnahme der Steifigkeit auf etwa 60 % ihres Maximums. Anschließend kommt es zu einer Nachkristallisation und die Steifigkeit steigt in einem kleinen Temperaturbereich sprunghaft an. Im Gegensatz dazu ist bei den faserverstärkten Proben kein Steifigkeitsabfall bis zum Glasübergangsbereich zu erkennen. Auch eine Nachkristallisation kann nicht erkannt werden. Oberhalb des Glasübergangsbereichs haben die $[0^\circ_6]$ -Proben noch eine Reststeifigkeit von etwa 15 %. Ohne die Faserverstärkung fällt die Steifigkeit bei den PC-Proben auf Null ab. Die Maxima von E'' treten für beide Proben bei etwa 145 °C auf und die gemessenen Unterschiede sind minimal. Dabei zeigen die faserverstärkten Proben ein gering höheres T_g und somit den gleichen Trend wie die EP-Proben in Kapitel 4.5.1. Außerhalb der Glasübergangstemperatur können zwischen den Proben Unterschiede festgestellt werden. Die PC-Proben zeigen bereits bei einer geringeren Temperatur eine Zunahme von E'' . Ab einer Temperatur von 60 °C nimmt E'' für die PC-Proben kontinuierlich zu. Der Anstieg von E'' für die Cf-PC Proben erfolgt erst im Glasübergangsbereich. Daher wird der Unterschied von E'' der Proben ab 60 °C bis 130 °C größer. Oberhalb von T_g fällt der Verlauf von E'' der PC-Proben auf Null ab. Für die Cf-PC verbleibt ein E'' von etwa 20 % bezogen auf den Maximalwert. Beide Proben zeigen ab Beginn des Glasübergangsbereichs eine plastische Verformung. Daher ist eine Messung weit oberhalb von T_g nicht möglich.

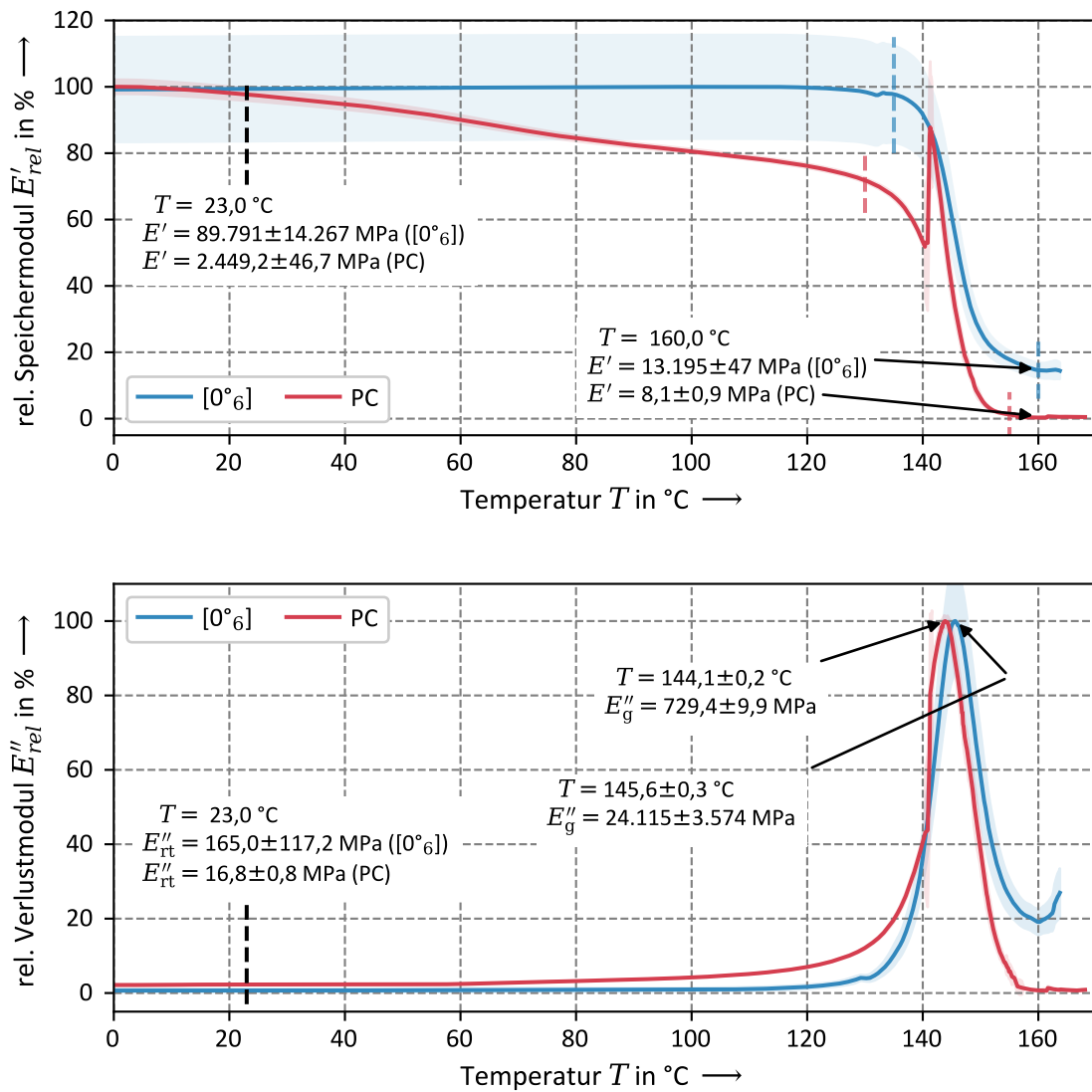


Abbildung 5.9: Vergleich von E'_{rel} (oben) und E''_{rel} (unten) von PC und Cf-PC ermittelt durch 3PB-DMA über einen Temperaturbereich von 0 °C bis 170 °C. Die Werte sind auf ihr jeweiliges Maximum bezogen.

5.1.4 Vergleich der Versuchsmethoden an Cf-PC

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse der Ausschwingversuche aus Kapitel 5.1.1 mit den DMA-Ergebnissen aus Kapitel 5.1.2 verglichen. Dabei zeigen die Ausschwingversuche bei einer Faserorientierung von 0° eine erste Eigenfrequenz von etwa 36 Hz. Die DMA Untersuchungen in Abbildung 5.4 zeigen für die 0° -Proben einen glatten Verlauf über die Prüffrequenz. Daher ist ein Vergleich bei 36 Hz möglich. Die Ausschwingversuche der 90° -Proben haben ihre erste Eigenfrequenz bei etwa 9 Hz. Um den Einfluss des wellenförmigen Messverlaufs der 90° -Proben aus Abbildung 5.4 zu minimieren, werden für den Vergleich die DMA-Ergebnisse vom Wendepunkt des Messverlaufs bei 8,25 Hz verwendet. Die Ergebnisse für den Vergleich sind in Abbildung 5.10 dargestellt.

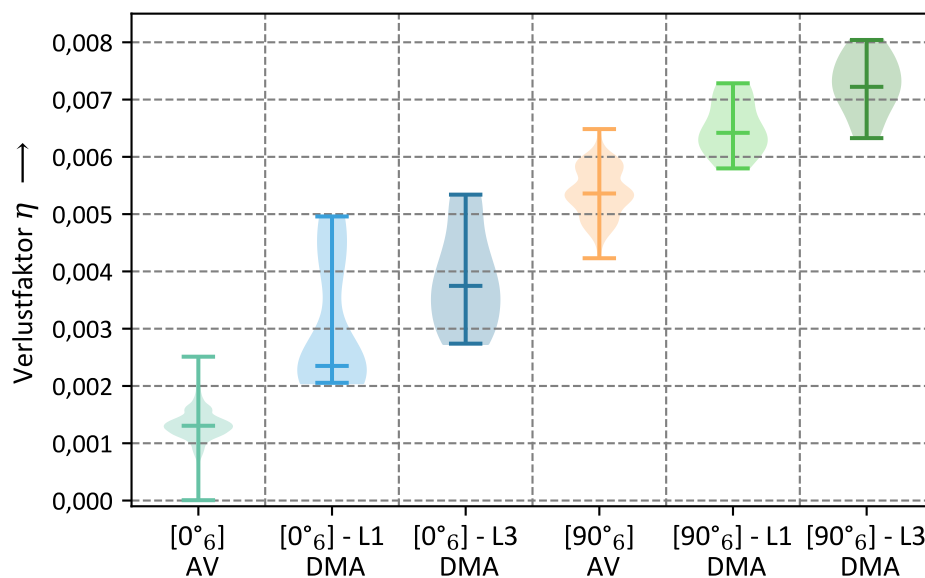


Abbildung 5.10: Vergleich der Ausschwingversuche mit den Ergebnissen der 3PB-DMA an den Cf-PC-Proben unterschiedlicher Faserorientierung. Darstellung der Belastung L1 und L3 der DMA-Untersuchungen.

In Abbildung 5.10 wird deutlich, dass durch die Ausschwingversuche für beide Faserorientierungen jeweils ein niedrigerer Wert für η gemessen wird. Bei den bisherigen Vergleichen zeigen die Ausschwingversuche stets einen größeren Ergebnisbereich als die DMA-Versuche. Speziell bei der 0° -Faserorientierung ändert sich dieses Verhältnis. Durch die Darstellung in Abbildung 5.10 und den Vergleich mit den Ausschwingversuchen wird die sehr breite Verteilung der Ergebnisse der DMA der 0° -Proben veranschaulicht. Zudem wird der Einfluss der Belastung auf die DMA-Ergebnisse verdeutlicht. Die Ergebnisse des Vergleichs sind in Tabelle 5.8 zusammengefasst.

Tabelle 5.8 bestätigt die Unterschiede in η . Neben der hohen Streuung von η verdeutlicht Tabelle 5.8 die hohe Streuung der Steifigkeit. Bei den 0° -Proben liegt diese bei fast 8 %

des gemessenen Wertes. Für beide Faserorientierungen werden mit den Ausschwingversuchen höhere Steifigkeiten gemessen. Bei den 0°-Proben liegen die Unterschiede noch im Bereich der Standardabweichung, auch wenn diese sehr hoch ist. Weit außerhalb der Standardabweichung liegen die Unterschiede der Steifigkeit bei den 90°-Proben.

Tabelle 5.8: Ergebniszusammenfassung der Ausschwingversuche und der DMA an den Cf-PC-Proben. Darstellung des Verlustfaktors η sowie des Speichermoduls E' in Abhängigkeit der jeweiligen Faserorientierung, Belastung und Prüffrequenz.

AV	η -	E' in MPa	f_1 in Hz	DMA	η -	E' in MPa	f in Hz
[0° ₆]	0,00131 ($\pm 2,31 \cdot 10^{-4}$)	91.699 (± 7.110)	36,78 ($\pm 0,90$)	[0° ₆] - L1	0,00235 ($\pm 1,11 \cdot 10^{-3}$)	84.509 (± 6.486)	36-38 -
	- -	- -	- -	[0° ₆] - L3	0,00375 ($\pm 8,41 \cdot 10^{-4}$)	83610 (± 6.817)	36-38 -
[90° ₆]	0,00536 ($\pm 4,11 \cdot 10^{-4}$)	5.022 (± 53)	8,83 ($\pm 0,07$)	[90° ₆] - L1	0,00642 ($\pm 4,66 \cdot 10^{-4}$)	4.060 (± 114)	8-8,5 -
	- -	- -	- -	[90° ₆] - L3	0,00722 ($\pm 5,11 \cdot 10^{-4}$)	3.954 (± 90)	8-8,5 -

Sowohl η als auch E' zeigen bei den Cf-PC-Proben keine gute Übereinstimmung der Ergebnisse beider Versuchsmethoden. Für beide Faserorientierungen wird ein niedrigerer η - und ein höherer E' -Kennwert durch die Ausschwingversuche ermittelt.

5.2 Dynamische Untersuchungen der PEEK-Matrix

In diesem Abschnitt werden die dynamischen Untersuchungen an Proben mit einer PEEK-Matrix vorgestellt. Dabei werden Untersuchungen an unverstärkten Kunststoffproben und kohlenstoffaserverstärkten Proben (Cf-PEEK) durchgeführt.

Die unverstärkte PEEK-Platte wird mit einer Plattendicke von 4 mm von einem Händler [109] bezogen. Der Hersteller ist *Zell-Metall* und die Materialbezeichnung ist *ZELLAMID® 1500 X*. Die Proben für die Untersuchungen werden aus den Platten gefräst, die Geometrie ist hierbei gleich zu den Untersuchungen in Kapitel 4.4.1. Die Cf-PEEK-Proben werden aus einem unidirektionalen faserverstärkten Tape mit der Materialbezeichnung *TPUD-PEEK-HTS45* von *Tenax™* hergestellt. Durch das Schichten von sechs UD-Lagen gleicher Faserorientierung werden die Platten im Autoklav hergestellt. Passend zu den jeweiligen Versuchen werden Proben mit einer 0°- oder 90°-Faserorientierung zurecht gesägt. Zur Analyse der Plattenqualität wird der Faservolumengehalt der Proben bestimmt. Der hierbei ermittelte Kennwert ist in Tabelle 5.10 angegeben. Die Materialkennwerte und Angaben des Herstellerdatenblattes für beide Materialien sind in Tabelle 5.9 zusammengefasst.

Tabelle 5.9: Kennwerte von PEEK [109] und Cf-PEEK [110] (mit $\varphi = 58\%$). Angaben für den Zug-Elastizitätsmodul (E^t) und den Biege-Elastizitätsmodul (E^f).

Material	Mechanische Eigenschaften		Weitere Kennwerte
PEEK	$E^t = 4.200 \text{ MPa}$	$E^f = 3.900 \text{ MPa}$	$T_g = 150 \text{ °C}$
Cf-PEEK	$E_{\parallel}^t = 138.000 \text{ MPa}$	$E_{\perp}^f = 120.000 \text{ MPa}$ $E_{\perp}^f = 9.200 \text{ MPa}$	$T_g = 143 \text{ °C}$ $d_1 = 0,14 \text{ mm}$

5.2.1 Ausschwingversuche an Cf-PEEK

Zur Untersuchung unterschiedlicher Faserorientierungen der Cf-PEEK-Proben werden in diesem Abschnitt freie Ausschwingversuche durchgeführt und analysiert. Für die Versuche werden die Proben dargestellt in Tabelle 5.10 verwendet. Hierbei werden Proben mit einer 0°- und 90°-Faserorientierung und gleicher Probengeometrie untersucht.

Tabelle 5.10: Cf-PEEK-Proben unterschiedlicher Faserorientierung für die freien Ausschwingversuche, Probengeometrie nach [100].

Probe	d in mm	b in mm	l in mm	m in g	φ in %
[0° ₆]	0,99 ($\pm 0,03$)	14,92 ($\pm 0,01$)	250,08 ($\pm 0,04$)	5,73 ($\pm 0,17$)	51,22 ($\pm 7,09$)
[90° ₆]	0,97 ($\pm 0,02$)	14,90 ($\pm 0,06$)	250,04 ($\pm 0,04$)	5,76 ($\pm 0,02$)	51,22 ($\pm 7,09$)

Die Versuchsdurchführung ist analog zu den in Kapitel 4.2 und 5.1.1 durchgeführten Ausschwingversuchen an dem Cf-EP- und Cf-PC-Material. Dabei werden beide Faserorien-

tierungen mit jeweils fünf Proben, an denen der Ausschwingversuch fünfmal durchgeführt wird, untersucht. Das durch das Ausschwingverhalten bestimmte η wird in Abbildung 5.11 für beide Faserorientierungen und in Abhängigkeit der Probengeschwindigkeit dargestellt.

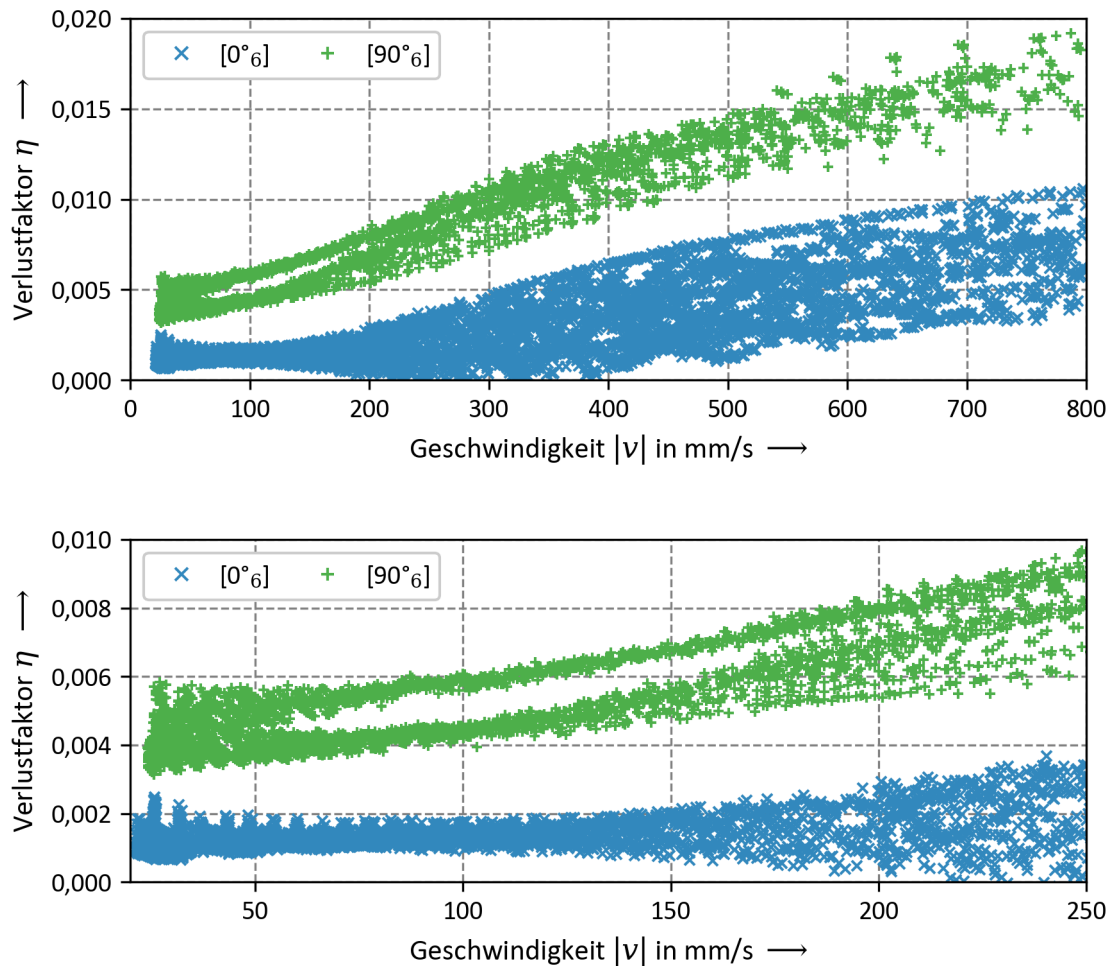


Abbildung 5.11: Vergleich der 0°- und 90°-Faserorientierung der Cf-PEEK-Proben. Darstellung von η über $|v|$ bei $n = 8$. Gesamter Messverlauf (oben) und Vergrößerung des niedrigen Geschwindigkeitsbereichs (unten).

Abbildung 5.11 zeigt einen deutlichen Unterschied zwischen den geprüften Faserorientierungen. Erwartungsgemäß führt eine 0°-Faserorientierung entlang der Balkenachse zu einer geringeren Dämpfung als bei einer Faserorientierung von 90°. Bei Probengeschwindigkeiten oberhalb von 150 mm/s zeigen beide Faserorientierungen eine sehr starke Streuung der Versuchsergebnisse. Des Weiteren ist bei den 90°-Proben eine Aufteilung in zwei Kurvenbereiche bei Geschwindigkeiten von 175 mm/s bis 50 mm/s zu erkennen. Hierbei handelt es sich um die Abweichung von zwei der geprüften fünf Proben. Dabei entsteht der Unterschied bei allen fünf Einzelprüfungen der zwei abweichenden Proben. Für beide Faserorientierungen kann ein Bereich identifiziert werden, in dem η unabhängig der

Probengeschwindigkeit ist. Unterhalb einer Geschwindigkeit von 125 mm/s ist für eine Faserorientierung von 0° kein Einfluss der Geschwindigkeit auf η zu erkennen. Bei 90° liegt diese Grenze bei 75 mm/s. Für den jeweiligen Geschwindigkeitsbereich der Faserorientierungen werden aggregierte Werte für η bestimmt. Das Ergebnis ist in Abbildung 5.12 dargestellt.

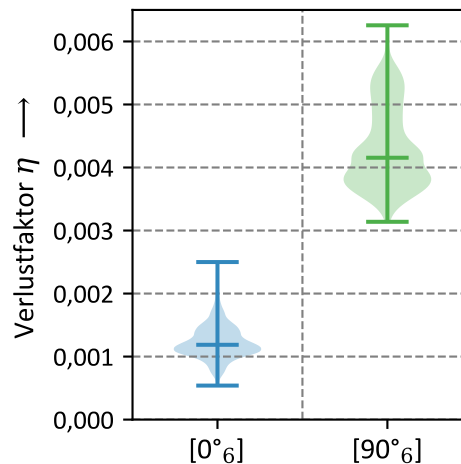


Abbildung 5.12: Vergleich von η für die $[0^\circ]_6$ - und $[90^\circ]_6$ -Proben. Ermittlung von η mit der jeweiligen Geschwindigkeitsgrenze bei $n = 8$.

Durch die Darstellung in Abbildung 5.12 wird der Unterschied in η der verschiedenen Faserorientierungen verdeutlicht. Die jeweiligen Mediane und die entsprechende Standardabweichung sind in Tabelle 5.11 zusammengefasst. Für beide Faserorientierungen ergibt sich ein sehr großer Ergebnisbereich. Dieser ist für die $[90^\circ]_6$ -Proben besonders groß und erstreckt sich über einen Bereich größer 0,003. Die $[0^\circ]_6$ -Proben zeigen absolut eine geringere Streuung um den Median. Ein Großteil der Werte liegt symmetrisch um den Median. Hingegen kommt es bei den $[90^\circ]_6$ -Proben zu einer Verteilung der Ergebnisse über nahezu den gesamten Ergebnisbereich. Hierbei liegt eine höhere und unsymmetrische Streuung um den Median vor. Die Ursache hierbei liegt bei den zwei abweichenden Proben der Prüferie und ist in Abbildung 5.11 (unten) zu erkennen. Zudem spiegelt sich die hohe Verteilung in der in Tabelle 5.11 aufgeführten Standardabweichung wider. Neben η sind in Tabelle 5.11 die durch die FFT bestimmten Eigenfrequenzen sowie die daraus ermittelten Steifigkeiten aufgetragen.

Alle Ergebnisse der Ausschwingversuche an den $[0^\circ]_6$ - und $[90^\circ]_6$ -Proben sind in Tabelle 5.11 zusammengefasst. Es werden unterschiedliche Dämpfungen für die jeweiligen Faserorientierungen gemessen. Hierbei führt ein höherer Faserwinkel zu einer ebenfalls höheren Dämpfung. Durch Abbildung 5.12 wird veranschaulicht und durch die Zahlenwerte in Tabelle 5.11 belegt, dass die $[90^\circ]_6$ -Proben eine höhere Standardabweichung haben. Die durch den Ausschwingversuch ermittelten Steifigkeiten der unterschiedlichen Faserori-

Tabelle 5.11: Zusammenfassung der Ergebnisse der Cf-PEEK-Proben. Ermittlung von η für $n = 8$ und den jeweiligen Geschwindigkeitsbereich, der Speichermodul wird aus der ermittelten f_1 sowie der Probengeometrie bestimmt.

Probe	η	f_1 in Hz	f_2 in Hz	$\hat{v}_2/\hat{v}_1$ in %	E' in MPa
$[0^\circ_6]$	0,00119 ($\pm 2,46 \cdot 10^{-4}$)	37,66 ($\pm 1,21$)	237,62 ($\pm 7,43$)	3,12 ($\pm 0,70$)	113.211 (± 2.969)
$[90^\circ_6]$	0,00415 ($\pm 6,16 \cdot 10^{-4}$)	10,32 ($\pm 0,29$)	65,80 ($\pm 1,43$)	3,00 ($\pm 0,60$)	8.887 (± 795)

entierungen sind in Tabelle 5.11 aufgeführt. Hierbei kommt es für beide Faserorientierungen zu einer guten Übereinstimmung mit den Kennwerten des Herstellers (Tabelle 5.9). Die Prüfung gleicher Probengeometrien hat bei unterschiedlichen Faserorientierungen und unterschiedlichen Steifigkeiten auch verschiedene Eigenfrequenzen zur Folge. Für den Vergleich der Ausschwingversuche mit weiteren Versuchsergebnissen wird η der jeweiligen ersten Eigenfrequenz zugeordnet. Abschließend ist zu erwähnen, dass das Verhältnis der Amplituden der Geschwindigkeiten ($\hat{v}_2/\hat{v}_1$) der ersten und zweiten Eigenfrequenz bei der Messung sehr gering ist. Daher kann ein Einfluss weiterer Eigenfrequenzen auf das Ergebnis als vernachlässigbar betrachtet werden.

5.2.2 Frequenzanalyse von PEEK und Cf-PEEK

Zur Untersuchung des Frequenzverhaltens werden in diesem Abschnitt Proben aus unverstärktem PEEK sowie Cf-PEEK-Proben untersucht. Herstellung und Kennwerte des Materials sind in Tabelle 5.9 dargestellt. Die Geometrie der jeweiligen Proben wird gleich zu den Untersuchungen der EP- und Cf-EP-Proben sowie der PC- und Cf-PC-Proben gehalten. In den dynamischen Versuchen wird lediglich eine Probendicke untersucht und die Proben sind in Tabelle 5.12 zusammengefasst.

Tabelle 5.12: PEEK- und Cf-PEEK-Proben mit einer 0° - und 90° -Faserorientierung für die DMA Untersuchungen mittels 3PB. Verhältnisse l/d und b/d der Probengeometrie (Cf-PEEK) nach [99].

Probe	d in mm	b in mm	l in mm	φ in %	ϕ in %
PEEK	4,40 ($\pm 0,01$)	10,01 ($\pm 0,01$)	60,00	-	0,00 ($\pm 0,00$)
$[0^\circ_6]$	0,98 ($\pm 0,03$)	7,98 ($\pm 0,02$)	60,00	51,22 ($\pm 7,09$)	-
$[90^\circ_6]$	0,99 ($\pm 0,01$)	7,97 ($\pm 0,01$)	60,00	51,22 ($\pm 7,09$)	-

Bei der dynamischen Untersuchung werden die Belastungen L1 und L3, definiert in Tabelle 3.3, über einen Frequenzbereich von 1 Hz bis 40 Hz geprüft. Die Versuche werden bei Raumtemperatur durchgeführt. Für die Untersuchungen werden jeweils sechs Proben

geprüft. Dargestellt in Abbildung 5.13 ist jeweils die Mediankurve sowie die Standardabweichung als Bereich hinterlegt.

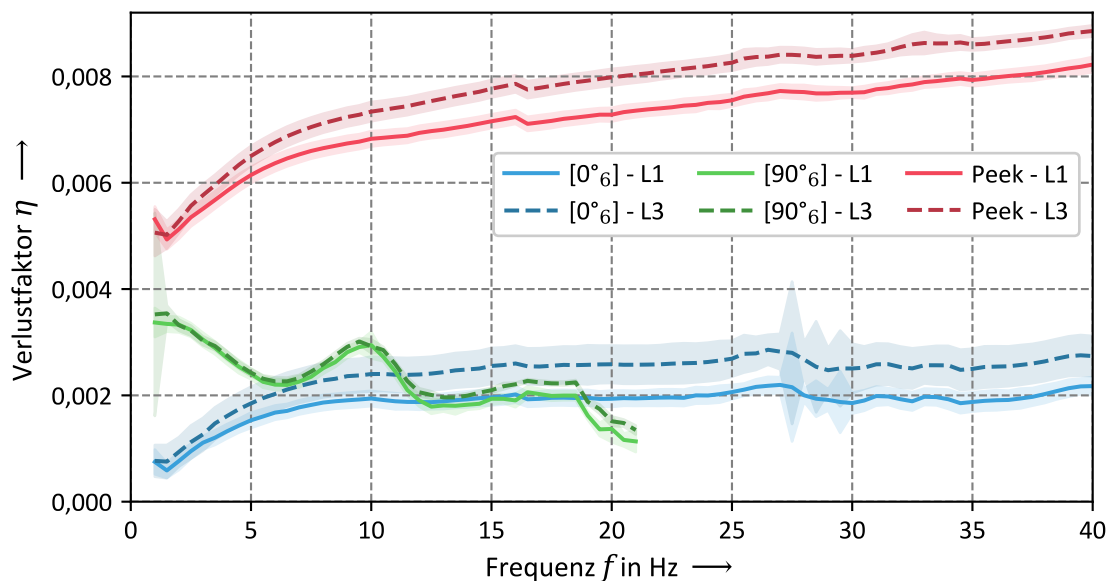


Abbildung 5.13: Untersuchung der 0°- und 90°-Faserorientierung der Cf-PEEK-Proben mittels 3PB-DMA bei den Belastungen L1, und L3. Darstellung des Verlustfaktors über der Frequenz.

In Abbildung 5.13 sind die Untersuchungen der unterschiedlichen Belastungen zusammengefasst. Dargestellt sind die Ergebnisse der unverstärkten PEEK-Proben sowie der Cf-PEEK-Proben mit einer 0°- und 90°-Faserorientierung. Hierbei zeigen alle Proben eine sehr geringe Streuung der Ergebnisse. Dabei ist ein deutlicher Unterschied in η der unverstärkten PEEK-Proben zu den beiden faserverstärkten Cf-PEEK-Proben zu erkennen. Im Gegensatz dazu können zwischen der 0°- und 90°-Faserorientierung nur geringe Unterschiede in η festgestellt werden. Bedingt durch den wellenförmigen Messverlauf der $[90^\circ_6]$ -Proben variieren die Unterschiede zu den $[0^\circ_6]$ -Proben stark über den gemessenen Frequenzbereich. Bis zu einer Frequenz von 5 Hz werden für die $[90^\circ_6]$ -Proben η höhere Werte gemessen als bei den $[0^\circ_6]$ -Proben. Anschließend sind keine erheblichen Unterschiede in η zwischen der 0°- und 90°-Faserorientierung zu erkennen. Die unverstärkten PEEK-Proben zeigen einen stetigen Anstieg von η über den gesamten Frequenzbereich. Dieser ist bis zu einer Frequenz von 8 Hz sehr ausgeprägt, anschließend nimmt die Steigung etwas ab. Bis zu einer Frequenz von 5 Hz kann nur ein sehr geringer Unterschied in η durch die Belastung festgestellt werden. Oberhalb von 5 Hz zeigt die Belastung einen eindeutigen Einfluss auf η . Mit zunehmender Prüffrequenz wird der Unterschied durch die unterschiedlichen Belastungen größer. Die $[0^\circ_6]$ -Proben zeigen im niedrigen Frequenzbereich ebenfalls eine Zunahme von η mit der Frequenz. Diese erfolgt im Bereich von 1 Hz bis 7 Hz. Anschließend folgt ein konstanter Verlauf von η bis zu einer Prüffrequenz von 40 Hz. Die Dämpfungszunahme im niedrigen Frequenzbereich wird durch die Null-

punkthypothese erklärt (Kapitel 3.1.2). Des Weiteren zeigt Abbildung 5.13 einen geringen Unterschied in η durch die unterschiedlichen Belastungen der $[0^\circ_6]$ -Proben. Die Proben mit einer 90° -Faserorientierung zeigen einen wellenförmigen Messverlauf von η mit zunehmender Prüffrequenz. Dieser Effekt ist bereits bei den Cf-EP- und Cf-PC-Proben mit einer 90° -Faserorientierung aufgetreten und ist durch die niedrige Biegesteifigkeit begründet. Ein Grund für die allgemein sehr niedrige Dämpfung der $[90^\circ_6]$ -Proben ist aus den bisherigen Untersuchungen nicht ersichtlich. Die Untersuchungen der unverstärkten Matrix ergeben hierbei keinen Anhaltspunkt. Für eine weitere Analyse der Untersuchungen wird zusätzlich η bei einer definierten Frequenz betrachtet. Hierfür wird erneut die Frequenz $f = 8,25 \text{ Hz}$ ausgewählt, bei welcher der Wendepunkt des wellenförmigen Messverlaufs der $[90^\circ_6]$ -Proben liegt. Die Ergebnisse für diese Frequenz sind in Abbildung 5.14 zusammengefasst.

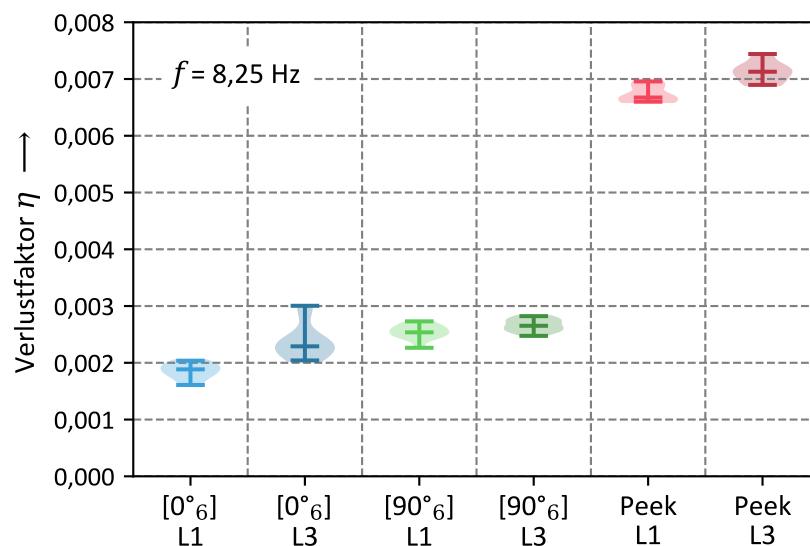


Abbildung 5.14: Verlustfaktor der Cf-Peek Proben mit einer 0° - und 90° -Faserorientierung. Darstellung der Belastungen L1 und L3 bei $f = 8,25 \text{ Hz}$.

Alle Versuche an PEEK und Cf-PEEK zeigen in Abbildung 5.14 eine sehr geringe Streuung der Ergebnisse. Lediglich bei den $[0^\circ_6]$ -Proben mit der L3-Belastung kommt es zu einer Abweichung. Dies ist in Abbildung 5.14 an der unsymmetrischen Verteilung mit einem, im Vergleich zu den anderen, größeren Ergebnisbereich zu erkennen. Der Einfluss der Belastung auf η ist für den ausgewählten Frequenzbereich für die $[0^\circ_6]$ - und PEEK-Proben zu erkennen. Dieser ist durch den gewählten Frequenzbereich, vor allem im Vergleich zu den weiteren Messungen, sehr gering. Hierbei führt eine höhere dynamische Belastung zu einem leichten Anstieg von η . Ebenso werden zwischen den $[0^\circ_6]$ - und $[90^\circ_6]$ -Proben nur minimale Unterschiede in η gemessen. Hingegen wird bei den unverstärkten Proben η deutlich höher im Vergleich zu den faserverstärkten Proben gemessen. Abschließend werden die Steifigkeiten der Proben bestimmt. Die Ergebnisse der hierzu durchgeführten

statischen und dynamischen Versuche sind in Tabelle 5.13 dargestellt.

Tabelle 5.13: Zusammenfassung der statisch und dynamisch ermittelten Steifigkeiten der Cf-PEEK-Proben unterschiedlicher Faserorientierung. E' ist bei der Belastung L3 bestimmt und über den Frequenzbereich gemittelt.

Probe	E in MPa	E' in MPa
PEEK	3.936 (± 32)	4.027 (± 33)
[0° ₆]	115.051 (± 2.936)	120.000 (± 4.129)
[90° ₆]	8.395 (± 201)	8.596 (± 373)

Zur Analyse von E' werden die Werte über den gesamten Messbereich für die Belastung L3 gemittelt. Die Ergebnisse der L1-Belastungen weichen nicht von den in Tabelle 5.13 dargestellten Ergebnissen ab. Neben den dynamischen Untersuchungen werden die PEEK- und Cf-PEEK-Proben statisch geprüft. Die Ergebnisse der statisch ermittelten Steifigkeiten sind ebenfalls in Tabelle 5.13 dargestellt. Alle Proben zeigen eine sehr gute Übereinstimmung der statischen und dynamischen Untersuchungen. Zudem kommt es zu keinen Abweichungen der Kennwerte im Vergleich zu den Angaben des Herstellers (Tabelle 5.9). Auch die ermittelten Steifigkeiten zeigen eine sehr geringe Streuung der Ergebnisse.

5.2.3 Temperaturanalyse von PEEK und CF-PEEK

Der Temperatureinfluss auf das Werkstoffverhalten der PEEK- und Cf-PEEK-Proben wird in diesem Abschnitt untersucht. Die Analysen werden analog zu den Untersuchungen in Kapitel 5.1.3 durchgeführt. Untersucht werden zunächst die unverstärkten PEEK-Proben dargestellt in Tabelle 5.4. Das Ergebnis der Untersuchungen ist in Abbildung 5.15 dargestellt. Für die Messreihen werden fünf Proben untersucht, dargestellt ist jeweils die Mediankurve sowie die Standardabweichung als Bereich hinterlegt.

Für eine T_g -Kurve typisch werden in Abbildung 5.15 die drei Messgrößen η , E' und E'' dargestellt über der Temperatur T dargestellt. Alle Messgrößen zeigen nur eine sehr geringe Streuung der Versuchsergebnisse über den gesamten Messverlauf. Der Speichermodul nimmt bereits bis zu Beginn des Glasübergangsbereich ab und sinkt auf einen Wert unterhalb von 3500 MPa. Im Glasübergangsbereich kommt es zu einem starken Abfall von E' . Oberhalb von T_g verbleibt eine geringe Reststeifigkeit der Proben von etwa 320 MPa. Der Verlustmodul hat bei T_g sein Maximum. Die Überhöhung ist im Glasübergangsbereich eindeutig ausgeprägt. Bis zu einer Temperatur von $T = 120^\circ\text{C}$ kommt es zu keiner großen Veränderung. Im Bereich oberhalb von T_g sinkt E'' ab auf einen Wert unterhalb der Messwerte bei RT. η_g liegt bei einer geringfügig höheren Temperatur als E''_g . Bis zum Glasübergangsbereich kommt es zu keiner deutlichen Zunahme von η . Für höhere

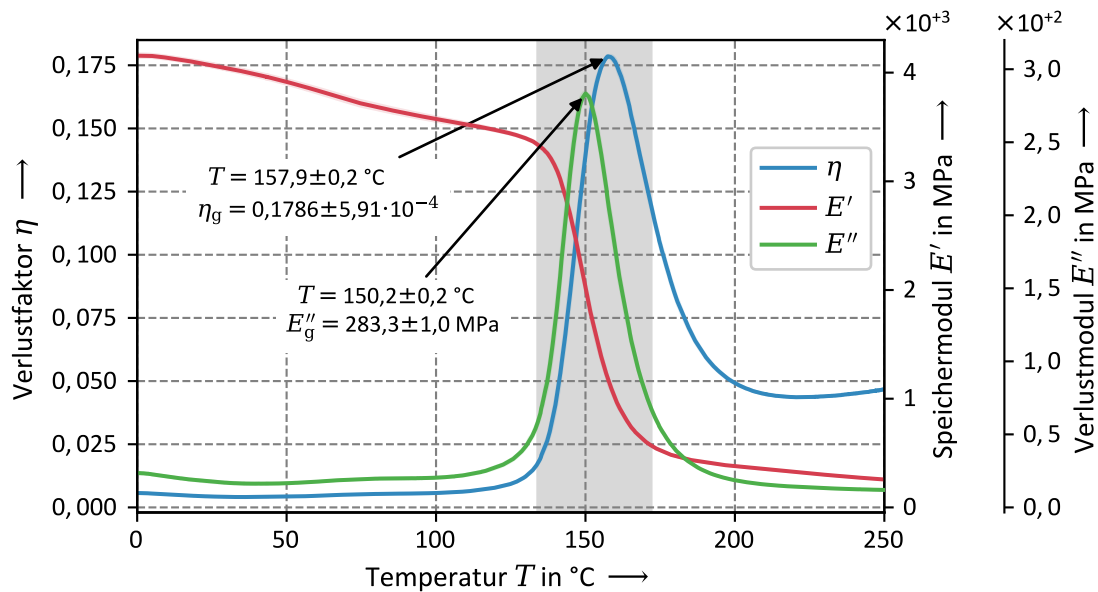


Abbildung 5.15: Tg-Kurve der PEEK-Proben ermittelt über 3PB-DMA. Darstellung von η , E' und E'' über einen Temperaturbereich von 0 °C bis 250 °C. Der Glasübergangsbereich ist grau hinterlegt.

Temperaturen fällt η wieder ab, die Messwerte oberhalb von Tg liegen jedoch eine Größenordnung oberhalb der Werte bei RT. Charakteristische Werte der Tg-Kurve außerhalb des Glasübergangsbereichs sind in Tabelle 5.14 noch einmal zusammengefasst.

Tabelle 5.14: Charakteristische Werte der Tg-Kurve der PEEK-Proben.

T in °C	η	E'' in MPa	E' in MPa
23,0	0,00438 ($\pm 1,18 \cdot 10^{-4}$)	17,9 ($\pm 0,5$)	4.076,1 ($\pm 18,3$)
220,0	0,04363 ($\pm 1,45 \cdot 10^{-4}$)	14,2 ($\pm 0,1$)	324,7 ($\pm 2,4$)

Durch Tabelle 5.14 und die Darstellung in Abbildung 5.15 wird die Überhöhung von η_g und E''_g im Glasübergangsbereich im Vergleich zur Raumtemperatur verdeutlicht. Das Maximum des Verlustfaktors liegt etwa 40-mal höher als der Wert bei Raumtemperatur. Bei dem Verlustmodul liegt die Überhöhung beim Faktor 15. E'' sinkt bei Temperaturen oberhalb Tg unter Werte gemessen bei RT. Für E' kommt es durch die Temperaturerhöhung zu einem deutlichen Abfall der Steifigkeit. Dennoch werden für $T = 220$ °C noch Steifigkeiten von 325 MPa gemessen. Das Datenblatt des Herstellers [110] gibt ein Tg von 143 °C an. Mit einem gemessenen Tg von 150,2 °C wird durch die Versuche eine etwas höhere Glasübergangstemperatur gemessen.

Des Weiteren werden in diesem Abschnitt Proben mit einer Faserverstärkung untersucht. Hierbei werden die in Tabelle 5.12 dargestellten Proben mit einer 0°-Faserverstärkung untersucht. Analog zu den Untersuchungen der Cf-PC- und Cf-EP-Proben wird die Belastung

auf $\varepsilon_d = 0,05\%$ und $\varepsilon_s = 0,0625\%$ festgelegt. Die Ergebnisse der Untersuchungen sind in Abbildung 5.16 zusammengefasst. Untersucht werden fünf Proben, der jeweilige Median sowie die Standardabweichung sind dargestellt.

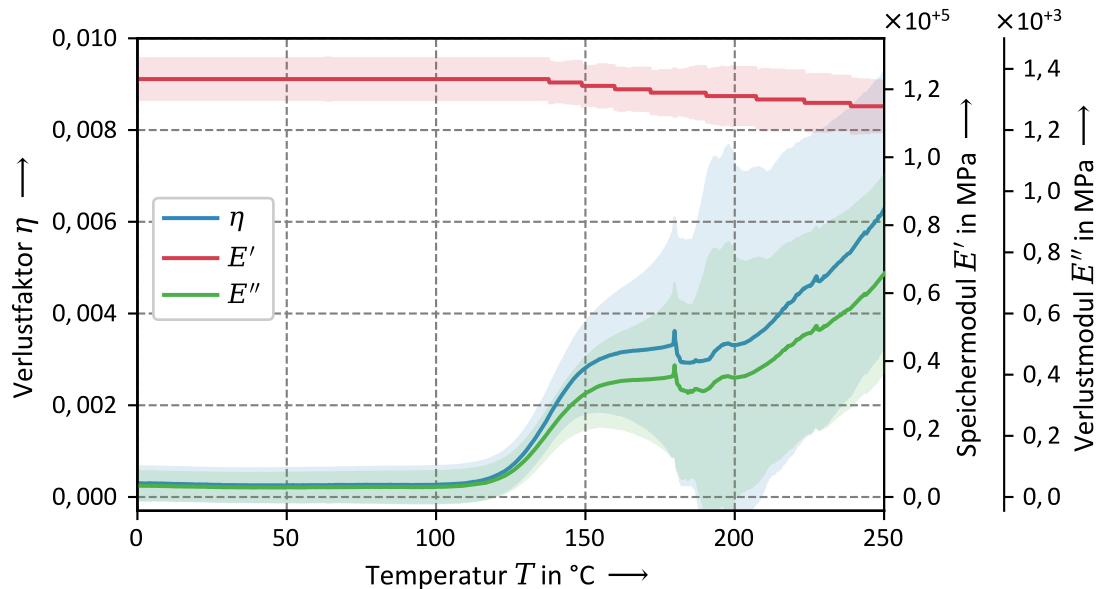


Abbildung 5.16: Tg-Kurve der Cf-PEEK-Proben mit einer 0°-Faserorientierung ermittelt über 3PB-DMA. Darstellung von η , E' und E'' über einen Temperaturbereich von 0 °C bis 250 °C.

Abbildung 5.16 zeigt Versuche an Cf-PEEK über eine Temperatur von 0 °C bis 250 °C. Im Gegensatz zu der Messung an den unverstärkten PEEK-Proben in Abbildung 5.15 tritt kein ausgeprägtes globales Maximum von η oder E'' auf. Zudem zeigt T nur einen sehr geringen Einfluss auf E' . Ab einer Temperatur von 125 °C ist eine Zunahme von η und E'' zu erkennen. Beide Messwerte zeigen bei $T = 180$ °C ein lokales Maximum. Anschließend kommt es zu einer weiteren Zunahme bis zum Prüfungsende bei 250 °C. Mit beginnender Zunahme von η und E'' steigt die Standardabweichung beider Messwerte deutlich an. Anhand der fehlenden Maxima von η und E'' sowie der geringe Einfluss auf E' können aus Abbildung 5.16 keine charakteristischen Temperaturwerte ermittelt werden. Aufgrund der fehlenden Temperaturwerte der Cf-PEEK-Kurve ist ein Vergleich mit Abbildung 5.15 nicht zielführend.

5.2.4 Vergleich der Versuchsmethoden von Cf-PEEK

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse der Ausschwingversuche aus Kapitel 5.2.1 mit den DMA-Ergebnissen aus Kapitel 5.2.2 verglichen. Dabei zeigen die Ausschwingversuche bei einer Faserorientierung von 0° eine erste Eigenfrequenz von etwa 37 Hz. Die DMA-Untersuchungen in Abbildung 5.13 zeigen für die 0° -Proben einen glatten Verlauf über die Prüffrequenz. Daher ist ein Vergleich bei 37 Hz möglich. Die Ausschwingversuche der 90° -Proben haben ihre erste Eigenfrequenz bei etwa 10 Hz. Um den Einfluss des wellenförmigen Messverlaufs der 90° -Proben aus Abbildung 5.13 zu minimieren, werden für den Vergleich die DMA-Ergebnisse vom Wendepunkt des Messverlaufs bei 8,25 Hz verwendet. Die Ergebnisse für den Vergleich sind in Abbildung 5.17 dargestellt.

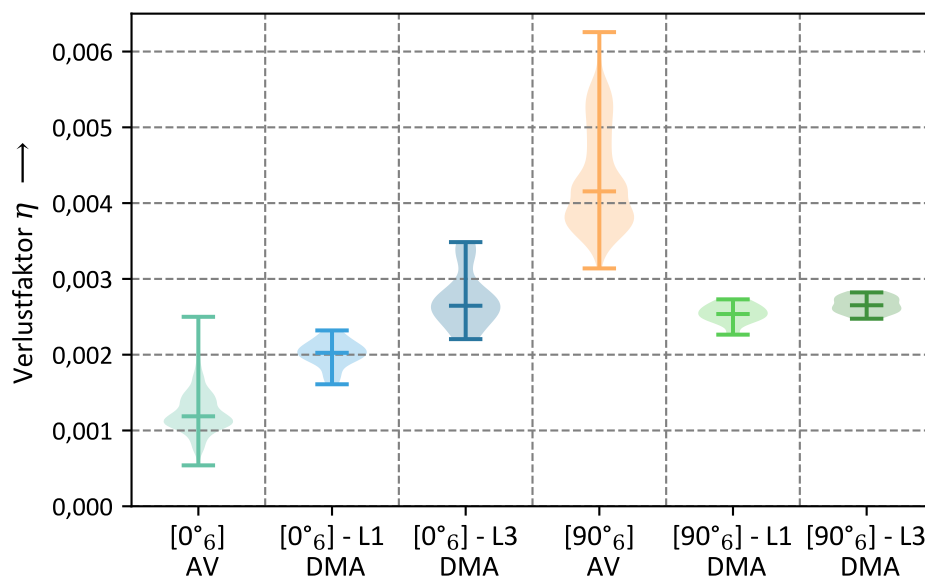


Abbildung 5.17: Vergleich der Ausschwingversuche mit den Ergebnissen der 3PB-DMA an den Cf-PEEK-Proben unterschiedlicher Faserorientierung. Darstellung der Belastung L1 und L3 der DMA-Untersuchungen.

Der Vergleich in Abbildung 5.17 zeigt deutlich, dass durch die unterschiedlichen Versuchsmethoden unterschiedliche Tendenzen gemessen werden. Während die Ausschwingversuche einen Unterschied zwischen den Faserorientierungen messen, zeigen die DMA für den ausgewählten Frequenzbereich nur minimale Unterschiede zwischen den Faserorientierungen. Zudem zeigen bei der DMA die 0° -Proben einen deutlichen Einfluss der Belastung, während dieser Unterschied bei den 90° -Proben minimal ist. Im Fall der 0° -Proben wird durch die Ausschwingversuche ein niedrigerer η -Wert gemessen. Im Gegensatz dazu zeigen die 90° -Proben im Ausschwingversuch eine höhere Dämpfung als bei den DMA. Für beide Faserorientierungen zeigen die Ausschwingversuche einen größeren Ergebnisbereich und es werden jeweils höhere Standardabweichungen bestimmt. Die Ergebnisse des Vergleichs sind in Tabelle 5.15 zusammengefasst.

Tabelle 5.15: Ergebniszusammenfassung der Ausschwingversuche und der DMA an den Cf-PEEK-Proben. Darstellung des Verlustfaktors η sowie des Speichermoduls E' in Abhängigkeit der jeweiligen Faserorientierung, Belastung und Prüffrequenz.

AV	η -	E' in MPa	f_1 in Hz	DMA	η -	E' in MPa	f in Hz
[0° ₆]	0,00119 ($\pm 2,46 \cdot 10^{-4}$)	113.211 (± 2.969)	37,66 ($\pm 1,21$)	[0° ₆] - L1	0,00202 ($\pm 1,68 \cdot 10^{-4}$)	119.500 (± 4.299)	37-39 -
	- -	- -	- -	[0° ₆] - L3	0,00265 ($\pm 3,50 \cdot 10^{-4}$)	120.000 (± 4.130)	37-39 -
[90° ₆]	0,00415 ($\pm 6,16 \cdot 10^{-4}$)	8.887 (± 795)	10,32 ($\pm 0,29$)	[90° ₆] - L1	0,00254 ($\pm 1,22 \cdot 10^{-4}$)	8.443 (± 345)	8-8,5 -
	- -	- -	- -	[90° ₆] - L3	0,00265 ($\pm 1,04 \cdot 10^{-4}$)	8.587 (± 375)	8-8,5 -

Durch Tabelle 5.15 werden die gemessenen Unterschiede in η bestätigt. Hier werden durch die verschiedenen Versuchsmethoden unterschiedliche Trends zwischen den Faserorientierungen gemessen. Im Gegensatz dazu kommt es bei dem Vergleich der Steifigkeiten nur zu geringen Abweichungen. Die Übereinstimmung der 90°-Proben ist für beide Versuche sehr gut. Beide Methoden erzielen Werte die nur geringfügig unter den Erwartungen aus Tabelle 5.9 liegen. Auch die 0°-Proben zeigen eine gute Übereinstimmung. Dabei zeigen die Ergebnisse der DMA keine signifikante Abweichung zu den Werten aus Tabelle 5.9. Durch die Ausschwingversuche wird für die 0°-Proben ein leicht geringerer Wert für E' ermittelt.

Somit zeigt der Vergleich der Versuchsmethoden unterschiedliche Ergebnisse. Für E' kommt es für beide Faserorientierungen zu einer guten Übereinstimmung. Im Gegensatz dazu werden für η deutlich unterschiedliche Trends gemessen.

6 Vergleich der Untersuchungen und Diskussion der Ergebnisse

Dieses Kapitel fokussiert sich auf den Vergleich der unterschiedlichen untersuchten Matrices. Anhand des jeweiligen Versuchs wird ein Vergleich der FKV-Proben mit duroplastischer und thermoplastischer Matrix durchgeführt. Zuerst werden die Ergebnisse der Ausschwingversuche der unterschiedlichen Cf-Proben vorgestellt. Hierbei wird ein Vergleich für beide Faserorientierungen dargestellt. Der Vergleich der DMA-Ergebnisse wird in verschiedene Unterkapitel aufgeteilt. Dabei wird der Einfluss der Faserorientierung, der Belastung, der Frequenz und der Temperatur an den jeweiligen Proben untersucht. Für den Vergleich der Matrices werden die Frequenzuntersuchungen der unverstärkten Kunststoffmatrix sowie die unterschiedlichen Faserorientierungen getrennt voneinander betrachtet. Abschließend wird der Einfluss der Temperatur auf die jeweilige Kunststoffmatrix dargestellt.

6.1 Ausschwingversuche

Im Rahmen dieser Arbeit werden Ausschwingversuche an unterschiedlichen Cf-Proben durchgeführt. Bei der Versuchsdurchführung wird für alle Cf-Proben die gleiche Geometrie untersucht. Die Darstellung der Einzelergebnisse ist dabei in den jeweiligen Kapiteln (4.2, 5.1.1 und 5.2.1) zu finden. Dieser Abschnitt beschäftigt sich mit der Fragestellung, ob durch die verschiedenen Matrices Unterschiede in η durch den Ausschwingversuch gemessen werden. Für diesen Vergleich liegen Ergebnisse jeweils für eine Faserorientierung von 0° und 90° vor. Eine Zusammenfassung aller Ausschwingversuche an beiden Faserorientierungen ist in Abbildung 6.1 dargestellt.

In Abbildung 6.1 sind für beide Faserorientierungen Unterschiede von η für die jeweilige Matrix zu erkennen. Dabei werden für beide Faserorientierungen die gleichen Trends zwischen den Matrices gemessen. Die Ausschwingversuche an Proben mit einer EP-Matrix zeigen für beide Faserorientierungen die höchste Dämpfung. Für die Proben mit einer PEEK-Matrix wird der geringste Wert von η ermittelt. Die Ergebnisse der Cf-PC-Proben liegen jeweils in der Mitte. Dabei sind die Unterschiede der Matrices für die 90° -Proben größer als bei den 0° -Proben. Alle Proben zeigen bei einer 0° -Faserorientierung eine symmetrische Verteilung der Ergebnisse um den Median. Dabei zeigen die Cf-PC-Proben den größten Ergebnisbereich. Bei den untersuchten Kunststoffen führt die 90° -Faserorientierung zu ei-

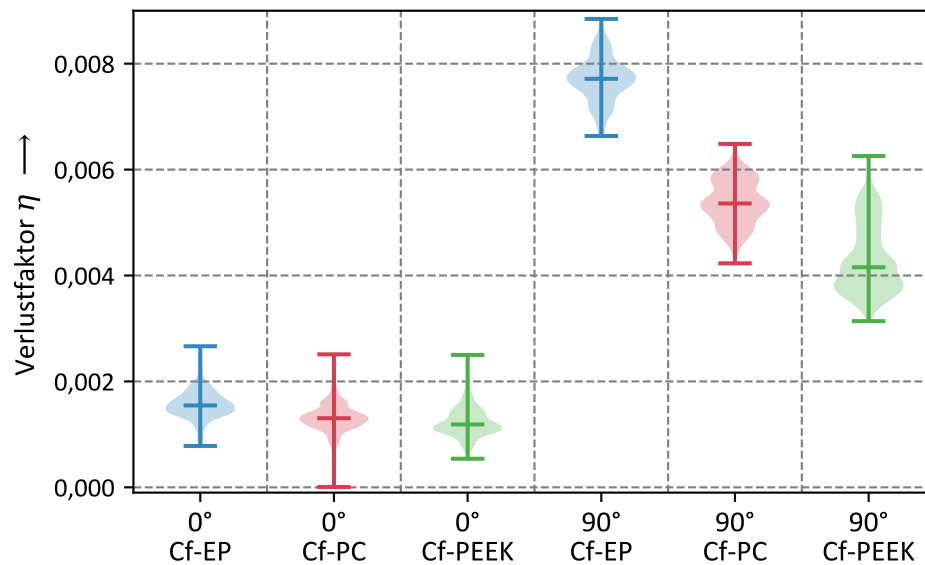


Abbildung 6.1: Vergleich der Ausschwingversuche der Cf-EP-, Cf-PC- und Cf-PEEK-Proben. Darstellung von η mit $n = 8$ und in Abhängigkeit der Matrix und der Faserorientierung.

ner breiteren Verteilung der Ergebnisse. Sowohl für die Cf-PC als auch für die Cf-PEEK Proben zeigt die Darstellung in Abbildung 6.1 eine unsymmetrische Verteilung. Allgemein wird durch eine 90°-Faserorientierung eine höhere Dämpfung gemessen, dies gilt für alle in dieser Arbeit untersuchten Matrices. Die Ergebnisse der Untersuchungen und der Vergleich der Matrices ist in Tabelle 6.1 zusammengefasst. Zur weiteren Beurteilung sind neben η auch die Steifigkeit, die Eigenfrequenz und der Faservolumengehalt der jeweiligen Proben dargestellt.

Tabelle 6.1: Zusammenfassung der Kennwerte der Cf-EP-, Cf-PC- und Cf-PEEK-Proben ermittelt durch die Ausschwingversuche mit $n = 8$.

Matrix	$\alpha = 0^\circ$				$\alpha = 90^\circ$		
	φ in %	η -	E' in MPa	f_1 in Hz	η -	E' in MPa	f_1 in Hz
EP	48,57 ($\pm 4,11$)	0,00155 ($\pm 2,37 \cdot 10^{-4}$)	84.913 (± 2.420)	35,83 ($\pm 0,55$)	0,00771 ($\pm 3,89 \cdot 10^{-4}$)	5.828 (± 228)	9,16 ($\pm 0,10$)
PC	38,84 ($\pm 4,41$)	0,00131 ($\pm 2,31 \cdot 10^{-4}$)	91.699 (± 7.110)	36,78 ($\pm 0,90$)	0,00536 ($\pm 4,11 \cdot 10^{-4}$)	5.022 (± 53)	8,83 ($\pm 0,07$)
PEEK	51,22 ($\pm 7,09$)	0,00119 ($\pm 2,46 \cdot 10^{-4}$)	113.211 (± 2.969)	37,66 ($\pm 1,21$)	0,00415 ($\pm 6,16 \cdot 10^{-4}$)	8.887 (± 795)	10,32 ($\pm 0,29$)

Die Zahlenwerte in Tabelle 6.1 bestätigen die Unterschiede von η aus Abbildung 6.1. Dabei zeigen die 0°-Proben für alle Matrices eine sehr ähnliche Standardabweichung. Für alle 90°-Proben liegt die Standardabweichung höher als bei den 0°-Proben der gleichen

Matrix. Die höchsten Steifigkeiten werden für beide Faserorientierungen bei den Cf-PEEK Proben ermittelt. Dies liegt einerseits an der höheren Steifigkeit der PEEK-Matrix und andererseits an dem höchsten Faservolumengehalt im Vergleich zu den anderen Proben. Verwendet werden für alle Proben Kohlenstofffasern mit einer Steifigkeit zwischen 230 GPa und 240 GPa. Dabei liegt die Steifigkeit der Cf-EP-Proben mit einer 0°-Faserorientierung unterhalb der Erwartung. Durch statische Versuche (Tabelle 4.1) wird eine höhere Steifigkeit ermittelt. Die Cf-PC zeigen im Hinblick auf die Steifigkeit ein geteiltes Ergebnis. Einerseits zeigen sie bei einer 0°-Faserorientierung eine höhere Steifigkeit als die Cf-EP-Proben trotz eines niedrigeren Faservolumengehalts. Dabei weisen die 0°-Proben eine sehr hohe Standardabweichung von E' auf. Diese ist doppelt bis dreimal so hoch im Vergleich zu den Cf-EP- und Cf-PEEK-Proben. Andererseits wird bei den 90° Cf-PC-Proben eine niedrige Steifigkeit im Vergleich zu den Cf-EP-Proben gemessen. Des Weiteren ist hierbei die Standardabweichung deutlich niedriger als bei den Cf-EP- und Cf-PEEK-Proben.

6.1.1 Fazit der Ausschwingversuche

Durch die Ausschwingversuche werden für beide Faserorientierungen Unterschiede durch die Matrix gemessen. Der Trend zwischen den Matrices ist für beide Faserorientierungen gleich, wobei der Unterschied bei den 90°-Proben stärker ausgeprägt ist. Die Cf-Proben zeigen mit einer EP-Matrix die höchste Dämpfung und mit einer PEEK-Matrix die niedrigste. Die Ergebnisse der Cf-PC-Proben liegen, trotz des niedrigsten Faservolumengehalts, jeweils in der Mitte.

6.2 Dynamisch-Mechanische Analyse

Im Rahmen der Arbeit werden unterschiedliche DMA-Versuche durchgeführt. Untersucht wurden mittels DMA der Einfluss der Frequenz, der Belastung sowie der Temperatur auf das Materialverhalten. Zudem wurden unterschiedliche Faserorientierungen sowie verschiedene Matrices untersucht. In diesem Abschnitt werden die jeweiligen Untersuchungen an verschiedenen Materialien miteinander verglichen. Anhand der Vergleiche wird der Einfluss der Matrix auf die Eigenschaften diskutiert.

6.2.1 Frequenzanalyse der unverstärkten Kunststoffmatrix

Zunächst werden die unterschiedlichen Frequenzanalysen der DMA-Untersuchungen verglichen. Begonnen wird mit einem Vergleich der unverstärkten Kunststoffproben. Untersucht werden hierbei Proben aus EP, PC und PEEK. Die Einzeluntersuchungen sind dabei in den Kapiteln 4.4.1, 5.1.2 und 5.2.2 zu finden. Die Proben werden über einen Frequenz-

bereich von 1 Hz bis 40 Hz mit den Belastungen L1 und L3 (vgl. Tabelle 3.3) geprüft. In Abbildung 6.2 sind die Ergebnisse der unterschiedlichen Kunststoffe in Abhängigkeit der Frequenz und Belastung zusammengefasst.

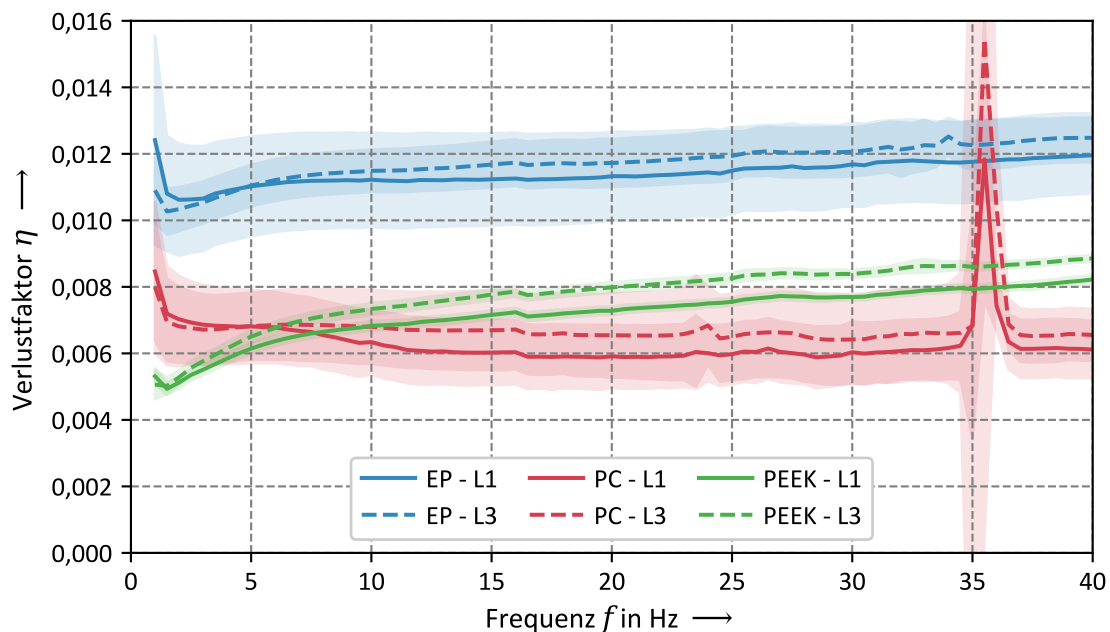


Abbildung 6.2: Vergleich der Frequenzanalyse mittels 3PB-DMA an den EP-, PC- und Peek-Proben bei einer L1- und L3-Belastung.

Zwischen den Kunststoffproben sind in Abbildung 6.2 Unterschiede zu erkennen. Über den gesamten Frequenzbereich zeigen die EP-Proben für beide Belastungen die höchste Dämpfung. Die Unterschiede zwischen den PC- und PEEK-Proben sind hingegen frequenzabhängig und zudem geringer als im Vergleich zu den EP-Proben. Unterhalb von 6 Hz werden für die PEEK-Proben für beide Belastungen niedrigere η -Werte gemessen als für die PC-Proben. Oberhalb von 10 Hz ändert sich dieses Verhältnis und die PEEK-Proben zeigen eine höhere Dämpfung. Zwischen 6 Hz und 10 Hz ist das Verhältnis abhängig von der jeweiligen Belastung. Die EP-Proben zeigen mit zunehmender Prüffrequenz eine geringe Zunahme des η -Wertes. Der Einfluss der Frequenz auf η ist bei den PEEK-Proben etwas stärker ausgeprägt. Diese zeigen ebenfalls über den gesamten Frequenzbereich eine kontinuierliche Zunahme von η . Im Gegensatz dazu zeigen die PC-Proben bei der L3-Belastung keinen signifikanten Einfluss der Frequenz. Bei der L1-Belastung wird im Bereich von 1 Hz bis 10 Hz eine geringe Abnahme von η gemessen. Somit zeigen alle Kunststoffe einen unterschiedlichen Einfluss der Frequenz auf η . Der Einfluss der Belastung ist bei allen Proben gleich. Oberhalb von 5 Hz zeigen alle Kunststoffe bei einer höheren Belastung einen höheren η -Wert. Die Versuche an den PEEK-Proben zeigen die geringste Streuung im Vergleich zu den EP- und PC-Proben. Des Weiteren zeigen die PC-Proben bei etwa $f = 35,5$ Hz einen Peak. Hierbei wird ein Unterton der ersten Eigenfrequenz vermutet, auch wenn diese

außerhalb des Messbereichs liegt. Die mit zunehmender Frequenz abnehmende F_d^{drv} weist auf eine Eigenfrequenz nicht weit außerhalb des Messbereichs hin. Zur Weiteren Analyse sind in Tabelle 6.2 die Ergebnisse der Frequenzanalysen an den unterschiedlichen Matrices zusammengefasst.

Tabelle 6.2: Zusammenfassung der Ergebnisse der EP-, PC- und PEEK-Proben. Ermittlung von E' über den gesamten Frequenzbereich und Darstellung von η bei $f = 2$ Hz und $f = 37$ Hz für die Belastung L1 und L3.

Probe	ϕ in %	E' in MPa	η		η	
			(2 Hz, L1)	(2 Hz, L3)	(37 Hz, L1)	(37 Hz, L3)
EP	0,51	3.239	0,01063	0,01041	0,01185	0,01238
	($\pm 0,05$)	(± 43)	($\pm 15,74 \cdot 10^{-4}$)	($\pm 6,33 \cdot 10^{-4}$)	($\pm 11,28 \cdot 10^{-4}$)	($\pm 6,87 \cdot 10^{-4}$)
PC	0,00	2.495	0,00704	0,00683	0,00620	0,00665
	($\pm 0,00$)	(± 62)	($\pm 12,54 \cdot 10^{-4}$)	($\pm 11,28 \cdot 10^{-4}$)	($\pm 8,11 \cdot 10^{-4}$)	($\pm 7,61 \cdot 10^{-4}$)
PEEK	0,00	4.027	0,00525	0,00533	0,00803	0,00868
	($\pm 0,00$)	(± 33)	($\pm 2,40 \cdot 10^{-4}$)	($\pm 2,98 \cdot 10^{-4}$)	($\pm 1,17 \cdot 10^{-4}$)	($\pm 1,04 \cdot 10^{-4}$)

In Tabelle 6.2 sind η -Werte für $f = 2$ Hz und $f = 37$ Hz jeweils für beide Belastungen dargestellt. Dadurch ist eine Beurteilung der Ergebnisse über den gemessenen Frequenzbereich möglich. Zudem ist die ermittelte Steifigkeit und der über CT bestimmte Porengehalt angegeben. Wie durch die jeweiligen Datenblätter zu erwarten ist, werden für die Kunststoffe unterschiedliche Steifigkeiten ermittelt. Diese zeigen eine gute Übereinstimmung mit den jeweiligen Datenblättern und Literaturangaben. Auffällig ist die hohe Standardabweichung der PC-Proben für beide Belastungen sowie bei den EP-Proben mit einer L1-Belastung. Die Standardabweichung der PEEK-Proben ist am geringsten. Durch die Werte in Tabelle 6.2 wird belegt, dass durch eine zunehmende Frequenz der Einfluss der Belastung zunimmt. Zudem zeigen sowohl die EP- als auch die PEEK-Proben einen Einfluss der Frequenz. Allgemein zeigen die EP-Proben die höchste Dämpfung. Hierfür liegen unterschiedliche Gründe vor. Eine höhere Dämpfung von EP im Vergleich zu PEEK wird ebenfalls in [71, 72] gemessen. Daher stehen die durchgeführten Untersuchungen im Einklang mit dem aktuellen Forschungsstand. Bei den durchgeführten Untersuchungen treten weitere Einflüsse auf, welche diesen Unterschied zusätzlich verstärken können. Zum einen wird durch die Temperaturanalyse in Kapitel 4.5 eine nicht vollständige Aushärtung der EP-Proben festgestellt. Diese erhöht nach [14] ebenfalls die Dämpfung. Des Weiteren werden nur bei den EP-Proben Poren durch die CT-Untersuchung festgestellt. Dieser ist aus mechanischer Sicht eine Mikroschädigung, die dämpfungsverursachend ist [7, 32]. Abschließend kann die Geometrie der EP-Proben noch einen zusätzlichen Einfluss haben. Wie alle Kurven in Abbildung 6.2 belegen, zeigt die Belastung einen Einfluss auf η . Die EP-Proben haben mit 4,65 mm die höchste Dicke im Vergleich zu den PC- (4,00 mm) oder PEEK-Proben (4,40 mm). Bedingt durch die gleiche Dehnungsbelastung der Unter-

suchungen führt dies zu den höchsten Schubspannungen bei den EP-Proben. Eine höhere Schubspannung führt nachweislich [38] zu einer höheren Dämpfung.

6.2.2 Frequenzanalyse der faserverstärkten Kunststoffe

Neben den Untersuchungen an der unverstärkten Kunststoffmatrix wurde in dieser Arbeit der Einfluss der Faserorientierung auf die Dämpfung untersucht. Auf die Unterschiede der Faserorientierung wurde in den jeweiligen Kapiteln 4.4.2, 5.1.2 und 5.2.2 eingegangen. Dieser Abschnitt fokussiert sich auf die Unterschiede, die bei der jeweiligen Faserorientierung durch die Matrix entstehen. Dazu sind in Abbildung 6.3 die Cf-EP-, Cf-PC- und Cf-PEEK-Proben mit einer Faserorientierung von 0° zusammengefasst.

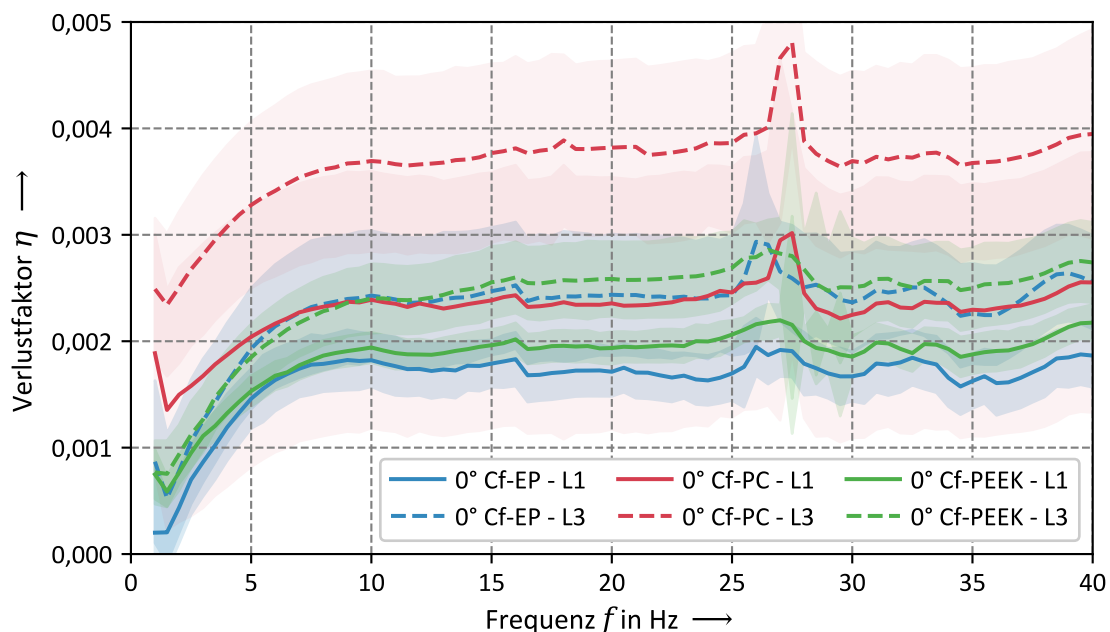


Abbildung 6.3: Vergleich der Frequenzanalyse mittels 3PB-DMA an den Cf-EP-, Cf-PC- und Cf-PEEK-Proben mit einer 0° -Faserorientierung und bei einer L1- und L3-Belastung.

Alle Proben in Abbildung 6.3 sind über eine Frequenz von 1 Hz bis 40 Hz für die Belastungen L1 und L3 dargestellt. Dabei zeigen die Proben durchweg einen Einfluss der Belastung auf η . Besonders deutlich wird der Unterschied an den PC-Proben, diese zeigen einen größeren Einfluss der Belastung. Allgemein weichen die Ergebnisse der Cf-PC-Proben von den anderen ab. Diese zeigen für beide Belastungen eine höhere Dämpfung. Der Vergleich der unverstärkten Kunststoffe aus Abbildung 6.2 lässt keine höhere Dämpfung der Cf-PC-Proben erkennen. Diese Abweichung der Cf-PC kann unterschiedliche Ursachen haben. Zum einen hat der niedrige Faservolumengehalt einen Einfluss. Dieser ist im Vergleich zu anderen Proben am niedrigsten. Den vermutlich größten Einfluss haben die durch

die Schliffbilder festgestellten trockenen Stellen im Querschnitt. Diese sind Mikroschädigung und nachweislich eine zusätzliche Quelle von Dämpfung [7, 32]. Des Weiteren fällt in diesem Zusammenhang die sehr hohe Streuung der Cf-PC-Proben auf. Deren Ursache ebenfalls den trockenen Stellen und der inhomogenen Faserverteilung über den Querschnitt zugeordnet wird. Anhand von Abbildung 6.3 können zwischen der PEEK- und EP-Matrix für beide Belastungen keine signifikanten Unterschiede in η festgestellt werden. Dies steht ebenfalls im Kontrast zu den Messungen aus Abbildung 6.2. Hierbei werden deutliche Unterschiede zwischen den unverstärkten EP- und PEEK-Matrices gemessen. Somit wird durch die Untersuchungen verdeutlicht, dass das Dämpfungsverhalten mit einer Faserorientierung von 0° stark faserdominiert ist, sofern die Proben einen ähnlichen Faservolumengehalt haben und keine Mikroschädigungen vorliegen. Alle Proben weisen einen Peak im Frequenzbereich zwischen 25 Hz und 30 Hz auf. Die F_d^{drv} weist auf eine erste Eigenfrequenz außerhalb des Messbereichs hin und daher wird in dem Peak ein Unterton der ersten Eigenfrequenz vermutet. Des Weiteren ist bei allen Proben und Belastungen eine Zunahme von η im Bereich von 1 Hz bis ca. 8,5 Hz zu erkennen. Anschließend kommt es im Frequenzbereich von 8,5 Hz bis 40 Hz zu keiner weiteren signifikanten Zunahme der Dämpfung. Zur weiteren Analyse sind in Tabelle 6.3 die Ergebnisse der Frequenzanalysen der unterschiedlichen Cf-Proben zusammengefasst.

Tabelle 6.3: Zusammenfassung der Ergebnisse der Cf-EP-, Cf-PC- und Cf-,PEEK-Proben mit einer 0° -Faserorientierung. Ermittlung von E' über den gesamten Frequenzbereich und Darstellung von η bei $f = 2$ Hz und $f = 37$ Hz für die Belastung L1 und L3.

Probe	φ in %	E' in MPa	η		η	
			(2 Hz, L1)	(2 Hz, L3)	(37 Hz, L1)	(37 Hz, L3)
EP	48,57	90.335	0,00055	0,00084	0,00167	0,00239
	($\pm 4,11$)	(± 1.632)	($\pm 3,79 \cdot 10^{-4}$)	($\pm 5,99 \cdot 10^{-4}$)	($\pm 2,66 \cdot 10^{-4}$)	($\pm 4,46 \cdot 10^{-4}$)
PC	38,84	83.610	0,00155	0,00251	0,00234	0,00373
	($\pm 4,41$)	(± 6.818)	($\pm 11,16 \cdot 10^{-4}$)	($\pm 6,75 \cdot 10^{-4}$)	($\pm 11,17 \cdot 10^{-4}$)	($\pm 8,51 \cdot 10^{-4}$)
PEEK	51,22	120.000	0,00077	0,00100	0,00195	0,00258
	($\pm 7,09$)	(± 4.129)	($\pm 1,93 \cdot 10^{-4}$)	($\pm 3,24 \cdot 10^{-4}$)	($\pm 1,66 \cdot 10^{-4}$)	($\pm 3,50 \cdot 10^{-4}$)

In Tabelle 6.3 sind η -Werte für $f = 2$ Hz und $f = 37$ Hz jeweils für beide Belastungen dargestellt. Zudem ist die ermittelte Steifigkeit und der bestimmte Faservolumengehalt angegeben. Die Unterschiede der Steifigkeiten der Proben verhalten sich qualitativ gleich zu den ermittelten Faservolumengehalten und der Probenqualität. Dabei liegt die Steifigkeit der Cf-EP-Proben unterhalb der Erwartungen aus Tabelle 4.1. Anhand der Zahlenwerte kann sowohl der Einfluss der Belastung als auch die Zunahme von η mit der Frequenz quantifiziert werden. Hervorzuheben ist dabei der Einfluss der Frequenz auf η . Im Bereich von 1 Hz bis ca. 8,5 Hz ist eine starke Zunahme von η mit zunehmender Frequenz zu erkennen. Wie in Kapitel 2.3.3 dargestellt zeigt ein Teil der Forschung ebenfalls einen Einfluss

der Frequenz auf die Dämpfung. Die Untersuchungen aus [51, 111] zeigen dabei ebenfalls eine Zunahme der Dämpfung im niedrigen Frequenzbereich wie in Abbildung 6.3. Zudem wird dieser Einfluss ebenfalls beim Einrichten Maschine durch die Stahlproben in Abbildung 3.7 gemessen. Diese Beobachtung im niedrigen Frequenzbereich wird in Kapitel 3.1.2 durch die aufgestellte Nullpunkthypothese erklärt. Dabei ist der Grenzwert der dynamischen Prüfung bei $f = 0 \text{ Hz}$ der statische Versuch, durch den wiederum keine Dämpfung ermittelt werden kann. Das Verhalten aller 0° -Proben in Abbildung 6.3 ist somit ein Beleg für die aufgestellte Hypothese.

Folgend wird der Einfluss der Matrix auf FKV-Proben mit einer 90° -Faserorientierung analysiert und diskutiert. Hierfür sind in Abbildung 6.4 die Untersuchungen der Cf-EP-, Cf-PC- und Cf-PEEK-Proben mit einer Faserorientierung von 90° zusammengefasst.

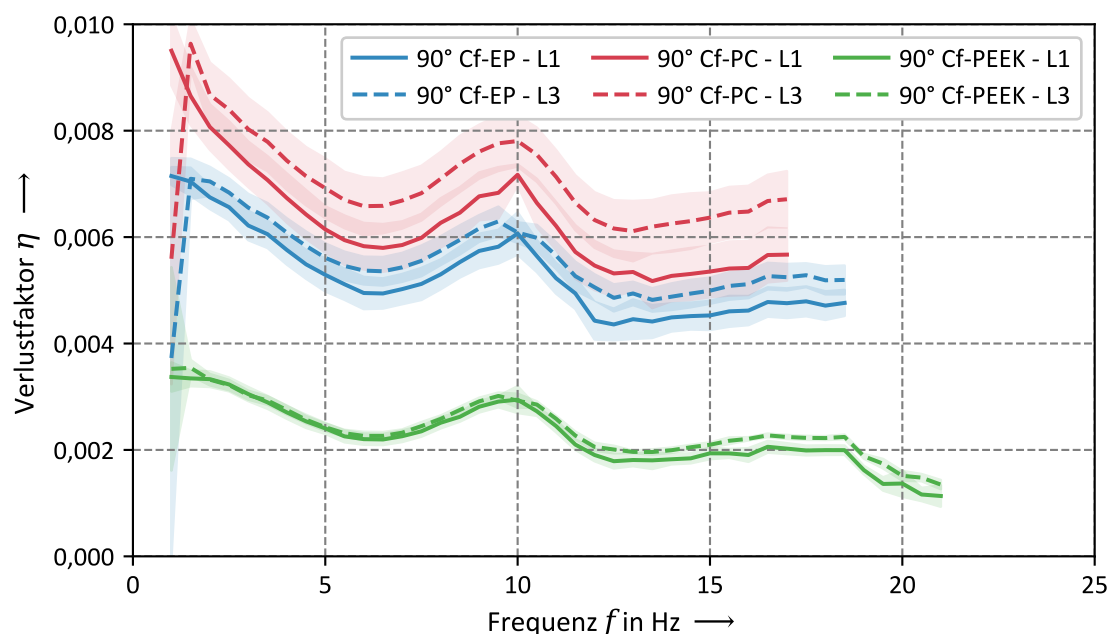


Abbildung 6.4: Vergleich der Frequenzanalyse mittels 3PB-DMA an den CF-EP-, Cf-PC- und Cf-PEEK-Proben mit einer 90° -Faserorientierung und bei einer L1- und L3-Belastung.

Dargestellt ist in Abbildung 6.4 der Verlustfaktor der unterschiedlichen Matrices ermittelt durch die Belastungen L1 und L3 über der Frequenz. Die verschiedenen Frequenzbereiche der Messung resultieren aus den unterschiedlichen Steifigkeiten der Proben. Alle Proben durchlaufen im Messbereich ihre erste Eigenfrequenz. Daher werden die Messkurven jeweils abgeschnitten wenn die F_d^{drv} die Prüfkraft bei $f = 1 \text{ Hz}$ mit zunehmender Frequenz überschreitet. Die unterschiedlichen Steifigkeiten der Proben führen dabei zu unterschiedlichen Eigenfrequenzen und daher werden die Ergebnisse bis zu verschiedenen Frequenzen dargestellt. Durch die Untersuchung zeigen die Ergebnisse der Cf-PEEK-Proben eine deut-

lich niedrigere Dämpfung, als dies bei den Cf-EP- und Cf-PC-Proben der Fall ist. Zudem hat die Belastung der Cf-PEEK-Proben keinen signifikanten Einfluss auf η . Im Gegensatz dazu wird bei Proben mit einer 0°-Faserorientierung ein Unterschied gemessen (vgl. Abbildung 6.3). Von den Ergebnissen der Cf-PEEK-Proben weichen die Messungen mit einer EP- und PC-Matrix deutlich ab. Diese zeigen jeweils eine höhere Dämpfung. Außerdem ist bei beiden Matrices ein Einfluss der Belastung auf η zu erkennen. Dieser Einfluss ist bei den Cf-PC-Proben absolut größer als bei den Cf-EP-Proben. Allgemein wird bei den Cf-PC-Proben die höchste Dämpfung gemessen. Gleichzeitig zeigen die Proben die höchste Standardabweichung. Beides hängt mit dem vergleichsweise niedrigen Faservolumengehalt und den zusätzlichen trockenen Stellen über den Querschnitt zusammen. Eine weitere Ursache ist die inhomogene Faserverteilung über den Querschnitt der Proben. Bei allen Proben tritt ein wellenförmiger Messverlauf von η in Abhängigkeit der Frequenz auf. Je höher die Biegesteifigkeit desto geringer ist die Wellenform ausgeprägt. Daher zeigen die PEEK-Proben mit der höchsten Steifigkeit (bei gleicher Geometrie) die geringste Ausprägung der Wellenform. Für eine abschließende Analyse der Untersuchungen an den Cf-Proben mit einer 90°-Faserorientierung sind die ermittelten Steifigkeiten in Tabelle 6.4 zusammengefasst. Bedingt durch wellenförmigen Messverlauf von η in Abhängigkeit der Frequenz werden die Ergebnisse in ihrem Wendepunkt bei $f = 8,25$ Hz dargestellt.

Tabelle 6.4: Zusammenfassung der Ergebnisse der Cf-EP-, Cf-PC- und Cf-PEEK-Proben mit einer 90°-Faserorientierung. Ermittlung von E' über den gesamten Frequenzbereich und Darstellung von η bei $f = 8,25$ Hz für die Belastung L1 und L3.

Probe	φ in %	E' in MPa	η	
			(8,25 Hz, L1)	(8,25 Hz, L3)
EP	48,57	5.953	0,00550	0,00588
	($\pm 4,11$)	(± 280)	($\pm 2,88 \cdot 10^{-4}$)	($\pm 2,77 \cdot 10^{-4}$)
PC	38,84	3.952	0,00642	0,00722
	($\pm 4,41$)	(± 90)	($\pm 4,66 \cdot 10^{-4}$)	($\pm 5,11 \cdot 10^{-4}$)
PEEK	51,22	8.596	0,00254	0,00265
	($\pm 7,09$)	(± 373)	($\pm 1,22 \cdot 10^{-4}$)	($\pm 1,04 \cdot 10^{-4}$)

Der Vergleich der Steifigkeiten in Tabelle 6.4 zeigt den gleichen Trend wie die Untersuchungen in Tabelle 6.3 und 6.2. Bedingt durch den Faservolumengehalt und die Steifigkeit der Matrix zeigen die Cf-PC-Proben die niedrigste Steifigkeit und die Cf-PEEK-Proben die höchste. Durch die Untersuchungen der 90°-Proben werden für die Dämpfung im Vergleich zu den bisherigen Untersuchungen andere Verhältnisse der Matrices zueinander gemessen. Allgemein zeigen die Untersuchungen der faserverstärkten Proben in Abbildung 6.3 und 6.4, dass die Cf-PC-Proben die höchste Dämpfung haben. Mutmaßlich wird der erhöhte η -Wert durch Mikroschädigungen verursacht. Die Untersuchung der unverstärkten Kunststoffmatrix ermittelt, im Gegensatz zu den Untersuchungen der faserverstärkten Proben,

bei den EP-Proben die höchste Dämpfung. Der Einfluss der Belastung ist bei den Untersuchungen der 90°-Proben weniger deutlich zu erkennen. Dabei nimmt mit zunehmender Dämpfung auch der Einfluss der Belastung zu. Keinen Einfluss der Belastung und die niedrigste Dämpfung wird bei den Cf-PEEK-Proben ermittelt.

6.2.3 Fazit der Frequenzanalyse

Die Unterschiede, die bei der Untersuchung der unverstärkten Matrix gemessen werden, können nicht direkt auf die faserverstärkten Proben übertragen werden. Sowohl die 0°-Faserorientierung als auch die unverstärkten Proben zeigen einen Einfluss der Frequenz auf das Dämpfungsverhalten. Bei unverstärkten Proben wird dadurch zusätzlich das Verhältnis der jeweiligen Proben zueinander beeinflusst. Insgesamt zeigt die Probenqualität einen großen Einfluss auf die Frequenzanalyse. Der niedrige Faservolumengehalt und zugleich hohe Porengehalt der Cf-PC-Proben verursacht für beide Faserorientierungen die jeweils höchste Dämpfung. Der größte Einfluss der Belastung wird bei den Untersuchungen der 0°-Proben festgestellt. Des Weiteren belegen die Untersuchungen den maßgeblichen Einfluss der Faserorientierung. Bei einer 0°-Faserorientierung zeigt der Vergleich der Cf-EP- und Cf-PEEK-Proben keinen Unterschied in η . Im Gegensatz dazu werden sowohl bei den unverstärkten Kunststoffen als auch bei 90°-Proben Unterschiede zwischen EP und PEEK gemessen.

6.2.4 Temperaturanalyse der unverstärkten Kunststoffmatrix

In diesem Abschnitt werden die durchgeführten Temperaturanalysen der unverstärkten Kunststoffproben verglichen. Ziel ist es dabei den Einfluss der Matrix auf die Dämpfungseigenschaften herauszuarbeiten. Grundlage der Untersuchung sind die Temperaturanalysen aus den Kapiteln 4.5, 5.1.3 und 5.2.3. Zur Analyse der unterschiedlichen Kunststoffproben sind in Abbildung 6.5 die Ergebnisse der unverstärkten EP-, PC- und PEEK-Proben zusammengefasst.

In Abbildung 6.5 sind die Messungen von η über einen Temperaturbereich von 0 °C bis maximal 250 °C für die jeweiligen Kunststoffe dargestellt. Des Weiteren sind in Abbildung 6.5 (oben) charakteristische Werte der Kurven markiert und der η_g -Wert bei der entsprechenden Temperatur angegeben. Zudem ist die Dämpfung bei RT für alle Proben dargestellt. Alle Proben zeigen ein Maximum von η im jeweiligen Glasübergangsbereich. Bedingt durch die unterschiedlichen Kunststoffe werden die η -Maxima bei verschiedenen Temperaturen ermittelt. Das Maximum bei der geringsten Temperatur wird bei der EP-Matrix ermittelt. Die Überhöhung von η_g im Vergleich zu η_{rt} ist dabei bei allen Kunststoff-

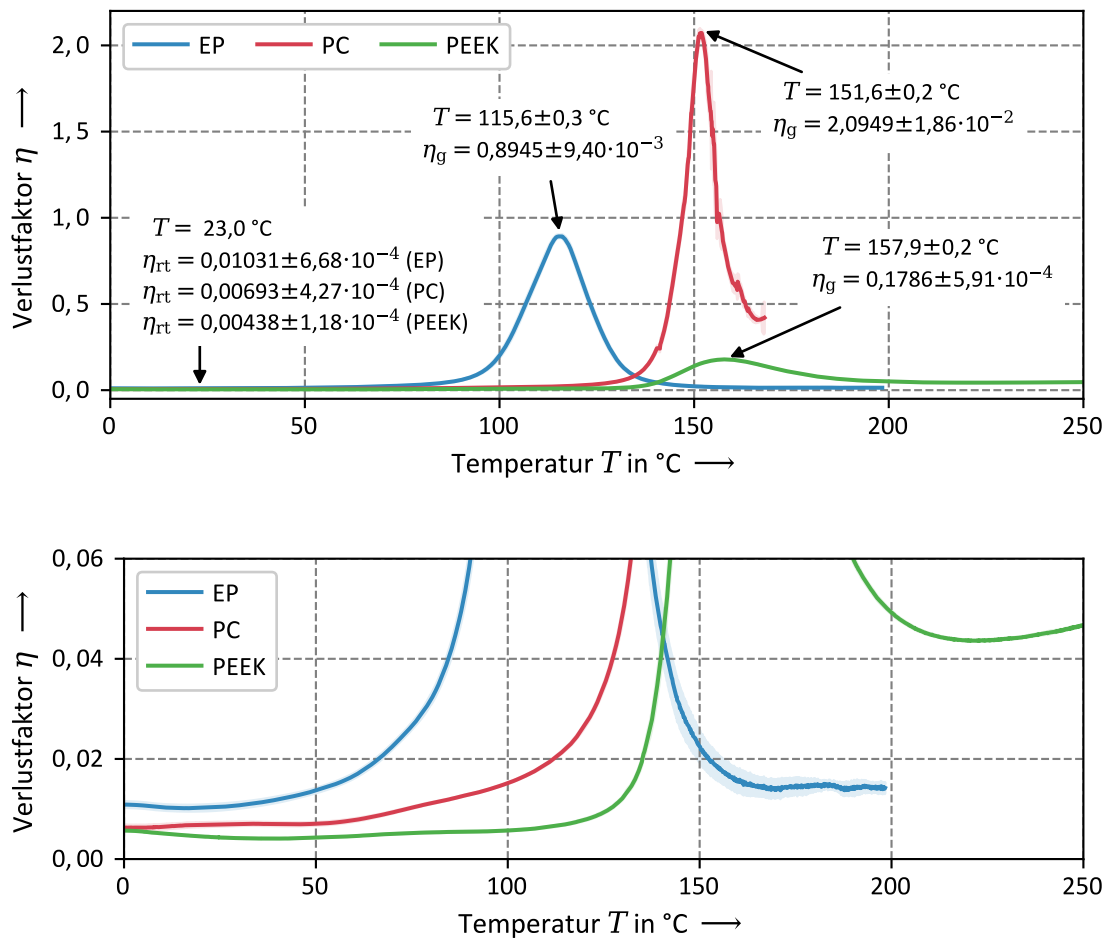


Abbildung 6.5: Vergleich von η der EP-, PC- und PEEK-Proben ermittelt durch 3PB-DMA über einen Temperaturbereich von 0°C bis maximal 250°C . Darstellung des gesamten Messverlaufs (oben) und mit angepasster η -Skalierung (unten).

fen unterschiedlich. Im Glasübergangsbereich zeigen die PC-Proben die größte Überhöhung von η_g . Zwischen η_{rt} und η_g liegt in etwa der Faktor 300. Dieser ist deutlich höher als bei den EP- (ca. 90) und PEEK-Proben (ca. 40). Zudem erstreckt sich die Überhöhung der PC-Proben über einen kleineren Temperaturbereich. Im Gegensatz dazu erstreckt sich der Glasübergangsbereich der EP-Proben über einen größeren Temperaturbereich, als dies bei den thermoplastischen Kunststoffen der Fall ist. Des Weiteren zeigen die PEEK-Proben oberhalb des Glasübergangsbereichs einen erhöhten η -Wert. Bei RT werden die gleichen Unterschiede zwischen den Kunststoffen wie in Abbildung 6.2 bei niedrigen Frequenzen ($f < 6 \text{ Hz}$) ermittelt. Dabei zeigen die EP-Proben die höchste Dämpfung und die PEEK-Proben die niedrigste. Das Verhalten der Kunststoffe unterscheidet sich mit zunehmender Temperatur im Bereich von RT bis zu η_g . Dabei zeigen die EP-Proben bei einer geringen Zunahme der Temperatur eine Zunahme von η . Oberhalb des Glasübergangsbereichs fällt η der EP-Proben wieder auf η -Werte in der Größenordnung der Werte bei RT zurück. Die PC-Proben zeigen ebenfalls eine Zunahme von η mit steigender Temperatur. Im Gegen-

satz zu den EP-Proben bleibt bei den PC-Proben oberhalb des Glasübergangsbereichs η erhöht. Ein deutlich unterschiedliches Verhalten in Abhängigkeit der Temperatur zeigen die PEEK-Proben. Diese zeigen nur eine geringe Zunahme von η bis zum Glasübergangsbereich. Im Glasübergangsbereich folgt eine sehr starken Zunahme von η . Oberhalb von T_g bleibt bei den PEEK-Proben η ebenfalls erhöht im Vergleich zu RT. Die Verhältnisse der Kunststoffe zueinander sind bei RT und beim η -Maximum unterschiedlich. Bei RT zeigen EP-Proben eindeutig die höchste Dämpfung. Im Gegensatz dazu zeigen im Maximum die PC-Proben den höchsten η_g -Wert. Wie bereits dargestellt ist dadurch das Verhältnis von η_{rt} und η_g bei allen Proben unterschiedlich. Daher hat die Temperatur einen unterschiedlichen Einfluss auf das Dämpfungsverhalten der jeweiligen Kunststoffe. Zur weiteren Analyse des Werkstoffverhaltens in Abhängigkeit der Temperatur werden Speicher- und Verlustmodul der unverstärkten Kunststoffproben dargestellt. Eine Zusammenfassung der Messkurven ist in Abbildung 6.6 zu finden.

An Abbildung 6.6 sind die unterschiedlichen Glasübergangstemperaturen der Kunststoffproben zu erkennen. Diese liegt jeweils beim Maximum der E'' -Kurve (Abbildung 6.6 unten) und ist mit dem jeweiligen E''_g - und T -Wert markiert. Des Weiteren sind für E' und E'' die Werte bei RT angegeben. Zur Analyse des Werkstoffverhaltens ist für E' ebenfalls ein Wert oberhalb des Glasübergangsbereichs dargestellt. Bedingt durch den Zusammenhang aus Gleichung (2.3) fallen die Ähnlichkeiten des Verlaufs von E'' zu dem Verlauf von η auf. Die PC-Proben zeigen die größte Überhöhung von E''_g bei T_g . Zugleich zeigt die Überhöhung die geringste Breite und erstreckt sich über einen geringen Temperaturbereich. E''_g der EP- und PEEK-Proben unterscheidet sich nur gering in der jeweiligen Höhe. Die Unterschiede in η folgen daher aus den unterschiedlichen Steifigkeiten, welche ebenfalls in Abbildung 6.6 (oben) dargestellt sind. Die EP-Proben zeigen vor dem Glasübergangsbereich einen höheren E'' -Wert. Oberhalb von T_g fällt E'' für die EP- und PC-Proben auf null ab. Im Gegensatz dazu zeigen die PEEK-Proben oberhalb von T_g ein im Vergleich zu RT erhöhten E'' -Wert. Für alle unverstärkten Kunststoffe ist in Abbildung 6.6 ein deutlicher Abfall von E' bis zum Beginn des Glasübergangsbereichs zu erkennen. Bei den EP-Proben ist dieser Steifigkeitsabfall am größten und die Steifigkeit nimmt von $T = 0^\circ\text{C}$ bis zum Glasübergangsbereich über 1.000 MPa ab. Die PC- und PEEK-Proben zeigen hierbei einen geringeren Abfall. Oberhalb von T_g zeigen die EP- und PC- keinerlei Reststeifigkeit und E' fällt auf sehr geringe Werte ab. Lediglich die PEEK-Proben zeigen eine Reststeifigkeit von etwa 380 MPa oberhalb von T_g .

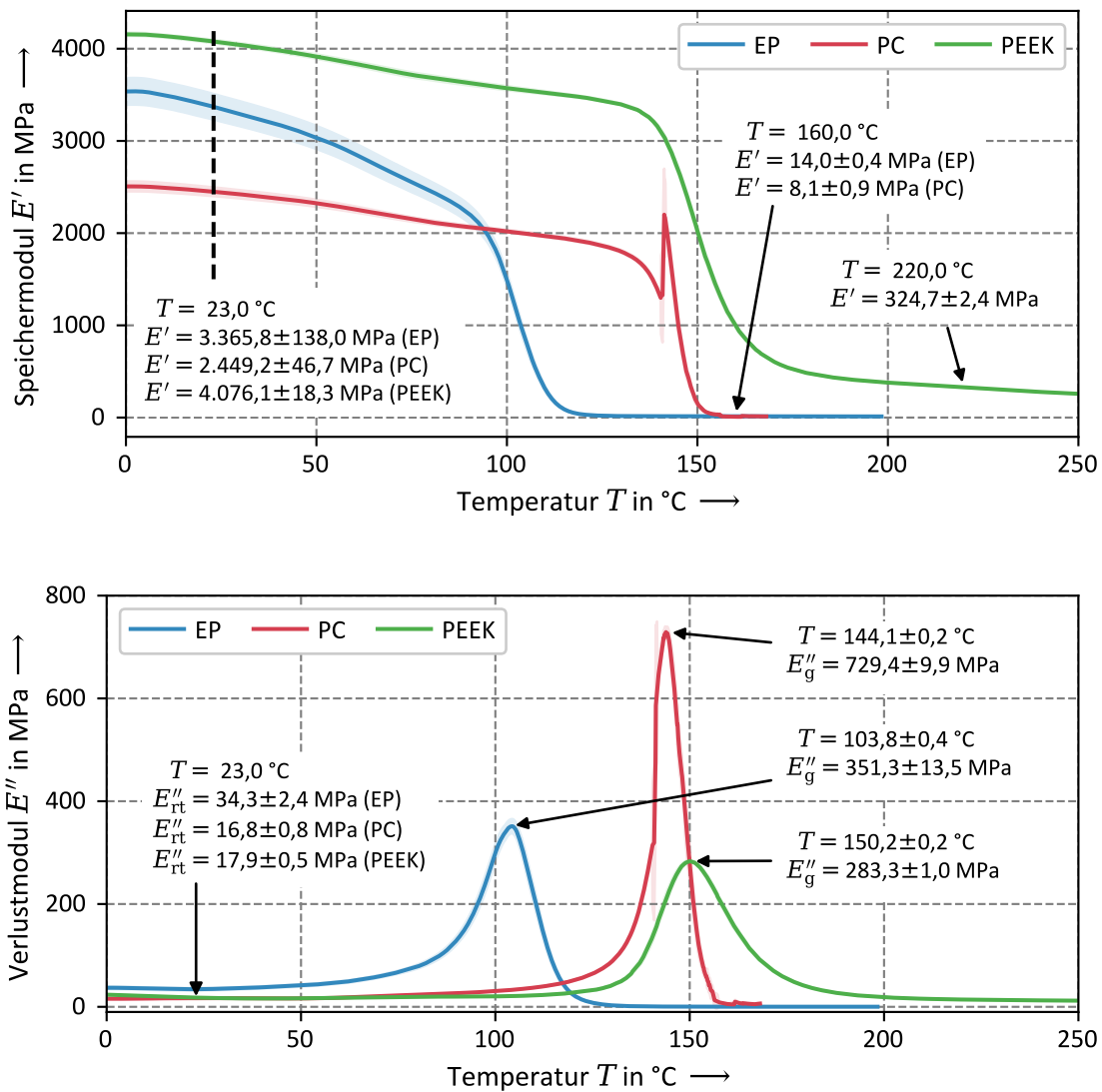


Abbildung 6.6: Vergleich von E' (oben) und E'' (unten) der EP-, PC- und PEEK-Proben ermittelt durch 3PB-DMA über einen Temperaturbereich von 0 °C bis maximal 250 °C.

6.2.5 Temperaturanalyse der faserverstärkten Kunststoffe

Abschließend werden die Untersuchungen an den faserverstärkten Proben in diesem Abschnitt zusammengeführt. Bei den Untersuchungen der Cf-PEEK Proben in Kapitel 5.2.3 kann durch die Faserverstärkung keine ausgeprägte T_g -Kurve ermittelt werden. Über den gemessenen Temperaturbereich kommt es zu keinem für den Glasübergangsbereich typischen starken Abfall des Speichermoduls. Auch E' und η zeigen kein ausgeprägtes Maximum. Daher werden die Versuche an Cf-PEEK nicht für den Vergleich herangezogen. Ein Vergleich von η der Cf-EP- und Cf-PC-Proben ist in Abbildung 6.7 dargestellt. Eine Beschreibung der Einzeluntersuchungen ist in Kapitel 4.5 und 5.1.3 zu finden.

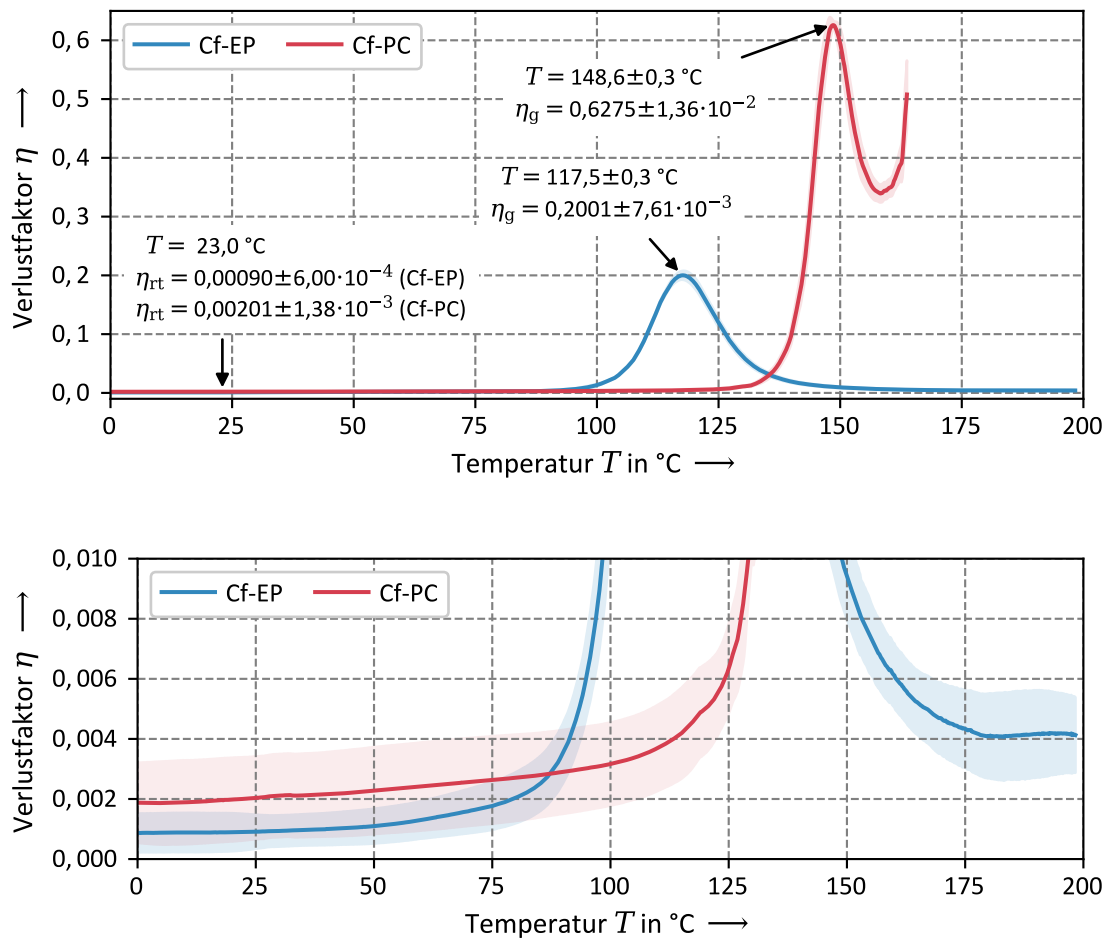


Abbildung 6.7: Vergleich von η der Cf-EP-, Cf-PC- und Cf-PEEK-Proben ermittelt durch 3PB-DMA über einen Temperaturbereich von $0 ^{\circ}\text{C}$ bis maximal $200 ^{\circ}\text{C}$.

In Abbildung 6.7 ist der Verlustfaktor η über einen Temperaturbereich von $0 ^{\circ}\text{C}$ bis maximal $200 ^{\circ}\text{C}$ dargestellt. Beide faserverstärkten Proben zeigen im Glasübergangsbereich ein Maximum von η . Sowohl die η_g -Werte als auch die Werte bei RT sind in Abbildung 6.7 abgebildet. Dabei fällt η_g von Cf-PC etwa dreimal so hoch aus, wie η_g der Cf-EP-Proben. Zudem erstreckt sich die Überhöhung von η_g über einen kleinen Temperaturbereich. Nach dem Maximum fällt der η -Wert von PC nicht wieder auf einen niedrigen Wert. Es folgt ein Minimum und darauf ein erneuter Anstieg des η -Wertes. Der erneute Anstieg hängt mit der plastischen Verformung der PC-Proben zusammen und ist der Grund, weshalb die Messkurve nur bis ca. $165 ^{\circ}\text{C}$ dargestellt wird. Des Weiteren ist an den Zahlenwerten die hohe Standardabweichung der Cf-PC-Proben zu erkennen. Diese ist bereits in Abbildung 6.3 dargestellt und diskutiert. Die Cf-EP-Proben zeigen im Vergleich zu den Cf-PC-Proben eine Überhöhung von η über einen größeren Temperaturbereich. Zudem fällt der Wert für η oberhalb des Glasübergangsbereichs auf Werte in der Größenordnung der Werte bei RT ab. Bei den Proben kann keine plastische Verformung festgestellt werden. Analog zu den Untersuchungen aus Abbildung 6.3 zeigen im unteren Temperaturbereich die Cf-

EP-Proben einen niedrigeren η -Wert als die Cf-PC-Proben. Mit zunehmender Temperatur zeigen beide Proben eine Zunahme von η . Zur weiteren Analyse des Werkstoffverhaltens in Abhängigkeit der Temperatur werden Speicher- und Verlustmodul der faserverstärkten Kunststoffproben in Abbildung 6.8 dargestellt.

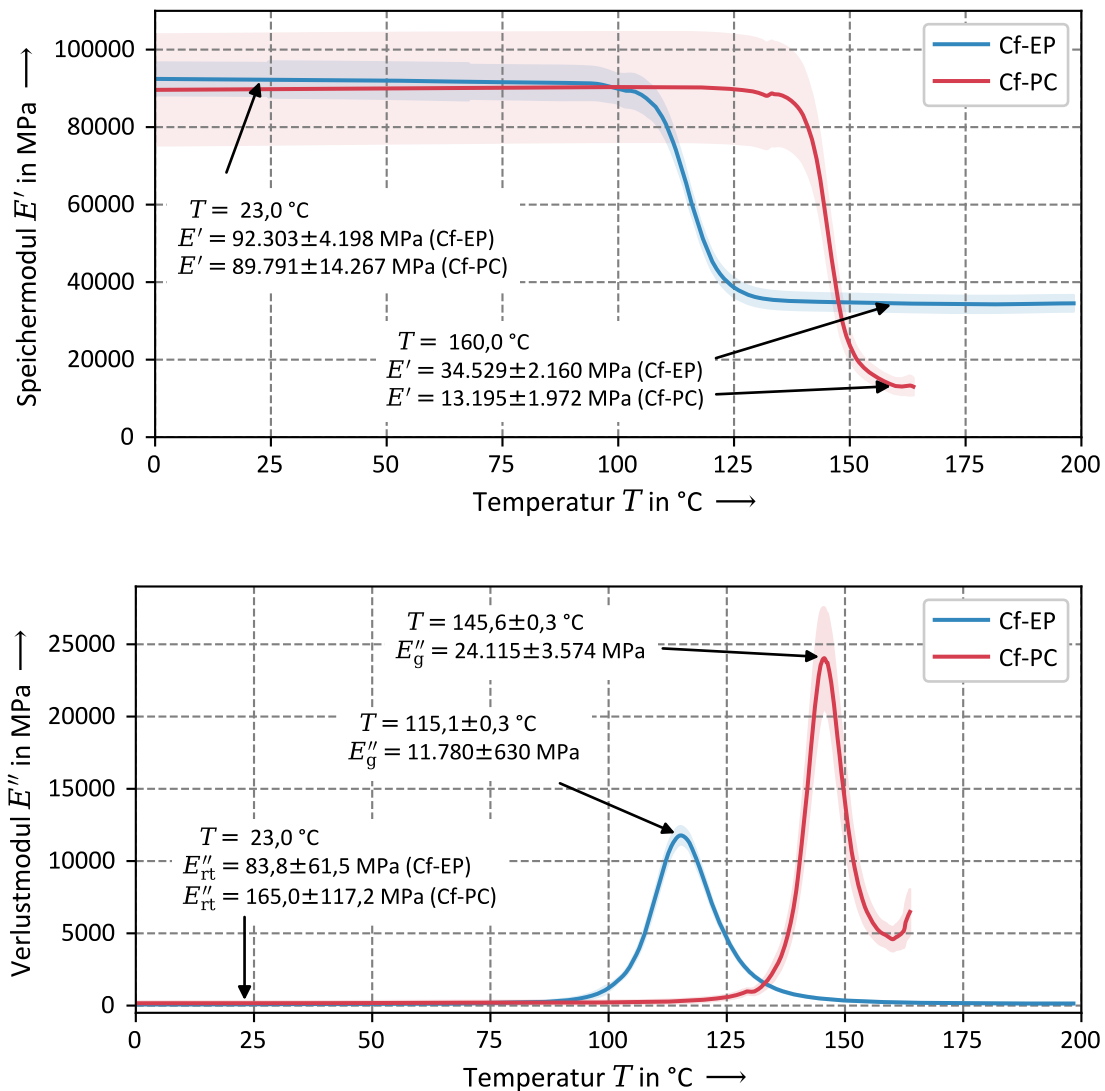


Abbildung 6.8: Vergleich von E' (oben) und E'' (unten) der Cf-EP-, Cf-PC- und Cf-PEEK-Proben ermittelt durch 3PB-DMA über einen Temperaturbereich von 0 $^{\circ}\text{C}$ bis maximal 200 $^{\circ}\text{C}$.

In Abbildung 6.8 sind die unterschiedlichen Glasübergangstemperaturen der Cf-Proben zu erkennen. Diese liegt jeweils beim Maximum der E'' -Kurve und ist in der Darstellung ausgewiesen. Zudem ist E''_{rt} angegeben, wodurch die Überhöhung bei T_{g} beurteilt werden kann. Für E' ist ebenfalls der Messwert bei RT und oberhalb des Glasübergangsbereich angegeben. Das E'' -Maximum der Cf-PC-Proben ist etwa doppelt so hoch wie das Maximum der Cf-EP-Proben. Dabei findet die Überhöhung über einen kleineren Temperaturbereich statt wie bei der η -Überhöhung aus Abbildung 6.7. Für beide Proben werden für Tempe-

turen unterhalb der Glasübergangstemperatur sehr ähnliche E' ermittelt. Dabei zeigen die Cf-PC-Proben eine sehr hohe Streuung. Diese ist deutlich größer als die Streuung der Cf-EP-Proben. Ursache für die Streuung ist die Probenqualität der Cf-PC-Proben. Die Cf-EP-Proben zeigen im Vergleich zu den Cf-PC-Proben eine geringe Abnahme von E' bis zu Beginn des Glasübergangsbereich. Im Gegensatz dazu zeigen die Cf-EP oberhalb von T_g eine deutlich höhere Reststeifigkeit als die Cf-PC-Proben.

6.2.6 Fazit der Temperaturanalyse

Den größten Einfluss der Temperatur auf das Werkstoffverhalten zeigen Proben mit einer PC-Matrix. Zudem zeigen diese Proben oberhalb von T_g eine plastische Verformung. Bei den Proben mit einer PEEK-Matrix wird der geringste Einfluss der Temperatur auf das Werkstoffverhalten festgestellt. Proben mit einer PEEK-Matrix zeigen zudem die höchste Steifigkeit oberhalb von T_g . Die größte Abnahme der Steifigkeit bis zum Glasübergangsbereich zeigen Proben mit einer EP-Matrix. Die Überhöhung von η_g und E''_g im Vergleich zu den Werten bei RT ist bei allen Proben unterschiedlich. Somit ist das Verhältnis nicht konstant und ein Rückschluss vom Maximalwert auf den RT-Wert bei den untersuchten Proben nicht möglich.

7 Zusammenfassung

Im Rahmen dieser Arbeit werden unterschiedliche Versuchsmethoden zur Bestimmung der Dämpfung untersucht. Zur Validierung werden mit jeder Methode Proben unterschiedlicher Geometrie aus Stahl untersucht. Hierbei zeigen die freien Ausschwingversuche keinen Einfluss der Probengeometrie und bestätigen damit die Erwartung. In verschiedenen Prüfserien werden ähnliche Kennwerte ermittelt. Die Dynamisch-Mechanische Analyse wird mit zwei unterschiedlichen Belastungen zur Dämpfungsermittlung verwendet. Mittels Zugbelastung kommt es zu keiner Übereinstimmung mit den Ergebnissen der Ausschwingversuche. Obwohl diese eine homogene Probenbelastung zu Folge haben, werden durch die Zug-DMA Dämpfungen bestimmt, die eine Größenordnung darüber liegen. Die DMA mittels 3-Punkt-Biegung der Stahlproben zeigt einen Einfluss der Probendicke auf das Ergebnis. Obwohl die Versuche im linear elastischen Bereich des Materials durchgeführt werden, führt eine dickere Probe zu einem höheren η -Wert. Der Vergleich der Ausschwingversuche mit den 3PB-DMA der dünneren Proben ergibt eine sehr gute Übereinstimmung.

Zur Analyse der FKV werden die drei unterschiedlichen Matrices EP, PC und PEEK untersucht. Als Referenz für die dynamischen Untersuchungen werden die Ausschwingversuche definiert. Diese zeigten in der Validierung an Stahlproben die höchste Zuverlässigkeit. Alle Matrices zeigen in den Ausschwingversuchen einen höheren η -Wert für eine 90°-Faserorientierung im Vergleich zu einer Faserorientierung von 0°. Zugleich werden für beide Faserorientierungen Unterschiede durch die jeweilige Matrix gemessen. Dabei sind die Trends für beide Faserorientierungen gleich, wobei diese bei den 90°-Proben stärker ausgeprägt sind. Die Cf-Proben zeigen mit einer EP-Matrix die höchste Dämpfung und mit einer PEEK-Matrix die niedrigste. In der Mitte liegen jeweils die Ergebnisse der Cf-PC-Proben.

Die Untersuchung der FKV durch die DMA ist in eine Frequenz- und eine Temperaturanalyse aufgeteilt. Zudem wird durch die DMA ebenfalls die unverstärkte Matrix untersucht. In der Frequenzanalyse wird für die EP-Matrix die höchste Dämpfung ermittelt. Im niedrigen Frequenzbereich zeigen die PEEK- und ab 10 Hz die PC-Proben den geringsten η -Wert. Mit steigender Frequenz nimmt η der EP- und PEEK-Proben gering zu. Dabei zeigen alle Proben einen Einfluss der Belastung. Die Unterschiede ermittelt bei der unverstärkten Matrix können nicht direkt auf die Untersuchungen der faserverstärkten Proben übertragen werden.

Die höchste Dämpfung der 0°-Proben zeigen Proben mit einer PC-Matrix. Zwischen der

EP- und PEEK-Matrix werden im Gegensatz dazu keine signifikanten Unterschiede gemessen. Dabei zeigen alle 0°-Proben einen Einfluss der Belastung. Im niedrigen Frequenzbereich nimmt η mit steigender Frequenz zu, anschließend ist η unabhängig von der Frequenz. Die Untersuchungen der 90°-Faserorientierung zeigen für alle Matrices einen wellenförmigen Messverlauf von η in Abhängigkeit der Frequenz. Unabhängig von der Probensteifigkeit treten die Maxima und Minima der Wellenform bei den gleichen Frequenzen auf. Als Ursache wird eine zu niedrige Biegesteifigkeit der 90°-Proben festgestellt. Die Cf-PEEK-Proben zeigen dabei den niedrigsten und die Cf-PC-Proben den höchsten η -Wert. Mit zunehmender Dämpfung nimmt auch der Einfluss der Belastung zu.

Für die 0°-Proben mit einer EP- und PC-Matrix wird eine niedrigere Dämpfung ermittelt im Vergleich zu einer 90°-Faserorientierung. Bei den Cf-PEEK-Proben wird bedingt durch den wellenförmigen Messverlauf der 90°-Proben kein eindeutiger Unterschied zwischen den Faserorientierungen festgestellt.

Die Temperaturanalyse wird maßgeblich von den Unterschieden der jeweiligen Matrix bestimmt. Dabei zeigen die Proben mit einer PC-Matrix den größten Einfluss der Temperatur auf das Werkstoffverhalten. Zudem wird oberhalb von T_g eine plastische Verformung der faserverstärkten und unverstärkten Proben gemessen. Bei den Proben mit einer PEEK-Matrix wird der geringste Einfluss der Temperatur auf das Werkstoffverhalten festgestellt. Proben mit einer PEEK-Matrix zeigen gleichzeitig die höchste Steifigkeit oberhalb von T_g . Dies führt dazu, dass bei den Cf-PEEK-Proben kein eindeutig definierter Glasübergang bis zu einer Temperatur von 250 °C gemessen wird. Die größte Abnahme der Steifigkeit bis zum Glasübergangsbereich zeigen Proben mit einer EP-Matrix.

7.1 Zielerreichung und Fazit

In der Zusammenfassung werden die Ergebnisse der Dämpfungsuntersuchung der unterschiedlichen Matrices dargestellt. Dies stellt ein Ziel der Arbeit, die Untersuchung des Einflusses einer duroplastischen und thermoplastischen Matrix auf das Dämpfungsverhalten von FKV, dar.

Das Ziel der Temperaturanalyse ist es eine höhere Prüftemperatur systematisch zu nutzen um die Dämpfungsermittlung bei Raumtemperatur zu verbessern. Mit steigender Temperatur nimmt die Dämpfung von Kunststoffen zu, wodurch die Messung gleichzeitig robuster gegen weitere Messeinflüsse wird. Die Untersuchung der unverstärkten und faserverstärkten Matrices zeigt jedoch, dass die Überhöhung von η und E'' im Maximum im Vergleich zu den Werten bei RT bei allen Proben unterschiedlich ausgeprägt ist. Demzufolge kann von dem Verhalten bei erhöhter Temperatur kein Rückschluss auf das Verhalten bei RT

getroffen werden.

Die detaillierte Untersuchung und der Vergleich von DMA und Ausschwingversuchen sowie die Ableitung von Gestaltungshinweisen basierend auf den Versuchsdurchführungen ist als weiteres Ziel der Arbeit definiert.

Der Vergleich der Versuchsdurchführung führt dabei für die jeweilige Matrix zu folgendem Ergebnis. Proben mit einer EP-Matrix zeigen für eine 0°-Faserorientierung und der niedrigen DMA-Belastung eine sehr gute Übereinstimmung mit den Ergebnissen der Ausschwingversuche. Die 90°-Faserorientierung zeigt für die DMA wiederum eine niedrige Dämpfung im Vergleich zu den Ausschwingversuchen. Für Proben mit einer PC-Matrix werden für beide Faserorientierungen durch die DMA jeweils höhere η -Werte ermittelt als durch die Ausschwingversuche. Eine 0°-Faserorientierung führt bei den DMA-Untersuchungen der Cf-PEEK zu einer etwas höheren Dämpfung als bei den Ausschwingversuchen. Im Gegensatz dazu wird durch die Ausschwingversuche bei den 90°-Proben ein höherer η -Wert ermittelt. Somit werden in Abhängigkeit der Matrix jeweils unterschiedliche Trends festgestellt. Dabei können in der Versuchsdurchführung grundlegende Unterschiede identifiziert werden.

Die Abweichung der 90°-Proben aller Matrices ist durch die DMA-Messung verursacht. Diese zeigt einen wellenförmigen Messverlauf der Proben, welche aufgrund der niedrigen Biegesteifigkeit der Proben entsteht. Durch eine höhere Probendicke kann die Biegesteifigkeit erhöht und zugleich die Wellenform der DMA-Messung reduziert werden. Zugleich führt eine höhere Probendicke bei gleicher Biegedehnung zu einer höheren Schubspannung und beeinflusst demzufolge das Ergebnis. Dies muss bei der Versuchsauslegung zusätzlich berücksichtigt werden.

Der niedrige Faservolumengehalt und zugleich hohe Porengehalt der Cf-PC-Proben dominieren das Ergebnis der DMA. Einerseits werden keine Unterschiede zwischen den 90°-Proben und den unverstärkten Kunststoffproben gemessen. Andererseits werden für beide Faserorientierungen durch die DMA deutlich höhere η -Werte im Vergleich zu den Ausschwingversuchen ermittelt. Beides weist darauf hin, dass die Mikroschädigungen der Cf-PC-Proben maßgeblich das DMA-Ergebnis beeinflussen.

Die DMA-Versuche vermitteln oftmals durch den glatten Messverlauf und die niedrige Standardabweichung ein scheinbar eindeutiges Ergebnis. Der Vergleich zeigt jedoch, dass dieses Ergebnis nicht immer mit den Ausschwingversuchen übereinstimmt. Die Frequenzanalyse der unverstärkten Kunststoffmatrix zeigt Unterschiede zwischen allen gemessenen Kunststoffen. Dennoch gelingt es bei der DMA der faserverstärkten Proben nicht vollständig die gemessenen Trends der Kunststoffproben zu bestätigen. Verursacht werden die Unterschiede durch die unzureichende Probenqualität der Cf-PC-Proben sowie die allgemein niedrige Biegesteifigkeit der 90°-Faserorientierung. Im Gegensatz dazu bilden die Ausschwingversuche der Cf-Proben die gemessenen Unterschiede der Kunststoffproben ab.

Somit zeigt sich der Ausschwingversuch resilienter gegen Schwankungen der Probenqualität und wechselnde Probensteifigkeiten.

Die Untersuchungen dieser Arbeit lassen folgende Schlussfolgerung zu. Der Dämpfungskennwert ermittelt durch die Ausschwingversuche ist unabhängig von der Belastung der Probe. Dabei wird durch die Ausschwingversuche der minimale Dämpfungskennwert für den jeweiligen Werkstoff ermittelt. Im Gegensatz dazu zeigen Untersuchungen mittels der DMA stets einen Einfluss der Belastung. Eine niedrigere Belastung führt zu einer niedrigeren Dämpfung. Wie in Kapitel 2.3.3 dargestellt ist, hängt dies mit einer abnehmenden Schubspannung zusammen. Besonders deutlich wird dieser Effekt bei der Untersuchung der 0°-Faserorientierung. Die DMA zeigt für alle Matrices einen starken Einfluss der Belastung. Der Vergleich beider Versuchsreihen zeigt entweder eine geringere (PC und PEEK) oder gleiche (EP) Dämpfung der geringen Belastung im Vergleich zu den Ausschwingversuchen. Daher ist die Annahme plausibel, dass durch eine reduzierte Belastung der Proben bei der DMA die Dämpfung weiter sinken und dadurch den minimale Dämpfungskennwert ermittelt werden kann. Gleichzeitig würde dies zu einer größeren Übereinstimmung von DMA und Ausschwingversuchen führen.

7.2 Ausblick

Ausgehend von den durchgeführten Untersuchungen werden folgende Betrachtungen empfohlen:

- Für weiterführende Untersuchungen mittels DMA ist es zielführend die Belastung der Proben zu reduzieren. Dadurch kann die Belastung, unterhalb derer die Dämpfung nicht weiter abnimmt, ermittelt werden. Des Weiteren wird bei einem Vergleich von unterschiedlichen Probendicken empfohlen die Versuche zusätzlich bei gleicher Schubspannung durchzuführen.
- Die Untersuchung einer 90°-Faserorientierung kann mit DMA durch eine höhere Probendicke (und folglich einer zunehmenden Biegesteifigkeit) erfolgreich gestaltet werden. Der Einfluss der Geometrie auf die Schubspannung ist bei der Versuchsauslegung zu berücksichtigen.
- Zur weiteren Betrachtung des niedrigen Frequenzbereichs können Ausschwingversuche mit angepasster Probenlänge und Probendicke durchgeführt werden. Zusätzlich ermöglicht die vertikale Befestigung eine Anbringung einer Schwungmasse am Probenende. Dadurch kann die untersuchte Eigenfrequenz weiter gesenkt werden.

Literaturverzeichnis

1. BERTHELOT, J. M. (Hrsg.). *Dynamics of Composite Materials*. Springer, 2015.
2. CHANDRA, R.; SINGH, S. P.; GUPTA, K. Damping studies in fiber-reinforced composites – a review. *Composite Structures*. 1999, Jg. 46, Nr. 1, S. 41–51. ISSN 02638223.
3. ADAMS, R. D.; BACON, D. G. C. Effect of Fibre Orientation and Laminate Geometry on the Dynamic Properties of CFRP. *Journal of Composite Materials*. 1973, Jg. 7, Nr. 4, S. 402–428. ISSN 0021-9983.
4. SARAVALOS, D. A.; CHAMIS, C. C. Unified Micromechanics of Damping for Unidirectional Fiber Reinforced Composites. *NASA Technical Memorandum*. 1989.
5. CHANDRA, R.; SINGH, S. P.; GUPTA, K. Micromechanical damping models for fiber-reinforced composites: a comparative study. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2002, Jg. 33, Nr. 6, S. 787–796. ISSN 1359-835X.
6. BERTHELOT, J. M. Damping analysis of laminated beams and plates using the Ritz method. *Composite Structures*. 2006, Jg. 74, Nr. 2, S. 186–201. ISSN 02638223.
7. HÖRING, B.; SCHÜRMANN, H. *Beitrag zur Dämpfung von Wellen und zur Konstruktion von Kupplungen aus Faser-Kunststoff-Verbunden in Antriebssträngen: Dämpfungsanalyse, Messtechnik und Auslegung*. Aachen: Shaker Verlag, 2015. ISBN 978-3-8440-4083-8.
8. TREVISO, A.; VAN GENECHTEN, B.; MUNDO, D.; TOURNOUR, M. Damping in composite materials: Properties and models. *Composites Part B: Engineering*. 2015, Jg. 78, S. 144–152. ISSN 13598368.
9. VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE (Hrsg.). *Werkstoff- und Bauteildämpfung - Dämpfung in festen Werkstoffen*. Bd. 17.160. Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2004. Nr. VDI 3830-2.
10. ALTENBACH, H. *Kontinuumsmechanik: Einführung in die materialunabhängigen und materialabhängigen Gleichungen*. 3., überarbeitete Auflage. Berlin und Heidelberg: Springer Vieweg, Springer-Verlag GmbH, 2015. Lehrbuch. ISBN 978-3-662-47069-5. Altenbach, Holm (VerfasserIn).
11. ALTENBACH, H.; ALTENBACH, J.; RIKARDS, R. *Einführung in die Mechanik der Laminat- und Sandwichtragwerke: Modellierung und Berechnung von Balken und Platten aus Verbundwerkstoffen*. Stuttgart: Dt. Verl. für Grundstoffindustrie, 1996. ISBN 3-342-00681-1.

12. MENARD, K. P. *Dynamic mechanical analysis: A practical introduction*. Boca Raton, Fla.: CRC Press, 1999. ISBN 0-8493-8688-8.
13. MEYERS, M. A.; CHAWLA, K. K. *Mechanical behavior of materials*. 2. ed. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2009. ISBN 978-0-521-86675-0.
14. SCHÜRMANN, H. *Konstruieren mit Faser-Kunststoff-Verbunden: Mit 39 Tabellen*. 2., bearb. und erw. Aufl. Berlin: Springer, 2007. VDI-/Buch]. ISBN 978-3-540-72189-5.
15. GROSS, D. *Technische Mechanik 4: Hydromechanik, Elemente der Höheren Mechanik, Numerische Methoden*. 8. Aufl. Berlin und Heidelberg, 2011. Springer-Lehrbuch. ISBN 3642168272. Auch verfügbar unter: <http://d-nb.info/1012629805/04>.
16. KOLSCH, Holger. *Schwingungsdämpfung durch statische Hysterese: Modellierung von Bauteilen, Parameteridentifikation, Schwingungsberechnungen* [Zugl.: Braunschweig, Techn. Univ., Diss., 1993]. Bd. 190. Düsseldorf: VDI-Verl., 1993. Fortschritt-Berichte VDI Reihe 11, Schwingungstechnik. ISBN 9783181490112.
17. SCHAPERLY, R. A. On the characterization of nonlinear viscoelastic materials. *Polymer Engineering & Science*. 1969, Jg. 9, Nr. 4, S. 295–310. ISSN 0032-3888.
18. STEINER, Harald. *Untersuchungen zum nichtlinear-viskoelastischen Materialverhalten von Kunststoffen* [Zugl.: München, Techn. Univ., Diss., 1997]. München: Utz Wiss, 1997. Werkstoffwissenschaften. ISBN 3896751557.
19. VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE (Hrsg.). *Werkstoff- und Bauteildämpfung - Einleitung und Übersicht*. Bd. 17.160. Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2004. Nr. VDI 3830-1.
20. MAHI, A. E.; ASSARAR, M.; SEFRANI, Y.; BERTHELOT, J. M. Damping analysis of orthotropic composite materials and laminates. *Composites Part B: Engineering*. 2008, Jg. 39, Nr. 7-8, S. 1069–1076. ISSN 13598368.
21. ASSARAR, M.; EL MAHI, A.; BERTHELOT, J. M. Damping Analysis of Sandwich Composite Materials. *Journal of Composite Materials*. 2009, Jg. 43, Nr. 13, S. 1461–1485. ISSN 0021-9983.
22. VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE (Hrsg.). *Werkstoff- und Bauteildämpfung - Versuchstechniken zur Ermittlung von Dämpfungskenngrößen*. Bd. 17.160. Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2005. Nr. VDI 3830-5.
23. DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V. (Hrsg.). *Kunststoffe - Bestimmung dynamische-mechanischer Eigenschaften - Teil 2: Torsionspendel-Verfahren*. Bd. 83.080.01. Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2019. Nr. DIN EN ISO 6721-2.

24. MÖSER, M. *Körperschall: Physikalische Grundlagen und technische Anwendungen*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2010. SpringerLink Bücher. ISBN 978-3-540-40336-4.
25. DRESIG, H.; HOLZWEISSIG, F. *Maschinendynamik*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2016. ISBN 978-3-662-52712-2.
26. NIEHUES, K. *Identifikation linearer Dämpfungsmodelle für Werkzeugmaschinenstrukturen* [Lehrstuhl für Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik]. München, 2016. Dissertation. TU München.
27. MARKERT, R. *Strukturdynamik: Skript zu den Vorlesung Strukturdynamik für Maschinenbauer*. 1., korr. Aufl. Darmstadt: Technische Universität, 2010. Technische Mechanik.
28. VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE (Hrsg.). *Werkstoff- und Bauteildämpfung - Modelle für gedämpfte Strukturen*. Bd. 17.160. Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2005. Nr. VDI 3830-4.
29. KOSTOPOULOS, V.; KORONTZIS, D. Th. A new method for the determination of viscoelastic properties of composite laminates: a mixed analytical–experimental approach. *Composites Science and Technology*. 2003, Jg. 63, Nr. 10, S. 1441–1452. ISSN 02663538. PII: S0266353803000861.
30. GIBSON, R. F. *Principles of Composite Material Mechanics, Third Edition*. 3rd ed. Hoboken: CRC Press, 2012. Mechanical Engineering. ISBN 978-1-4398-5006-0.
31. VANTOMME, J. A parametric study of material damping in fibre-reinforced plastics. *Composites*. 1995, Jg. 26, Nr. 2, S. 147–153. PII: 001043619590415V.
32. NELSON, D. J.; HANCOCK, J. W. Interfacial slip and damping in fibre reinforced composites. *Journal of Materials Science*. 1978, Jg. 13, Nr. 11, S. 2429–2440. ISSN 1573-4803. PII: BF00808058.
33. KENNY, J. M.; MARCHETTI, M. Elasto-plastic behavior of thermoplastic composite laminates under cyclic loading. *Eighth International Conference on Composite Structures*. 1995, Jg. 32, Nr. 1, S. 375–382. ISSN 0263-8223.
34. CURTIS, D. C.; MOORE, D. R.; SLATER, B.; ZAHLAN, N. Fatigue testing of multi-angle laminates of CF/PEEK. *Composites*. 1988, Jg. 19, Nr. 6, S. 446–452. PII: 0010436188907021.
35. SCHULTZ, A. B.; TSAI, S. W. Dynamic Moduli and Damping Ratios in Fiber-Reinforced Composites. *Journal of Composite Materials*. 1968, Jg. 2, Nr. 3, S. 368–379. ISSN 0021-9983.

36. SCHULTZ, A. B.; TSAI, S. W. Measurements of Complex Dynamic Moduli for Laminated Fiber-Reinforced Composites. *Journal of Composite Materials*. 1969, Jg. 3, Nr. 3, S. 434–443. ISSN 0021-9983.
37. ADAMS, R. D.; FOX, M. A. O.; FLOOD, R. J. L.; FRIEND, R. J.; HEWITT, R. L. The Dynamic Properties of Unidirectional Carbon and Glass Fiber Reinforced Plastics in Torsion and Flexure. *Journal of Composite Materials*. 1969, Jg. 3, Nr. 4, S. 594–603. ISSN 0021-9983.
38. ADAMS, R. D.; BACON, D. G. C. Measurement of the flexural damping capacity and dynamic Young's modulus of metals and reinforced plastics. *Journal of Physics D: Applied Physics*. 1973, Jg. 6, Nr. 1, S. 27. ISSN 0022-3727.
39. GUILD, F. J.; ADAMS, R. D. A new technique for the measurement of the specific damping capacity of beams in flexure. *Journal of Physics D: Applied Physics*. 1981, Jg. 14, Nr. 3, S. 355–363. ISSN 0022-3727.
40. GIBSON, R. F.; PLUNKETT, R. Dynamic Mechanical Behavior of Fiber-Reinforced Composites: Measurement and Analysis. *Journal of Composite Materials*. 1976, Jg. 10, Nr. 4, S. 325–341. ISSN 0021-9983.
41. GIBSON, R. F.; PLUNKETT, R. A forced-vibration technique for measurement of material damping. *Experimental Mechanics*. 1977, Jg. 17, Nr. 8, S. 297–302. ISSN 0014-4851.
42. SUAREZ, S. A.; GIBSON, R. F.; DEOBALD, L. R. Random and Impulse Techniques for Measurement of Damping in Composite Materials. *Experimental Techniques*. 1984, Jg. 8, Nr. 10, S. 19–24. ISSN 0732-8818.
43. SUAREZ, S. A.; GIBSON, R. F.; SUN, C. T.; CHATURVEDI, S. K. The influence of fiber length and fiber orientation on damping and stiffness of polymer composite materials. *Experimental Mechanics*. 1986, Jg. 26, Nr. 2, S. 175–184. ISSN 0014-4851.
44. CRANE, R. M.; GILLESPIE, J. W. Characterization of the vibration damping loss factor of glass and graphite fiber composites. *Composites Science and Technology*. 1991, Jg. 40, Nr. 4, S. 355–375. ISSN 02663538. PII: 026635389190030S.
45. MAHERI, M. R.; ADAMS, R. D. Finite-element prediction of modal response of damped layered composite panels. *Composites Science and Technology*. 1995, Jg. 55, Nr. 1, S. 13–23. ISSN 02663538. PII: 0266353895000747.
46. BERTHELOT, J. M.; SEFRANI, Y. Damping analysis of unidirectional glass and Kevlar fibre composites. *Composites Science and Technology*. 2004, Jg. 64, Nr. 9, S. 1261–1278. ISSN 02663538.

47. HADI, A. S.; ASHTON, J. N. Measurement and theoretical modelling of the damping properties of a uni-directional glass/epoxy composite. *Eighth International Conference on Composite Structures*. 1996, Jg. 34, Nr. 4, S. 381–385. ISSN 0263-8223. PII: 0263822396000050.
48. ROMANO, M. *Charakterisierung von gewebeverstärkten Einzellagen aus kohlenstofffaserverstärktem Kunststoff (CFK) mit Hilfe einer mesomechanischen Kinetik sowie strukturdynamischen Versuchen*. Regensburg, 2016. Dissertation. Ostbayerische Technische Hochschule Regensburg.
49. HÖRING, B.; BLOHBERGER, E.; SCHÜRMANN, H. Experimentelle Untersuchungen zur Dämpfung in Faser-Kunststoff-Verbunden und Beitrag zur Berechnung der Dämpfung von Antriebswellen. *Konstruktion*. 2018.
50. SHOKRIEH, M. M.; NAJAFI, A. An Experimental Evaluation of Micromechanical Approaches for Damping Characterization of Polymer Matrix Composites. *Journal of Composite Materials*. 2008, Jg. 42, Nr. 24, S. 2599–2613. ISSN 0021-9983.
51. ABRAMOVICH, H.; GOVICH, D.; GRUNWALD, A. Damping measurements of laminated composite materials and aluminum using the hysteresis loop method. *Progress in Aerospace Sciences*. 2015, Jg. 78, S. 8–18. ISSN 03760421.
52. DONG, S.; GAUVIN, R. Application of dynamic mechanical analysis for the study of the interfacial region in carbon fiber/epoxy composite materials. *Polymer Composites*. 1993, Jg. 14, Nr. 5, S. 414–420. ISSN 0272-8397.
53. VESCOVINI, R.; BISAGNI, C. A procedure for the evaluation of damping effects in composite laminated structures. *Progress in Aerospace Sciences*. 2015, Jg. 78, S. 19–29. ISSN 03760421.
54. CRAWLEY, E. F.; MOHR, D. G. Experimental measurements of material damping in free fall with tunable excitation. *AIAA Journal*. 1985, Jg. 23, Nr. 1, S. 125–131. ISSN 0001-1452.
55. EDBERG, D. L. Material damping of simple structures in a simulated space environment. *Journal of Spacecraft and Rockets*. 1986, Jg. 23, Nr. 3, S. 288–296. ISSN 0022-4650.
56. BAKER, W. E.; WOOLAM, W. E.; YOUNG, D. Air and internal damping of thin cantilever beams. *International Journal of Mechanical Sciences*. 1967, Jg. 9, Nr. 11, S. 743–766. ISSN 00207403.
57. ADAMS, R. D.; MAHERI, M. R. Dynamic flexural properties of anisotropic fibrous composite beams. *Composites Science and Technology*. 1994, Jg. 50, Nr. 4, S. 497–514. ISSN 02663538. PII: 0266353894900582.

58. ADAMS, R. D.; MAHERI, M. R. Damping in advanced polymer–matrix composites. *Journal of Alloys and Compounds*. 2003, Jg. 355, Nr. 1-2, S. 126–130. ISSN 09258388.
59. BERTHELOT, J. M.; SEFRANI, Y. Damping Analysis of Unidirectional Glass Fiber Composites with Interleaved Viscoelastic Layers: Experimental Investigation and Discussion. *Journal of Composite Materials*. 2006, Jg. 40, Nr. 21, S. 1911–1932. ISSN 0021-9983.
60. BERTHELOT, J. M.; ASSARAR, M.; SEFRANI, Y.; MAHI, A. E. Damping analysis of composite materials and structures. *Composite Structures*. 2008, Jg. 85, Nr. 3, S. 189–204. ISSN 02638223.
61. HWANG, S. J.; GIBSON, R. F. The effects of three-dimensional states of stress on damping of laminated composites. *Composites Science and Technology*. 1991, Jg. 41, Nr. 4, S. 379–393. ISSN 02663538.
62. HWANG, S. J.; GIBSON, R. F. Contribution of interlaminar stresses to damping in thick laminated composites under uniaxial extension. *Eighth International Conference on Composite Structures*. 1992, Jg. 20, Nr. 1, S. 29–35. ISSN 0263-8223. PII: 0263822392900092.
63. MAHERI, M. R. The effect of layup and boundary conditions on the modal damping of FRP composite panels. *Journal of Composite Materials*. 2011, Jg. 45, Nr. 13, S. 1411–1422. ISSN 0021-9983.
64. WRIGHT, G. C. The dynamic properties of glass and carbon fibre reinforced plastic beams. *Journal of Sound and Vibration*. 1972, Jg. 21, Nr. 2, S. 205–212. ISSN 0022460X. PII: 0022460X72909078.
65. NI, R. G.; ADAMS, R. D. The Damping and Dynamic Moduli of Symmetric Laminated Composite Beams—Theoretical and Experimental Results. *Journal of Composite Materials*. 1984, Jg. 18, Nr. 2, S. 104–121. ISSN 0021-9983.
66. FUJIMOTO, J.; TAMURA, T.; TODOME, K.; TANIMOTO, T. Mechanical Properties for CFRP/ Damping-Material Laminates. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*. 1993, Jg. 12, Nr. 7, S. 738–751. ISSN 0731-6844.
67. LUO, Xiangcheng; CHUNG, D.D.L. Vibration damping using flexible graphite. *Carbon*. 2000, Jg. 38, Nr. 10, S. 1510–1512. ISSN 00086223. PII: S0008622300001111.
68. FU, W.; CHUNG, D.D.L. Vibration Reduction Ability of Polymers, Particularly Polymethylmethacrylate and Polytetrafluoroethylene. *Polymers and Polymer Composites*. 2001, Jg. 9, Nr. 6, S. 423–426. ISSN 0967-3911.

69. CHUNG, D.D.L. Structural composite materials tailored for damping. *Journal of Alloys and Compounds*. 2003, Jg. 355, Nr. 1-2, S. 216–223. ISSN 09258388. PII: S0925838803002330.
70. CHUNG, D.D.L. Review: Materials for vibration damping. *Journal of Materials Science*. 2001, Jg. 36, Nr. 24, S. 5733–5737. ISSN 1573-4803.
71. CRANE, R. M.; GILLESPIE, J. W. Damping Loss Factor Determination of Glass and Graphite Fiber Composites. *David Taylor Research Center*. 1989.
72. MAHERI, M. R. The effect of temperature on the dynamic characteristics of heat-resistant thermoplastic composites. *Composites Science and Technology*. 1996, Jg. 56, Nr. 12, S. 1425–1434. ISSN 02663538. PII: S0266-3538(96)00103-0.
73. NI, R. G.; ADAMS, R. D. A rational method for obtaining the dynamic mechanical properties of laminae for predicting the stiffness and damping of laminated plates and beams. *Composites*. 1984, Jg. 15, Nr. 3, S. 193–199. PII: 001043618490274X.
74. BERTHELOT, J. M.; SEFRANI, Y. Longitudinal and transverse damping of unidirectional fibre composites. *Composite Structures*. 2007, Jg. 79, Nr. 3, S. 423–431. ISSN 02638223.
75. MCLEAN, D.; READ, B. E. Storage and loss moduli in discontinuous composites. *Journal of Materials Science*. 1975, Jg. 10, Nr. 3, S. 481–492. ISSN 1573-4803. PII: BF00543693.
76. GIBSON, R. F.; YAU, A. Complex Moduli of Chopped Fiber and Continuous Fiber Composites: Comparison of Measurements with Estimated Bounds. *Journal of Composite Materials*. 1980, Jg. 14, Nr. 2, S. 155–167. ISSN 0021-9983.
77. SUN, C. T.; GIBSON, R. F.; CHATURVEDI, S. K. Internal material damping of polymer matrix composites under off-axis loading. *Journal of Materials Science*. 1985, Jg. 20, Nr. 7, S. 2575–2585. ISSN 1573-4803. PII: BF00556089.
78. GIBSON, R. F.; CHATURVEDI, S. K.; SUN, C. T. Complex moduli of aligned discontinuous fibre-reinforced polymer composites. *Journal of Materials Science*. 1982, Jg. 17, Nr. 12, S. 3499–3509. ISSN 0022-2461.
79. SUN, C. T.; WU, J. K.; GIBSON, R. F. Prediction of material damping of laminated polymer matrix composites. *Journal of Materials Science*. 1987, Jg. 22, Nr. 3, S. 1006–1012. ISSN 1573-4803.
80. CHORTIS, D. I.; CHRYSOCHOIDIS, N. A.; VARELIS, Dimitris S.; SARAVANOS, D. A. A damping mechanics model and a beam finite element for the free-vibration of laminated composite strips under in-plane loading. *Journal of Sound and Vibration*. 2011, Jg. 330, Nr. 23, S. 5660–5677. ISSN 0022460X.

81. KHAN, S. U.; LI, C. Y.; SIDDIQUI, N. A.; KIM, J. K. Vibration damping characteristics of carbon fiber-reinforced composites containing multi-walled carbon nanotubes. *Composites Science and Technology*. 2011, Jg. 71, Nr. 12, S. 1486–1494. ISSN 02663538.
82. ADAMS, R. D.; BACON, D. G. C. The Dynamic Properties of Unidirectional Fibre Reinforced Composites in Flexure and Torsion. *Journal of Composite Materials*. 1973, Jg. 7, Nr. 1, S. 53–67. ISSN 0021-9983.
83. YIM, J. H.; GILLESPIE, J. W. Damping characteristics of 0° and 90° AS4/3501-6 unidirectional laminates including the transverse shear effect. *Composite Structures*. 2000, Jg. 50, Nr. 3, S. 217–225. ISSN 02638223.
84. BERTHELOT, J. M. Damping Analysis of Orthotropic Composites with Interleaved Viscoelastic Layers: Modeling. *Journal of Composite Materials*. 2006, Jg. 40, Nr. 21, S. 1889–1909. ISSN 0021-9983.
85. UNGAR, E.; KERWIN, E. M. Loss Factors of Viscoelastic Systems in Terms of Energy Concepts. *The Journal of the Acoustical Society of America*. 1962, Jg. 34, Nr. 7, S. 954–957. ISSN 0001-4966.
86. SARAVANOS, D. A.; CHAMIS, C. C. Mechanics of damping for fiber composite laminates including hygrothermal effects. *AIAA Journal*. 1990, Jg. 28, Nr. 10, S. 1813–1819. ISSN 0001-1452.
87. SARAVANOS, D. A. Analysis of passive damping in thick composite structures. *AIAA Journal*. 1993, Jg. 31, Nr. 8, S. 1503–1510. ISSN 0001-1452.
88. HASHIN, Z. Complex moduli of viscoelastic composites - I. General theory and application to particulate composites. *International Journal of Solids and Structures*. 1970, Jg. 6, Nr. 5, S. 539–552. ISSN 00207683. PII: 0020768370900296.
89. HASHIN, Z. Complex moduli of viscoelastic composites - II. Fiber reinforced materials. *International Journal of Solids and Structures*. 1970, Jg. 6, Nr. 6, S. 797–807. ISSN 00207683. PII: 0020768370900181.
90. YIM, J. H.; JANG, B. Z. An analytical method for prediction of the damping in symmetric balanced laminated composites. *Polymer Composites*. 1999, Jg. 20, Nr. 2, S. 192–199. ISSN 0272-8397.
91. YIM, J. H. A damping analysis of composite laminates using the closed form expression for the basic damping of Poisson's ratio. *Composite Structures*. 1999, Jg. 46, Nr. 4, S. 405–411. ISSN 02638223.
92. BILLUPS, E. K.; CAVALLI, M. N. 2D damping predictions of fiber composite plates: Layup effects. *Composites Science and Technology*. 2008, Jg. 68, Nr. 3-4, S. 727–733. ISSN 02663538.

93. DONHAUSER, T. *Untersuchung des Dämpfungsverhaltens von FKV, dessen Implementierung in das FE-Programm ABAQUS sowie Validierung durch Dämpfungsversuche an Rohrprobekörpern*. 2013. Masterarbeit. Konstruktiver Leichtbau und Bauweisen, TU Darmstadt.
94. KLOTTER, K.; BENZ, G. *Technische Schwingungslehre*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1978. ISBN 978-3-662-39301-7.
95. HOFFMANN SE. Folienband. *Datenblatt*. 2020.
96. DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V. (Hrsg.). *Kunststoffe - Bestimmung der Zugeigenschaften - Teil 1: Allgemeine Grundsätze*. Bd. 83.080.01. Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2019. Nr. DIN EN ISO 527-1.
97. MARKERT, R. *Statik und Elastomechanik: Technische Mechanik, Teil A; Skript zu den Vorlesungen Statik und Elastomechanik (TM I und TM II) für Maschinenbauer und Technische Mechanik für Elektrotechniker*. 2., korr. Aufl. Darmstadt: Technische Universität, 2013. Technische Mechanik. ISBN 9783981416336.
98. HOFFMANN SE. Fühlerlehenrolle. *Datenblatt*. 2021.
99. DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V. (Hrsg.). *Faserverstärkte Kunststoffe - Bestimmung der Biegeeigenschaften*. Bd. 83.120. Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2011. Nr. DIN EN ISO 14125.
100. DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V. (Hrsg.). *Kunststoffe - Bestimmung dynamisch-mechanischer Eigenschaften - Teil 3: Biegeschwingung Resonanzkurven Verfahren*. Bd. 83.080.01. Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2021. Nr. DIN EN ISO 6721-3.
102. DELTA-TECH. Technisches Datenblatt - Matrix DT120. *Datenblatt*. 2015.
103. DELTA-PREG. Produktkatalog - Prepreg. *Datenblatt*. 2017.
104. DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V. (Hrsg.). *Zugversuch an 45° Laminaten zur Bestimmung der Schubspannung/Schubverformungs-Kurve, des Schubmoduls in der Lagenebene*. Bd. 83.120. Berlin: Beuth Verlag GmbH, 1998. Nr. DIN EN ISO 14129.
105. DELTA-PREG. Produktdatenblatt - RI004N2. *Datenblatt*. 2019.
106. DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V. (Hrsg.). *Faserverstärkte Kunststoffe - Bestimmung des Glasübergangs von Faserverbundwerkstoffen unter dynamischer Belastung*. Bd. 49.025.40. Berlin: Beuth Verlag GmbH, 1999. Nr. DIN 65583.
107. COVESTRO. Produktdatenblatt - UD Tape CF GP 1000T. *Datenblatt*. 2018.
108. COVESTRO. Produktdatenblatt - Makrolon 2205. *Datenblatt*. 2019.

-
109. ZELL-METALL. Produktdatenblatt - ZELLAMID 1500 X (PEEK). *Datenblatt*. 2019.
 110. TEIJIN CARBON EUROPE GMBH. Produktdatenblatt - TPUD PEEK HTS45. *Datenblatt*. 2023.
 111. CRANE, R. M.; GILLESPIE, J. W. Analytical model for prediction of the damping loss factor of composite materials. *Polymer Composites*. 1992, Jg. 13, Nr. 3, S. 179–190. ISSN 0272-8397.

Eigene Veröffentlichungen

112. HEYDT, T.; MOTSCH, N.; HAUSMANN, J. *Experimental investigation of free oscillation of carbon fiber reinforced plastics*. Xi'an, China, 2017. 21st International Conference on Composite Materials.
113. HEYDT, T.; MOTSCH, N.; HAUSMANN, J. *Development of a hybrid process for the production of personalized and structurally optimized 3D-printed orthosis on site*. Daegu, Südkorea, 2018. International Textile Conference.
114. HESSELBACH, J.; HEILIG, M.; KRAUS, E.; RUPP, T.; TEUTSCH, R.; HEYDT, T.; MOTSCH-EICHMANN, N. Characterisation of the damping behaviour of an adhesive-bonded GFRP trailer. *Joining Plastics*. 2024, Nr. 3, S. 178–185.

Betreute studentische Arbeiten

101. DICKHEUER, N. *Konstruktion und Inbetriebnahme einer Prüfvorrichtung zur Bestimmung der Dämpfungseigenschaften von Faser-Kunststoff-Verbunden*. 2019. Masterarbeit. Institut für Verbundwerkstoffe, Kaiserslautern.
115. OBERLÄNDER, C. *Untersuchung der Temperaturentwicklung unter Langzeiteinwirkung eines Laserstrahls auf ein Spiegelsystem mit CFK-Träger*. 2017. Studienarbeit. Institut für Verbundwerkstoffe, Kaiserslautern.
116. SKRZYPCZAK, G. *Materialcharakterisierung und Untersuchung 3D-gedruckter faserverstärkter Prüfkörper*. 2017. Studienarbeit. Institut für Verbundwerkstoffe, Kaiserslautern.
117. RAINOT, G. *Numerische und experimentelle Untersuchung von tapeverstärktem PA12-Material unter Biegebelastung*. 2018. Diplomarbeit. Institut für Verbundwerkstoffe, Kaiserslautern.
118. BENTZ, J. *Herstellung einer Verbindung zwischen 3D-gedrucktem PA12 mit thermoplastischen Tapes, sowie deren Charakterisierung mittels Schäl- und Zugscherprüfung*. 2018. Studienarbeit. Institut für Verbundwerkstoffe, Kaiserslautern.
119. HANSEN, K. *Aufbau eines parametrischen Simulationsmodells zur Untersuchung eines Mountainbike Rahmens mit flexiblem Hinterbau*. 2019. Studienarbeit. Institut für Verbundwerkstoffe, Kaiserslautern.
120. SHAHPASANDI, M. *Digitale Prozesskette zur Individualisierung von High-Performance Fahrradsätteln*. 2021. Studienarbeit. Institut für Verbundwerkstoffe, Kaiserslautern.

Lebenslauf

Persönliche Daten

Name	Torsten Felix Florian Heydt
Geburtsort	Worms, Deutschland

Berufserfahrung

10.2015 - 03.2022	Leibniz Institut für Verbundwerkstoffe, Kaiserslautern Wissenschaftlicher Mitarbeiter Abteilung: Bauteilentwicklung, Kompetenzfeld: Bauweisen
03.2014 - 08.2014	Airbus Helicopters Deutschland, Donauwörth Praktikant, Bereich Industrial Engineering

Hochschulstudium

10.2008 - 06.2015	Technische Universität Darmstadt Maschinenbau - Mechanical and Process Engineering Abschluss: Master of Science (M. Sc.) Schwerpunkte: Faser-Kunststoff-Verbunde und konstruktiver Leichtbau
-------------------	---

Schulausbildung

1999 - 2008	Gauß-Gymnasium-Worms Allgemeine Hochschulreife
-------------	---

Darmstadt, im Mai 2025