

Dämpfungseigenschaften geklebter Verbindungen

Simulation und Validierung an Bauteilversuchen

Damm, Jannis^a; Albiez, Matthias^a; Ummenhofer, Thomas^a

Kötz, Fabian^b; Matzenmiller, Anton^b

a Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Stahl- und Leichtbau, Karlsruhe

b Universität Kassel, Institut für Mechanik (IfM), Kassel

Abstract

Klebverbindungen können einen wertvollen Beitrag zur Dämpfung dynamisch beanspruchter Strukturen leisten. Diese Dämpfungseigenschaften können bislang jedoch nicht zuverlässig modelliert werden. In einem FOSTA-Forschungsprojekt werden Materialmodelle entwickelt, die das Klebstoffverhalten bei statischer und bei dynamischer Beanspruchung abbilden können. Zur Validierung werden umfangreiche experimentelle Untersuchungen zu den Dämpfungseigenschaften bauteilähnlicher Rohrverbindungen herangezogen.

1 Einleitung

Klebstoffe auf Basis von Epoxidharzen und Polyurethanen sind derart modifizierbar, dass sie neben einer hervorragenden Festigkeit auch gute Dämpfungseigenschaften besitzen.

Numerische sowie experimentelle Untersuchungen haben gezeigt, dass eine lokal wirkende Dämpfung durch geklebte Anschlüsse das dynamische Verhalten einer Gesamtstruktur zudem positiv beeinflussen kann [1]. Die Entwicklung von Materialmodellen zur Berücksichtigung sowohl der statischen als auch der dynamischen Eigenschaften kommerzieller Klebstoffe wurde bisher jedoch nicht realisiert und ist daher Gegenstand des FOSTA-Forschungsprojekts P 1272. Die erzielten Ergebnisse werden in einer zweiteiligen Publikationsserie in Auszügen vorgestellt [2], [3]

Im ersten Teil dieser Publikationsserie [2] wurden die Ergebnisse numerischer und experimenteller Untersuchungen zu den Dämpfungseigenschaften semistruktureller 2K-Klebstoffe vorgestellt. Im Rahmen vereinfachter numerischer Analysen wurde das große Potenzial der Dämpfung dynamisch belasteter Strukturen durch geklebte Anschlüsse aufgezeigt. Das dynamische Tragverhalten von Strukturen lässt sich durch die Anordnung und die gezielte geometrische Auslegung der Klebfugengeometrie deutlich optimieren. Die Implementierung geeigneter Materialmodelle zur Berücksichtigung der Dämpfungseigenschaften kommerzieller Klebstoffsysteme während der Konstruktion sowie der dynamischen Auslegung von Strukturen ist jedoch bisher nur eingeschränkt möglich. Die gleichzeitige Berücksichtigung nichtlinearen Klebstoffverhaltens sowie der Abhängigkeit der Dämpfungseigenschaften von der Frequenz, der Temperatur sowie dem Maß der Deformation der Klebschicht ist in numerischen Berechnungen bislang nicht umsetzbar und steht im Fokus des FOSTA-Forschungsprojekts P 1272 [4]. Die methodische Vorgehensweise, die zur Entwicklung und Validierung der Materialmodelle der Klebstoffe verfolgt wird, ist schematisch in Abbildung 1 dargestellt.

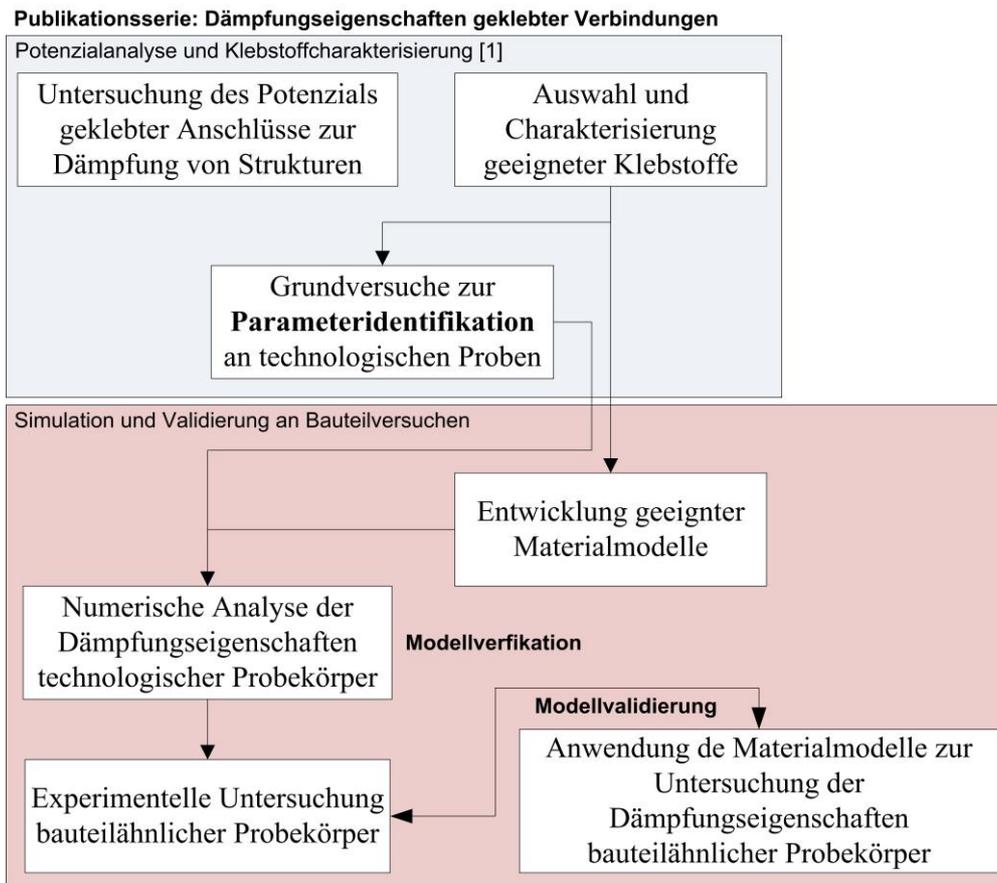


Abbildung 1: Methodische Vorgehensweise zur Entwicklung und Validierung von Materialmodellen kommerziell verfügbarer Klebstoffsysteme zur Berechnung und Beurteilung der Dämpfungseigenschaften

In [2] wurden zunächst die Dämpfungseigenschaften von zwei Klebstoffen an Substanzproben und technologischen Verbundproben charakterisiert. Das Ziel dieser Untersuchungen ist die Identifikation notwendiger Kennwerte zur Parametrisierung der Materialmodelle der Klebstoffe. Hierzu zählen sowohl Parameter zur Charakterisierung statischer wie auch dynamischer Eigenschaften. Zudem werden in [2] die Ergebnisse ausgewählter, experimenteller Untersuchungen an technologischen Probekörpern (dicke Zugscherprobe) vorgestellt, anhand derer die Dämpfungseigenschaften von Verbundproben bestimmt werden können und die zur Verifikation der Materialmodelle herangezogen werden.

Im vorliegenden zweiten Teil dieser Reihe wird zunächst die experimentelle Datengrundlage durch Versuchsreihen zur Analyse der Dämpfungseigenschaften geklebter bauteilähnlicher Probekörper erweitert. Der Fokus liegt hierbei auf geklebten Kreishohlprofil-Steckverbindungen. Im Rahmen einer Parameterstudie werden die Einflüsse ausgewählter

Geometrie- und Prüfparameter auf die Dämpfungseigenschaften der KHP-Steckverbindung bestimmt. Darauf aufbauend werden die Berechnungen zur Verifikation der Materialmodelle der untersuchten Klebstoffe dargestellt. Auf Grundlage dieser Verifikationsrechnungen können die identifizierten Materialparameter optimiert werden. Abschließend werden die Materialmodelle durch den Vergleich experimentell und numerisch bestimmter Kraft-Weg-Hysteresen sowie der zugehörigen Dämpfungseigenschaften validiert.

2 Experimentelle Untersuchung der Dämpfungseigenschaften geklebter Kreishohlprofil-Steckverbindungen

2.1 Werkstoffe und Probekörper

2.1.1 Klebstoffe

Die Untersuchungen an geklebten Kreishohlprofilverbindungen werden mit zwei unterschiedlichen Klebstoffen durchgeführt. Es werden der 2K-EP-Klebstoff Sikadur F51-60 der SIKA AG (im Folgenden auch als „Klebstoff S“ abgekürzt) sowie der 2K-PU-Klebstoff Körapur 842 der Kömmerling Chemische Fabrik GmbH (im Folgenden auch als „Klebstoff K“ abgekürzt) verwendet. Exemplarische Ergebnisse der Klebstoffcharakterisierung der priorisierten Klebstoffe sind in [2] dokumentiert. In Teil 2 zweiteiligen Publikation werden die Ergebnisse experimenteller Untersuchungen an mit beiden Klebstoffen gefertigten KHP-Steckverbindungen vorgestellt. Hierbei steht neben einer generellen Bestimmung der Dämpfungseigenschaften ein Vergleich der beiden Klebstoffsysteme anhand ausgewählter Versuchsparameter im Fokus der Untersuchungen.

2.1.2 Stahlwerkstoffe

Für die Fertigung der Probekörper werden warmgefertigte, nahtlose Kreishohlprofile (KHP) nach DIN EN 10210-1 [5] in der Stahlgüte S355J2H (Werkstoffnummer 1.0576) verwendet. Die Fügeteile bestehen aus KHP-Abschnitten mit einer Länge von 300 mm, die mit einer definierten Überlappungslänge L ineinandergesteckt und klebtechnisch gefügt werden. Das innere Kreishohlprofil hat einen Durchmesser $D_i = 70,0$ mm und eine Wandstärke $t_i = 10,0$ mm. Der Außendurchmesser D_a und die Wanddicke t_a des äußeren Kreishohlprofilabschnitts werden entsprechend den in Abbildung 1 dargestellten Probenkonfigurationen A, B und C gewählt. Die resultierenden Klebschichtdicken entsprechen den Nennwerten.

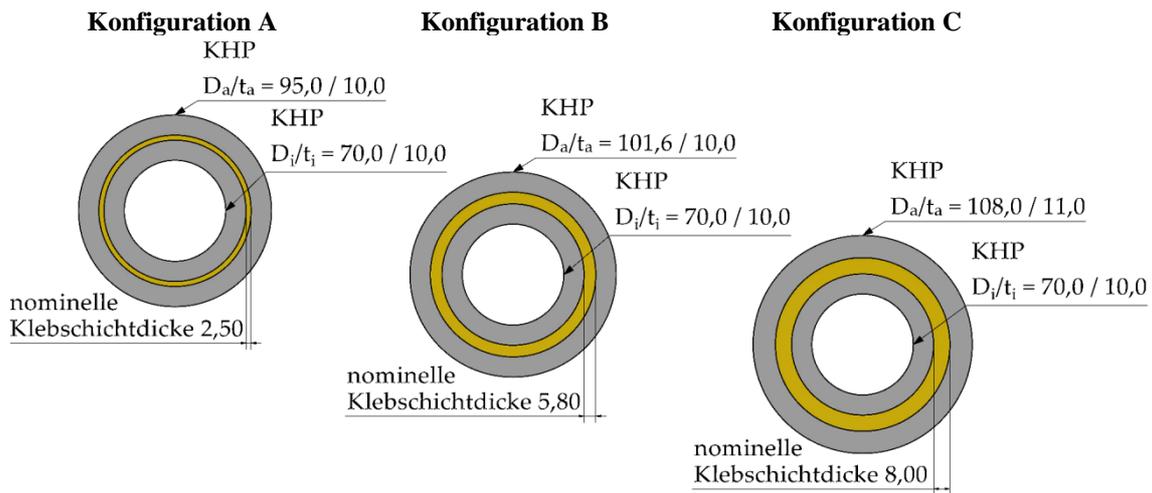


Abbildung 2: Abmessungen der untersuchten Kreishohlprofile der Probekörperkonfigurationen A, B und C in [mm] [6]

Vor der Klebung werden die Fügeiteiloberflächen mit einer Bürste von grobem Schmutz und Rost gereinigt und anschließend mit Methyläthylketon (MEK) gereinigt. Anschließend werden die Fügeiteiloberflächen mit Korund auf die Oberflächengüte Sa 3 nach EN ISO 8501-1[7] gestrahlt und abschließend erneut mit MEK gesäubert.

2.2 Probekörperfertigung

Für die klebtechnische Fertigung der KHP-Steckverbindung wurde eine Fertigungsvorrichtung aus Polyethylen entwickelt, die aus insgesamt vier Platten besteht, die in einer Rahmenkonstruktion übereinander angeordnet sind. Die Platten sind mit Bohrungen versehen, deren Durchmesser den Außendurchmessern der verwendeten Kreishohlprofile entsprechen. Zur Herstellung der Rohrverbindungen werden die Fügeiteile in vertikaler Lage in die Vorrichtung eingebaut. Die korrekte Ausrichtung und Zentrierung der beiden kreisförmigen Hohlprofile wird durch eine Hilfskonstruktion sichergestellt. Die Positionierung der kreisförmigen Hohlprofile in der Fixiervorrichtung ist links in Abbildung 3 dargestellt. Nach der Überprüfung der Klebfugengeometrie werden die beiden oberen Ebenen der Fixierungsvorrichtung zusammengesetzt. Diese beiden Ebenen haben Bohrungen mit dem Außendurchmesser des inneren Hohlprofils, wodurch dieses ebenfalls fixiert wird.

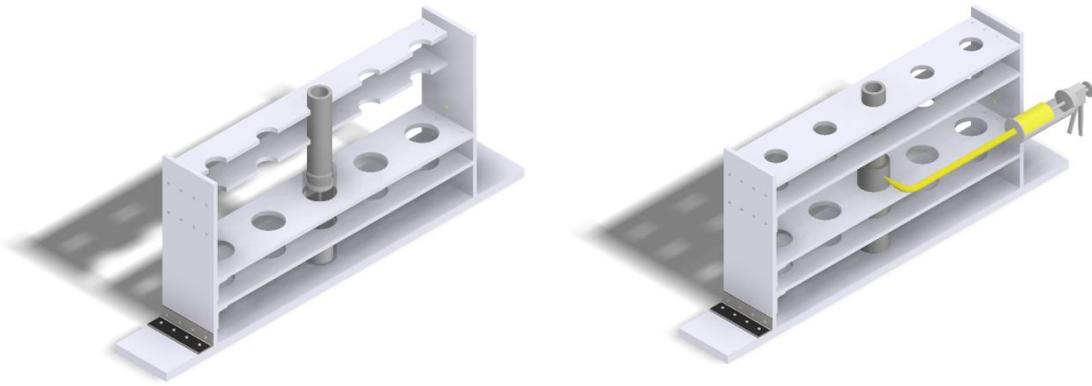


Abbildung 3: Positionierung der beiden Fügeiteile der KHP-Steckverbindung in der Fertigungsvorrichtung (links); Klebtechnische Fertigung durch Injektion des Klebstoffs durch eine Injektionsbohrung im äußeren KHP (rechts) [6]

In den entstehenden Spalt wird der Klebstoff injiziert. Die Injektion erfolgt durch zwei gegenüberliegende, seitlich am Außenrohr angeordnete Injektionsbohrungen (siehe Abbildung 2, rechts). Die Bohrungen sind so angeordnet, dass der Klebstoff am Boden des Spalts eingebracht wird. Der Klebstoff wird abwechselnd durch die beiden Löcher injiziert, um eine gleichmäßige Füllung des Klebespalts zu erreichen. Der Injektionsvorgang wird beendet, sobald der Klebstoff im Klebspalt die Oberkante des äußeren Hohlprofils erreicht hat.

2.3 *Dynamische Hystereseversuche an geklebten KHP-Steckverbindungen*

2.3.1 *Versuchsaufbau*

Zur Untersuchung der Dämpfungseigenschaften der geklebten Rohrverbindungen werden dynamischen Prüfungen auf einer servohydraulischen 250 kN-Prüfmaschine durchgeführt. Die dynamischen Prüfungen werden als Hystereseversuche unter Zug-Druck-Wechselbelastung durchgeführt. Der Prüfaufbau der dynamischen Prüfungen ist daher so ausgelegt, dass beim Wechsel der Belastungsrichtung von Zug auf Druck und umgekehrt kein Schlupf innerhalb des Probekörpers, zwischen den geklebten Bauteilen und der Anbindung des Probekörpers an die Prüfmaschine auftritt.

Der Versuchsaufbau der dynamischen Hystereseversuche ist in Abbildung 4 dargestellt.

Abbildung 5 zeigt schematisch eine geklebte KHP-Steckverbindung und die blau-grau

dargestellten Komponenten, die den Probekörper mit der Prüfmaschine verbinden. Hierzu werden zylindrische Einsätze mit nach außen überstehendem Gewinde in die Öffnungen der kreisförmigen Hohlprofile an beiden Enden der Kreishohlprofile eingeführt. Das Hohlprofil und der eingeführte Einsatz werden anschließend über einen Sicherungsbolzen (Durchmesser $D = 18,0 \text{ mm}$) verbunden. Der Bolzen wird vollständig durch das kreisförmige Hohlprofil und die zylindrischen Einsätze geschoben. Anschließend wird der Bolzen zwischen dem kreisförmigen Hohlprofil und der Einlage vorgespannt. Dazu werden auf das außenliegende Gewinde der zylindrischen Einsätze auf beiden Seiten nacheinander zwei ringförmige Muttern aufgeschraubt und dadurch eine Vorspannung im eingesetzten Bolzen erzeugt.



Abbildung 4: Versuchsaufbau der dynamischen Hystereseversuche unter harmonischer Fremdanregung

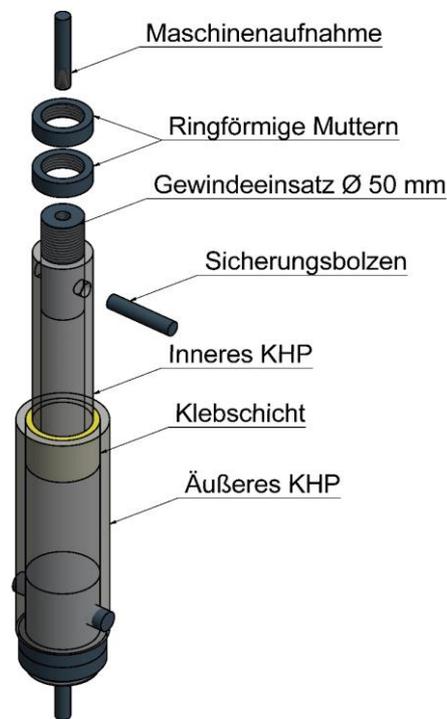


Abbildung 5: Schematische Darstellung der geklebten Kreishohlprofilverbindung und der Komponenten zum Einbau der Probekörper in die Prüfmaschine (blau-grau eingefärbt)

2.3.2 Versuchsparameter und Prüfmatrix

Die dynamischen Hystereseversuche werden auf Grundlage von definierten Prüfniveaus

durchgeführt. Ein Prüfniveau ist dabei durch das Maximum der im Hystereseversuch aufgetragenen Gleitung charakterisiert. Die Analyse des Einflusses verschiedener Geometrie- und Prüfparameter steht im Fokus der Untersuchungen. Die Prüfniveaus werden auf Grundlage der Ergebnisse statischer Zugversuche abgeleitet. Exemplarische Ergebnisse der statischen Zugversuche sind für die Probekörperkonfigurationen A und C mit einer Überlapplänge von 20 mm für die beiden untersuchten Klebstoffe S und K in Abbildung 6 dargestellt. Die Maschinenkraft ist hierbei über der Lokalverformung zwischen den beiden KHP-Fügeteilen aufgetragen.

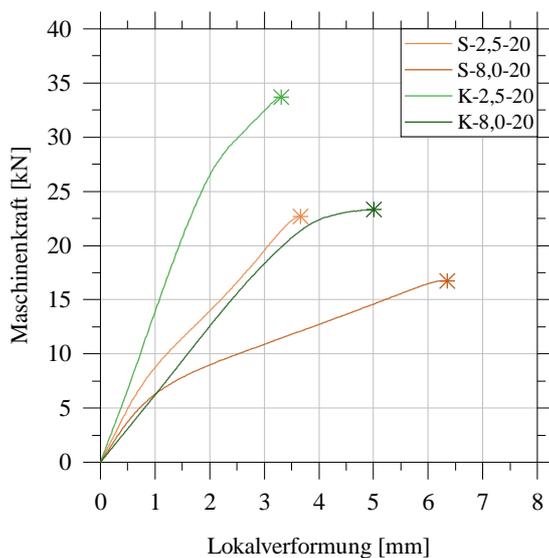


Abbildung 6: Maschinenkraft-Lokalverformung-Diagramm der statischen Zugversuche an KHP-Steckverbindungen mit einer Überlapplänge von 20 mm; Klebstoff S und K

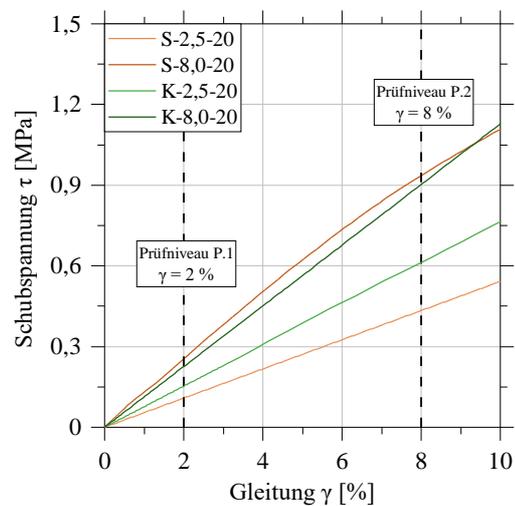


Abbildung 7: Schubspannung-Gleitungs-Diagramm der statischen Zugversuche an KHP-Steckverbindungen mit einer Überlapplänge von 20 mm für einen Bereich der Gleitung von 0 bis 10 %; Klebstoff S und K

Die ermittelten Kraft-Weg-Verläufe in Abbildung 6 können unter Berücksichtigung der Probengeometrie in die in Abbildung 7 exemplarisch dargestellten Schubspannungs-Gleitungs-Verläufe überführt werden. Zur Berechnung der Schubspannung werden die Kräfte auf den Umfang der Klebschicht an der äußeren Wandung des inneren Kreishohlprofils bezogen [8]. In Abbildung 7 ist der für die Ableitung der Prüfniveaus relevante Kurvenbereich bis zu einer

maximalen Gleitung von 10 % dargestellt. Es werden insgesamt zwei gleitungs-basierte Prüfniveaus (P.1 und P.2) definiert.

Das Prüfniveau P.1 ist durch eine maximale Gleitung der Klebschicht von 2 % charakterisiert und basiert auf dem Ansatz einer Prüfung der Probekörper im linear-elastischen Bereich der jeweiligen Klebschichten. In diesem Bereich kleiner Deformationen kann ein proportionaler Zusammenhang zwischen der Gleitung der Klebschicht γ sowie der daraus resultierenden Schubspannung τ unterstellt werden. Das Kraft-Verformungs-Verhalten der Probekörper ist in diesem Bereich vollständig linear-viskoelastisch [9]. In Prüfniveau P.2 wird die maximale Gleitung der Klebschicht auf 8 % erhöht um eventuelle Einflüsse von nichtlinear-viskoelastischem Klebstoffverhalten abzubilden.

Im Rahmen der experimentellen Untersuchungen an KHP-Steckverbindungen, die analog zu den in [2] dokumentierten Hystereseversuchen durchgeführt werden, werden folgende

Prüfparameter untersucht:

- Gleitungs-niveau der Klebschicht (2 % / 8 %)
- Prüffrequenz (1 Hz / 3 Hz / 5 Hz)
- Überlapplänge (20 mm / 60 mm)
- Klebschichtdicke (2,5 mm / 5,8 mm / 8,0 mm)
- Klebstoff (Sikadur F51-60 / Körapur 842)

Die resultierende Prüfmatrix der dynamischen Hystereseversuche ist in Tabelle 1 zusammengefasst. Es werden die Probekörperkonfigurationen A, B und C mit den Überlapplängen 20 und 60 mm untersucht. Die Prüfung der Probekörper erfolgt bei zwei definierten Prüfniveaus mit drei verschiedenen Prüffrequenzen. Je Probekörperkonfiguration werden zwei Versuche durchgeführt.

Tabelle 1: Versuchsmatrix der dynamischen Hystereseversuche für die KHP-Verbindungen (vgl. Abbildung 2)

	Probekörpergeometrie		Prüfandbedingungen		
	Klebschichtdicke [mm]	Überlapplänge [mm]	Prüfniveau	Prüffrequenzen	Anzahl Versuche
Klebstoff	2,5	20	2	3	2

		60			2
	5,8	20	2	3	2
		60			2
	8,0	20	2	3	2
		60			2
Klebstoff Körapur 842	2,5	20	2	3	2
		60			2
	5,8	20	2	3	2
		60			2
	8,0	20	2	3	2
		60			2

2.3.3 Versuchsauswertung

Zur Quantifizierung der Dämpfungseigenschaften der untersuchten KHP-Steckverbindungen wird der bereits in Teil 1 [2] verwendete Verlustfaktor herangezogen. Der Verlustfaktor als Kenngröße zur Quantifizierung der Dämpfungseigenschaften bietet zwei wesentliche Vorteile. Er lässt sich in weitere bekannte Kenngrößen zur Beschreibung von Dämpfungseigenschaften wie die spezifische Dämpfungskapazität ψ oder das logarithmische Dekrement Δ überführen [10]. Die Äquivalenz zwischen Verlustfaktor und dem Tangens des Phasenwinkels δ ist hierbei von besonderem Interesse. Der Tangens des Phasenwinkels δ wird im Rahmen einer Dynamisch-Mechanischen-Analyse (DMA) an Klebstoffsubstanzproben aus dem Quotienten aus Verlust- und Speichermodul ermittelt. Ein weiterer Vorteil besteht in der Tatsache, dass der Verlustfaktor als Kenngröße speziell zur Beschreibung der Dämpfungseigenschaften von Klebstoffen in einer Vielzahl internationaler Publikationen verwendet wird. Als Beispiele hierfür können die [11], [12] sowie [13] dokumentierten genannt werden. Die im Rahmen dieser Arbeit ermittelten Ergebnisse können somit direkt in die bestehende Datengrundlage integriert und mit dieser verglichen werden.

Zur Ermittlung des Verlustfaktors aus den Ergebnissen der dynamischen Hystereseversuche wird ein zeitbasierter Auswertungsansatz verwendet. Die zeitbasierte Auswertung fußt auf der Tatsache, dass ein viskoses bzw. viskoelastisches Material dadurch gekennzeichnet ist, dass es gegenüber einer äußeren, sinusförmigen Belastung eine zeitlich verzögerte Materialantwort zeigt. Aus diesem zeitlichen Versatz von Systemanregung und der zugehörigen Systemantwort kann der Phasenwinkel δ der beiden Sinuskurven bestimmt werden. Die Höhe des zeitlichen

Versatzes wird durch die materialabhängige Zusammensetzung elastischer und viskoser Eigenschaften bestimmt [9]. Der Tangens des Phasenwinkels entspricht dabei dem Verlustfaktor η [14]. In Abbildung 8 sind die Ergebnisse eines exemplarischen Versuchs im Zeitbereich dargestellt.

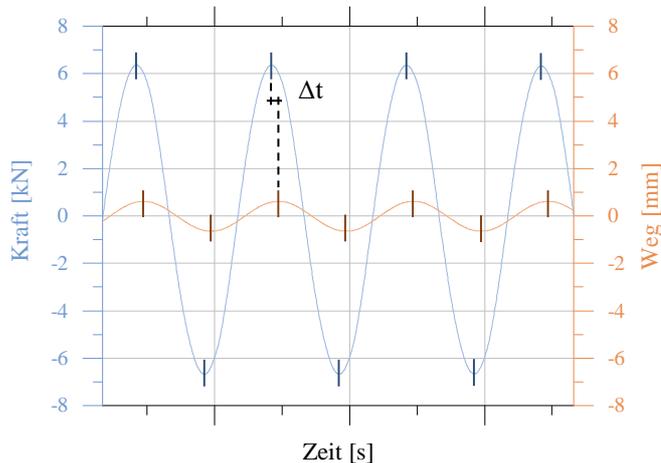


Abbildung 8: Darstellung der Versuchsdaten im Kraft-Zeit- bzw. Weg-Zeit-Diagramm zur zeitbasierten Auswertung des Verlustfaktors über den Phasenwinkel zwischen Systemanregung und Systemantwort [6]

Zur Auswertung des zeitlichen Versatzes Δt werden zunächst die Maxima des Kraft- und Wegsignals der Prüfmaschine pro Lastzyklus bestimmt. Der Phasenwinkel δ errechnet sich aus dem zeitlichen Versatz Δt zwischen dem sinusförmigen Kraft- bzw. Wegsignal mit Hilfe von Gl. (1):

$$\delta [^\circ] = \Delta t \cdot f \cdot 360^\circ \quad (1)$$

Der Faktor f in Gl. (1) bezeichnet die Prüffrequenz. Durch die anschließende Ermittlung des Tangens des Phasenwinkels ergibt sich der Verlustfaktor η . Zur Auswertung der Versuche wird das Datenanalyse – und darstellungsprogramm OriginLab 2020b der OriginLab Corp verwendet. In Origin 2020b können entsprechende Auswerteroutinen zur Ermittlung der Maxima der Versuchskurven, des zeitlichen Versatzes der Maxima sowie des Verlustfaktors programmiert werden. Eine Auswertung der Versuchsergebnisse kann so automatisiert erfolgen.

2.4 Ergebnisse der dynamischen Hystereseversuche an geklebten KHP-Steckverbindungen

Die Ergebnisse experimenteller Untersuchungen an mit den Klebstoffen S und K gefertigten KHP-Steckverbindungen zur Ermittlung der Dämpfungseigenschaften werden im Folgenden anhand ausgewählter Probekörper- und Prüfkfigurationen vorgestellt. Zudem wird der Einfluss wesentlicher Parameter diskutiert. Alle Ergebnisse der durchgeführten Versuche können [4] entnommen werden. Zunächst werden die prinzipiellen Unterschiede im Dämpfungs- und Kraft-Verformungsverhalten der Klebstoffe Sikadur F51-60 (Klebstoff S) und Körapur 842 (Klebstoff K) vorgestellt. In Abbildung 9 sind exemplarische Schubspannungs-Gleitungs-Hysteresen für die beiden untersuchten Klebstoffe dargestellt, anhand derer die Dämpfungseigenschaften der untersuchten Probekörper quantifiziert werden können [2].

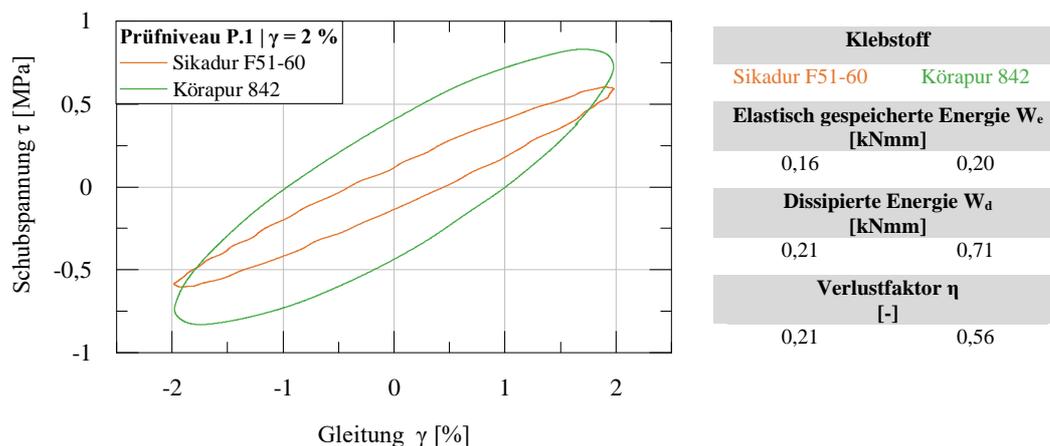


Abbildung 9: Vergleich der Schubspannungs-Gleitungs-Hysteresen der untersuchten Klebstoffe im Prüfniveau P.1 mit einer maximalen Gleitung von $\gamma = 2\%$; Exemplarische Darstellung für Probekörperkonfiguration B mit einer Überlapplänge von $L_{\ddot{u}} = 20\text{ mm}$ sowie die Prüffrequenz 1 Hz.

Im Unterschied zur Darstellung der Ergebnisse im Zeitbereich können anhand der hysteretischen Darstellung der Versuchsergebnisse wesentliche Erkenntnisse über das Kraft-Verformungsverhalten der Probekörper sowie Aussagen über den Einfluss verschiedener Parameter abgeleitet werden. Die vergleichende Darstellung der Hysteresen in Abbildung 9 zeigt bei gleicher Probekörperkonfiguration einen deutlichen Unterschied zwischen den beiden Klebstoffen S und K sowohl hinsichtlich der elastisch gespeicherten Energie W_e als auch der dissipierten Energie W_d pro Lastzyklus. Ein Vergleich der aus den Hysteresen abgeleiteten

Energien in Abbildung 9 zeigt, dass insbesondere die dissipierte Energie pro Lastzyklus W_d , die durch den Flächeninhalt der dargestellten Hysterese charakterisiert ist, für den Klebstoff K im Vergleich zum Klebstoff S deutlich ansteigt. Die elastisch gespeicherte Energie W_e liegt für den Klebstoff K nur geringfügig über dem Wert, der für den Klebstoff S ermittelt werden kann. Ein Vergleich der für die beiden Klebstoffe ermittelten Verlustfaktoren zeigt, dass der Verlustfaktor für den mit dem Klebstoff K gefertigten KHP-Probekörper mehr als doppelt so groß ist, was primär auf die deutlich höhere dissipierte Energie pro Lastzyklus zurückgeführt werden kann.

Die anhand der zeitbasierten Auswertung der durchgeführten Versuche ermittelten Verlustfaktoren sind in Abbildung 10 exemplarisch für Prüfniveau P.1 ($\gamma = 2\%$) und die drei untersuchten Probekörperkonfigurationen sowie die Überlapplänge 20 mm für die Klebstoffe S und K dargestellt.

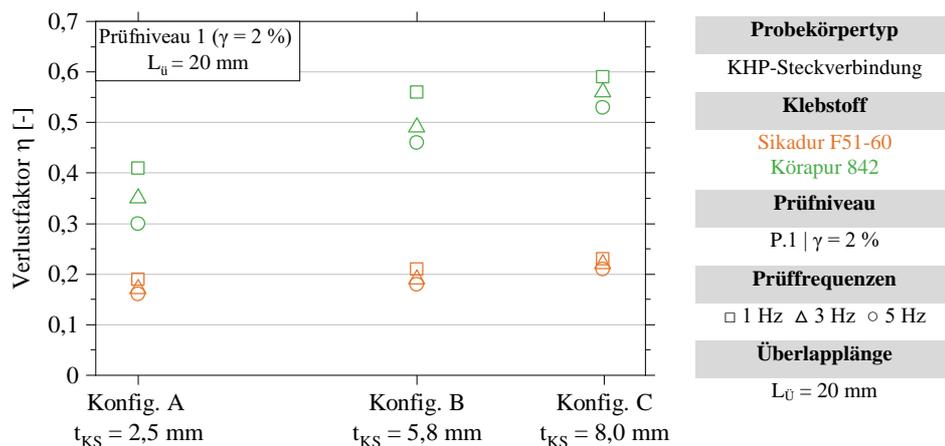


Abbildung 10: Ergebnisse der dynamischen Hystereseversuche an KHP-Steckverbindungen der Konfigurationen A, B und C

Im Bereich kleiner Deformationen, der für eine maximale Gleitung von $\gamma = 2\%$ unterstellt werden kann, liegen die Verlustfaktoren für den Klebstoff S in Abhängigkeit der Klebschichtdicke zwischen 0,16 und 0,23. Die Verlustfaktoren der mit dem Klebstoff K gefertigten KHP-Steckverbindungen liegen bei gleichen Randbedingungen zwischen 0,30 und 0,59. Die spezifischen Einflüsse ausgewählter Versuchs- und Geometrieparameter auf die Dämpfungseigenschaften der KHP-Steckverbindungen werden nachfolgend exemplarisch für die baupraktisch relevante Prüffrequenz 1 Hz diskutiert [14].

2.4.1 Einfluss des Gleitungs niveaus

Der Einfluss einer steigenden Verzerrung bzw. Gleitung der Klebschicht auf die Dämpfungseigenschaften der KHP-Steckverbindung ist in Abbildung 11 exemplarisch für Probekörperkonfiguration A mit einer Überlapplänge von 20 mm dargestellt. Eine Zunahme der maximalen Gleitung von 2 % auf 8 % führt für beide Klebstoffe zu einer deutlichen Zunahme des Verlustfaktors um 37 % (Sikadur F51-60) bzw. 29 % (Körapur 842). Dies kann analog für alle übrigen Probekörperkonfigurationen beobachtet werden. Gespeicherte und dissipierte Energie steigen mit zunehmender Gleitung nicht proportional an, wodurch der Verlustfaktor erhöht wird. Aus praktischer Sicht ist diese gleitungsabhängige Zunahme der Dämpfungseigenschaften als positiv zu bewerten, da reale Schwingungserscheinungen mit größeren Amplituden entsprechend stärker gedämpft werden.

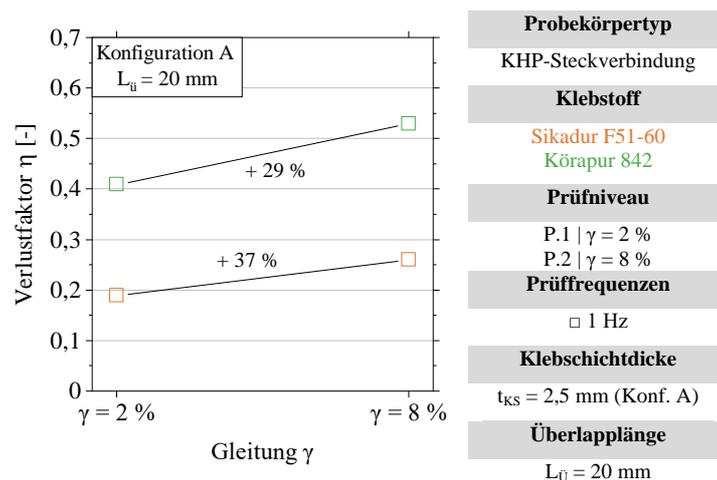


Abbildung 11: Einfluss der Gleitung in der Klebschicht auf den Verlustfaktor der KHP-Steckverbindung; Exemplarische Darstellung für Probekörperkonfiguration A mit einer Überlapplänge $L_{\bar{u}} = 20$ mm für die Prüffrequenz 1 Hz

Der Einfluss des Gleitungs niveaus auf die Dämpfungseigenschaften der untersuchten Probekörper soll anhand der in Abbildung 12 dargestellten Schubspannung-Gleitungs-Hysteresen exemplarisch für Klebstoff S und Probekörperkonfiguration B mit einer Überlapplänge von 20 mm untersucht werden. Die dargestellten Hysteresen zeigen zunächst, dass mit zunehmender Gleitung auch die elastische und dissipierte Energie pro Lastzyklus ansteigt, was durch die Lage und Völligkeit der Hysterese ersichtlich wird. Zudem kann festgestellt werden, dass die Steifigkeit des Probekörpers, die durch die Neigung der Hysterese

charakterisiert ist, mit zunehmender Gleitung abnimmt. Diese Steifigkeitsabnahme wirkt sich dabei primär auf die im Probekörper gespeicherte Energie aus. Die gespeicherte und dissipierte Energie sind für die dargestellten Hysterese in Abbildung 12 rechts dokumentiert. Zudem ist der Faktor des Anstiegs der gespeicherten sowie der dissipierten Energie infolge der Erhöhung der Gleitung in Klammern angegeben.

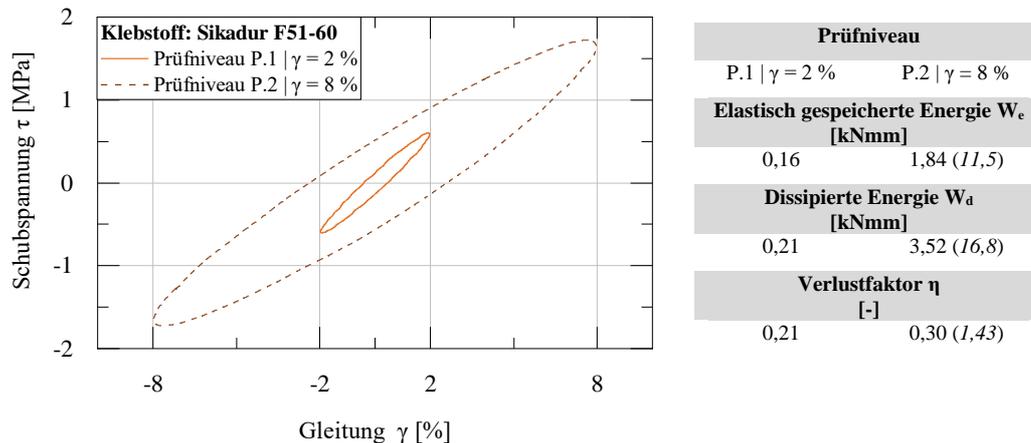


Abbildung 12: Vergleich der Schubspannung-Gleitung-Hysteresen in den Prüfniveaus P.1 ($\gamma = 2\%$) und P.2 ($\gamma = 8\%$) für den Klebstoff Sikadur F51-60; Exemplarische Darstellung für Probekörperkonfiguration B mit einer Überlapplänge $L_{\text{Ü}} = 20$ mm für die Prüffrequenz 1 Hz

Die Auswertung der Energien zeigt eine Zunahme der elastisch gespeicherten Energie für einen Anstieg der von 2 % auf 8 % um Faktor 11,5. Demgegenüber steigt die dissipierte Energie um den Faktor 16,8 an. Dieser nicht-proportionalen Anstieg der beiden Energien mit Zunahme der Gleitung resultiert in einem Anstieg des Verlustfaktors um 43 %. Der gegenüber der dissipierten Energie unterproportionale Anstieg der gespeicherten Energie kann für Klebstoff S durch dessen zunehmend nichtlineares Verhalten mit steigender Gleitung begründet werden (vgl. Abbildung 7). Die pro Lastzyklus dissipierte Energie hängt demgegenüber primär vom Maß der inneren Reibung ab, die mit zunehmender Verzerrung der Klebschicht ansteigt. Die innere Reibung ist mit dem Aufbau bzw. dem Grad der inneren Vernetzung des Klebstoffs assoziiert und ist somit abhängig vom betrachteten Klebstoff [10].

2.4.2 Untersuchungen zum Einfluss der Klebfugegeometrie

Die Klebfugegeometrie der untersuchten KHP-Steckverbindungen wird durch die Klebschichtdicke t_{KS} sowie die Überlapplänge $L_{\bar{u}}$ definiert. Untersuchungen in [10], [13], [1] zeigen, dass sowohl die Dämpfungseigenschaften als auch die dynamischen Eigenschaften wie bspw. die Eigenfrequenz geklebter Probekörper und Strukturen durch die Anpassung der Klebfugegeometrie optimiert werden können. Im Folgenden steht die Untersuchung des Einflusses der Klebfugegeometrie auf die Dämpfungseigenschaften geklebter KHP-Steckverbindung im Fokus. Der Einfluss der Klebschichtdicke sowie der Überlapplänge wird dabei zunächst getrennt voneinander analysiert.

2.4.2.1 Einfluss der Klebschichtdicke

Die Grundlage der Diskussion des Einflusses der Klebschichtdicke bilden normierte Darstellungen des Verlustfaktors für die Konfigurationen A, B und C mit den Klebschichtdicken 2,5 mm, 5,8 mm und 8,0 mm. Hierfür werden die Ergebnisse je Prüfniveau auf den Verlustfaktor der Konfiguration A ($t_{KS} = 2,5$ mm) im jeweiligen Prüfniveau normiert. Die Auswertung findet zunächst als Vergleich der Klebstoffe S und K im Prüfniveau P.1 ($\gamma = 2$ %) für die Überlapplänge 20 mm statt. Die normierten Ergebnisse der drei Konfigurationen mit der Überlapplänge 20 mm sind in Abbildung 13 dargestellt.

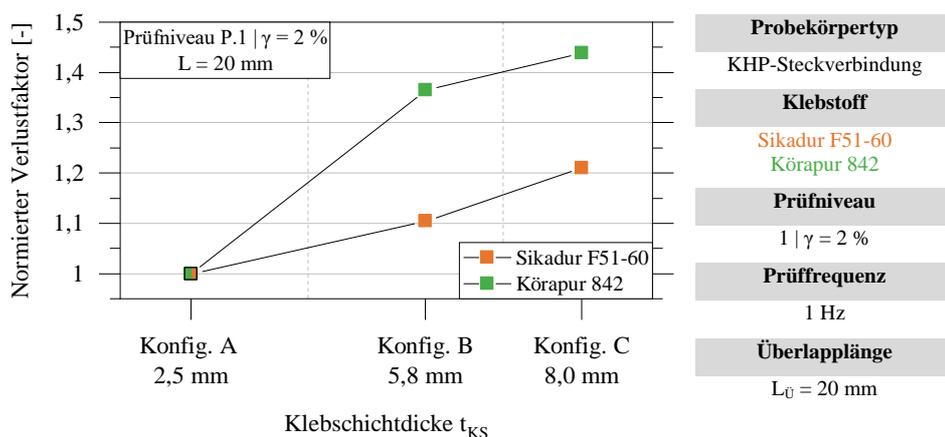


Abbildung 13: Vergleich des Einflusses der Klebschichtdicke auf den Verlustfaktor der KHP-Steckverbindung für die Klebstoffe Sikadur F51-60 und KÖrapur 842; Exemplarische Darstellung für die Überlapplänge $L_{\bar{u}} = 20$ mm und die Prüffrequenz 1 Hz im Prüfniveau P.1; auf den Verlustfaktor von Konfiguration A mit der Klebschichtdicke 2,5 mm normierte Darstellung

Die Auswertung der normierten Verlustfaktoren zeigt für beide Klebstoffe eine Zunahme der Dämpfungseigenschaften mit steigender Klebschichtdicke. Der Zusammenhang zwischen Klebschichtdicke und Verlustfaktor ist für den Klebstoff S annähernd linear. Der Verlustfaktor nimmt für einen Anstieg der Klebschichtdicke von 2,5 mm auf 5,8 mm bzw. 8,0 mm um 10,5 % bzw. 21,0 % zu. Die absolute Zunahme des Verlustfaktors beträgt 0,02 bzw. 0,04 und ist somit als gering einzuschätzen.

Für Klebstoff K zeigt sich ein exponentieller Zusammenhang zwischen Verlustfaktor und Klebschichtdicke. Für einen Anstieg der Klebschichtdicke auf 5,8 mm bzw. 8,0 mm kann ein Anstieg des Verlustfaktors um 36,5 % bzw. 43,9 % beobachtet werden. Der Verlustfaktor nimmt dabei absolut um 0,15 bzw. 0,18 zu. Die experimentellen Ergebnisse für Klebstoff K zeigen somit eine deutliche, absolute Zunahme des Verlustfaktors mit steigender Klebschichtdicke, die in einer für die praktische Auslegung dynamisch beanspruchter Strukturen relevanten Größenordnung liegt.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass der absolute Einfluss der Klebschichtdicke auf die Dämpfungseigenschaften der KHP-Steckverbindungen für Klebstoff S im Bereich kleiner Gleitungen vernachlässigbar ist. Demgegenüber kann für Klebstoff K bereits für eine Gleitung von 2 % eine deutliche, für die Optimierung geklebter Strukturen relevante Steigerung des Verlustfaktors mit zunehmender Klebschichtdicke beobachtet werden. Allerdings zeigen die in [1] dokumentierten Untersuchungen, dass sich das dynamische Tragverhalten geklebter Strukturen auch bei konstantem Verlustfaktor des Klebstoffs durch die Erhöhung der Klebschichtdicke optimieren lässt. Dies wird durch die Erhöhung der lokalen Deformationen der Klebschichten begründet. Neben der Erhöhung der Klebschichtdicke kann auch die Verwendung weniger steifer Klebstoffe zur Optimierung der Strukturdynamik beitragen. Zur Erhöhung der Dämpfungseigenschaften geklebter Anschlüsse sind größere Klebschichtdicken vor dem Hintergrund der Erkenntnisse der experimentellen sowie der Ergebnisse numerischer Untersuchungen, die in [1] dokumentiert sind, zu priorisieren. Die Auslegung der Klebschichtdicke muss jedoch zusätzlich unter Berücksichtigung statischer Erfordernisse erfolgen.

2.4.2.2 Einfluss der Überlapplänge

Neben der Klebschichtdicke wird die Klebfugegeometrie durch die Länge der Überlappung der beiden Kreishohlprofile definiert. Der Einfluss der Überlapplänge 20 und 60 mm auf die Dämpfungseigenschaften der KHP-Steckverbindungen wird exemplarisch anhand der in Abbildung 14 dargestellten Schubspannungs-Gleitungs-Hysteresen sowie die daraus ermittelten Energien im Prüfniveau P.2 ($\gamma = 8\%$) für den Klebstoff S analysiert. Die gespeicherte und dissipierte Energie sind für die dargestellten Hysteresen rechts in Abbildung 14 angegeben. Der Faktor des Anstiegs der jeweiligen Energie infolge der Erhöhung der Überlapplänge von 20 mm auf 60 mm ist in Klammern angegeben. Eine Verdreifachung der Überlapplänge von 20 mm auf 60 mm führt erwartungsgemäß zu einem Anstieg der elastisch gespeicherten Energie um den Faktor drei. Die maximale Schubspannung für eine Gleitung von 8 % bleibt somit konstant, was für den betrachteten Bereich der Gleitung durch den annähernd linearen Zusammenhang zwischen Überlapplänge und auftretender Schubspannung erklärt werden kann [15], [16]. Demgegenüber steigt die dissipierte Energie lediglich unterproportional um den Faktor 1,67 an, woraus eine Abnahme des Verlustfaktors um den Faktor 0,60 bzw. 60 % resultiert. Die Abnahme der pro Lastzyklus dissipierten Energie kann auch anhand einer Betrachtung des Flächeninhalts der in Abbildung 14 dargestellten Hysteresen festgestellt werden.

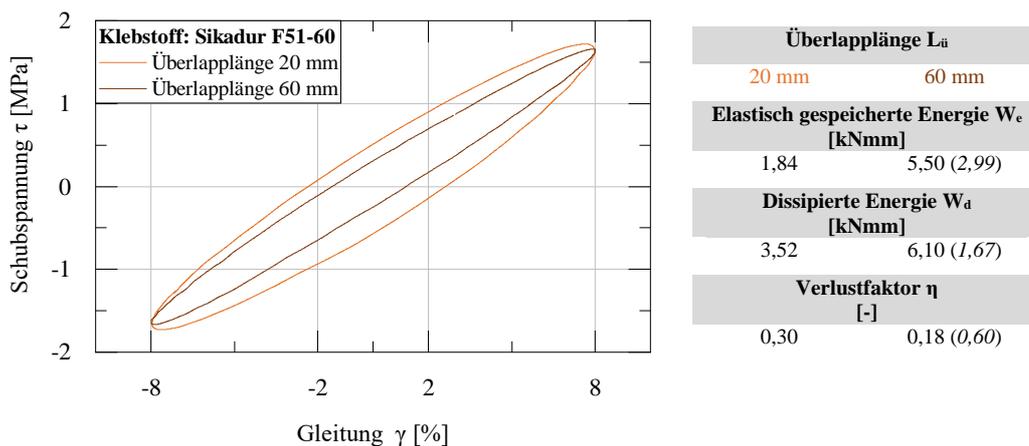


Abbildung 14: Analyse des Einflusses der Überlapplänge auf die Schubspannungs-Gleitungs-Hysteresen im Prüfniveau P.2 ($\gamma = 8\%$) für den Klebstoff Sikadur F51-60; Exemplarische Darstellung für Probekörperkonfiguration B mit den Überlapplängen $L_{\bar{a}} = 20\text{ mm}$ und 60 mm für die Prüffrequenz 1 Hz

Der Einfluss der untersuchten Überlapplänge wird in Abbildung 15 anhand einer exemplarischen Darstellung für den Klebstoff Sikadur F51-60 für die Prüffrequenz 1 Hz in den Prüfniveaus P.1 und P.2 auch für die übrigen Probekörperkonfigurationen untersucht. Die Auswertung erfolgt getrennt für jede Klebschichtdicke. Die Verlustfaktoren der Probekörper mit einer Überlapplänge von 60 mm werden dabei auf den Verlustfaktor der Probekörper mit einer Überlapplänge von 20 mm normiert.

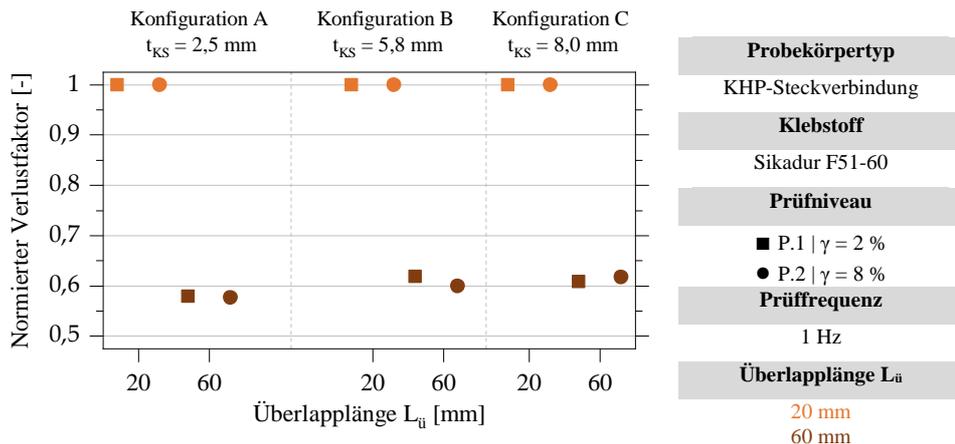


Abbildung 15: Einfluss der Überlapplänge auf den Verlustfaktor der KHP-Steckverbindung; Exemplarische Darstellung für den Klebstoff Sikadur F51-60 für die Prüffrequenz 1 Hz in den Prüfniveaus P.1 und P.2; auf den Verlustfaktor der jeweiligen Konfiguration mit der Überlapplänge 20 mm normierte Darstellung

Die Ergebnisse in Abbildung 15 zeigen zunächst einen annähernd konstanten Einfluss der Überlapplänge für alle untersuchten Klebschichtdicken. Der Einfluss der Überlapplänge ist im betrachteten Bereich der Gleitung der Klebschicht unabhängig vom Niveau der Gleitung. Die Verlustfaktoren der Probekörper mit einer Überlapplänge von 60 mm liegen ca. 60 % unter denen, die für die kürzere Überlapplänge von 20 mm ermittelt werden können.

Auf Grundlage der vorgestellten Ergebnissen experimenteller Untersuchungen an KHP-Steckverbindungen sowie der Erkenntnisse aus [1] können daher folgende Empfehlungen für die Auslegung geklebter Kreishohlprofilanschlüsse für dynamisch beanspruchte Strukturen abgeleitet werden. Neben einer Erhöhung der Klebschichtdicke, deren Einfluss bereits zuvor diskutiert wurde, kann das Dämpfungsverhalten geklebter KHP-Anschlüsse durch die Reduzierung der Überlapplänge optimiert werden. Eine reduzierte Überlapplänge führt, analog zur Erhöhung der Klebschichtdicke, zur einer geringeren Knotensteifigkeit, die mit einer

Zunahme lokaler Deformationen und einem Anstieg der Dämpfungseigenschaften assoziiert ist.

Dies muss aber immer im Zusammenhang mit den Anforderungen an die mechanische

Beanspruchbarkeit der jeweiligen Klebfugengeometrie bewertet werden.

3 Entwicklung und Validierung von mathematischen Klebstoffmodellen

Bei der rechnerischen Berücksichtigung der Dämpfung geklebter Stahlverbindungen werden in der Regel proportionale Dämpfungsmodelle wie das von RAYLEIGH verwendet. Diese Ansätze sind zwar besonders einfach und schnell umzusetzen, zeigen aber lediglich eine sehr grobe Annäherung an das tatsächliche lokale Dämpfungsverhalten der jeweiligen Materialien und Klebverbindungen im Materialmix des Leichtbaus [4]. Eine Alternative dazu ist die allgemeine viskose Dämpfung, die einerseits sehr genaue Prognosen ermöglicht und sich andererseits komfortabel in automatisierbare Berechnungsabläufe auf Basis der Finite-Elemente-Methode (FEM) integrieren lässt. Sie findet zudem auch über größere Frequenzbereiche Gültigkeit. Im Folgenden werden die experimentellen Untersuchungen aus [2] sowie die zuvor dargestellten Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen an bauteilähnlicher Probekörper für die Verifikation und Validierung des Dämpfungsmodells herangezogen.

Ziel ist es dabei, das viskoelastische Materialverhalten eines Klebstoffs über ein geeignetes Materialmodell abzubilden. Zur Charakterisierung und Parametrisierung der Materialmodelle werden zunächst die Ergebnisse der Grundversuche aus [2] herangezogen. Die Parameter der ausgewählten Modellgleichungen werden an das reale viskoelastische Verhalten des Klebstoffs angepasst. Bei der inversen Parameteridentifikation werden die Grundversuche im Zuge eines nichtlinearen Optimierungsverfahrens iterativ mit variablen Parametersätzen simuliert und die Kraft-Weg-Verläufe aus Simulation und Experiment miteinander verglichen. Die Startwerte für die Optimierung liefert die Auswertung der dynamisch-mechanischen-Analyse (DMA). Weiterhin erfolgen nach der Identifikation die Verifikationsrechnung und die Validierung anhand der experimentellen Untersuchung bauteilähnlicher Probekörper.

In [2] werden die Dämpfungseigenschaften technologischer Probekörper (dicke Zugscherprobe) anhand der freien Abklingung untersucht. Die freie abklingende Schwingung ergibt sich durch eine Auslenkung der Masse, die schlagartig gelöst und durch das viskoelastische Verhalten harmonisch gegen die Nulllage schwingt. Die Dämpfungseigenschaften des Klebstoffs können

dabei anhand der Abnahme der Schwingungsamplituden hin zum statischen Gleichgewicht quantifiziert werden. In im Rahmen des Forschungsprojekts durchgeführten Untersuchungen [4] konnte bereits gezeigt werden, dass die Ansätze mit rheologischen Netzwerken für die Modellierung der freien Ausschwingversuche ausreichend sind und sich für die Dämpfungsberechnung sehr gut eignen (s. Abbildung 16).

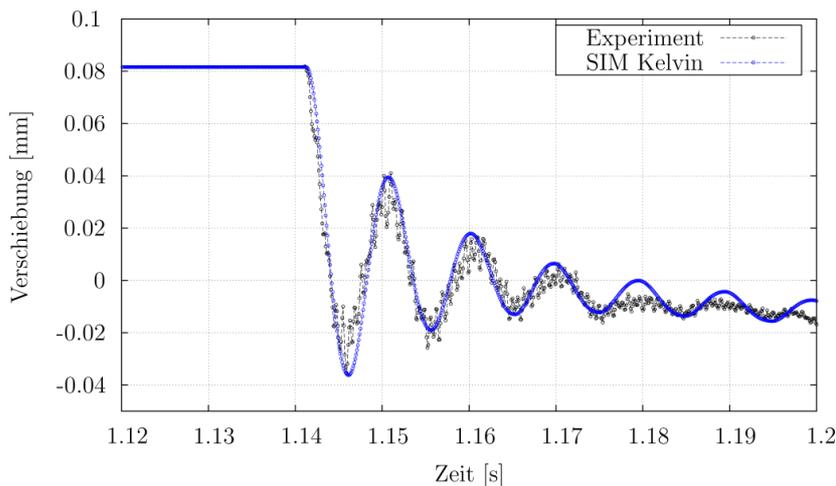


Abbildung 16: Vergleich der frei abklingenden Schwingung einer dicken Zugscherprobe mit 10,9 kg Zusatzmasse aus [2] mit der Simulationsrechnung mit einem 6P-Kelvin-Modell, Klebstoff Sikadur F51-60 [4]

Für die Modellierung der Klebschicht können lineare Ansätze der Viskoelastizitätstheorie verwendet werden. Hier werden für die Simulationsrechnung in Abbildung 16 verallgemeinerte rheologische Netzwerke vom Kelvin-Typ, bestehend aus NEWTONschen Dämpfern und HOOKEschen Federn, verwendet. Exemplarisch zeigt die Modellierung mit dem 6-Parameter-Modell vom KELVIN-Typ eine sehr gute Annäherung an den Kriech- und Ausschwingprozess. Im weiteren Projektverlauf wird das allgemein viskose Dämpfungsmodell vom MAXWELL-Typ verwendet, da sich die Parameteridentifikation mit der DMA und einfachen Grundversuchen, wie einer erzwungenen Schwingung mit harmonischer Fremdanregung, als wirtschaftlicher erweist.

3.1 Entwicklung der Materialmodelle der Klebstoffe

3.1.1 Identifikation der Parameter rheologischer Modelle der Viskoelastizität

Im Folgenden wird das Dämpfungsmodell sowie das methodische Vorgehen zur Parametrisierung und Verifikation des Dämpfungsmodells aus Grundversuchen vorgestellt. Die in Projekt P 1272 [4] durchgeführten Untersuchungen zeigen, dass insbesondere das rheologische Materialmodell vom MAXWELL-Typ für die weiteren Arbeiten geeignet ist.. Die Vorteile bestehen in einer guten Anwendbarkeit für KMU, einer schnellen und einfachen Parametrisierung sowie einer vorhandenen Verfügbarkeit in kommerziellen FE-Programmen wie z.B. LS-DYNA. Das verallgemeinerte MAXWELL-Modell [17], welches schematisch in Abbildung 17 dargestellt ist, besteht aus mehreren einzelnen MAXWELL-Elementen sowie einer weiteren Feder, die zu einer Parallelschaltung zusammengefügt sind.

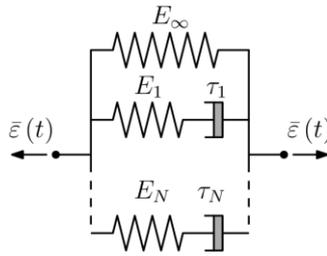


Abbildung 17: Verallgemeinertes MAXWELL-Modell [17]

In der Feder E_∞ tritt die Gleichgewichtsspannung σ_{eq} auf und in den Maxwell Elementen die Überspannungen entsprechend Gl. 1.

$$\sigma_{eq} = \sum_{i=1}^n \sigma_{ov,i} \quad (1)$$

Dabei können die Überspannungen in den einzelnen Elementen durch das lineare Elastizitätsgesetz beschrieben werden. Nach Erweiterung, Integration und Einsetzen in das Kräftegleichgewicht ergibt sich für die Spannung das Integral

$$\sigma(t) = \int_0^t \left(E_\infty + \sum_{i=1}^n E_i * e^{-\frac{(t-s)}{\tau_i}} \right) \quad (2)$$

bzw. die Relaxationsfunktion

$$G(t-s) = E_{\infty} + \sum_{i=1}^n E_i * e^{-\frac{(t-s)}{\tau_i}} \quad (3)$$

mit der Relaxationszeit τ_i , welche das Materialverhalten des Klebstoffs beschreiben und während der FE-Rechnung gelöst werden [17]. Die Schwierigkeit besteht in der Identifikation der Elastizitäten E und der Relaxationszeiten τ . Hierfür werden die Grundversuche aus [2] verwendet. Die Gleichgewichtsfeder kann an einem einfachen Zugversuch ermittelt werden und die weiteren Materialparameter lassen sich mit DMA Versuchen bestimmen. Da die DMA-Daten an Klebstoffsubstanzproben ermittelt werden, geschieht eine Anpassung der Kettenkennwerte anhand der Versuchsergebnisse der zyklisch belasteten Verbindungsproben (dicke Zugscherprobe in Abbildung 19) durch inverse Optimierung mit der Software LS-OPT und LS-DYNA. Die Gleichgewichtsfeder wird bei der Optimierungsrechnung ebenfalls mit angepasst. Folglich steht für den Sikadur F51-60 sowie für den Körapur 842 jeweils ein Parametersatz für weitere Berechnungen bereit. Weitere Informationen zur Parameteridentifikation sowie die Parametersätze können [4] entnommen werden.

3.1.2 Verifikation der identifizierte Materialparameter

Durch eine harmonische Fremderregung des Systems wird eine erzwungene Schwingung erzeugt. Die harmonische Fremderregung kann zum Beispiel durch eine vorgegebene Verschiebung oder eine vorgegebene Spannung der Form

$$\sigma(t) = \sigma_a \sin(\Omega t) \quad (4)$$

erfolgen. Daraus resultiert aufgrund der zeitabhängigen viskosen Eigenschaft eine phasenverschobene Schwingungsantwort: hier eine phasenverschobene Dehnung der Form:

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma_a}{E(1 + \Omega^2 \tau^2)} \sin(\Omega t - \delta) \quad (5)$$

mit dem Phasenwinkel

$$\delta = \arctan(\Omega \tau) \quad (6)$$

Durch die im Material vorliegende Dämpfungseigenschaft, z.B. für einen viskoelastischen Klebstoff, verändert sich die Phasenverschiebung maßgeblich in Abhängigkeit der Kriechzeit.

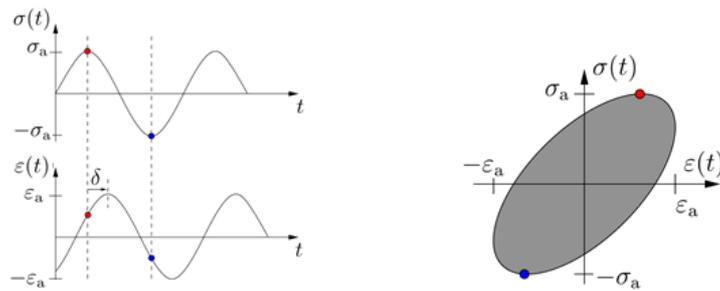


Abbildung 18: Verlauf der Spannung und Dehnung über der Zeit mit Phasenverschiebung (links); Hystereseverlauf: infolge der Phasenverschiebung zwischen Erreger- und Antwortfunktion (rechts)

Trägt man die Systemanregung und Systemantwort - hier die Spannung und Dehnung - über der Zeit auf, so wird die Phasenverschiebung deutlich (Abbildung 18 links). Die Phasenverschiebung bzw. die Größe der sich daraus ergebenden Hysterese ((Abbildung 18 rechts) ist ein Maß für das Dämpfungsverhalten des betrachteten Materials.

Die erzwungene Schwingung der dicken Zugscherprobe unter harmonischer Fremdanregung wird experimentell und mit FE-Rechnung untersucht und dient der Parameteridentifikation, welche nun verifiziert wird. Verwendet wird dabei die dicke Zugscherprobe, die in Abbildung 19 als FE-Modell dargestellt ist. Die Zugscherprobe besteht aus zwei Stahlfügeteilen und einer Klebschicht.

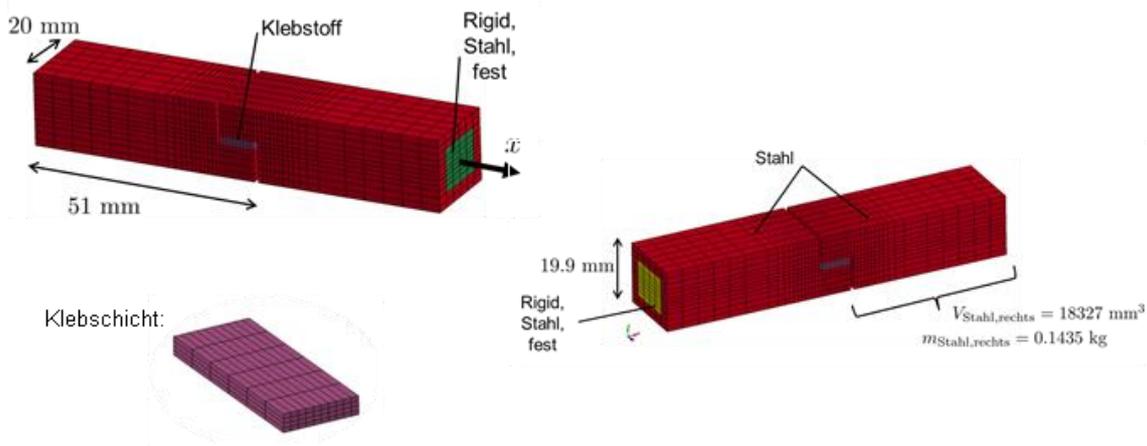


Abbildung 19: FE-Modell der Klebschicht und der dicken Zugscherprobe nach DIN EN 14869-2 [18] in Anlehnung an [19] in zwei Ansichten

Die Stahlfügeteile und die Klebschicht bestehen aus SOLID-Elementen [20] wobei die Fügeiteile mit den typischen Elastizitäts- und Dichteigenschaften von Stahl charakterisiert

werden. Der Klebschicht wird ein linear-viskoelastisches Werkstoffverhalten mit den optimierten Parametern der verallgemeinerten Maxwell-Modells für die verwendeten Klebstoffe zugewiesen. Die beiden Starrkörper, in Abbildung 19 grün bzw. gelb dargestellt, sorgen für die Lagerung der Probe bzw. für die Krafteinleitung am jeweiligen Probenende.

Die Verifikationsrechnungen zur Überprüfung der Parameteridentifikation bzw. -optimierung sind in den folgenden Abbildungen für den Sikadur F51-60 und für den Körapur 842 exemplarisch für die Frequenz von 10 Hz dargestellt. Mit einer Verschiebungsrandbedingung von 0,0125 mm , die auch im Rahmen der experimentellen Untersuchungen in [2] verwendet wird, ergibt sich die in Gl. 7 angegebene, harmonische Verschiebungsfunktion für die Simulation in Gl. 7:

$$x(t) = 0.0125 \text{ mm} \times \sin(2 \times \pi \times 10 \text{ Hz} \times t) \quad (7)$$

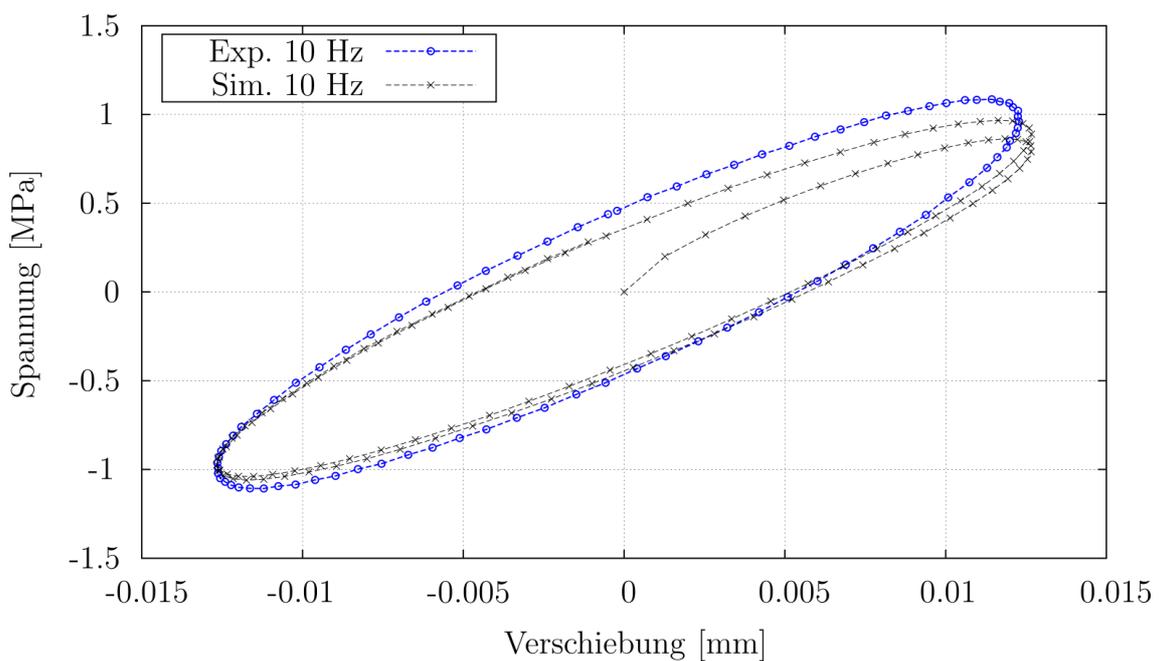


Abbildung 20: Versuchsergebnisse der dicken Zugscherprobe unter vorgegebener Verschiebungsrandbedingung aus [2] und Verifikationsrechnung mit LS-DYNA für den Klebstoff Sikadur F51-60 für eine Frequenz von 10 Hz

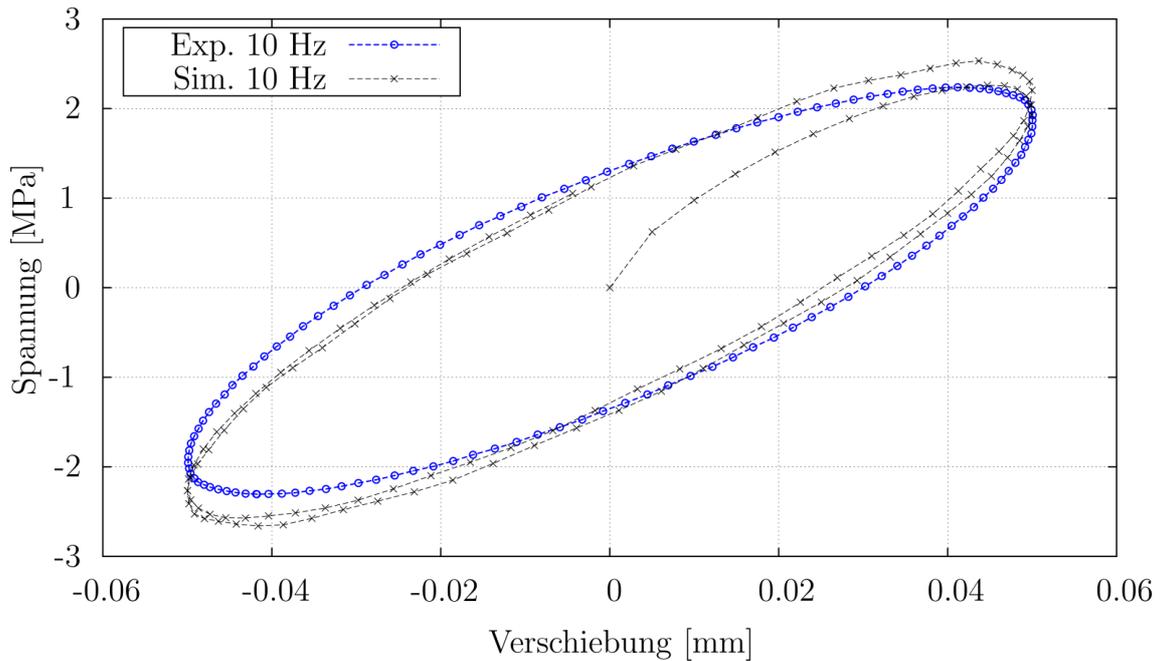


Abbildung 21: Versuchsergebnisse der dicken Zugscherprobe unter vorgegebener Verschiebungsrandbedingung aus [1] und Verifikationsrechnung mit LS-DYNA für den Klebstoff Körapur 842 für eine Frequenz von 10 Hz

Die Berechnungen zur Verifikation der entwickelten Materialmodelle in Abbildung 20 (Klebstoff Sikadur F51-60) sowie Abbildung 21 (Klebstoff Körapur 842) zeigen eine gute Übereinstimmung von Experiment (blaue Datenpunkte) und Simulation (schwarze Datenpunkte) in der Hystereseform sowie in den Maximalwerten des Spannungsverlaufs. Die Parameteridentifikation ist mit der erfolgreichen Verifikationsrechnung abgeschlossen und wird im weiteren Vorgehen anhand der bauteilähnlichen Probekörper validiert.

3.2 Validierung des Dämpfungsmodells und der Parameteridentifikation

3.2.1 Simulation der bauteilähnlichen KHP-Steckverbindung

Das Dämpfungsmodell mit den identifizierten Parametern zeigt für beide Klebstoffe eine erfolgreiche Verifikationsrechnung. Die Übertragbarkeit des Dämpfungsmodells auf andere Probengeometrien, Frequenzen, Überlappängen sowie Klebschichtdicken soll im Folgenden in den Validierungsrechnungen gezeigt werden.

Zunächst wird ein FE-Modell der zuvor experimentell untersuchten KHP-Steckverbindung mit dem LS-PrePost als aufgebaut. Das FE-Modell der KHP-Steckverbindung ist in Abbildung 22 dargestellt.

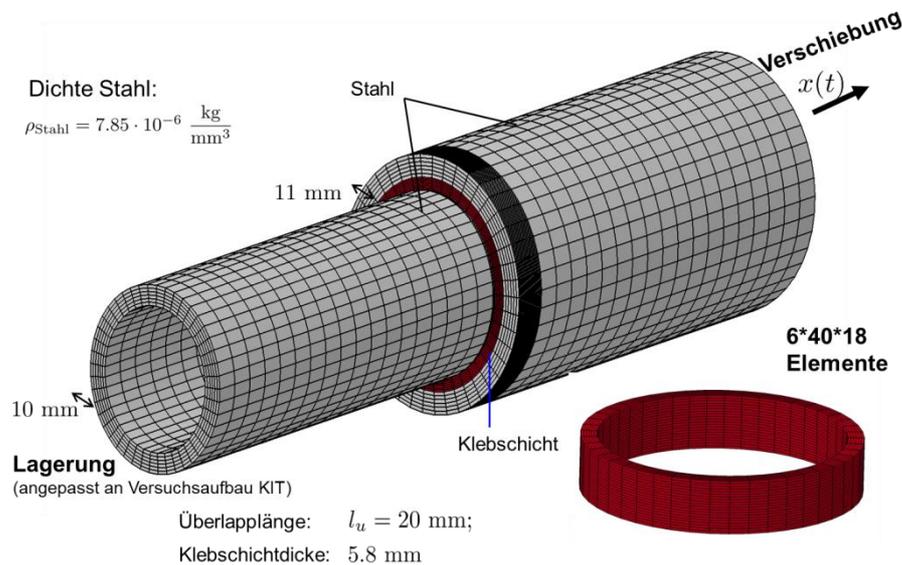


Abbildung 22: FE-Modell der KHP Steckverbindung mit Detailausschnitt der Klebschicht; exemplarische Darstellung für die Probekörperkonfiguration B mit einer Klebschichtdicke von 5,8 mm und einer Überlapplänge von 20 mm

Die Stahlfügeteile und die Klebschicht bestehen aus SOLID-Elementen. Analog zur numerischen Untersuchung der dicken Zugscherprobe werden für die die Hohlprofile charakteristische Elastizitäts- und Dichteigenschaften für den Stahlwerkstoff und die Klebschicht definiert. Die Werkstoffeigenschaften werden hierbei auf Grundlage der identifizierten MAXWELL-Parameter aus den Verifikationsrechnungen in Abbildung 20 und Abbildung 21 mit linear-viskoelastischem Materialverhalten formuliert. Die Lagerung und die Kräfteinleitung der KHP-Steckverbindung werden in der Simulation über Knotenrandbedingungen analog zum in Abbildung 4 dargestellten Versuchsaufbau definiert.

Die Klebschichtdicke und die Überlapplänge in Abbildung 22 sind exemplarisch für Probekörperkonfiguration B angegeben und werden im LS-PrePost für den Rechenlauf entsprechend der untersuchten Probekörperkonfiguration der Prüfmatrix in Tabelle 1 angepasst. In dem folgenden Diagramm sind die Versuchs- und Simulationsergebnisse für den Klebstoff Sikadur F51-60 bei der Frequenz 1 Hz, einer Überlapplänge von 20 mm und einer

Klebschichtdicke von 5,8 mm gegenübergestellt. Die Verschiebungsrandbedingung für das freie Ende in der FE-Berechnung ist in Gl. 8 angegeben.

$$x(t) = 0,2 \text{ mm} \times \sin(2 \times \pi \times 1 \text{ Hz} \times t) \quad (8)$$

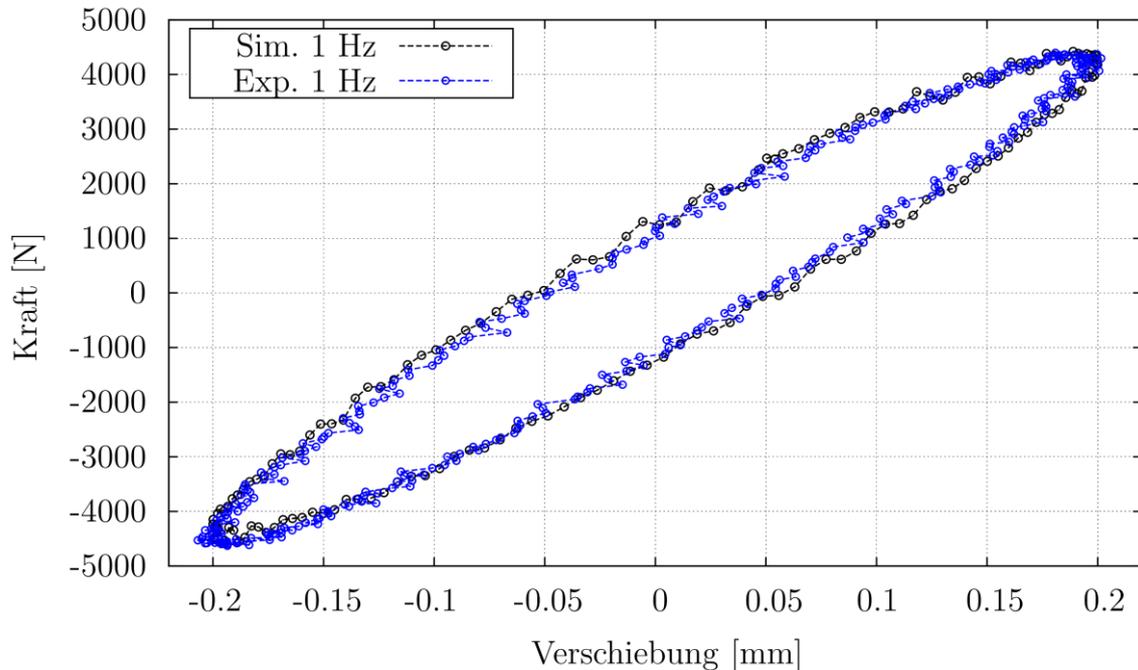


Abbildung 23: Simulationsrechnung der KHP-Steckverbindung für den Klebstoff Sikadur F51-60 (Klebschichtdicke 5,8 mm; Überlapplänge 20 mm) bei 1 Hz und der Verschiebungsrandbedingung aus Gl. 8; Simulationsrechnung mit LS-DYNA in schwarz; Versuchsdaten in blau.

Ferner sind für den Klebstoff Körapur 842 die Versuchs- und Simulationsergebnisse bei ebenfalls 1 Hz Frequenz, einer Überlapplänge von 60 mm und einer Klebschichtdicke von 5,8 mm im folgenden Diagramm dargestellt. Die Verschiebungsrandbedingung für die FE-Berechnung entspricht hier ebenfalls Gl. 7.

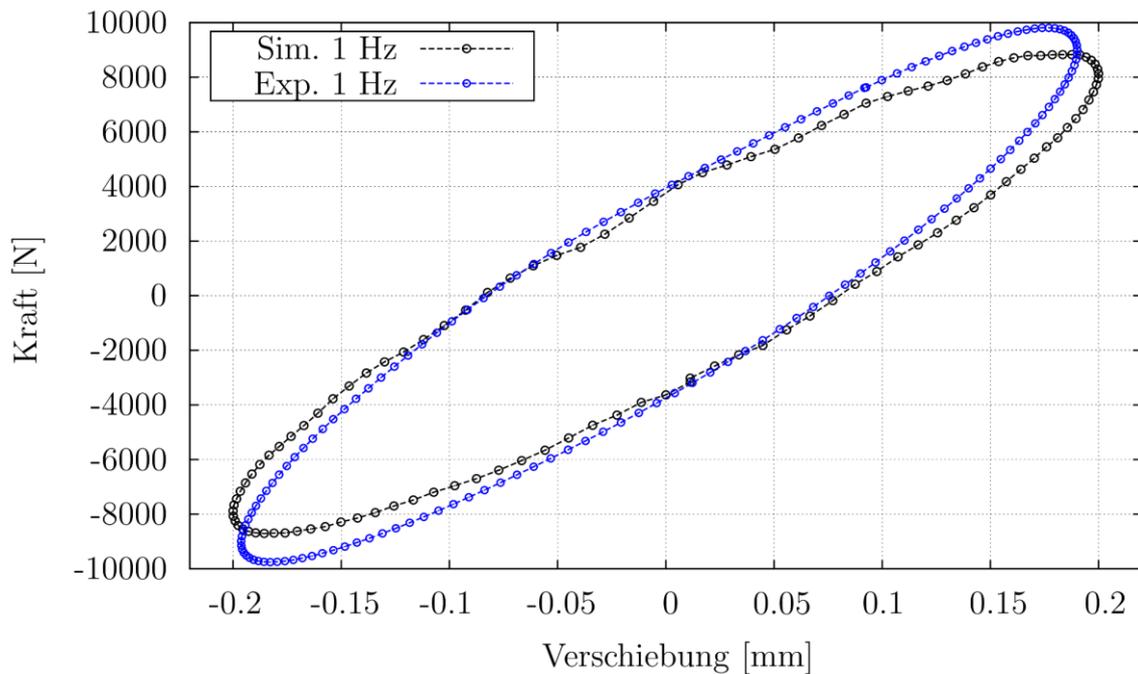


Abbildung 24: Simulationsrechnung der KHP-Steckverbindung für den Klebstoff Körapur 842 (Klebschichtdicke 5,8 mm; Überlapplänge 60 mm) bei 1 Hz und der Verschiebungsrandbedingung aus Gl. 8; Simulationsrechnung mit LS-DYNA in schwarz; Versuchsdaten in blau.

Abbildung 23 und Abbildung 24 zeigen den Vergleich der experimentell und numerisch bestimmten Dämpfungseigenschaften der KHP-Steckverbindung mit einer Klebschichtdicke von 5,8 mm sowie den Überlapplänge 20 mm für den Klebstoff Sikadur F51-60 sowie 60 mm für den Klebstoff Körapur 842 in Form einer Hysteresekurve. Dabei zeigen die Simulationsrechnungen einen ähnlichen Kurvenverlauf sowie ähnliche Kraftmaxima zu den jeweiligen Verschiebungsrandbedingungen wie im Versuch. Die Form der Hysteresen und damit die Phasenverschiebung (vgl. Abbildung 18) stimmen ebenfalls gut überein. Geringfügige Abweichungen der dissipierten Energie pro Lastzyklus in Form des Flächeninhalts der Hysterese können durch den bisher nicht umfassend berücksichtigten Einfluss der temperaturabhängigen Dämpfungseigenschaften begründet werden.

Im Folgenden wird im Rahmen der Validierung für den Klebstoff Körapur 842 die Frequenz auf 3 Hz erhöht und nach dem Rechenlauf mit LS-DYNA den Ergebnissen der experimentellen Untersuchung in Abbildung 24 gegenübergestellt. Der Vergleich der experimentell und numerisch bestimmten Daten für die KHP-Steckverbindung mit einer Klebschichtdicke von 5,8

mm und einer Überlapplänge von 60 mm sowie einer erhöhten Frequenz von 3 Hz ist in Abbildung 25 dargestellt. Hierbei zeigt sich auch für höhere Frequenzen eine gute Übereinstimmung der Simulationsergebnisse mit den experimentellen Daten.

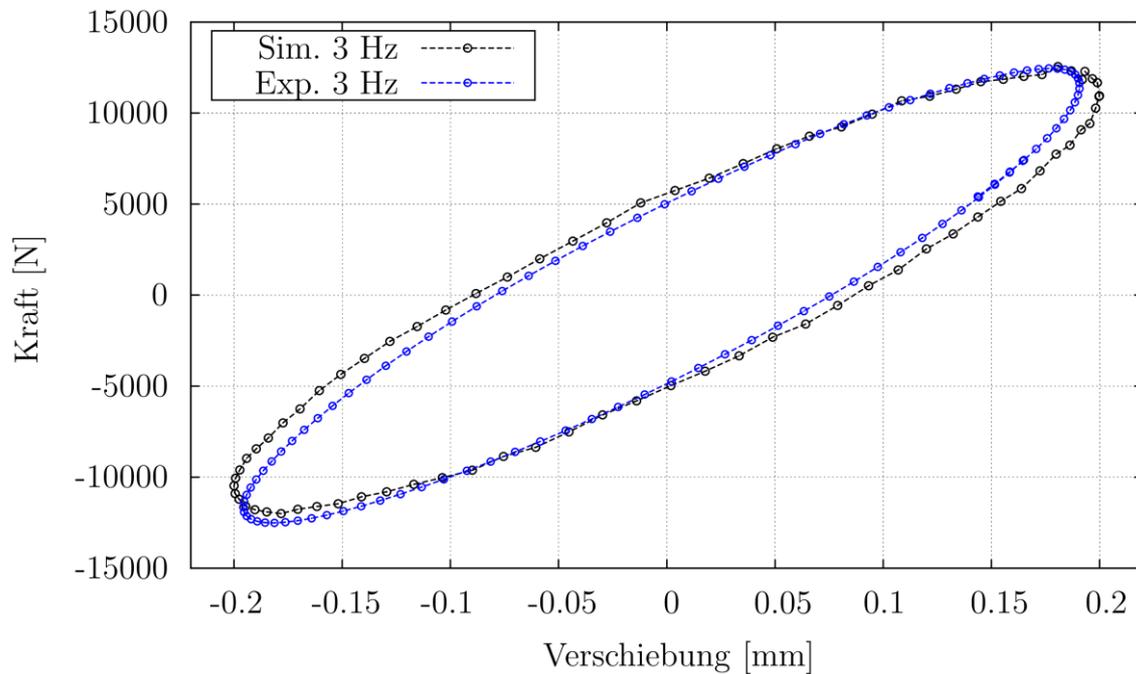


Abbildung 25: Simulationsrechnung der KHP-Steckverbindung für den Klebstoff Körapur 842 (Klebschichtdicke 5,8 mm; Überlapplänge 60 mm) bei 3 Hz und der Verschiebungsrandbedingung aus Gl. 8; Simulationsrechnung mit LS-DYNA in schwarz; Versuchsdaten in blau.

Insgesamt zeigt der Vergleich der experimentell und numerisch bestimmten Kraft-Verformungshysterese in Abbildung 23 bis Abbildung 25 eine gute Übereinstimmung sowohl elastisch gespeicherten als auch der dissipierten Energie der untersuchten Probekörper. Dies gilt für die untersuchten Klebstoffe sowie verschiedene Prüffrequenzen und Probekörpergeometrien. Die Auswertung der experimentell und numerisch bestimmten Verlustfaktor in Tabelle 2 zeigt lediglich eine geringe Abweichung zwischen den experimentellen Daten sowie den Simulationsergebnissen. Vorhandene Abweichung können durch die zukünftig geplante Berücksichtigung der Abhängigkeit der Dämpfungseigenschaften von der Temperatur sowie dem mehraxialen Spannungszustand innerhalb der Klebschicht weiter reduziert werden.

Tabelle 2: Vergleich der Ergebnisse der experimentellen und numerischen Untersuchung der bauteilähnlichen KHP-Steckverbindung

Klebstoff	t_{KS} [mm]	$L_{\bar{u}}$ [mm]	Frequenz	Verlustfaktor η [-]	
				Versuch	Simulation
S	5,8	20	1 Hz	0,28	0,28
K	5,8	60	1 Hz	0,42	0,44
K	5,8	60	3 Hz	0,43	0,48

Weitere Simulationsergebnisse und Validierungsrechnungen werden im Abschlussbericht [4] veröffentlicht. Die Prognosen des Dämpfungsmodells zeigen übergreifend für verschiedene Versuchsszenarien gute Übereinstimmung mit den experimentellen Daten der Grundversuche sowie für die bauteilähnlichen Probekörper.

4 Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen dieses Beitrages werden umfangreiche dynamische Versuche an geklebten Rohrsteckverbindungen vorgestellt. Die Ergebnisse der Untersuchungen erlauben die Quantifizierung der Dämpfungseigenschaften geklebter Probekörper sowie die Beschreibung des Einflusses von Klebfugegeometrie, Prüffrequenz und Klebstoff. Ein mathematisches Modell zur Abbildung der Dämpfungseigenschaften von Klebstoffen wurde entwickelt und anhand der vorgestellten Versuche an technologischen und bauteilähnlichen Proben validiert.

Im Fokus der vorliegenden Untersuchungen standen vorwiegend schubbeanspruchte Klebverbindungen. Im Hinblick auf praktische Anwendungsbeispiele ist die Analyse der Dämpfungseigenschaften bei kombinierten, multiaxialen Beanspruchungen (Schub- und Normalbeanspruchungen) von großer Bedeutung. Hierfür kann das vorhandene Dämpfungsmodell erweitert und für reale Klebverbindungen in allen Einsatzgebieten unter allen Belastungsszenarien nutzbar gemacht werden.

Förderhinweis:

Das IGF-Vorhaben „Experimentelle und numerische Untersuchung der Dämpfungseigenschaften geklebter Strukturen unter dynamischer Beanspruchung“, IGF-Projekt Nr. 20080 N, der Forschungsvereinigung Stahlanwendung e. V. (FOSTA), Sohnstraße 65, 40237 Düsseldorf wird über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen

Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

5 Schriftum

- [1] Damm, J.; Ummenhofer, T.; Albiez, M. (2020): Influence of damping properties of adhesively bonded joints on the dynamic behaviour of steel structures: numerical investigations. In: *The Journal of Adhesion* 6 (94), S. 1–29.
- [2] Damm, J.; Albiez, M.; Ummenhofer, T.; Göddecke, J.; Meschut, G. (2021): Dämpfungseigenschaften geklebter Verbindungen – Potenzialanalyse und Klebstoffcharakterisierung. In: *Adhaes Kleb Dicht* 65 (9), S. 14–23.
- [3] Damm, J.; Albiez, M.; Ummenhofer, T.; Kötz, F.; Matzenmiller, A. (2021): Dämpfungseigenschaften geklebter Verbindungen – Simulation und Validierung an Bauteilversuchen. In: *Adhaes Kleb Dicht* 65 (10).
- [4] Damm, J.; Albiez, M.; Ummenhofer, T.; Göddecke, J.; Meschut, G.; Kötz, F.; Matzenmiller, A. (Veröffentlichung in 2022): Experimentelle und numerische Untersuchung der Dämpfungseigenschaften geklebter Strukturen unter dynamischer Beanspruchung – Dämpfende Knoten (FOSTA P 1272, IGF Nr. 20080 N) Forschungsvereinigung Stahlanwendung e. V. (FOSTA), Düsseldorf (Abschlussbericht).
- [5] DIN EN 10210-1, Juli 2006: Warmgefertigte Hohlprofile für den Stahlbau aus unlegierten Baustählen und aus Feinkornbaustählen – Teil 1: Technische Lieferbedingungen: Beuth Verlag GmbH, Berlin.
- [6] Damm, J. (noch nicht veröffentlicht): Untersuchung der Dämpfungseigenschaften geklebter Verbindungen im Stahlbau (Dissertation). Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe.
- [7] DIN EN ISO 8501-1, Dezember 2007: Vorbereitung von Stahloberflächen vor dem Auftragen von Beschichtungsstoffen – Visuelle Beurteilung der Oberflächenreinheit – Teil 1: Rostgrade und Oberflächenvorbereitungsgrade von unbeschichteten Stahloberflächen und

Stahloberflächen nach ganzflächigem Entfernen vorhandener Beschichtungen: Beuth Verlag GmbH, Berlin.

- [8] Albiez, M. (2016): Zur statischen Tragfähigkeit geklebter Kreishohlprofilverbindungen im Stahlbau (Dissertation). Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe.
- [9] Habenicht, G. (2009): Kleben – Grundlagen, Technologien, Anwendungen. 6., aktualisierte Auflage, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg (VDI-Buch).
- [10] da Silva, Lucas F.M.; Öchsner, A.; Adams, R. D. (Hg.) (2018): Handbook of adhesion technology. Second edition, Cham: Springer.
- [11] Almitani, K. H.; Othman, R. (2016): Analytical solution of the harmonic response of visco-elastic adhesively bonded single-lap and double-lap joints. In: International Journal of Adhesion and Adhesives 71, S. 55–65.
- [12] Vaziri, A.; Nayeb-Hashemi, H. (2005): Dynamic response of tubular joints with an annular void subjected to a harmonic torsional load. In: Proceedings of the IMechE 216 (4), S. 361–370.
- [13] Vaziri, A.; Nayeb-Hashemi, H. (2002): Dynamic response of tubular joints with an annular void subjected to a harmonic axial load. In: International Journal of Adhesion and Adhesives 22 (5), S. 367–373.
- [14] Petersen, C.; Werkle, H. (2017): Dynamik der Baukonstruktionen. 2. Aufl., Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden.
- [15] Albiez, M.; Vallée, T.; Fricke, H.; Ummenhofer, T. (2019): Adhesively bonded steel tubes — Part I: Experimental investigations. In: International Journal of Adhesion and Adhesives 90, S. 199–210.
- [16] Albiez, M.; Vallée, T.; Ummenhofer, T. (2019): Adhesively bonded steel tubes – Part II: Numerical modelling and strength prediction. In: International Journal of Adhesion and Adhesives 90, S. 211–224.

- [17] Findley, William N.; Davis, Francis A. (2013): Creep and Relaxation of Nonlinear Viscoelastic Materials, Newburyport: Dover Publications (Dover Civil and Mechanical Engineering).
- [18] DIN EN 14869-2, Juli 2011: Strukturklebstoffe – Bestimmung des Scherverhaltens struktureller Klebungen – Teil 2: Scherprüfung für dicke Füge­teile: Beuth Verlag GmbH, Berlin.
- [19] Meschut, G.; Schwarzkopf, G.; Matzenmiller, A.; Nelson, A.; Mayer, B.; Brede, M. et al. (2019): Numerische Modellierung und Kennwertermittlung für das Versagensverhalten hyperelastischer Klebverbindungen – (FOSTA P 1086, IGF Nr. 18716 N) Forschungsvereinigung Stahlanwendung e. V. (FOSTA), Düsseldorf.
- [20] Hallquist, John O. (2006): LS-DYNA® Theory Manual, Livermore, California 94551: Livermore Software Technology Corporation.