

Zum Dämpfungsverhalten viskoelastischer Klebverbindungen im Stahlbau

Zur Erlangung des akademischen Grades eines

DOKTORS DER INGENIEURWISSENSCHAFTEN (Dr.-Ing.)

von der KIT Fakultät für

Bauingenieur-, Geo- und Umweltwissenschaften

des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT)

genehmigte

DISSERTATION

von

Jannis Damm, M.Sc.

aus Marburg

Tag der mündlichen Prüfung: 27.04.2023

Referent: Prof. Dr.-Ing. Thomas Ummenhofer

Korreferenten: Prof. Dr.-Ing. Gerson Meschut

Prof. Dr.-Ing. Luise Kärger

Karlsruhe 2023



Dieses Werk ist lizenziert unter einer Creative Commons Namensnennung - Weitergabe unter gleichen Bedingungen 4.0 International Lizenz (CC BY-SA 4.0): <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/deed.de>

Kurzfassung

Baukonstruktionen sind häufig dynamischen Belastungen ausgesetzt. Hierdurch können Strukturschwingungen hervorgerufen werden, die sowohl die Tragfähigkeit als auch die Gebrauchstauglichkeit negativ beeinflussen. Aus diesem Grund müssen auftretende Schwingungsamplituden durch geeignete, dämpfende Maßnahmen begrenzt werden. Viskoelastische Klebstoffe auf Basis von Polyurethanen und Epoxidharzen bieten neben einer hohen Festigkeit sehr gute Dämpfungseigenschaften. Das Dämpfungsverhalten geklebter Stahlbauanschlüsse sowie deren Potential zur Dämpfung dynamisch beanspruchter Strukturen wurden allerdings bislang nicht ausreichend untersucht.

In der vorliegenden Arbeit werden numerische und experimentelle Untersuchungen zum Dämpfungsverhalten geklebter Verbindungen unter Berücksichtigung spezifischer Anforderungen und Randbedingungen des Bauwesens beschrieben.

In numerischen Untersuchungen an Stahlbaustrukturen mit einem sowie mehreren geklebten Anschlüssen wird zunächst das Potential geklebter Anschlüsse zur Optimierung des dynamischen Verhaltens der untersuchten Strukturen aufgezeigt. Die Analysen verschiedener Schwingungsszenarien sowie des Einflusses von Geometrie- und Werkstoffparametern stehen im Fokus der Untersuchungen. Im Vergleich zu einem geschweißten Referenzsystem können auftretende Schwingungsamplituden durch die Implementierung geklebter Anschlüsse effektiv reduziert werden. Die Dämpfungseigenschaften geklebter Anschlüsse können zudem durch die Anpassung der Steifigkeit und der dissipativen Eigenschaften des Klebstoffs sowie der Geometrie der Klebfuge optimiert werden.

Einen wesentlichen Teil des originären Beitrags dieser Arbeit stellt die experimentelle Untersuchung der Dämpfungseigenschaften geklebter Überlapp- und Kreishohlprofilsteckverbindungen unter Variation von Geometrie- und Beanspruchungsrandbedingungen dar. Der Fokus der experimentellen Untersuchungen liegt auf Klebverbindungen mit schubbeanspruchten Klebschichten. Die ausgewählten Klebstoffe erfüllen die spezifischen Anforderungen des Bauwesens in Bezug auf die dynamisch-mechanischen Eigenschaften.

Die dynamischen Untersuchungen zeigen, dass die Dämpfungseigenschaften vorwiegend schubbeanspruchter Klebverbindungen von der Klebfugengeometrie (Klebschichtdicke, Überlapplänge) sowie der Höhe der Beanspruchung abhängen. Die Dämpfungseigenschaften geklebter Verbindungen hängen bei gleichen Geometrie- und Beanspruchungsrandbedingungen von der Art der Verbindung (Überlapp- bzw. Kreishohlprofilsteckverbindung) ab. Der Einfluss der Prüffrequenz auf die Dämpfungseigenschaften ist von untergeordneter Relevanz. Allerdings muss in Abhängigkeit der aufgetragenen Lastzyklen eine ermüdungsbedingte Schädigung der Klebschicht berücksichtigt werden. Die Untersuchungsergebnisse erfüllen jedoch die in dieser Arbeit definierten Anforderungen an die dissipativen Eigenschaften geklebter Verbindungen. Durch diese Multifunktionalität wird die Attraktivität des Fügeverfahrens Kleben weiter gesteigert.

Neben der experimentellen Datenbasis bildet die Entwicklung einer Methodik zur Identifikation funktionaler Zusammenhänge der Versuchsergebnisse mit Hilfe einer Dimensionsanalyse einen weiteren Schwerpunkt dieser Arbeit. Es kann gezeigt werden, dass die Versuchsergebnisse getrennt für jeden Probekörpertyp durch das Auftragen über einem dimensionslosen Eingangsparameter in einem funktionalen Zusammenhang dargestellt werden können. Die identifizierten Zusammenhänge können durch Regressionsfunktionen mit einem Bestimmtheitsmaß $R^2 > 0,95$ approximiert werden. Damit können die Dämpfungseigenschaften im Rahmen definierter Gültigkeitsgrenzen für verschiedene Klebfugengeometrien und Beanspruchungsrandbedingungen ermittelt werden. Das bildet die Grundlage der analytischen Prognose der Dämpfungseigenschaften geklebter Anschlüsse im Rahmen der praktischen Auslegung von Stahlbaustrukturen.

Abstract

Building structures are often exposed to dynamic loads. This can cause structural vibrations that have a negative impact on both the load-bearing capacity and the serviceability. For this reason, vibration amplitudes must be limited by suitable damping measures. Viscoelastic adhesives based on polyurethanes and epoxy resins offer good damping properties in addition to high strength. However, the damping behaviour of adhesively bonded structural steel connections and their potential for damping dynamically stressed structures have not been sufficiently investigated so far.

In this dissertation, numerical and experimental investigations of the damping behaviour of adhesively bonded joints are described, taking into account specific requirements and boundary conditions of civil engineering.

In numerical investigations of steel structures with one and several adhesively bonded joints, the potential of adhesively bonded joints for optimising the dynamic behaviour of the investigated structures is first demonstrated. The analysis of different vibration scenarios and the influence of geometry and material parameters are the focus of the investigations. Compared to a welded reference system, vibration amplitudes can be effectively reduced by implementing adhesively bonded joints. The damping properties of adhesively bonded joints can also be optimised by adjusting the stiffness and dissipative properties of the adhesive and the geometry of the bonded joint.

An essential part of the original contribution of this work is the experimental investigation of the damping properties of bonded overlap and circular hollow section tubular joints under variation of geometry and stress boundary conditions. The focus of the experimental investigations is on bonded joints with adhesive layers subject to shear stress. The selected adhesives meet the specific requirements of the civil engineering sector in terms of dynamic-mechanical properties.

The dynamic investigations show that the damping properties of predominantly shear-stressed adhesively bonded joints depend on the geometry of the bonded joint (adhesive layer thickness, overlap length) as well as the level of stress.

The damping properties of adhesively bonded joints depend on the type of joint (overlap or circular hollow section joint) for the same geometry and stress boundary conditions. The influence of the test frequency on the damping properties is of minor relevance. However, depending on the applied load cycles, fatigue-related damage to the adhesive layer must be taken into account. However, the test results fulfil the requirements defined in this work for the dissipative properties of adhesively bonded joints. This multifunctionality further increases the attractiveness of adhesive bonding.

In addition to the experimental database, the development of a methodology for identifying functional relationships of the test results with the help of a dimensional analysis is another focus of this work. It can be shown that the test results can be represented in a functional relationship separately for each specimen type by plotting them over a dimensionless input parameter. The identified correlations can be approximated by regression functions with a coefficient of determination $R^2 > 0.95$. This allows the damping properties to be derived within defined limits of validity for different joint geometries and stress boundary conditions. This forms the basis of the analytical prediction of the damping properties of adhesively bonded joints in the context of the practical dimensioning of steel structures.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	i
Abstract	iii
Inhaltsverzeichnis	v
Abkürzungsverzeichnis und Formelzeichen	xi
1 Einleitung	1
1.1 Ausgangssituation und Zielsetzung	1
1.2 Aufbau der Arbeit	2
2 Kenntnisstand	5
2.1 Grundlagen der Strukturdynamik	5
2.1.1 Allgemeines	5
2.1.2 Kinematik	6
2.1.3 Schwingungsverhalten des Einfreiheitsgradschwingers	9
2.1.4 Erweiterung auf den Mehrfreiheitsgradschwinger	15
2.2 Grundlagen der Dämpfung	17
2.2.1 Dämpfungsarten	19
2.2.2 Dämpfungsmodelle	20
2.3 Das Fügeverfahren Kleben	29
2.3.1 Definition	29
2.3.2 Chemie der Klebstoffe	30
2.3.3 Bindungskräfte in einer Klebverbindung	31
2.3.4 Anwendung der Klebtechnik im Bauwesen	33
2.4 Grundlagen der Viskoelastizität	36
2.4.1 Mechanisches Verhalten viskoelastischer Werkstoffe	36
2.4.2 Dämpfungseigenschaften viskoelastischer Werkstoffe	39
2.4.3 Ermittlung charakteristischer Dämpfungskennwerte	41
2.5 Dämpfungseigenschaften geklebter Verbindungen	46
2.5.1 Ebene Überlappverbindungen	47
2.5.2 Zylindrische Kreishohlprofilsteckverbindungen	49
2.6 Dämpfungsmaßnahmen im Bauwesen	52

2.6.1	Schwingungsphänomene von Baukonstruktionen	52
2.6.2	Passive Dämpfungsmaßnahmen	54
3	Auswahl und Charakterisierung der Klebstoffe	65
3.1	Allgemeines.....	65
3.2	Anforderungen	65
3.3	Auswahl der Klebstoffe	68
3.3.1	Klebstoff EPH	68
3.3.2	Klebstoff PUR	69
3.4	Experimentelle Untersuchungen.....	70
3.4.1	Statisch-mechanische Eigenschaften	70
3.4.2	Dynamisch-mechanische Eigenschaften.....	73
3.5	Zusammenfassung	76
4	Numerische Untersuchungen zum Dämpfungspotential geklebter	
	Anschlüsse.....	77
4.1	Zielsetzung und prinzipielle Vorgehensweise.....	77
4.2	Werkstoffgesetze	78
4.3	Untersuchung eines Einknotensystems	81
4.3.1	Numerisches Modell und Netzkonvergenzstudie	81
4.3.2	Eigenfrequenzen und -moden.....	86
4.3.3	Stationäre Schwingungszustände.....	90
4.3.4	Instationäre Schwingungszustände.....	99
4.4	Untersuchung eines Mehrknotensystems.....	114
4.4.1	Numerisches Modell und Netzkonvergenzstudie	114
4.4.2	Eigenfrequenzen und -moden	119
4.4.3	Stationäre Schwingungszustände.....	122
4.5	Zusammenfassung	126
5	Konzeptionierung und Fertigung der Probekörper zur Ermittlung	
	des quasi-statischen Tragverhaltens und der Dämpfungseigenschaften.....	129
5.1	Probekörpergeometrien.....	129
5.1.1	Überlappverbindung	129
5.1.2	Kreishohlprofilsteckverbindung.....	130
5.1.3	Probekörperbezeichnung.....	132
5.2	Probekörperfertigung	132

5.2.1	Oberflächenvorbereitung der Fügeteile	132
5.2.2	Klebtechnische Fertigung der Überlappverbindung	133
5.2.3	Klebtechnische Fertigung der Kreishohlprofilsteckverbindung	135
6	Quasi-statisches Tragverhalten geklebter Überlapp- und Kreishohlprofilsteckverbindungen unter Axialbelastung.....	139
6.1	Ansatz und Zielsetzung.....	139
6.2	Experimentelle Untersuchungen.....	140
6.2.1	Versuchsprogramm	140
6.2.2	Einfluss der Prüfgeschwindigkeit.....	141
6.2.3	Versuchsaufbau der Zugversuche an Überlappverbindungen.....	141
6.2.4	Versuchsaufbau der Zugversuche an Kreishohlprofilsteckverbindungen.....	142
6.3	Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen.....	144
6.3.1	Ergebnisse Überlappverbindung	144
6.3.2	Ergebnisse Kreishohlprofilsteckverbindung.....	148
6.4	Ableitung von Prüfniveaus	153
6.4.1	Auswertung der Ergebnisse quasi-statischer Zugversuche an Überlapp- und Kreishohlprofilsteckverbindungen	153
6.4.2	Charakterisierung der Prüfniveaus	156
7	Dämpfungseigenschaften geklebter Überlapp- und Kreishohlprofilsteckverbindungen.....	159
7.1	Ansatz und Zielsetzung.....	159
7.2	Experimentelle Untersuchungen.....	160
7.2.1	Allgemeines.....	160
7.2.2	Versuchsprogramm	160
7.2.3	Versuchsaufbau Überlappverbindung.....	161
7.2.4	Versuchsaufbau Kreishohlprofilsteckverbindung.....	162
7.3	Versuchsdurchführung.....	164
7.4	Versuchsauswertung.....	165
7.4.1	Energiebasierte Auswertung	167
7.4.2	Zeitbasierte Auswertung.....	168
7.5	Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen.....	170

7.5.1	Ergebnisse Überlappverbindung	170
7.5.2	Ergebnisse Kreishohlprofilsteckverbindung	173
7.6	Diskussion der Ergebnisse experimenteller Untersuchungen an Überlappverbindungen	175
7.6.1	Allgemeines	175
7.6.2	Einfluss der Prüffrequenz	175
7.6.3	Einfluss der Überlapplänge	181
7.6.4	Einfluss der Klebschichtdicke	187
7.6.5	Einfluss des Klebstoffs	193
7.7	Diskussion der Ergebnisse experimenteller Untersuchungen an Kreishohlprofilsteckverbindungen	196
7.7.1	Allgemeines	196
7.7.2	Einfluss der Prüffrequenz	196
7.7.3	Einfluss der Überlapplänge	201
7.7.4	Einfluss der Klebschichtdicke	205
7.7.5	Einfluss des Klebstoffs	211
7.8	Zusammenfassung	214
8	Prognose der Dämpfungseigenschaften geklebter Verbindungen	216
8.1	Ansatz und Vorgehensweise	216
8.1.1	Anmerkungen zur Übertragbarkeit	217
8.2	Grundlagen einer Dimensionsanalyse	217
8.2.1	Begrifflichkeiten	218
8.2.2	Das Pi-Theorem der Dimensionsanalyse	219
8.2.3	Modellbildung und Ermittlung dimensionsloser Kennzahlen	220
8.3	Dimensionsanalyse experimenteller Untersuchungen an geklebten Überlappverbindungen	221
8.3.1	Definition dimensionsbehafteter Einflussgrößen	221
8.3.2	Identifikation des funktionalen Zusammenhangs	223
8.4	Dimensionsanalyse experimenteller Untersuchungen an geklebten Kreishohlprofilsteckverbindungen	230
8.4.1	Definition dimensionsbehafteter Einflussgrößen	230
8.4.2	Identifikation des funktionalen Zusammenhangs	232
8.5	Zusammenfassung	236

9 Zusammenfassung und Ausblick.....	237
9.1 Zusammenfassung	237
9.2 Ausblick	241
Literaturverzeichnis.....	243
Anhang.....	255

Abkürzungsverzeichnis und Formelzeichen

Abkürzungen

2K	Zweikomponenten
DIN	Deutsches Institut für Normung
DMA	Dynamisch-Mechanische-Analyse
EKS	Einknotensystem
EPH	Epoxy-Hybridklebstoff
i	Laufparameter
KHP	Kreishohlprofil
LVE	Lineare Viskoelastizität
LZA	Lichtzeichenanlage
MEK	Methylethylketon
MKS	Mehrknottensystem
n	Anzahl einer Grundgesamtheit
PE	Polyethylen
PUR	Polyurethanklebstoff
RT	Raumtemperatur
TMD	Tuned-Mass-Damper
VDI	Verein Deutscher Ingenieure

Lateinische Formelzeichen

<i>Zeichen</i>	<i>Einheit</i>	<i>Erläuterung</i>
a_0		Fourier-Glied (Einheit abhängig von Funktion $f(t)$)
a_i	[-]	i-te Einflussgröße
B_F	[mm]	Nennbreite der Fügeteile der Überlappverbindung
c_f	[-]	Kraftbeiwert
C_n		Fourier-Glied (Einheit abhängig von Funktion $f(t)$)
c_{sCd}	[-]	Kombinierter Strukturbeiwert
\underline{D}	[Ns/m]	Dämpfungsmatrix
D_a	[mm]	Nenndurchmesser des äußeren Kreishohlprofils
D_i	[mm]	Nenndurchmesser des inneren Kreishohlprofils
d	[-]	Dämpfungskonstante
E	[MPa]	Elastizitätsmodul
\underline{E}	[MPa]	Komplexer Elastizitätsmodul
E'	[MPa]	Speichermodul (Normalspannung)
E''	[MPa]	Verlustmodul (Normalspannung)
F_0	[kN]	Amplitude einer harmonischen Kraftanregung
f	[Hz]	Frequenz
$F(w_{Max})$	[kN]	Kraft bei Erreichen des maximalen Wegs der Prüfmaschine während der dynamischen Versuche
G	[MPa]	Schubmodul
\underline{G}	[MPa]	Komplexer Schubmodul
G'	[MPa]	Speichermodul (Schubspannung)
G''	[MPa]	Verlustmodul (Schubspannung)
k	[N/mm]	Federsteifigkeit
\underline{K}	[N/m]	Steifigkeitsmatrix
L_F	[mm]	Nennlänge der Fügeteile der Überlappverbindung

<i>Zeichen</i>	<i>Einheit</i>	<i>Erläuterung</i>
$L_{\ddot{u}}$	[mm]	Überlapplänge
m	[kg]	Masse
m, n	[-]	Ramberg-Osgood-Parameter
\underline{M}	[kg]	Massenmatrix
N	[-]	Schwingspielzahl
$P_{wd,i}$	[kN/m ²]	Maximale Amplitude des Winddrucks der harmonischen Grundanregung i
q_p	[kN/m ²]	Böengeschwindigkeitsdruck
r	[-]	Quotienten aus Anrege- und Eigenfrequenz
S_n		Fourier-Glied (Einheit abhängig von Funktion $f(t)$)
T	[s]	Periodenlänge
t	[s]	Zeit
t_a	[mm]	Nennwanddicke des äußeren Kreishohlprofils
$\tan(\delta)$	[-]	Verlustfaktor: Quotient aus Verlustmodul G'' und Speichermodul G'
t_F	[mm]	Nennstärke der Fügeteile der Überlappverbindung
T_G	[°C]	Glasübergangstemperatur
t_i	[mm]	Nennwanddicke des inneren Kreishohlprofils
t_{KS}	[mm]	Nennklebschichtdicke
$t_{Ringschale}$	[mm]	Nennwanddicke der Ringschale
U_m	[mm]	Mittlerer Umfang der Klebschicht
u_n	[mm]	Amplitude des n -ten Zyklus
u_{n+N}	[mm]	Amplitude des $n+N$ -ten Zyklus
V_1	[-]	Vergrößerungsfaktor
v_b	[kN/m ²]	Basisdruck
W_d	[kNmm]	Dissipierte Energie
W_e	[kNmm]	Elastisch gespeicherte Energie

<i>Zeichen</i>	<i>Einheit</i>	<i>Erläuterung</i>
w_{Max}	[mm]	Maximaler Weg der Prüfmaschine während der dynamischen Versuche
x, y, z		Achsen des kartesischen Koordinatensystems
x	[mm]	Komponente der Bewegung eines Systems entlang der x-Achse
x_n	[mm]	Amplitude einer periodischen Schwingung durch Überlagerung von n harmonischen Schwingungen
x_p	[mm]	Partikuläre Lösung der Bewegungsgleichung einer Schwingung entlang der x-Achse
\dot{x}	[mm/s]	Geschwindigkeit der Bewegung eines Systems entlang der x-Achse
\ddot{x}	[mm/s ²]	Beschleunigung eines Systems entlang der x-Achse
x_0	[mm]	Amplitude zum Zeitpunkt $t = 0$ der harmonischen Schwingung
$\hat{x}, \hat{x}_{\text{dyn}}$	[mm]	Amplitude der partikulären Lösung der DGL der ungedämpften Schwingung infolge harmonischer Anregung
\hat{x}_i	[mm]	i-ter Eigenvektor eines Systems mit n Freiheitsgraden
\hat{x}_{st}	[mm]	Amplitude einer Schwingung infolge einer ausschließlichen statischen Belastung

Griechische Formelzeichen

<i>Zeichen</i>	<i>Einheit</i>	<i>Erläuterung</i>
γ	[%]	Gleitung
γ_0	[-]	Maximale Amplitude der Gleitung innerhalb einer Hysterese-Schleife
Δ	[-]	Logarithmisches Dekrement
Δt	[s]	Zeitdifferenz
$\varepsilon_d(t)$	[-]	Längenänderung eines Dämpfers im rheologischen Modell
$\varepsilon_k(t)$	[-]	Längenänderung einer Feder im rheologischen Modell
$\hat{\varepsilon}$	[-]	Dehnungsamplitude
$\dot{\varepsilon}$	[1/s]	1. Ableitung der Dehnung ε
η	[-]	Verlustfaktor
η_{dyn}	[MPa \times s]	Dynamische Viskosität
ν	[-]	Querdehnzahl
ξ	[-]	Dämpfungsgrad
π	[-]	Kreiszahl Pi; $\pi \approx 3,1415$
Π_i	[-]	i-te dimensionslose Kennzahl
ρ	[g/cm ³]	Dichte
σ	[MPa]	Normalspannung
$\sigma_d(t)$	[MPa]	Spannung in einem Dämpfer im rheologischen Modell
σ_e	[MPa]	Elastische Spannung im Modell der hysteretischen Dämpfung
σ_h	[MPa]	Hysteretische Spannung im Modell der hysteretischen Dämpfung
$\hat{\sigma}_h$	[MPa]	Amplitude einer harmonischen Spannungsänderung im Modell der hysteretischen Dämpfung
$\sigma_k(t)$	[MPa]	Spannung in einer Feder im rheologischen Modell

<i>Zeichen</i>	<i>Einheit</i>	<i>Erläuterung</i>
$\hat{\sigma}$	[MPa]	Amplitude einer harmonischen Spannungsänderung im Modell der viskosen Dämpfung
τ	[MPa]	Schubspannung
$\tau(t)_{\text{Nenn}}$	[MPa]	Nennschubspannung in Abhängigkeit der Zeit t
φ, δ	[°]	Phasenwinkel
ψ	[-]	Spezifische Dämpfung
Ω	[1/s]	Frequenz einer harmonischen Kraftanregung
ω	[-]	(Eigen)kreisfrequenz
ω_i^2	[-]	i-ter Eigenwert eines Systems mit n Freiheitsgraden

1 Einleitung

1.1 Ausgangssituation und Zielsetzung

Baukonstruktionen sind häufig dynamischen Belastungen ausgesetzt. Hierdurch können Strukturschwingungen hervorgerufen werden. Aus unkontrollierten Schwingungserscheinungen können eine Vielzahl an Problemen resultieren, die sowohl die Tragfähigkeit als auch die Gebrauchstauglichkeit von Strukturen negativ beeinflussen. In diesem Zusammenhang ist insbesondere die akkumulierte Werkstoffermüdung zu nennen, die zur Schädigung von Bauteilen oder deren Verbindungen führt. Darüber hinaus werden Schwingungen durch Menschen als störend oder gefährlich empfunden, wodurch die Gebrauchstauglichkeit von Strukturen eingeschränkt werden kann. Typische Beispiele für dynamisch beanspruchte, schwingungsanfällige Strukturen des Bauwesens und speziell des Stahlbaus sind Brückenbauwerke für Straßen- oder Fußgängerverkehr, Mastkonstruktionen, schlanke Fachwerkkonstruktionen, Aussichtstürme, Schornsteine sowie Windenergieanlagen.

Viskoelastische Klebstoffe auf Basis von Polyurethanen und Epoxidharzen bieten neben einer hohen Festigkeit sehr gute Dämpfungseigenschaften. Diese Dämpfungseigenschaften wurden bisher primär anhand numerischer und analytischer Betrachtungen von Probekörpern im Kleinbauteilmaßstab untersucht. Die Untersuchung der Dämpfungseigenschaften geklebter Verbindungen in einem für das Bauwesen relevanten Maßstab steht allerdings noch aus. Darüber hinaus wurde die Wirkungsweise geklebter Anschlüsse in dynamisch beanspruchten Strukturen bisher nicht ausreichend untersucht. Aus baupraktischer Sicht stellt sich die Frage, ob die dynamischen Eigenschaften schwingungsanfälliger Strukturen durch die Implementierung geklebter Anschlüsse in verschiedenen Schwingungsszenarien optimiert werden können.

Vor dem Hintergrund der aufgezeigten Ausgangssituation können die Ziele der vorliegenden Arbeit wie folgt definiert werden:

- I. Quantifizierung des **Potentials zur Optimierung der Dynamik von Strukturen** des Bauwesens durch geklebte Anschlüsse unter Berücksichtigung variabler geometrischer und werkstofflicher Randbedingungen
- II. Kenntnis der **Dämpfungseigenschaften geklebter Verbindungen im Bauteilmaßstab** bei Variation unterschiedlicher geometrischer und werkstofflicher Parameter
- III. Entwicklung einer ingenieurmäßigen Methodik zur **analytischen Prognose der Dämpfungseigenschaften** geklebter Anschlüsse basierend auf experimentellen Untersuchungen

1.2 Aufbau der Arbeit

Im Folgenden werden die Inhalte der einzelnen Kapitel der vorliegenden Arbeit sowie deren Zusammenhänge erläutert:

In **Kapitel 2** wird der Kenntnisstand zusammengefasst. Zu Beginn werden die Grundlagen sowie analytische Modelle zur Beschreibung der Kinematik von Ein- und Mehrfreiheitsgradsystemen vorgestellt. Darauf aufbauend werden Dämpfungsarten sowie Modelle zur Berücksichtigung von Dämpfung in analytischen Modellen erläutert. Anschließend werden die Grundlagen des Fügeverfahrens Kleben sowie der Viskoelastizität erarbeitet. Hierbei steht die Ermittlung und Quantifizierung der Dämpfungseigenschaften viskoelastischer Klebstoffe im Fokus der Darstellungen. Darauf folgend wird der Stand der Forschung zu den Dämpfungseigenschaften geklebter Verbindungen zusammengefasst. Ein Überblick über den Einsatz von Dämpfungsmaßnahmen im Bauwesen bildet den Abschluss von Kapitel 2.

Kapitel 3 beinhaltet die Erarbeitung baupraktischer Randbedingungen und die daraus abgeleiteten, fertigungstechnischen und normativen Anforderungen an Klebstoffe sowie geklebte Verbindungen als Grundlage einer Auswahl von Klebstoffen. Zudem werden thermische und mechanische Anforderungen definiert. Darauf aufbauend finden eine Klebstoffauswahl und eine daran anschlie-

ßende Charakterisierung wesentlicher statischer und dynamischer Klebstoffeigenschaften statt.

Umfassende numerische Untersuchungen zum Potential der Dämpfung dynamisch beanspruchter Strukturen durch geklebte Anschlüsse sind Gegenstand von **Kapitel 4**. Zunächst werden die Ergebnisse der Untersuchung des Schwingungsverhaltens einer Struktur mit einem geklebten Anschluss vorgestellt. Hierbei werden verschiedene Szenarien der Anregung unter Variation geometrischer und werkstofflicher Parameter analysiert. Darauf folgend werden die zuvor gewonnenen Erkenntnisse um die Untersuchungsergebnisse einer Struktur mit mehreren geklebten Anschlüssen erweitert.

Kapitel 5 umfasst die Konzeptionierung und Fertigung geklebter Überlapp- und Kreishohlprofilsteckverbindungen in einem für das Bauwesen relevanten Maßstab. Nach der Beschreibung der untersuchten Probekörpergeometrien wird auf die Fertigung der Probekörper eingegangen.

Kapitel 6 enthält experimentelle Untersuchungen zum Last-Verformungsverhalten der Überlapp- und Kreishohlprofilsteckverbindungen anhand quasi-statischer Zugversuche unter Axialbelastung. Zunächst werden die Versuchsaufbauten sowie die Versuchsdurchführung beschrieben. Darauf folgt die Darstellung der Versuchsergebnisse sowie die Ableitung von Prüfniveaus zur Durchführung dynamischer Untersuchungen.

Experimentelle Untersuchungen zu den Dämpfungseigenschaften geklebter, bauteilähnlicher Überlapp- und Kreishohlprofilsteckverbindungen sind Gegenstand von **Kapitel 7**. Dabei wird zunächst auf die Durchführung sowie die Auswertung der Versuche eingegangen. Auf die Darstellung der Versuchsergebnisse folgt eine Diskussion des Einflusses geometrischer, werkstofflicher sowie versuchstechnischer Parameter auf die Dämpfungseigenschaften der untersuchten Probekörper.

Auf Grundlage der in Kapitel 7 dokumentierten Ergebnisse experimenteller Untersuchungen wird in **Kapitel 8** deren funktionaler Zusammenhang im Rahmen einer Dimensionsanalyse identifiziert. Dabei werden zunächst die wissenschaftlichen Grundlagen einer Dimensionsanalyse zusammengefasst. Darauf

aufbauend wird die Identifikation des funktionalen Zusammenhangs aller Versuchsergebnisse je Probekörpertyp erläutert. Die Regression der funktionalen Zusammenhänge anhand von Logarithmus- und Exponentialfunktionen, die als Grundlage für einen Transfer der Ergebnisse in die praktische Auslegung von Strukturen dienen können, bildet den Abschluss dieses Kapitels.

Wesentliche Erkenntnisse der Arbeit sowie mögliche zukünftige Forschungsarbeiten werden abschließend in **Kapitel 9** zusammengefasst.

In Abbildung 1.1 sind der beschriebene Aufbau sowie die Zusammenhänge der einzelnen Kapitel schematisch dargestellt.

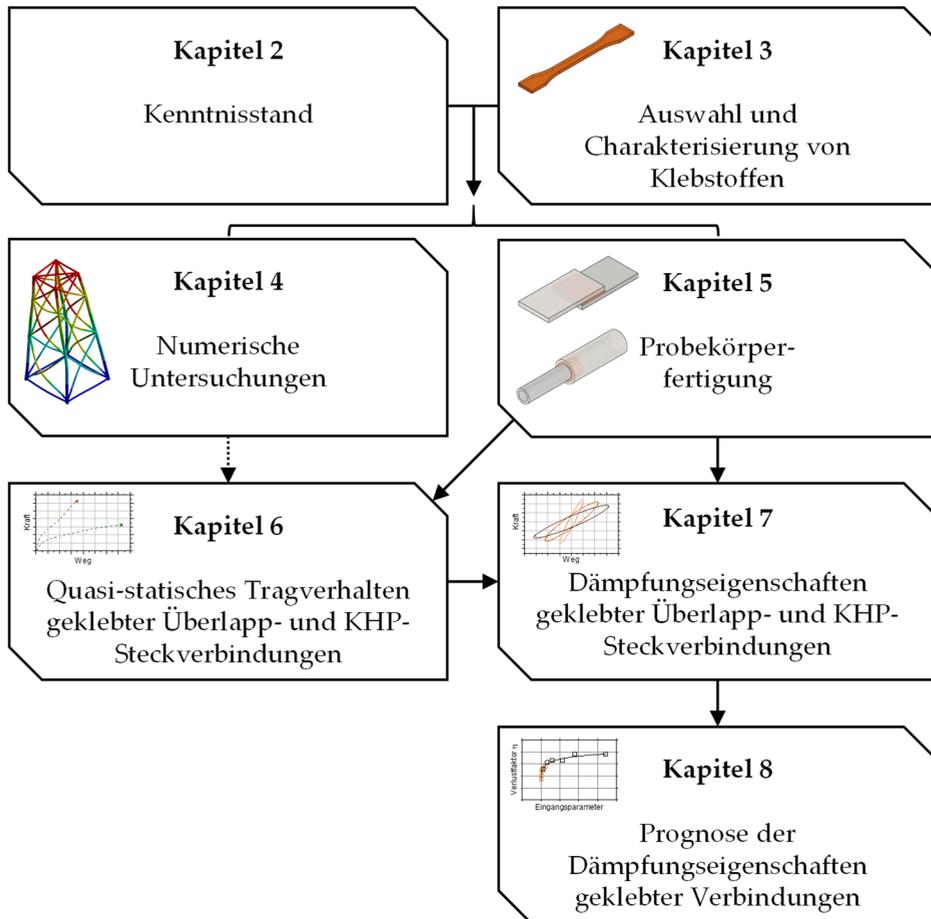


Abbildung 1.1: Schematische Darstellung des Aufbaus der Arbeit

2 Kennnisstand

2.1 Grundlagen der Strukturdynamik

2.1.1 Allgemeines

Die Grundlage sowohl der statischen als auch der dynamischen Auslegung von Strukturen bildet die Übertragung der Realität in ein einfaches sowie ausreichend genaues, analytisches Berechnungsmodell. Das Verhalten einer realen Struktur kann anhand des entwickelten Modells abgeschätzt werden. Die Aufgabe eines bemessenden Ingenieurs ist es somit, notwendige Annahmen und Vereinfachungen zu treffen und deren Einfluss auf das zu erstellende Berechnungsmodell zu analysieren und zu bewerten. Dabei müssen insbesondere bei der Lösung eines dynamischen Problems eine Vielzahl von Annahmen und Vereinfachungen berücksichtigt werden, um die erforderliche Rechendauer zu minimieren.

Im Folgenden werden die Grundlagen der Modellbildung zur Lösung dynamischer Probleme erarbeitet, die für das Verständnis der vorliegenden Arbeit benötigt werden. Dies gilt insbesondere für die in Kapitel 4 dokumentierten, numerischen Untersuchungen zum dynamischen Verhalten von Stahlbaustrukturen mit geklebten Anschlüssen.

Zunächst werden in Abschnitt 2.1.2 relevante Formen dynamischer Schwingungen zusammengefasst. Darauf aufbauend wird in Abschnitt 2.1.3 die Bewegungsgleichung des Einfreiheitsgradschwingers (EFS) hergeleitet, der zur Lösung einfacher, linearer und nichtlinearer Probleme der Dynamik verwendet werden kann (Paz und Kim 2019). Abschließend werden die Gleichungen des EFS auf einen komplexeren Mehrfreiheitsgradschwinger (MFS) erweitert, wodurch die Beschreibung beliebiger Strukturen ermöglicht wird (Petersen und Werkle 2017). Zudem werden die Grundlagen der Modalanalyse als grundlegende Analysemethode zur Lösung strukturdynamischer Probleme zusammengefasst.

2.1.2 Kinematik

Mechanische Systeme verlassen ihre Ruhelage und geraten in Schwingung, wenn sie durch eine äußere, zeitveränderliche Anregung über einen definierten Zeitraum hinweg angeregt werden. Schwingungen können daher als zeitabhängige, mit variierender Regelmäßigkeit auftretende Änderung einer Zustandsgröße verstanden werden. Neben den generellen Systemeigenschaften wird die Systemantwort maßgeblich durch die Form sowie die Intensität der zeitveränderlichen Anregung bestimmt (Petersen und Werkle 2017).

Je nach auftretender Periodizität kann zwischen einer harmonischen, periodischen oder aperiodischen Schwingung unterschieden werden. Ein großer Teil der im Bauwesen auftretenden Schwingungsszenarien kann direkt oder in guter Näherung über eine harmonische bzw. periodische Schwingung beschrieben werden (Strømmen 2014). Aus diesem Grund werden die wesentlichen Merkmale beider Schwingungsformen im Folgenden zusammengefasst.

Harmonische Schwingung

Eine Schwingung, deren Verlauf durch Gl. 2.1 beschrieben werden kann, wird als harmonische Schwingung bezeichnet.

$$x(t) = A \sin(\omega t) + B \cos(\omega t) = C \cos(\omega t + \varphi) \quad (2.1)$$

Es gilt:

$$C = \sqrt{A^2 + B^2} \text{ sowie } \tan(\varphi) = \frac{A}{B} \quad (2.2)$$

A, B und C sind Freiwerte, die aus den Anfangsbedingungen der Schwingung zum Zeitpunkt $t = 0$ bestimmt werden können. Der Freiwert C bestimmt sich so zur Amplitude x_0 zu Beginn der Schwingung (Petersen und Werkle 2017).

Es gilt:

$$x(t) = x_0 \cos(\omega t + \varphi) \quad (2.3)$$

In Abbildung 2.1 sind die Verläufe von zwei um den Phasenwinkel φ verschobenen, harmonischen Schwingungen dargestellt.

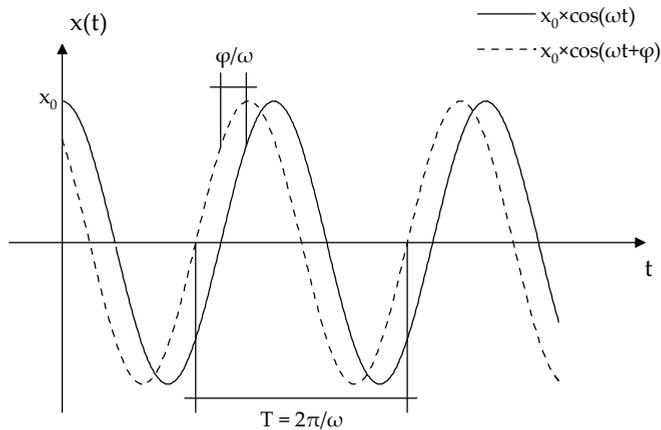


Abbildung 2.1: Verläufe von zwei um den Phasenwinkel φ verschobenen, harmonischen Schwingungen in kartesischer Darstellung im $x(t)$ - t -Diagramm in Anlehnung an (Petersen und Werkle 2017)

Die beiden Schwingungen werden durch die Periodenlänge T sowie die Amplitude x_0 charakterisiert. Dabei ist ω die Kreisfrequenz der Schwingung. Der Kehrwert der Periodendauer $1/T$ wird als Frequenz f bezeichnet (Strømmen 2014). Es gilt:

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{1}{f} \quad (2.4)$$

Die in Abbildung 2.1 dargestellten Schwingungen sind gegeneinander entlang der Zeitachse um den Phasenwinkel φ verschoben. Wertet man die Verschiebung für den diskreten Wert $t = 0$ aus, wird der Phasenwinkel auch als Nullphasenwinkel bezeichnet (Strømmen 2014).

Für positive Phasenwinkel wird die Cosinusfunktion entlang der Abszisse um den Wert φ/ω nach links verschoben. Zwei Schwingungen mit identischem Phasenwinkel und identischer Frequenz verlaufen in Phase bzw. synchron (Petersen und Werkle 2017).

Periodische Schwingung

Eine Funktion $x(t)$ wird als periodisch mit der Periodendauer T bezeichnet, wenn für sie gilt (vgl. Abbildung 2.2):

$$x(t) = x(t + T) \quad (2.5)$$

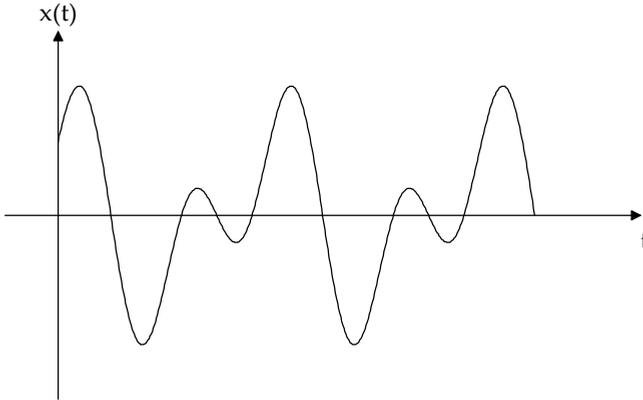


Abbildung 2.2: Periodische Schwingung in kartesischer Darstellung im $x(t)$ - t -Diagramm in Anlehnung an (Petersen und Werkle 2017)

Die einfachste periodische Schwingung ist die harmonische Schwingung. Darüber hinaus kann eine periodische Schwingung entsprechend Gl. 2.6 auch aus einer beliebigen Anzahl von n harmonischen Schwingungen bestehen, deren Kreisfrequenzen ganzzahlige Vielfache der Kreisfrequenz ω sind (Petersen und Werkle 2017).

$$x_n(t) = a_n \cos(n\omega t + \varphi), \quad n = 1, 2, 3 \dots N \quad (2.6)$$

Die periodische Schwingung $x_n(t)$ wiederholt sich während der Zeit T n -mal, weshalb sie entsprechend Gl. 2.7 auch als Summe aller n harmonischen Schwingungen geschrieben werden kann.

$$x(t) = a_0 + \sum_{n=1}^N x_n(t) \quad (2.7)$$

Die Lösung einer periodischen Funktion kann durch eine Fourier-Reihe angenähert werden. Unter Annahme einer periodischen Schwingung mit der Periode T_F kann die zugehörige Fourier-Entwicklung wie folgt geschrieben werden:

$$x(t) = a_0 + \sum_{n=1}^N S_n \sin(n\omega t) + \sum_{n=1}^N C_n \cos(n\omega t) \quad (2.8)$$

Die Werte a_0 , S_n und C_n werden als Fourier-Glieder oder Fourierkoeffizienten bezeichnet und können im Rahmen einer Fourier-Analyse analytisch oder numerisch ermittelt werden (Strømmen 2014). Mit Hilfe von Gl. 2.2 kann Gl. 2.8 im Frequenzbereich wie folgt dargestellt werden:

$$x(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cos(n\omega t + \varphi_n) \quad (2.9)$$

Werden anschließend die Amplituden A_n über der Frequenz f aufgetragen, erhält man das Amplitudenspektrum der Schwingung. Das Amplitudenspektrum liefert Informationen darüber, welche diskreten Frequenzen in der periodischen Schwingung $x(t)$ enthalten sind und welche Energie durch die zugehörigen harmonischen Schwingungen übertragen wird. Die Kenntnis des Amplitudenspektrums ist daher für die Beurteilung baodynamischer Problemstellungen von großer Relevanz (Petersen und Werkle 2017).

2.1.3 Schwingungsverhalten des Einfreiheitsgradschwingers

2.1.3.1 Ungedämpfte Schwingung

Für die Analyse der dynamischen Eigenschaften einer Struktur muss diese zunächst durch Vereinfachungen und Idealisierung in ein mechanisches Berechnungsmodell überführt werden. Das einfachste Modell eines schwingfähigen Systems ist der in Abbildung 2.3 dargestellte ungedämpfte Schwinger mit einem Freiheitsgrad (Einfreiheitsgradschwinger, EFS).

Das Modell des EFS besteht aus einer konzentrierten Masse m und daran angeschlossenen Federn mit der Federsteifigkeit k , wodurch die Masse einer Struktur sowie deren Energiespeicherfähigkeit abgebildet werden können. Vorhandene Dämpfungseffekte werden in diesem Modell nicht berücksichtigt.

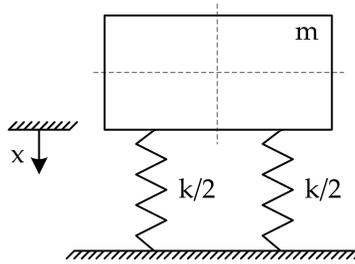


Abbildung 2.3: Modell des ungedämpften Schwingers mit einem Freiheitsgrad in Anlehnung an (Petersen und Werkle 2017)

Der EFS ist während seiner Bewegung frei von äußeren Einwirkungen oder Kräften. Nach einmaliger Auslenkung schwingt er um die Ruhelage. Die freie Schwingung des EFS verläuft harmonisch und kann mit Hilfe des D'Alembert'schen Prinzip bestimmt werden (Petersen und Werkle 2017). Es lautet wie folgt:

$$m\ddot{x} + kx = 0 \tag{2.10}$$

Nach Umformung lautet das Anfangswertproblem:

$$\ddot{x} + \omega^2 x = 0 ; \quad \omega = \sqrt{\frac{k}{m}} \tag{2.11}$$

$$x(0) = x_0 \text{ und } \dot{x}(0) = \dot{x}_0$$

Die Eigenkreisfrequenz ω hängt ausschließlich von der Masse und der Federsteifigkeit ab und charakterisiert die wesentlichen Eigenschaften des EFS. Art und Dauer der Schwingung werden zudem nicht durch die aufgebrauchte Anregung beeinflusst (Strømmen 2014).

Die homogene Differenzialgleichung 2. Ordnung der freien, ungedämpften Schwingung lässt sich mit Hilfe der zuvor hergeleiteten, allgemeinen Form einer harmonischen Schwingung (Gl. 2.1) lösen (Petersen und Werkle 2017). Durch Einsetzen einer Teillösung aus Gl. 2.1 in Gl. 2.10 erhält man:

$$(-m\omega^2 + k)A\cos(\omega t) = 0 \tag{2.12}$$

2.1.3.2 Ungedämpfte Schwingung infolge harmonischer Anregung

Eine Vielzahl an in der Praxis auftretenden Schwingungen werden durch äußere, zeitveränderliche Anregungen verursacht. In diesem Fall liegt eine erzwungene Schwingung vor, die durch eine Kraft-, Unwucht- oder Basisanregung hervorgerufen werden kann (Paz und Kim 2019). Unter exemplarischer Annahme einer harmonischen Kraftanregung $F_0 \sin(\Omega t)$ mit der Amplitude F_0 und der Anregungsfrequenz Ω erweitert sich die Bewegungsgleichung des EFS zu:

$$m\ddot{x} + kx = F_0 \sin(\Omega t) \quad (2.13)$$

Die Lösung der DGL 2.13 besitzt einen homogenen und einen partikulären Teil und kann wie folgt geschrieben werden:

$$x(t) = x_h(t) + x_p(t) \quad (2.14)$$

Zur Ermittlung des homogenen Teils der Lösung wird der linke Teil der DGL zu Null gesetzt. Die so entstehende DGL des ungedämpften EFS kann über den in Gl. 2.1 dokumentierten Ansatz gelöst werden (Petersen und Werkle 2017). Der partikuläre Teil der Lösung muss demgegenüber den inhomogenen Teil der DGL erfüllen und kann über

$$x_p(t) = \hat{x} \sin(\Omega t) \quad (2.15)$$

ausgedrückt werden. Die Amplitude der Partikulärlösung ist \hat{x} . Einsetzen in Gleichung (2.13) liefert

$$-m\Omega^2 \hat{x} + k\hat{x} = F_0 \quad (2.16)$$

oder

$$\hat{x} = \frac{F_0}{k - m\Omega^2} = \frac{F_0/k}{1 - r^2} \quad \text{mit} \quad r = \frac{\Omega}{\omega} \quad (2.17)$$

wobei r dem Quotienten aus der Anregungsfrequenz und der Frequenz der freien Schwingung (Eigenfrequenz) des Systems entspricht (Petersen und Werkle 2017).

Durch Einsetzen von Gl. 2.1 und 2.15 in die allgemeine Lösung der DGL der fremderregten Schwingung (Gl. 2.14) erhält man:

$$x(t) = A \sin(\omega t) + B \cos(\omega t) + \frac{F_0/k}{1-r^2} \sin(\Omega t) \quad (2.18)$$

Unter der Annahme, dass der homogene Teil der Lösung im Zeitverlauf aufgrund vorhandener Dämpfungseffekte abklingt, verbleibt lediglich die Partikulärlösung der DGL (Petersen und Werkle 2017). Diese kann wie folgt geschrieben werden:

$$x(t) = \frac{F_0/k}{1-r^2} \sin(\Omega t) \quad (2.19)$$

Hieraus folgt, dass die Amplituden der Schwingung unendlich groß werden, sobald die Anregefrequenz der Eigenfrequenz der Struktur entspricht. Dieser Zustand wird als Resonanz bezeichnet. In der Praxis wird dieser Zustand meist durch vorhandene Dämpfungseffekte oder das Erreichen der Tragfähigkeit der Struktur infolge zunehmender Amplituden verhindert (Strömmen 2014).

2.1.3.3 Gedämpfte Schwingung infolge harmonischer Anregung

Die in einer Struktur vorhandene Dämpfung führt sowohl zu einem Abklingen der freien Schwingung im Zeitverlauf als auch zu einer Begrenzung der auftretenden Schwingungsamplituden. Dies gilt insbesondere im Resonanzfall. Das Modell eines viskos gedämpften Schwingers mit einem Freiheitsgrad unter harmonischer Anregung ist in Abbildung 2.4 dargestellt.

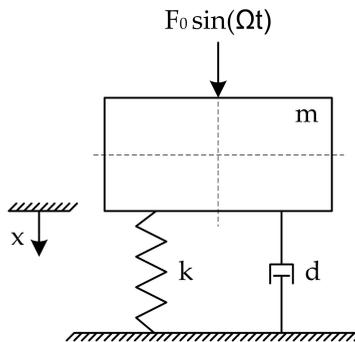


Abbildung 2.4: Modell des viskos gedämpften Schwingers mit einem Freiheitsgrad unter harmonischer Anregung in Anlehnung an (Petersen und Werkle 2017)

Im Folgenden sollen Gl. 2.10 bzw. 2.13 um den Einfluss der viskosen Dämpfung erweitert werden. Unter Annahme der Dämpfungskonstante d zur Berücksichtigung der viskosen Dämpfung ergibt sich die zu lösende Bewegungsgleichung zu:

$$m\ddot{x} + d\dot{x} + kx = F_0 \sin(\Omega t) \quad (2.20)$$

Zur Lösung der DGL kann vorausgesetzt werden, dass der homogene Teil im Zeitverlauf abklingt und ausschließlich der partikuläre Teil benötigt wird (Petersen und Werkle 2017). Es wird daher der folgende Ansatz zur Lösung der DGL verfolgt:

$$x_p(t) = \hat{x} \sin(\Omega t - \varphi) \quad (2.21)$$

Gl. 2.21 enthält die Amplitude der Schwingung \hat{x} sowie den Phasenwinkel φ . Durch Einsetzen von Gl. 2.21 in Gl. 2.20 und hier nicht dokumentiertes Umformen erhält man:

$$[(k - m\Omega^2)\hat{x}]^2 + (d\Omega\hat{x})^2 = F_0^2 \rightarrow \hat{x} = \frac{F_0}{\sqrt{(k - m\Omega^2)^2 + (d\Omega)^2}}; \quad \tan(\varphi) = \frac{d\Omega}{k - m\Omega^2} \quad (2.22)$$

Eine ausführliche Darstellung der Herleitung von Gl. 2.22 kann (Petersen und Werkle 2017) entnommen werden. Aus Gl. 2.22 folgt durch einfaches Umstellen:

$$V_1 = \left(\frac{\hat{x}_{\text{dyn}}}{\hat{x}_{\text{st}}} \right) = \frac{\hat{x}}{\hat{x}_{\text{st}}} = \frac{1}{\sqrt{[1 - (\frac{\Omega}{\omega})^2]^2 + (2\xi\frac{\Omega}{\omega})^2}}; \quad \tan(\varphi) = \frac{2\xi\frac{\Omega}{\omega}}{1 - (\frac{\Omega}{\omega})^2} \quad (2.23)$$

In Gl. 2.23 sind die Eigen(kreis)frequenz ω des EFS sowie der Dämpfungsgrad ξ enthalten. Für diese gilt:

$$\omega = \frac{k}{m} \quad \text{und} \quad \xi = \frac{d}{2m\omega} \quad (2.24)$$

Durch den Quotienten $\hat{x}/\hat{x}_{\text{st}}$ wird die dynamische Überhöhung gegenüber einer statischen Beanspruchung charakterisiert, weshalb dieser Quotient als Überhöhungs- oder Vergrößerungsfaktor V_1 bezeichnet wird. Für die oben genannten Anregungsformen lassen sich verschiedene Vergrößerungsfaktoren herleiten. Zur Visualisierung der praktischen Bedeutung des Vergrößerungsfaktors wer-

den V_1 und φ in Abbildung 2.5 über dem Frequenzverhältnis r aufgetragen. Hierbei werden verschiedene Anregungsfrequenzen bzw. Frequenzverhältnisse betrachtet. Das so erzeugte Resonanz- oder Amplitudenspektrum zeigt eine deutliche Abhängigkeit der Amplituden infolge dynamischer Anregung vom Frequenzverhältnis r sowie der vorhandenen Dämpfung (Petersen und Werkle 2017).

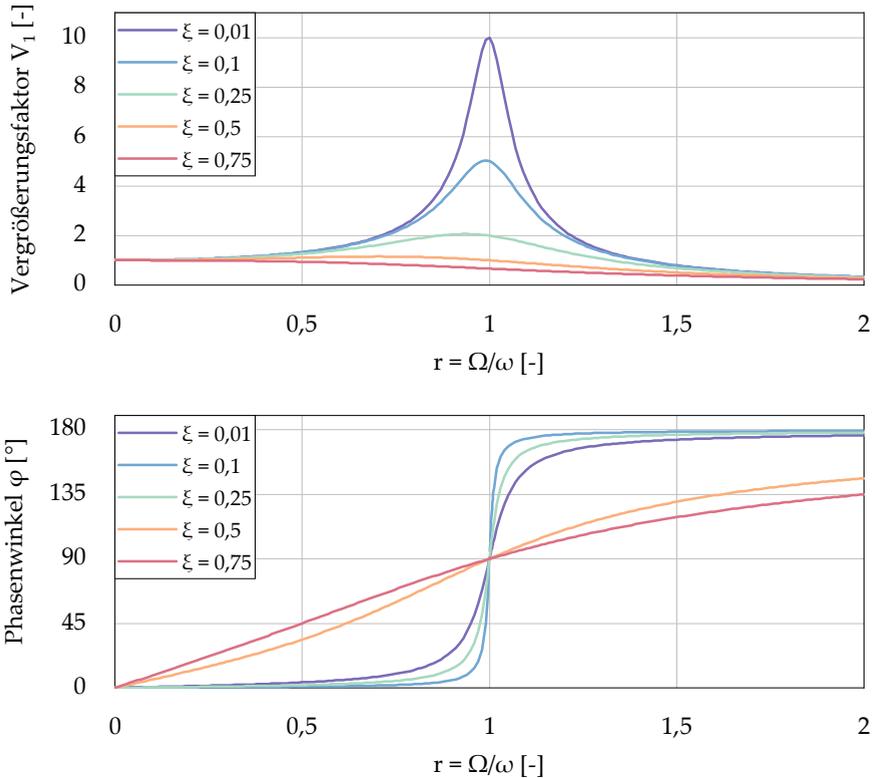


Abbildung 2.5: Vergrößerungsfaktor V_1 und zugehöriger Phasenwinkel φ der gedämpften Schwingung des EFS unter harmonischer Kraftanregung in Abhängigkeit des Frequenzverhältnis r sowie des Dämpfungsgrads ξ nach (Petersen und Werkle 2017)

Im Resonanzfall ($r = 1$) werden die Amplituden maximal und ausschließlich durch die vorhandene Dämpfung begrenzt. Unterhalb der Resonanzstelle ($r < 1$) verlaufen Anregung und Systemantwort gleichsinnig. Darüber ($r > 1$) schwingt das System gegensinnig zur Erregerkraft. Für hohe Erregerfrequenzen nähert sich der Phasenwinkel dem Wert 180° an. Aufgrund der Trägheit des Systems

werden Anregungen ab einer gewissen Frequenz nicht mehr in Schwingungen umgesetzt und das System bewegt sich in Gegenphase.

Dem Vergrößerungsfaktor, der auch als Vergrößerungsfunktion bezeichnet wird, kommt baodynamisch große Bedeutung zu. Er gibt Auskunft über das Resonanzspektrum einer Struktur, auf dessen Grundlage eine dynamische Auslegung erfolgen kann. Im Rahmen der baodynamischen Nachweisführung ist insbesondere darauf zu achten, dass keine Anregung im Bereich um die Resonanzstelle ($r \approx 1$) stattfindet, was bei gegebener Anregefrequenz durch eine geeignete Auslegung der Struktureigenschaften erreicht werden kann (Petersen und Werkle 2017). Die Bestimmung der Eigenfrequenzen und Resonanzstellen einer Struktur kann über eine Modalanalyse erfolgen (s. Abschnitt 2.1.4) (Paz und Kim 2019).

2.1.4 Erweiterung auf den Mehrfreiheitsgradschwinger

Das Schwingungsverhalten von Bauwerken lässt sich in der Praxis selten ausreichend genau durch die Bewegungsgleichung des EFS beschreiben. Durch die Berücksichtigung zusätzlicher Knotenpunkte und der zugehörigen Massen- und Steifigkeitsverteilung entsteht ein Mehrfreiheitsgradschwinger (MFS), durch den das Schwingungsverhalten einer Struktur beliebig genau abgebildet werden kann. Die Bewegungsgleichung des MFS bildet die Grundlage der in Abschnitt 4.4 dokumentierten, numerischen Untersuchung des dynamischen Verhaltens eines Aussichtsturms in Fachwerkbauweise.

Der Unterschied zwischen den Bewegungsgleichungen eines EFS bzw. MFS liegt im Wesentlichen in den mathematischen Methoden zur Aufstellung und Lösung der Bewegungsgleichung. Die Aussagen zum Schwingungsverhalten des EFS können übernommen werden. Sie müssen jedoch um die zusätzlichen Freiheitsgrade erweitert werden. Die Bewegungsgleichung wechselt dabei von einem skalaren Charakter in eine Tensorfunktion (Paz und Kim 2019). Sie besitzt folgende Form:

$$\underline{M}\ddot{\underline{x}} + \underline{D}\dot{\underline{x}} + \underline{K}\underline{x} = \underline{F}(t) \quad (2.25)$$

Die Bewegungsgleichung des MFS enthält die Massenmatrix \underline{M} , die Dämpfungsmatrix \underline{D} , die Steifigkeitsmatrix \underline{K} sowie die Vektoren der Koordinate x und der äußeren Last F (Paz und Kim 2019).

Die Lösung der DGL des Mehrfreiheitsgradschwingers kann unter Hinzunahme der zusätzlichen Freiheitsgrade sowohl für ungedämpfte als auch für gedämpfte Schwingungen analog zum Schwinger mit einem Freiheitsgrad erfolgen. Aufgrund der häufig sehr hohen Anzahl an Freiheitsgraden muss die DGL meist computergestützt gelöst werden. Eine ausführliche Herleitung der Lösung kann (Petersen und Werkle 2017) sowie (Skolaut 2018) entnommen werden.

Modalanalyse

Die Grundlage der Lösung eines baodynamischen Problems ist die Kenntnis der Eigenfrequenzen und -formen der ungedämpften Struktur. Die Eigenfrequenzen bzw. -formen eines MFS können durch eine Modalanalyse ermittelt werden, wobei die homogene Lösung der Differentialgleichung des MFS in Gl. 2.26 gelöst werden muss (Petersen und Werkle 2017).

$$\underline{M}\ddot{x} + \underline{K}x = 0 \tag{2.26}$$

Unter Verwendung des analog zum EFS aufgestellten Lösungsansatzes mit dem Amplitudenvektor \hat{x} erhält man das folgende, verallgemeinerte Eigenwertproblem:

$$(-\omega^2 \underline{M} + \underline{K})\hat{x} = 0 \tag{2.27}$$

Unter Vernachlässigung der trivialen Lösung ($\hat{x} = 0$) muss für die Koeffizientendeterminante gelten:

$$\det(-\omega^2 \underline{M} + \underline{K}) = 0 \tag{2.28}$$

Für ein System mit n Freiheitsgraden können so n Eigenwerte ω^2 mit zugehörigen Eigenvektoren \hat{x}_i ermittelt werden. Jeder Eigenfrequenz wird somit eine charakteristische Schwingungsform zugeordnet, die als Eigenform bezeichnet wird (Petersen und Werkle 2017).

Durch Überlagerung von n harmonischen Eigenformen ergibt sich die Lösung des MFS in der Form:

$$x(t) = \sum_{i=1}^n \hat{x}_i (A_i \cos(\omega_i t) + B_i \sin(\omega_i t)) \quad (2.29)$$

Die Bestimmung der Integrationskonstanten A_i und B_i kann über bekannte Anfangsbedingungen erfolgen (Skolaut 2018).

2.2 Grundlagen der Dämpfung

In der vorliegenden Arbeit steht die Analyse des Dämpfungsverhaltens geklebter Verbindungen im Fokus der Untersuchungen. Aus diesem Grund wird der Begriff der Dämpfung zunächst allgemeingültig eingeführt. Darüber hinaus beinhaltet dieser Abschnitt eine Zusammenfassung wesentlicher Dämpfungsarten sowie zugehöriger Modelle zur Beschreibung der Dämpfungseigenschaften in rheologischen Modellen.

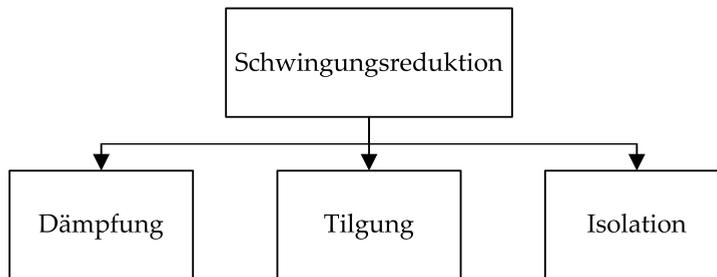


Abbildung 2.6: Übersicht konventioneller Maßnahmen zur Schwingungsreduktion nach (VDI 3830 Blatt 1)

Der Begriff der Dämpfung wird häufig fälschlicherweise synonym für alle dem Oberbegriff der Schwingungsreduzierung zugeordneten Maßnahmen verwendet. Neben der Schwingungsdämpfung können Schwingungen von Bauwerken auch durch Methoden der Schwingungsisolation sowie -tilgung begrenzt werden (vgl. Abbildung 2.6). Die Wirkungsweisen der drei genannten Methoden der Schwingungsreduktion sollen im Folgenden zunächst voneinander abgegrenzt werden.

Der Begriff der Schwingungsdämpfung beschreibt den Vorgang einer Amplitudenreduzierung bzw. -begrenzung infolge Energiedissipation. Wird ein schwingungsfähiges System einmalig ausgelenkt, bewirkt die der Dämpfung zugrundeliegende Energiedissipation eine Reduzierung der Schwingungsamplitude und damit ein Abklingen der Schwingung im Zeitverlauf. Bei einer harmonischen Anregung des Systems durch eine von außen eingeprägte Kraft, stellt sich ein stationärer Schwingungszustand ein. Hierbei stehen die eingeprägte Erregerenergie und die im System dissipierte Energie im Gleichgewicht (Petersen und Werkle 2017).

Als Schwingungstilgung wird die Begrenzung auftretender Schwingungsamplituden durch eine Kraftkompensation durch gegenphasige Schwingungen bezeichnet. Einer auftretenden Strukturschwingung wirkt die Schwingung einer Masse entgegen, die an die eigentliche Struktur gekoppelt ist und keine Dämpfungseigenschaften besitzt.

Die Entkopplung einer Struktur von der angrenzenden Umgebung wird als Schwingungsisolation bezeichnet. Es wird zwischen passiver und aktiver Schwingungsisolation unterschieden (Geisler 2010). Eine Schwingungsisolation wird dadurch erreicht, dass der Abstand der Eigenfrequenz der zu isolierenden Struktur zur Anregefrequenz durch den Einsatz isolierender Elemente vergrößert wird (Petersen und Werkle 2017).

Die Berücksichtigung von Dämpfung im Rahmen der konstruktiven Auslegung dynamisch beanspruchter Strukturen begründet sich vorrangig durch deren großen Einfluss auf die Strukturdynamik. Im Resonanzfall werden die Schwingungsamplituden allein durch das Vorhandensein von Dämpfung begrenzt. Die negativen Auswirkungen zu geringer Dämpfung bzw. die positive Beeinflussung der Strukturdynamik durch vorhandene Dämpfung lässt sich an einer Vielzahl von Beispielen aus dem Brücken- (Strogatz et al. 2005), dem Windenergieanlagen- (Nagel et al. 2019) und dem Hochhausbau (Li et al. 2011) veranschaulichen.

2.2.1 Dämpfungsarten

Die der Dämpfung zugrundeliegende Energiedissipation kann durch eine Umwandlung der Bewegungsenergie einer Struktur in eine andere Energieform, wie bspw. Wärmeenergie erfolgen. Eine weitere Möglichkeit der Energiedissipation ist die Abgabe der Energie in einen Bereich außerhalb der Struktur. Beide Möglichkeiten haben gemein, dass die Bewegungsenergie in eine für die Struktur nicht mehr nutzbare Energieform übergeht (Dieterle 1981). Die Ursachen für das Auftreten von Dämpfung sind vielfältig und man unterscheidet in der Literatur häufig zwischen inneren und äußeren Dämpfungsmechanismen (VDI 3830 Blatt 1).

Die Terminologie der Dämpfungsarten ist in der Literatur häufig nicht eindeutig und soll daher im Folgenden auf Grundlage von (VDI 3830 Blatt 1) für diese Arbeit eingeführt werden. Eine Übersicht der Arten innerer und äußerer Dämpfung entsprechend der Definitionen aus (VDI 3830 Blatt 1) ist in Abbildung 2.7 dargestellt.

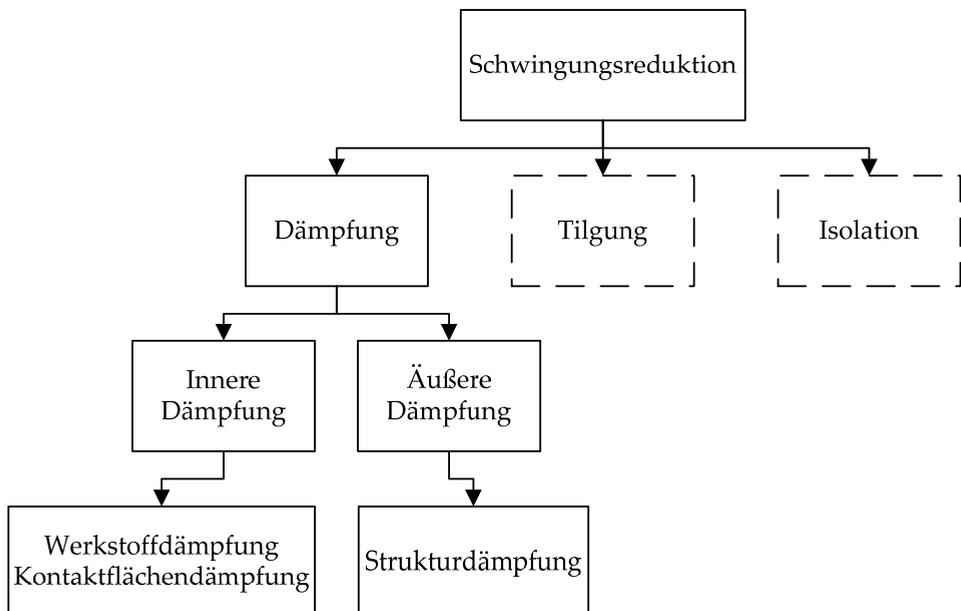


Abbildung 2.7: Übersicht der Arten innerer und äußerer Dämpfung nach (VDI 3830 Blatt 1)

Innere Dämpfung beruht im Wesentlichen auf Reibvorgängen im Inneren von Werkstoffen sowie auf der durch eine Relativbewegung von Bauteilen hervorgerufenen Kontaktflächenreibung. Sie ist daher meist mit der Entstehung von Reibungsenergie assoziiert. Die Dämpfung, die durch innere Reibungsvorgänge entsteht, wird durch die Deformation eines Werkstoffs hervorgerufen und daher als Werkstoffdämpfung bezeichnet. Die Dämpfung aufgrund von Kontaktflächenreibung, wie sie bspw. aufgrund von Schlupf oder Reibung bei geschraubten Konstruktionen auftritt, bezeichnet man als Kontaktflächendämpfung (VDI 3830 Blatt 1). Die Energiedissipation, die durch Interaktion einer Struktur mit der Umgebung auftritt, wird als äußere Dämpfung bezeichnet. Baupraktische Relevanz hat hierbei primär die Dämpfung infolge der Interaktion einer Struktur mit dem Baugrund sowie der umgebenden Luft bzw. dem umgebenden Wasser. Sie wird daher als Strukturdämpfung bezeichnet. Die umgebenden Medien wirken als viskoses Medium, deren Dämpfung durch die Bewegung der Struktur aktiviert wird (Petersen und Werkle 2017).

2.2.2 Dämpfungsmodelle

In der Mechanik existiert eine Vielzahl an Modellen zur Beschreibung des Verhaltens unterschiedlicher Werkstoffe wie bspw. Stahl, Holz, Beton oder Polymere. Ideal-elastische Werkstoffe sind durch einen linearen Zusammenhang zwischen aufgebrachtener Kraft und zugehöriger Werkstoffantwort gekennzeichnet (Petersen und Werkle 2017). Reale Werkstoffe besitzen keine ideal-elastischen Werkstoffeigenschaften. Diese Tatsache führt infolge zyklischer Anregung zu einer (nicht-)linearen Energiedissipation, die sich im Last-Verformungs-Diagramm in Form einer charakteristischen Hysterese zeigt (s. Abbildung 2.8). Die Gesamtheit der pro Lastzyklus dissipierten Energie W_d ist proportional zum Flächeninhalt der dargestellten Hysterese (Lazan 1968). Es gilt:

$$W_d = \int F(X) dX \tag{2.30}$$

Zur Beschreibung der Dämpfungseigenschaften eines Werkstoffs werden Dämpfungsmodelle verwendet, die neben den Steifigkeitseigenschaften auch die dissipativen Eigenschaften eines Werkstoffs charakterisieren. Die Dämpfungsmodelle unterscheiden sich bzgl. deren Ansatz zur Beschreibung der Form der

Hysterese (vgl. Abbildung 2.8) sowie deren Abhängigkeit von äußeren Einflüssen (Frequenz, Amplitude, Temperatur) (Jones 2001).

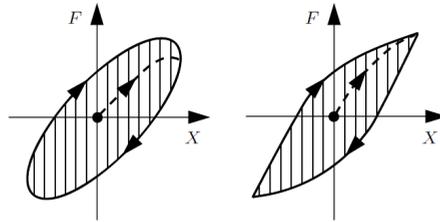


Abbildung 2.8: Charakteristische Hysteresen für Werkstoffe mit linearen (links) und nichtlinearen (rechts) Dämpfungseigenschaften in Anlehnung an (Lazan 1968)

Im Fokus dieser Arbeit steht die Untersuchung der Dämpfungseigenschaften geklebter Verbindungen. Klebstoffe besitzen neben elastischen auch viskose Werkstoffeigenschaften. Die Grundlagen der linearen Viskoelastizität werden in Abschnitt 2.4 zusammengefasst. Zur Beschreibung viskoelastischer Dämpfung können die Modelle der viskosen oder der hysteretischen Dämpfung verwendet werden (Petersen und Werkle 2017). Die beiden genannten Modelle viskoelastischer Dämpfung können nach (Petersen und Werkle 2017) wie folgt charakterisiert werden:

- **Viskose Dämpfung:** Geschwindigkeitsproportionale Dämpfung in Werkstoffen mit viskosen Eigenschaften sowie viskosen Medien
- **Hysteretische Dämpfung:** Verzerrungsproportionale Dämpfung, die in Werkstoffen infolge innerer Reibungsvorgänge auftritt

Die wesentlichsten Unterschiede beider Dämpfungsmodelle sowie deren Anwendungsgrenzen zur Beschreibung viskoelastischer Klebstoffdämpfung werden im Folgenden zusammengefasst.

2.2.2.1 Viskose Dämpfung

Das Materialverhalten ideal-elastischer Werkstoffe kann durch das Hookesche Gesetz in Gl. 2.31 beschrieben werden (Petersen und Werkle 2017).

$$\sigma = E\varepsilon \quad (2.31)$$

Der lineare Zusammenhang zwischen einer aufgetragenen Deformation (ε) und der sich daraus ergebenden Werkstoffantwort (σ) kann über das mechanische Hook-Modell links in Abbildung 2.9 visualisiert werden.

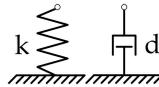


Abbildung 2.9: Hook-Modell einer elastischen Feder (links) und Newton-Modell eines mit Öl befüllten Zylinders (rechts) in Anlehnung an (Petersen und Werkle 2017)

Die dargestellte Feder besitzt eine lineare Federkennlinie mit der linear-elastischen Federsteifigkeit k . Reale Materialien sind jedoch nie ideal-elastisch und dissipieren einen Teil der eingebrachten Formänderungsenergie. Die dissipativen Eigenschaften eines Werkstoffs können über das rechts in Abbildung 2.9 dargestellte Newton-Modell eines mit Öl gefüllten Zylinders abgebildet werden, in dem sich ein perforierter Kolben bewegt (Strømmen 2014). Für den Newton-Dämpfer gilt:

$$\sigma = \eta_{\text{dyn}} \dot{\varepsilon} \quad (2.32)$$

Durch die dynamische Viskosität η_{dyn} können die dissipativen Werkstoffeigenschaften im Rahmen der Modellbildung berücksichtigt werden (viskose Dämpfung). Das Verhalten realer Werkstoffe und deren Dämpfungseigenschaften kann über rheologische Modelle abgebildet werden, die durch eine Kombination von Federn und Dämpfern charakterisiert sind. Zwei häufig verwendete, rheologische Grundmodelle sind das Maxwell- sowie das Kelvin-Voigt-Modell (Petersen und Werkle 2017).

Maxwell-Modell

Das rheologische Modell nach Maxwell in Abbildung 2.10 besteht aus einer Feder und einem Dämpfer, die in Reihe geschaltet sind.

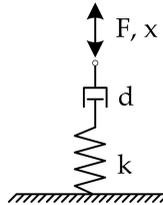


Abbildung 2.10: Maxwell-Modell in Anlehnung an (Petersen und Werkle 2017)

Infolge einer aufgetragenen, harmonischen Spannungsänderung mit der Amplitude $\hat{\sigma}$ und der Frequenz Ω der Form

$$\sigma(t) = \hat{\sigma} \sin(\Omega t) \quad (2.33)$$

ergibt sich die resultierende Modellantwort $\varepsilon(t)$ aus der Addition der Längenänderung in Feder $\varepsilon_k(t)$ und Dämpfer $\varepsilon_d(t)$. Die Modellantwort verläuft aufgrund der vorhandenen Dämpfung nicht in Phase und kann nach Aufstellen der Einzelantworten sowie deren Superposition wie folgt geschrieben werden:

$$\varepsilon(t) = \hat{\sigma} \left(\frac{1}{E} \sin(\Omega t) - \frac{1}{\eta_{\text{dyn}} \Omega} \cos(\Omega t) \right) \quad (2.34)$$

Der zugehörige Phasenwinkel φ ergibt sich aus:

$$\tan(\varphi) = \frac{E}{\eta_{\text{dyn}} \Omega} \rightarrow \varphi = \arctan\left(\frac{E}{\eta_{\text{dyn}} \Omega}\right) \quad (2.35)$$

Für sehr große dynamische Viskositäten ($\eta_{\text{dyn}} \rightarrow \infty$) reagiert der Dämpfer als starres Koppelglied. Spannung und Dehnung verlaufen in Phase, da keine Energiedissipation stattfindet. Demgegenüber wird der Phasenwinkel für sehr kleine dynamische Viskositäten ($\eta_{\text{dyn}} \rightarrow 0$) maximal. In diesem Fall ergibt sich die Modellantwort ausschließlich aus der Längenänderung des Dämpfers. In der Realität liegt die Werkstoffantwort viskoser Werkstoffe zwischen den beiden genannten Grenzfällen ($0 < \eta_{\text{dyn}} < \infty$) (Petersen und Werkle 2017).

Kelvin-Voigt-Modell

Im Unterschied zum Maxwell-Modell werden Feder und Dämpfer im in Abbildung 2.11 dargestellten Kelvin-Voigt-Modell parallelgeschaltet.

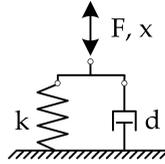


Abbildung 2.11: Kelvin-Voigt-Modell in Anlehnung an (Petersen und Werkle 2017)

Die Modellantwort entspricht aus Verträglichkeitsgründen stets sowohl der der Feder als auch der des Dämpfers (Gl. 2.36).

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_k(t) = \varepsilon_d(t) \quad (2.36)$$

Die Summe der Spannungen in Dämpfer und Feder entspricht der angelegten Gesamtspannung (Petersen und Werkle 2017). Es gilt:

$$\sigma(t) = \sigma_k(t) + \sigma_d(t) \quad (2.37)$$

Aus der Gleichgewichtsbedingung unter Verwendung der Einzelspannungen folgt:

$$E\varepsilon(t) + \eta_{\text{dyn}}\dot{\varepsilon}(t) = \hat{\sigma}\sin(\Omega t) \quad (2.38)$$

Unter Verwendung von Gl. 2.31 und Gl. 2.32 ergibt sich die Lösung der Bewegungsgleichung infolge der aus Abbildung 2.11 abgeleiteten Gleichgewichtsbedingungen zu:

$$\varepsilon(t) = \frac{\hat{\sigma}}{E\cos(\varphi) - \eta_{\text{dyn}}\Omega\sin(\varphi)} \sin(\Omega t - \varphi) \quad (2.39)$$

Der Phasenwinkel zwischen der Gesamtspannung $\sigma(t)$ und der resultierenden Systemantwort $\varepsilon(t)$ kann mit Gl. 2.40 bestimmt werden (Petersen und Werkle 2017).

$$\tan(\varphi) = \frac{\eta_{\text{dyn}}\Omega}{E} \rightarrow \varphi = \arctan\left(\frac{\eta_{\text{dyn}}\Omega}{E}\right) \quad (2.40)$$

Der Einfluss der in Reihe geschalteten Feder und Dämpfer auf die resultierende Modellantwort $\varepsilon(t)$ hängt von der Höhe der dynamischen Viskosität ab. Für $\eta_{\text{dyn}} \rightarrow 0$ wird ausschließlich die Feder aktiviert und es entsteht keine Phasenverschiebung zwischen Anregung und Antwort. Demgegenüber wird die Modellantwort für $\eta_{\text{dyn}} \rightarrow \infty$ nur durch den Dämpfer bestimmt und der Phasenwinkel erreicht sein Maximum. Im Unterschied zum Maxwell-Modell wird die Modellantwort des Kelvin-Voigt-Modells in den beiden Grenzfällen durch die steifere der beiden Komponenten der Reihenschaltung bestimmt. Zudem ist der Einfluss der dynamischen Viskosität auf den Phasenwinkel entgegengesetzt (Petersen und Werkle 2017). Aus Gl. 2.39 kann unter Berücksichtigung trigonometrischer Beziehungen die Dehnungsamplitude $\hat{\varepsilon}$ wie folgt abgeleitet werden:

$$\hat{\varepsilon} = \frac{\hat{\sigma}}{\sqrt{E^2 + (\eta_{\text{dyn}}\Omega)^2}} \quad (2.41)$$

Hieraus kann durch Einsetzen und Umformen die Spannung in Feder und Dämpfer ermittelt werden. Die Beziehung zwischen der Spannung im Dämpfer σ_d sowie der Dehnung ε kann wie folgt ausgedrückt werden:

$$\left(\frac{\sigma_d}{\Omega\eta_{\text{dyn}}\hat{\varepsilon}}\right)^2 + \left(\frac{\varepsilon}{\hat{\varepsilon}}\right)^2 = 1 \quad (2.42)$$

Gl. 2.42 beschreibt eine auf der Seite liegende Ellipse, deren Flächeninhalt der pro Lastzyklus dissipierten Energie W_d entspricht (da Silva et al. 2018). Es gilt:

$$W_d = \pi\eta_{\text{dyn}}\Omega\hat{\varepsilon}^2 \rightarrow \eta_{\text{dyn}} = \frac{W_d}{\pi\Omega\hat{\varepsilon}^2} \quad (2.43)$$

Anhand von Gl. 2.43 lässt sich die Abhängigkeit der Dämpfungsarbeit W_d von der Frequenz der Anregung Ω erkennen, die charakteristisch für das Modell der viskosen Dämpfung ist. Die dissipierte Energie wächst linear mit der Frequenz und quadratisch mit der Amplitude. Zusammen mit der elastischen Formänderungsenergie

$$W_e = \frac{E\hat{\varepsilon}^2}{2} \quad (2.44)$$

ergibt sich die spezifische Dämpfung ψ , die die pro Lastzyklus dissipierte Energie ins Verhältnis zur elastisch eingebrachten Energie setzt und daher zur Cha-

rakterisierung der Dämpfungseigenschaften herangezogen werden kann (da Silva et al. 2018). Es gilt:

$$\psi = \frac{W_d}{W_e} = 2\pi \frac{\eta_{dyn}}{E} \Omega \quad (2.45)$$

Das Verhalten von Werkstoffen, deren spezifische Dämpfung ausschließlich von der Frequenz und nicht von der Deformation abhängt, kann häufig in guter Näherung durch das lineare Modell der viskosen Dämpfung beschrieben werden. Eine von der Dehnrate abhängige, viskose Dämpfung kann anhand nichtlinearer Modelle beschrieben werden. Für die Beschreibung des Materialverhaltens in einem größeren Frequenzbereich ist die Erweiterung auf mehrparametrische Modelle notwendig (Petersen und Werkle 2017). Die resultierende Dämpfung ändert sich im gleichen Verhältnis wie die Amplitude der Anregung. Für viskoelastische Klebstoffe ist dies jedoch häufig nicht der Fall. Zudem sind die Dämpfungseigenschaften von Klebstoffen sowohl frequenz- als auch stark verzerrungsabhängig (Jones 2001). Daher kann das Modell der viskosen Dämpfung hier nur im Bereich enger Grenzen angewendet werden (Petersen und Werkle 2017).

2.2.2.2 Hysteretische Dämpfung

Das rheologische Modell der linearen hysteretischen Dämpfung in Abbildung 2.12 ist analog zum Kelvin-Voigt-Modell aufgebaut. Die aufgebrachte Spannung $\sigma(t)$ teilt sich anteilig auf Feder und Dämpfer auf.

Abbildung 2.12 zeigt zudem das elastische Arbeitsdiagramm sowie die zugehörige hysteretische Arbeitsfläche eines vollen Zyklus für eine maximale Dehnung von $\hat{\epsilon}$. Hieraus lassen sich die elastische Spannung σ_e sowie die hysteretische Spannung σ_h in allgemeiner Form ableiten (Petersen und Werkle 2017).

$$\sigma_e = E\epsilon \quad (2.46)$$

$$\sigma_h = \eta E\dot{\epsilon} \quad (2.47)$$

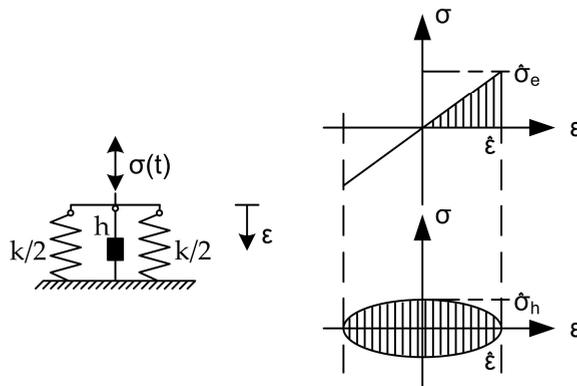


Abbildung 2.12: Hysteretisches Dämpfungsmodell in der σ - ε -Ebene in Anlehnung an (Petersen und Werkle 2017)

Die dissipierte Energie kann analog zum Kelvin-Voigt Modell aus dem Flächeninhalt der Hysterese in Abbildung 2.12 ermittelt werden. Es gilt:

$$W_d = \pi \hat{\sigma}_h \hat{\varepsilon} = \pi \eta E \hat{\varepsilon}^2 \quad (2.48)$$

Die pro Lastzyklus dissipierte Energie hängt somit nur noch quadratisch von der Verzerrung eines Werkstoffs und nicht mehr von der Frequenz der aufgebrachten Spannung ab. Die elastische Formänderungsenergie kann wie folgt geschrieben werden:

$$W_e = \frac{\hat{\sigma}_e \hat{\varepsilon}}{2} \quad (2.49)$$

Aus dem Quotient aus elastisch gespeicherter und dissipierter Energie kann der Verlustfaktor η ermittelt werden. Aus Gl. 2.48 und Gl. 2.49 folgt, dass die auftretende Dämpfung nicht vom Spannungs- oder Dehnungszustand abhängt und somit als linear bezeichnet werden kann. Es gilt:

$$\eta = \frac{\Psi}{2\pi} \quad (2.50)$$

Durch Summation aller innerhalb eines Werkstoffs vorhandenen Dämpfung erhält man die Werkstoffdämpfung (vgl. Abschnitt 2.2.1). Diese Überlegung lässt sich analog auf Bauteile oder Bauwerke übertragen (Petersen und Werkle 2017).

Nichtlineare Dämpfung

Die Spannungs-Dehnungs-Beziehung vieler Werkstoffe ist für geringe Beanspruchungen annähernd linear-elastisch. Dennoch findet eine Energiedissipation infolge einer harmonischen Spannungsänderung statt. Die Dämpfung realer viskoelastischer Werkstoffe steht dabei in direktem Zusammenhang zur Höhe der aufgebrachten Beanspruchung und ist meist nur im Bereich geringer Beanspruchungen linear. Mit zunehmender Beanspruchung wächst die dissipierte Energie progressiv mit der Spannungs- oder Dehnungsamplitude (Lazan 1953).

Nach (Lazan 1953) kann die pro Lastzyklus dissipierte Energie unter Berücksichtigung werkstoffabhängiger Konstanten b und q allgemeingültig anhand von Gl. 2.51 ermittelt werden:

$$W_d = b\hat{\sigma}^q \quad (2.51)$$

Die Parameter b und q werden als Dämpfungskonstante und Dämpfungsexponent bezeichnet und müssen experimentell ermittelt werden. Für einen Dämpfungsexponenten von $q=2$ ist die entstehende Hysterese elliptisch und die Dämpfung ist linear (Lazan 1968). Für viele Werkstoffe steigt der Dämpfungsexponent mit zunehmender Beanspruchung an ($q > 2$). Eine mit steigender Beanspruchung zunehmende Dämpfung wird als nichtlinear bezeichnet. Der vom Beanspruchungszustand abhängige Verlustfaktor ergibt sich unter Annahme eines (quasi-)elastischen Materialverhaltens zu (Lazan 1968):

$$\eta = \frac{W_d}{2\pi W_e} = \frac{bE\hat{\sigma}^{q-2}}{\pi} \quad (2.52)$$

2.3 Das Fügeverfahren Kleben

Das Fügeverfahren Kleben zählt nicht zu den im Bauwesen etablierten und somit häufig verwendeten Fügeverfahren (vgl. Abschnitt 2.3.4). Aus diesem Grund werden in diesem Abschnitt zunächst die Grundlagen des Fügeverfahrens Kleben zusammengefasst. Der Fokus liegt dabei auf der Einführung relevanter Begriffe zur Beschreibung einer Klebung sowie auf der Erläuterung der chemischen und physikalischen Vorgänge, die für die Ausbildung einer tragfähigen Klebverbindung verantwortlich sind.

2.3.1 Definition

Nach (DIN 8593-8) beschreibt der Begriff *Kleben* das Fügen gleicher oder verschiedener Werkstoffe unter Verwendung eines nicht-metallischen Klebstoffs durch Flächenhaftung (Adhäsion) und innerer Festigkeit (Kohäsion). Das Fügeverfahren Kleben kann somit den stoffschlüssigen Fügeverfahren zugeordnet werden, zu denen auch Schweißen und Löten gehören.

Die zur Beschreibung und Charakterisierung eines Klebprozesses bzw. einer Klebverbindung benötigten Begriffe sind in (DIN EN 923) normativ definiert. Im Folgenden werden die für das Verständnis dieser Arbeit wichtigsten Begriffsdefinitionen zusammengefasst.

- Klebung:** mit Klebstoff hergestellte Verbindung zwischen Fügeteilen
- Klebstoff:** nichtmetallischer Stoff, der Werkstoffe durch Oberflächenhaftung (Adhäsion) so verbinden kann, dass die Verbindung eine ausreichende innere Festigkeit (Kohäsion) besitzt
- Fügeteil:** Formteil, das mit einem anderen Formteil verklebt werden soll oder ist
- Klebfläche:** Teil einer Oberfläche, die für das Kleben mit einer anderen vorbereiteten Oberfläche vorbereitet ist, oder der Teil einer Oberfläche, der auf eine saubere Oberfläche geklebt wird
- Klebschicht:** Klebstoffschicht in einer Fügeverbindung
- Klebfuge:** der Zwischenraum zwischen zwei Klebflächen, der durch einen Klebstoff gefüllt wird

2.3.2 Chemie der Klebstoffe

Organische Klebstoffe sind aus Polymeren aufgebaut. Polymere bestehen aus einer Vielzahl an Grundbausteinen, die als Monomere bezeichnet werden. Die Monomere liegen dabei entweder als Ketten oder Netze vor. Aus diesem Grund ähnelt der chemische Aufbau von Klebstoffen dem Aufbau konventioneller Kunststoffe. Bei Klebstoffen entstehen je nach Polyreaktion und Ausgangsstoffen mehr oder weniger verkettete Polymere, die dementsprechende Eigenschaften aufweisen. Der Grad der Vernetzung der Ketten untereinander bestimmt unter anderem den Elastizitätsmodul, die Festigkeit sowie die Dämpfungseigenschaften eines Klebstoffs (da Silva et al. 2009a). Aus diesem Grund sollen die wichtigsten Polymergruppen im Folgenden erläutert werden.

Allgemein lassen sich Polymere in drei Gruppen einteilen. Mit steigendem Grad der Vernetzung der Ketten kann zwischen Thermoplasten, Elastomeren und Duroplasten unterschieden werden.

Klebstoffe können bis auf wenige Ausnahmen den Thermoplasten und Duroplasten zugeordnet werden. Die unterschiedlichen Strukturformen, in denen sich die Monomere anordnen können, sind in Abbildung 2.13 dargestellt. Duroplaste sind engmaschig vernetzte Polymere, die durch den hohen Vernetzungsgrad sehr temperatur- und lösungsmittelbeständig sind. Demgegenüber weisen Thermoplaste einen geringeren Vernetzungsgrad auf, weshalb sie eine niedrigere Temperaturbeständigkeit besitzen. Je nach Grad der Vernetzung unterscheidet man amorphe sowie teilkristalline Thermoplaste. Die thermische und chemische Beständigkeit steigt mit zunehmendem Vernetzungsgrad an (da Silva et al. 2018).

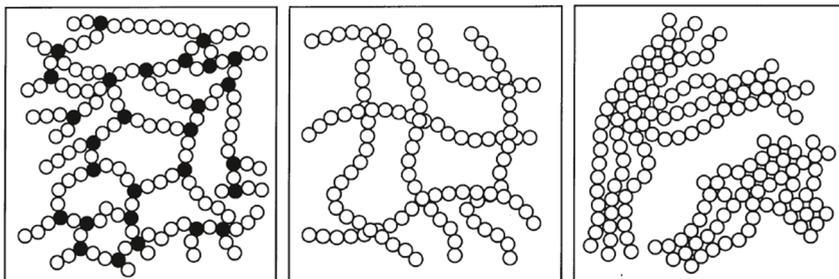


Abbildung 2.13: Aufbau von Polymerketten aus Monomeren (v.l. Duroplast, amorpher Thermoplast, teilkristalliner Thermoplast) (Habenicht 2009)

Die Vernetzung einzelner Monomere zu einem Polymer kann über verschiedene Vernetzungsprozesse geschehen. Die drei wichtigsten Verkettungsreaktionen für die Verbindung von Monomeren sind die Polymerisation, die Polyaddition sowie die Polykondensation. Bei der Polymerisation werden gleiche oder verschiedene Monomere zu Polymeren ohne Abspaltung von Nebenprodukten durch das Aufspalten von Doppelbrückenbindungen verkettet. Die Verkettung von Monomeren mit reaktiven Endgruppen unter Verwendung eines Katalysators wird als Polyaddition bezeichnet. Werden gleiche oder verschiedene Monomere unter Abspaltung eines Nebenproduktes (Wasser oder Alkohol) verkettet, spricht man von Polykondensation (da Silva et al. 2018).

2.3.3 Bindungskräfte in einer Klebverbindung

Die Festigkeit einer Klebverbindung muss als Festigkeit eines Verbundsystems aus Fügeteilen und Klebschicht sowie der dazwischenliegenden Grenzschichten verstanden werden. Ein Versagen tritt ein, sobald die Festigkeit einer an der Klebverbindung beteiligten Komponenten überschritten wird.

Die in dieser Arbeit betrachteten Fügeteile bestehen aus Baustahl der Sorte S355, dessen Festigkeit durch die Streckgrenze sowie die Zugfestigkeit nach (DIN EN 1993-1-1) definiert ist. Die Festigkeit der Klebschicht wird durch die Kohäsionsbindungen zwischen den einzelnen Klebstoffmolekülen bestimmt. Zwischen den Klebstoffmolekülen und den Fügepartikelmolekülen entsteht eine Adhäsionsverbindung, die die Festigkeit der zwischenliegenden Grenzfläche definiert (da Silva et al. 2018).

Der Begriff der *Adhäsion* beschreibt die wirkenden Kräfte zwischen Fügepartikel und Klebstoff. Diese Bindung wird auch Grenzflächenbindung genannt, da der Klebstoff nur mit der oberflächennahen Schicht des Fügepartikels reagiert. Die Ausbildung von Adhäsionskräften wird maßgeblich durch die Benetzung der Fügepartikeloberfläche durch den Klebstoff beeinflusst. Neben einer geeigneten Fügepartikeloberfläche sowie deren vollständiger Benetzung, ist das Vorliegen eines flüssigen oder niedrigviskosen Klebstoffs maßgebend für die Bildung von Adhäsionskräften verantwortlich (vgl. Abbildung 2.14) (da Silva et al. 2018).

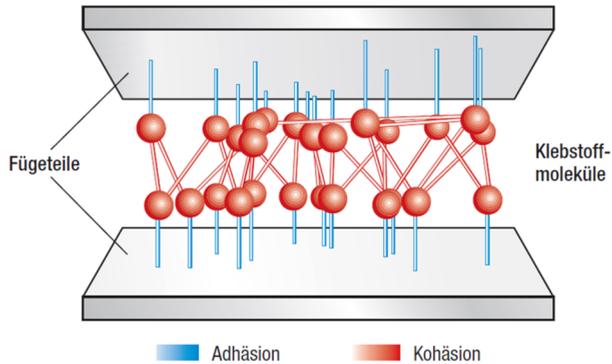


Abbildung 2.14: Adhäsions- und Kohäsionskräfte in einer Klebverbindung (Geiß et al. 2012)

Die Ausbildung von Adhäsionskräften ist von unterschiedlichen Mechanismen abhängig. Es kann zwischen *spezifischer* und *mechanischer* Adhäsion unterschieden werden (da Silva et al. 2018; Habenicht 2009):

- Die spezifische Adhäsion beruht auf der Ausbildung chemischer oder physikalischer Kräfte.
- Mechanische Adhäsionskräfte beruhen auf der Verzahnung bzw. Verklammerung des Klebstoffs in den Poren des Fügeteils und nehmen demnach mit steigender Porosität der Fügeiloberfläche zu.

Die spezifische Adhäsion entsteht vorrangig durch die Ausbildung chemischer und zwischenmolekularer Bindungen (Habenicht 2009). Zu den chemischen Bindungen zählen kovalente und heteropolare Bindungen. Chemische Bindungen weisen die höchsten Bindungsenergien auf. Zwischenmolekulare Bindungen entstehen zwischen valenzmäßig ungesättigten Molekülen und besitzen eine Reichweite von 0,1 – 1 nm. Sie können auch als van-der-Waalsche Kräfte bezeichnet werden (da Silva et al. 2018).

Der Begriff der *Kohäsion* bezeichnet die innere Festigkeit eines Klebstoffs. Kohäsionskräfte entstehen durch die Anziehungskräfte zwischen den Atomen und Molekülen innerhalb eines Klebstoffs (Geisler 2010). Hierbei unterscheidet man Hauptvalenz- und Nebervalenzbindungen. Die Kohäsionskräfte in einem Stoff sind stark werkstoff- und temperaturabhängig. Mit zunehmender Temperatur sinken die Kohäsionskräfte in einer Klebschicht, da die Molekülbeweglichkeit und damit die Verformbarkeit der gesamten Klebverbindung zunehmen. Die

Polymerstruktur hat einen Einfluss auf die wirkenden Kohäsionskräfte. Duroplaste weisen im Gegensatz zu Thermoplasten höhere Kohäsionskräfte auf. Der Grund hierfür ist der bei Duroplasten höhere Vernetzungsgrad der einzelnen Polymerketten und die damit verbundene, erhöhte Formstabilität (Domínguez et al. 2012).

2.3.4 Anwendung der Klebtechnik im Bauwesen

Das Fügeverfahren Kleben findet im Automobil- und Luftfahrzeugbau seit mehreren Jahrzehnten erfolgreich Anwendung. Im Bauwesen beschränkt sich der Einsatz struktureller Klebverbindungen auf einzelnen Anwendungen. Im konstruktiven Stahlbau finden tragende Klebverbindungen dementsprechend nur selten Anwendung. Allerdings wird in den letzten Jahren verstärkt zur Anwendung der Klebtechnik in diesem Bereich geforscht. Im Folgenden werden ausgewählte, praktische Anwendungsbeispiele der Klebtechnik im Bauwesen sowie der aktuelle Stand der Forschung zu Klebverbindungen insbesondere im Stahlbau zusammengefasst.

Ein breites Anwendungsgebiet von Klebstoffen im Bauwesen sind Sandwichelemente. Zur Herstellung von Sandwichelementen werden außenliegende Stahl- oder Aluminiumbleche durch einen Kunststoffschäum aus Polyurethan oder Polystyrol verklebt. Sandwichelementen mit einem Kern aus Mineralwolle werden ebenfalls unter Anwendung der Klebtechnik hergestellt. Die Deckschichten werden durch dünne Klebschichten mit dem Kern aus Mineralwolle verklebt. Der Schäum oder die Mineralwolle dienen gleichzeitig als Wärmedämmung (Bucak und Hagl 2006).

Zur Befestigung von Fassadenelementen können Metall-Metall-Klebverbindungen ebenfalls eingesetzt werden. Ein Beispiel hierfür ist das in Abbildung 2.15 dargestellte Guggenheim-Museum in Bilbao. Die Fassade dieses Museums besteht aus geschuppt angeordneten Titanblechen, die durch Silikonklebungen verbunden sind (Bucak und Hagl 2006).

Bei der sog. Structural Glazing-Technik werden große Glasflächen linienförmig mit einem Trägerrahmen aus Metall oder Holz verklebt (Bucak und Hagl 2006). Durch den Einsatz von Structural Glazing ist es möglich, große Glasflächen ohne

Spannungsspitzen linienförmig mit einem Trägerrahmen zu verkleben. Dieser Trägerrahmen kann mechanisch mit einer Unterkonstruktion verbunden werden, wodurch entsprechend hohe Vorfertigungsgrade ermöglicht werden. Zusätzlich wirken so hergestellte Fassaden filigraner und bieten eine größere Lichteinfallfläche, da der Rahmenanteil insgesamt geringer gehalten werden kann (Geiß et al. 2012). In Deutschland bedürfen Silikonklebstoffe zur Herstellung und Anwendung von Structural Glazing-Fassaden einer Europäischen Zulassung (ETA). Ein weiteres Einsatzgebiet der Klebtechnik ist die Herstellung von Verbundglas. Bei dessen Herstellung werden zwei oder mehr Glasscheiben durch einen Klebstoff miteinander verbunden und so deren Tragfähigkeit deutlich erhöht (Bucak und Hagl 2006).



Abbildung 2.15: Fassade des Guggenheim-Museums in Bilbao (©Guggenheim Bilbao, <https://www.guggenheim-bilbao.eus/>)

Im Holzbau wird die Klebtechnik bereits seit Jahrzehnten erfolgreich eingesetzt. Das im Holzbau vielfach verwendete Brettschichtholz wird über flächige Klebverbindungen hergestellt. Die Holzlamellen werden im Herstellungsprozess faserparallel und festigkeitsorientiert verklebt. Mit Brettschichtholz lassen sich Träger mit großer Spannweite sowie hoher Tragfähigkeit realisieren. Als Klebstoffe kommen Melaminharz-, Polyurethan- oder Phenol-Resorcinharzklebstoffe zum Einsatz (Vallée et al. 2017). Ein weiterer Holzwerkstoff, der mit Hilfe von Klebstoffen hergestellt wird, ist Furnierschichtholz. Dieser Holzwerkstoff besteht

aus Nadel- oder Laubholz. Die Fasern der einzelnen Furniere verlaufen ausschließlich oder zum Großteil parallel zur Faserrichtung des Furnierschichtholzes. Als Klebstoff wird Phenolharz verwendet (Blaß und Sandhaas 2016).

Zur Erstellung und Verstärkungen von Verbindungen im konstruktiven Holzbau können eingeklebte Gewindestangen eingesetzt werden. Diese werden in vorgebohrte Löcher eingeschoben und verklebt. Hierzu werden meist Epoxidharzklebstoffe verwendet, die eine ausreichende Toleranz gegenüber Schwankungen der Klebschichtdicke sowie eine gute Haftung auf Holzoberflächen aufweisen (Vallée et al. 2017).

Im Bereich des Stahlbaus wurden in den letzten Jahren eine Vielzahl an Forschungsarbeiten insbesondere zur statischen Tragfähigkeit geklebter Verbindungen im Stahlbau veröffentlicht.

Die Entwicklung und systematische Untersuchung einer geklebten Verbindung zwischen Stahlgussknoten und Stahlhohlprofilen für Anwendungen im konstruktiven Stahlbau ist Schwerpunkt des FOSTA-Forschungsprojekts P 884 (Ummerhofer et al. 2015). Die Tragfähigkeit der geklebten Stahlgussknoten-Rohrverbindung kann unter Berücksichtigung realistischer Imperfektionen für unterschiedliche Klebschichtdicken, Überlappungslängen, Rohrdurchmesser sowie unterschiedliche Temperaturen aufgezeigt werden (Albiez et al. 2019a; Albiez et al. 2019b).

In dem darauf aufbauenden FOSTA-Forschungsprojekt P 1123 (Albiez et al. 2021) wird eine geklebte Verbindung von Eckstielen und Streben aus Kreishohlprofilen bei Jacket-Tragstrukturen von Offshore-Windenergieanlagen entwickelt und untersucht (Albiez et al. 2022b). In Klein- und Großbauteilversuchen an geklebten Fachwerkausschnitten wird sowohl für eine quasi-statische als auch für eine Ermüdungsbeanspruchung stets die Tragfähigkeit der Stahlquerschnitte erreicht (Albiez et al. 2022a).

Ein neuartiges Klebkonzept wird im FOSTA-Forschungsprojekt P 1307 (Ummerhofer et al. 2022) untersucht. Die hybride Kleb-Grout-Verbindungstechnik, die sich insbesondere zum Fügen von Hohlprofilsteckverbindungen eignet, weist einen neuartigen, mehrschichtigen Aufbau auf. Hierbei werden anorganische mit organischen Klebschichten kombiniert, wodurch eine sehr hohe mechanische

Beanspruchbarkeit der Verbindung erreicht wird. Die hybride Kleb-Grout-Verbindung kann im Bereich von Offshore-Strukturen (z.B. OWEA), aber auch im Bereich der Verbindung von Konstruktionsbauteilen im Hoch- und Brückenbau Anwendung finden (Ummerhofer et al. 2022).

Ein weiteres Forschungsfeld im Bereich der Klebtechnik stellt die Sanierung von Bauwerken durch aufgeklebte CFK-Lamellen dar. Im Bauwesen werden aufgeklebte CFK-Lamellen derzeit überwiegend zur nachträglichen Verstärkung von Stahlbetonbauteilen eingesetzt. Im Forschungsprojekt FASS (Kasper et al. 2019) wird daher die Möglichkeit zur nachträglichen Verstärkung von ermüdungsgeschädigten Stahlbauwerken durch schlaff und vorgespannt aufgeklebte CFK-Lamellen untersucht. Dabei kann eine deutliche Erhöhung der Restlebensdauer im Vergleich zu einem unverstärkten Träger festgestellt werden (Kasper et al. 2021).

Auf Grundlage des Standes der Forschung rücken aktuelle Forschungsvorhaben zunehmend die Multifunktionalität von Klebstoffen in den Fokus der Untersuchungen. Klebstoffe auf Basis von Epoxidharzen und Polyurethanen sind derart modifizierbar, dass sie neben einer hohen Festigkeit auch gute Dämpfungseigenschaften besitzen. Durch das viskoelastische Materialverhalten des Klebstoffs entsteht eine Werkstoffdämpfung, die einen Beitrag zur Strukturdämpfung liefern kann. Die Dämpfungseigenschaften geklebter Verbindungen werden im FOSTA-Forschungsprojekt P 1272 (Damm et al. 2022a) umfassend untersucht. Die dort erarbeitete Datenbasis bildet die Grundlage dieser Arbeit.

2.4 Grundlagen der Viskoelastizität

2.4.1 Mechanisches Verhalten viskoelastischer Werkstoffe

Im Allgemeinen werden Werkstoffe anhand ihres Verformungsverhaltens unter Lasteinwirkung und den daraus abgeleiteten Werkstoffkennwerten charakterisiert. Man unterscheidet u.a. elastische, viskose sowie viskoelastische Werkstoffe. Die Unterschiede im Verhalten dieser drei Werkstoffgruppen sind in Abbildung

2.16 veranschaulicht und werden im Folgenden sowie in Abschnitt 2.4.2 detaillierter beschrieben (Jones 2001).

Abbildung 2.16 zeigt, dass eine Unterscheidung der drei zuvor genannten Werkstoffgruppen anhand der Werkstoffantwort gegenüber einer harmonischen Spannungsänderung erfolgen kann. Die betrachteten Werkstoffe weisen einen mehr oder weniger großen, zeitlichen Versatz zwischen der dynamisch aufgebrauchten Schubspannung $\tau(t)$ und der daraus resultierenden Werkstoffantwort in Form einer Deformation auf, die als Gleitung $\gamma(t)$ bezeichnet wird. Dieser zeitliche Versatz zwischen Spannung und Deformation innerhalb eines Werkstoffs wird als Phasenverschiebung bezeichnet. Die Phasenverschiebung kann über einen Phasenwinkel δ charakterisiert werden und beschreibt sowohl das generelle Materialverhalten als auch die Dämpfungseigenschaften eines Werkstoffs (Jones 2001).

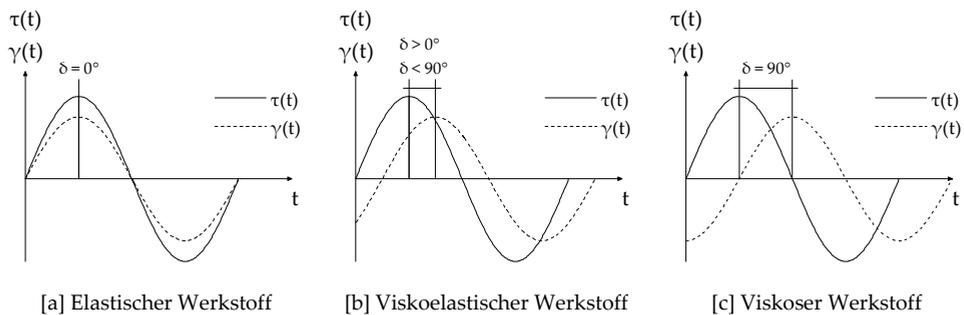


Abbildung 2.16: Phasenverschiebung zwischen einer harmonisch aufgebrauchten Spannung $\tau(t)$ und der Werkstoffantwort $\gamma(t)$ eines elastischen [a], viskoelastischen [b] und viskosen [c] Werkstoffs in Anlehnung an (Jones 2001)

Für einen ideal-elastischen Werkstoff ist die Beziehung zwischen einer Spannung und einer daraus resultierenden Deformation linear. Sie kann für reine Normalspannung σ sowie reine Schubspannung τ entsprechend nachfolgender Gleichungen ausgedrückt werden:

$$\sigma = E \times \varepsilon \quad (2.53)$$

$$\tau = G \times \gamma \quad (2.54)$$

Hierbei ist E der Elastizitätsmodul und G der Schubmodul. Die Parameter ε und γ beschreiben die Dehnung bzw. Gleitung des Werkstoffs. Die Beziehung zwischen Elastizitätsmodul E und Schubmodul G kann über Gl. 2.55 ausgedrückt werden, wobei ν die Querdehnzahl des Werkstoffs ist (Jones 2001).

$$E = 2G(1 + \nu) \quad (2.55)$$

Lineare Werkstoffe zeigen demzufolge einen linearen Zusammenhang zwischen einer Spannung und der zugehörigen Deformation. Als beispielhafter Werkstoff kann Baustahl genannt werden. Der anhand von Zugversuchen an Baustahlproben ermittelte Zusammenhang zwischen der Spannung und der Dehnung folgt zunächst einer Geraden, anhand derer der Elastizitäts- bzw. Schubmodul ermittelt werden kann. Dieser lineare Bereich wird erst für sehr große Deformationen verlassen. Dies gilt für einen Temperaturbereich deutlich unterhalb des Schmelzpunkts des Stahlwerkstoffs sowie unabhängig von der Deformationsgeschwindigkeit, sofern diese in einem stahlbautypischen Bereich liegt (Petersen und Werkle 2017). Ideal-lineare Werkstoffe zeigen daher keinen zeitlichen Versatz zwischen auftretender Spannung und der zugehörigen Werkstoffantwort. Der Phasenwinkel beträgt 0° . Demgegenüber wird die Phasenverschiebung zwischen Spannung und Deformation für ideal-viskose Werkstoffe maximal. Die Werkstoffantwort folgt der Anregung mit einem Phasenwinkel von 90° und erreicht ihr Maximum zu jedem Zeitpunkt, an dem die harmonische Anregung den Nullpunkt erreicht (vgl. Abbildung 2.16, [c]). Viskose Werkstoffe besitzen keinerlei elastische Rückstellwirkung und verbleiben in jeder, dem Werkstoff zugeführten Deformation (Jones 2001).

Werkstoffe, die sowohl elastische als auch viskose Eigenschaften besitzen, werden als viskoelastische Werkstoffe bezeichnet. Der Phasenwinkel zwischen Spannung und Deformation liegt zwischen 0° (in Phase) und 90° (außer Phase) (vgl. Abbildung 2.16, [b]) (Jones 2001). Die in dieser Arbeit untersuchten Klebstoffe sind der Gruppe der viskoelastischen Polymerwerkstoffe zuzuordnen (Frick und Stern 2017). Die Wissenschaft der Beschreibung des Verformungs- und Fließverhaltens viskoelastischer Werkstoffe wird als Rheologie bezeichnet. Polymere bestehen aus einer Vielzahl langer, mehr oder weniger ungeordneter Molekülketten, die untereinander an diskreten Punkten verbunden sind. Die Eigenschaften von Polymeren sind daher abhängig von der Anzahl, Positionie-

rung und Häufigkeit der Vernetzung der Molekülketten (Jones 2001). Hieraus folgt, dass das Verhalten viskoelastischer Werkstoffe u.a. von der Temperatur, der Belastungsgeschwindigkeit (Frequenz) sowie vom Verformungs- bzw. Beanspruchungszustand abhängen kann, wodurch dessen Beschreibung besonders komplex ist (Gutierrez-Lemini 2014).

Die Grundlagen der rheologischen Prüfung viskoelastischer Werkstoffe können (Frick und Stern 2017) entnommen werden. Die Ergebnisse einer Charakterisierung der statisch-mechanischen sowie der dynamisch-mechanischen Eigenschaften der in dieser Arbeit betrachteten Klebstoffe sind in Kapitel 3 dokumentiert.

2.4.2 Dämpfungseigenschaften viskoelastischer Werkstoffe

Die Eigenschaften viskoelastischer Werkstoffe werden durch die elastischen und viskosen Anteile am Materialverhalten definiert. Dabei bestimmen die elastischen Werkstoffanteile die Fähigkeiten eines Materials zur elastischen Energiespeicherung. Demgegenüber charakterisieren die viskosen Anteile die dissipativen Werkstoffeigenschaften. Hieraus können Aussagen zu dessen Dämpfungseigenschaften abgeleitet werden. Die Dämpfung eines Werkstoffs nimmt mit steigendem Anteil der viskosen Eigenschaften zu.

Werkstoffe mit linear-elastischem Verhalten können durch den Elastizitäts- oder Schubmodul beschrieben werden. Demgegenüber werden viskose Werkstoffe durch deren Viskosität charakterisiert. Die Beschreibung eines viskoelastischen Werkstoffs ist aufgrund der Abhängigkeit vom Verhältnis elastischer und viskoser Anteile nicht durch einen einzigen Kennwert möglich. Zur Beschreibung der Viskoelastizität eines Werkstoffs werden daher die komplexen Module \underline{E} und \underline{G} eingeführt, die sich aus einem Real- und einem Imaginärteil zusammensetzen (Jones 2001). Da in dieser Arbeit schubbeanspruchte Klebverbindungen im Fokus stehen, wird im Folgenden lediglich der komplexe Schubmodul hergeleitet. Der komplexe Elastizitätsmodul ergibt sich analog. Der komplexe Schubmodul \underline{G} kann über Gl. 2.56 im komplexen Raum wie folgt ausgedrückt werden:

$$\underline{G} = G' + iG'' \quad (2.56)$$

wobei G' als Speicher- und G'' als Verlustmodul bezeichnet werden und die elastischen sowie viskosen Werkstoffeigenschaften charakterisieren (da Silva et al. 2018). Eine Darstellung von Gl. 2.56 im komplexen Zahlenraum ist in Abbildung 2.17 angegeben.

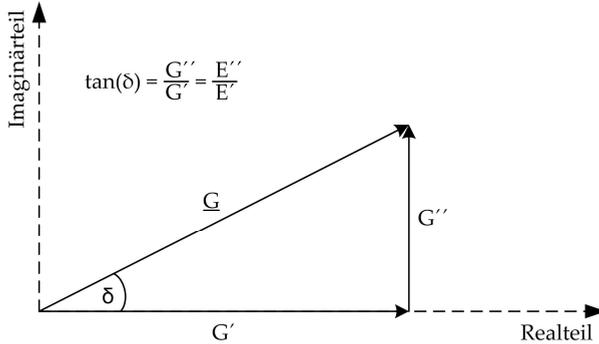


Abbildung 2.17: Darstellung von Speichermodul G' (Realteil), Verlustmodul G'' (Imaginärteil) und komplexem Modul \underline{G} im komplexen Raum nach (Habenicht 2009)

Der Speichermodul G' (Realteil) charakterisiert den Anteil einer eingebrachten Formänderungsenergie, der nach der Entlastung zurückgewonnen werden kann. Demgegenüber kennzeichnet der Verlustmodul G'' (Imaginärteil) den Anteil der eingebrachten Energie, der irreversibel in Form von Wärmeenergie dissipiert wird (Jones 2001). Zur gesamtheitlichen Betrachtung kann der in Abbildung 2.17 angegebene Quotient aus Verlust- und Speichermodul verwendet werden, der über den Tangens des Winkels δ ausgedrückt werden kann (da Silva et al. 2018). Es gilt:

$$\tan(\delta) = \frac{G''}{G'} = \frac{E''}{E'} \quad (2.57)$$

Der Tangens des Winkels δ kennzeichnet das Verhältnis der dissipierten zur gespeicherten Energie. Je größer der Tangens des Winkels δ ist, umso größer ist der Anteil der dissipierten Energie an der aufgebrauchten Formänderungsenergie. Der Tangens des Winkels δ kann daher als Kennwert zur Charakterisierung der Dämpfungseigenschaften eines Werkstoffs verwendet werden und wird in der Literatur häufig über den Verlustfaktor η ausgedrückt. Der Tangens des Winkels

δ und der Verlustfaktor besitzen dabei den in Gl. 2.58 angegebenen Zusammenhang (da Silva et al. 2018).

$$\eta = \tan(\delta) = \frac{G''}{G'} = \frac{E''}{E'} \quad (2.58)$$

Die in Gl. 2.54 und 2.55 dargestellten Zusammenhänge zwischen Spannung und Deformation linear-elastischer Werkstoffe können zur Berücksichtigung der dissipativen Eigenschaften viskoelastischer Werkstoffe unter Berücksichtigung des eingeführten Verlustfaktors wie folgt ergänzt werden:

$$\sigma = E(1 + i\eta)\varepsilon \quad (2.59)$$

$$\tau = G(1 + i\eta)\gamma \quad (2.60)$$

An dieser Stelle sei angemerkt, dass neben den mechanischen Eigenschaften auch die Dämpfungseigenschaften von der Beanspruchungsrichtung abhängen können. Die Quantifizierung dieser richtungsabhängigen Dämpfungseigenschaften muss dabei für jeden viskoelastischen Werkstoff separat erfolgen (Lazan 1968). Die experimentelle Bestimmung viskoelastischer Werkstoffkennwerte ist Gegenstand von Abschnitt 2.4.3. Im Rahmen dieser Arbeit steht die Untersuchung vorwiegend schubbeanspruchter Klebverbindungen im Fokus, weshalb sich alle folgenden Angaben der Dämpfungseigenschaften auf diese Beanspruchungsrichtung beziehen.

2.4.3 Ermittlung charakteristischer Dämpfungskennwerte

In der Literatur findet sich eine Vielzahl an Kennwerten zur Quantifizierung vorhandener Dämpfung. Diese können gleichermaßen zur Charakterisierung von Werkstoff- und Verbundproben sowie für komplette Strukturen verwendet werden. Im Folgenden werden die für diese Arbeit wichtigsten Kennwerte zusammengefasst.

In Abbildung 2.18 sind die Amplituden-Zeit-Verläufe einer erzwungenen sowie einer frei abklingenden Schwingung dargestellt. Anhand dieser einfachen Schwingungsformen kann das Vorhandensein von Dämpfung veranschaulicht werden. Im Fall der fremderregten Schwingung führt das Vorhandensein von

Dämpfung, insbesondere in der Nähe der Resonanzstelle eines Systems, zur Begrenzung der maximalen Amplitude, wodurch sich im Zeitverlauf ein stationärer Schwingungszustand einstellt. Für Systeme, die einmal aus der Ruhelage ausgelenkt werden und anschließend frei schwingen können, kann eine Abnahme der maximalen Amplitude über die Zeit beobachtet werden, was auf eine Energiedissipation im Schwingungsverlauf zurückgeführt werden kann. Eine versuchstechnische Ermittlung der Dämpfungskennwerte viskoelastischer Werkstoffe ist anhand dieser beiden Schwingungsszenarien möglich (Petersen und Werkle 2017).

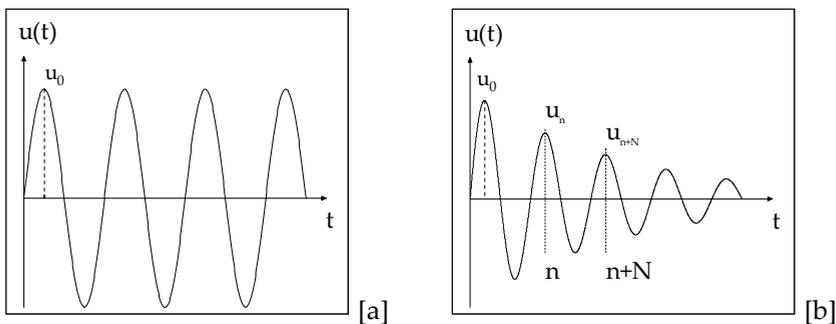


Abbildung 2.18: Amplituden-Zeit-Verläufe der erzwungenen Schwingung [a] und der frei abklingenden Schwingung [b] in Anlehnung an (da Silva et al. 2018)

Werkstoffe mit viskoelastischem Verhalten zeichnen sich vor allem durch eine zeitlich verzögerte Antwort gegenüber einer von außen eingepägten Last aus. Die Antwort eines viskoelastischen Werkstoffs gegenüber einer harmonischen Anregung ist ebenfalls harmonisch und besitzt die gleiche Frequenz. Bei einer Betrachtung im Zeitbereich folgt das Antwortsignal eines viskoelastischen Werkstoffs dem harmonischen Signal der Anregung mit einem zeitlichen Versatz (siehe Abschnitt 2.4.1). Der Phasenwinkel δ zwischen den beiden harmonischen Signalen ist dabei äquivalent zu dem in Abbildung 2.17 dargestellten Winkel zwischen Verlust- und Speichermodul im komplexen Raum. Für den Phasenwinkel δ gilt demnach ebenfalls der in Gl. 2.58 angegebene Zusammenhang. Zur Charakterisierung eines viskoelastischen Werkstoffs wird daher häufig die Größe der Phasenverschiebung bestimmt, anhand derer relevante Dämpfungskennwerte abgeleitet werden können (Jones 2001).

Eine konventionelle Methode zur Charakterisierung viskoelastischer Werkstoffe, insbesondere von Polymeren, ist die Dynamisch-Mechanische-Analysen (DMA). Im Rahmen der DMA wird das zeitabhängige Deformationsverhalten einer standardisierten Substanzprobe infolge einer harmonisch aufgebracht Kraft für unterschiedliche Frequenzen und Beanspruchungsrichtungen über einen zuvor definierten Temperaturbereich vollautomatisch bestimmt. Abbildung 2.19 zeigt ein exemplarisches Ergebnis einer DMA eines Klebstoffs.

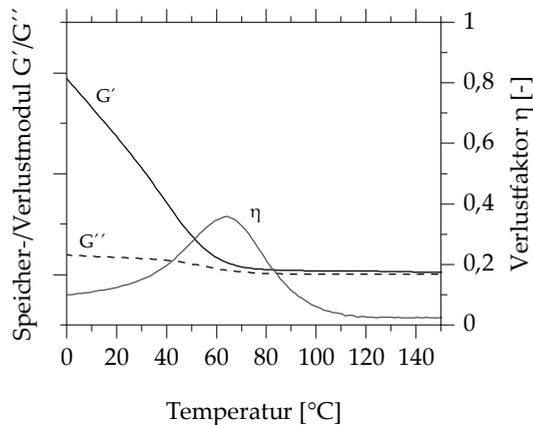


Abbildung 2.19: Exemplarische Ergebnisse einer Dynamisch-Mechanischen-Analyse (DMA); Darstellung von Speichermodul G' , Verlustmodul G'' und Verlustfaktor η in Abhängigkeit der Temperatur in [°C] nach (Damm et al. 2022a)

Der Speicher- und Verlustmodul sowie der sich daraus ergebende Verlustfaktor werden über einem definierten Temperaturspektrum aufgetragen. Hierbei zeigt sich eine ausgeprägte Temperaturabhängigkeit der mechanischen und physikalischen Eigenschaften des betrachteten Polymers. Der Grund dafür sind mikro- und makrobrownsche Bewegungen der Makromoleküle innerhalb eines Polymers, die mit höherer Temperatur zunehmen (Habenicht 2009). Durch das Auftreten makrobrownscher Bewegungen fallen mechanische Eigenschaften wie der Elastizitäts- und Schubmodul sowie der Speichermodul stark ab. Der Temperaturbereich, in dem diese Eigenschaftsänderungen auftreten, kann durch die Glasübergangstemperatur T_G charakterisiert werden. Der Werkstoff wechselt dabei vom Zustand eines Festkörpers in einen zähflüssigen Zustand. Für die Glasübergangstemperatur werden die Dämpfungseigenschaften aufgrund der

plötzlich abnehmenden Energiespeicherfähigkeit des Polymers maximal (da Silva et al. 2018).

Neben der Auswertung des Zusammenhangs zwischen Anregung und Werkstoffantwort im Zeitbereich besteht die Möglichkeit der Charakterisierung viskoelastischer Werkstoffe durch das Auftragen der harmonischen Anregung über der Werkstoffantwort. In Abbildung 2.20 ist der Zyklus einer harmonischen Anregung $\tau(t)$ über der Zeit im τ -t-Diagramm dargestellt. Die harmonische Anregung $\tau(t)$ kann über Gl. 2.61 beschrieben werden:

$$\tau(t) = \tau_0 \times \sin(\Omega t) \tag{2.61}$$

Trägt man einen Zyklus der harmonischen Anregung $\tau(t)$ über der Werkstoffantwort in Form der sich einstellenden, zeitabhängigen Verzerrung $\gamma(t)$ auf, entsteht die in Abbildung 2.21 dargestellte Ellipse im τ - γ -Diagramm (Jones 2001).

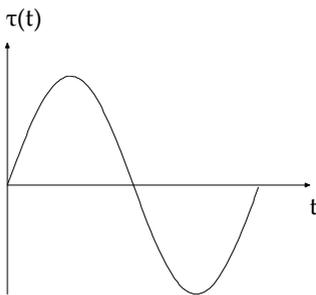


Abbildung 2.20: Zyklus einer harmonischen Anregung im τ -t-Diagramm nach (Petersen und Werkle 2017)

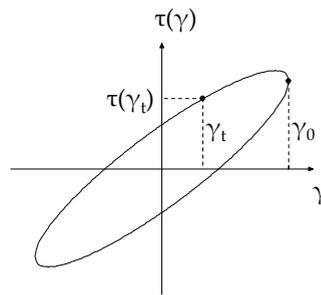


Abbildung 2.21: Hystereseschleife infolge des Auftragens einer harmonischen Anregung und der zugehörigen Werkstoffantwort im τ - γ -Diagramm nach (Petersen und Werkle 2017)

Die in Abbildung 2.21 dargestellte Ellipse wird auch als Hystereseschleife oder Hysterese bezeichnet. Sie kann durch Gl. 2.62 beschrieben werden.

$$\tau(t) = G \times \gamma(t) \pm G \times \eta \times \sqrt{\gamma_0^2 - \gamma(t)^2} \tag{2.62}$$

Hierbei sind $\tau(t)$ bzw. $\gamma(t)$ die Schubspannung bzw. Gleitung zum Zeitpunkt t . γ_0 charakterisiert die maximale Amplitude der Gleitung in jedem Zyklus. Die viskoelastischen Eigenschaften des Werkstoffs sind in Form des Schubmoduls G

sowie des Verlustfaktors η enthalten. Aus Abbildung 2.21 lassen sich die Formänderungs- bzw. Speicherenergie W_e sowie die dissipierte Energie W_d ermitteln (Jones 2001). Aus Speicherenergie sowie dissipierter Energie W_d lässt sich die spezifische Dämpfung ψ wie folgt ermitteln:

$$\psi = \frac{W_d}{W_e} = 2\pi \frac{G''}{G'} \quad (2.63)$$

Unter Berücksichtigung von Gl. 2.58 ergibt sich folgender Zusammenhang zwischen spezifischer Dämpfung, Verlustfaktor sowie Speicher- und Verlustmodul:

$$\eta = \tan(\delta) = \frac{W_d}{W_e \times 2\pi} = \frac{G''}{G'} = \frac{\psi}{2\pi} \quad (2.64)$$

Neben der fremderregten Schwingung können die Dämpfungseigenschaften viskoelastischer Werkstoffe anschaulich anhand der frei abklingenden Schwingung in Abbildung 2.18 bestimmt werden. Der Probekörper eines zu charakterisierenden Werkstoffs wird hierfür einmalig ausgelenkt und schwingt anschließend frei aus. Die aufeinanderfolgenden Schwingungsmaxima nehmen aufgrund der Energiedissipation pro Schwingungszyklus kontinuierlich ab. Hieraus lässt sich das in der Bautechnik verbreitete Dämpfungsmaß des logarithmischen Dekrements Δ anhand von Gl. 2.65 ermitteln (da Silva et al. 2018).

$$\Delta = \frac{1}{N} \ln \frac{u_n}{u_{n+N}} \quad (2.65)$$

Hierbei ist u_n die Amplitude des n-ten Zyklus und u_{n+N} die Amplitude des n+N-ten Zyklus. Das logarithmische Dekrement lässt sich für Systeme mit geringer Dämpfung ebenfalls in den Verlustfaktor η überführen. Demnach kann Gl. 2.64 wie folgt erweitert werden (Jones 2001):

$$\eta = \tan(\delta) = \frac{W_d}{W_e \times 2\pi} = \frac{G''}{G'} = \frac{\psi}{2\pi} = \frac{\Delta}{\pi} \quad (2.66)$$

Für die vorliegende Arbeit bildet der Verlustfaktor die Grundlage zur Quantifizierung der Dämpfungseigenschaften von Klebstoffen und geklebten Verbindungen. Neben der wenig komplexen Anwendung besteht ein wesentlicher Vorteil in der Möglichkeit zur Überführung in weitere, in der Strukturmechanik

gebräuchliche Kennwerte zur Quantifizierung vorhandener Dämpfung. Weiterführende Erläuterungen können Abschnitt 7.4 entnommen werden.

2.5 Dämpfungseigenschaften geklebter Verbindungen

Das Auftreten klebstoffinhärenter Dämpfung innerhalb geklebter Anschlüsse ist maßgeblich von dem innerhalb der Klebschicht wirkenden Normal- und Schubspannungszustand abhängig. Somit besteht ein direkter Zusammenhang zwischen der in eine Klebschicht eingebrachten Formänderungsenergie sowie der stattfindenden Energiedissipation. Zur Berechnung der Spannungsverteilung in normal- und schubbeanspruchten Klebschichten und der Ableitung von Versagenskriterien wurden, ausgehend von frühen Arbeiten von Volkersen (1938) und Goland und Reissner (1944), bereits eine Vielzahl analytischer Berechnungsansätze publiziert. Einfach anzuwendende Ansätze gehen für den Klebstoff sowie für die Füge­teile von einem linear-elastischen Materialverhalten aus. Komplexere Lösungsansätze implementieren entweder nichtlineares Materialverhalten des Klebstoffs oder berücksichtigen Nichtlinearitäten sowohl für den Klebstoff als auch für die Füge­teile. In diesem Zusammenhang sei auf die Veröffentlichungen von da Silva et al. hingewiesen, in denen die wesentlichsten Berechnungsansätze auf Grundlage vorhandener Literatur zusammengefasst (da Silva et al. 2009a) und verglichen werden (da Silva et al. 2009b).

Klebstoffe auf Basis von Epoxidharzen und Polyurethanen sind allerdings derart modifizierbar, dass sie neben sehr guten statischen Festigkeitseigenschaften auch gute Dämpfungseigenschaften besitzen. Durch das viskoelastische Materialverhalten des Klebstoffs entsteht materielle Dämpfung, die einen Beitrag zur Dämpfung innerhalb einer Struktur liefern kann. Zur Bestimmung der Dämpfungseigenschaften von Klebschichten und geklebter Verbindungen sind in den vergangenen Jahrzehnten einige analytische sowie numerische Berechnungsansätze entwickelt und publiziert worden, die allerdings häufig Annahmen oder Vereinfachungen beinhalten. Allgemein lässt sich hierbei zwischen Modellen zur Bestimmung der Dämpfungseigenschaften einfacher ebener Überlappklebungen sowie komplexeren Lösungen für Klebungen mit zylindrischen Klebschichten unterscheiden.

2.5.1 Ebene Überlappverbindungen

In frühen Arbeiten haben He, S. und Rao (1992a, 1992b) analytische Modelle zur Berechnung des freien Schwingungsverhaltens von zweidimensionalen, ein- und zweischnittig gefügten, beidseitig gelenkig gelagerten Balkenelementen mit Hilfe der Energiemethode und des Hamiltonschen Prinzips entwickelt. Die Klebstoffe werden dabei durch die Verwendung komplexer Module als viskoelastisches Material in die Berechnungen implementiert. Die angewendete Energiemethode der Mechanik basiert auf einer gesamtheitlichen Betrachtung des Gleichgewichtszustands aller in einem abgeschlossenen System vorhandenen Energien. Das Hamiltonsche Prinzip der theoretischen Mechanik dient der Beschreibung der Dynamik eines Systems. Es besagt, dass von allen möglichen Pfaden zwischen zwei Punkten innerhalb eines vorgegebenen Zeitintervalls die Bewegung eines Systems durch den Pfad beschrieben wird, für den das Wirkungsfunktional, also das Zeitintegral über die Differenz aus kinetischer und potentieller Energie, minimal wird (Fließbach 2009). Darauf aufbauend führen He, S. und Rao (1992c) in weiteren Arbeiten numerische Berechnungen auf Grundlage des entwickelten, analytischen Berechnungsansatzes durch. Hierbei wird der Einfluss der Klebfugengeometrie sowie variabler Materialparameter auf die Eigenmoden, die zugehörigen Eigenfrequenzen und den Verlustfaktor untersucht.

In der Arbeit von Ingole und Chatterjee (2016) wird ebenfalls das Schwingungsverhalten von zweidimensionalen, einschnittig gefügten Balkenelementen untersucht. Das Ziel ist eine optimierte Berücksichtigung des Einflusses der Klebverbindung. Im Unterschied zu den zuvor genannten Arbeiten werden die Balkenelemente hierbei als frei im Raum gelagerte Euler-Bernoulli-Balken modelliert. Der Einfluss der Klebung wird durch einen Vergleich der Ergebnisse geklebter und monolithischer Probekörper analysiert.

Kaya et al. (2004) erweitern die bestehenden Berechnungsmodelle um eine dritte Dimension. Zudem wird der Einfluss verschiedener Geometrie- und Werkstoffparameter auf die Eigenmoden sowie die Resonanzamplituden von dreidimensionalen, einseitig eingespannten, einschnittigen Überlappverbindungen anhand numerischer Berechnungen untersucht.

Die dynamische Systemantwort einseitig eingespannter, einschnittig geklebter Balkenelemente unter einer Schälbeanspruchung wird von Vaziri et al. (2004) anhand analytischer Berechnungen umfangreich untersucht. Die Balkenelemente werden hierbei als elastische Euler-Bernoulli-Balken modelliert, die durch eine viskoelastische Klebschicht verbunden sind. Neben dem Einfluss von verschiedenen Geometrie- und Werkstoffparametern wird die Abhängigkeit der Eigenfrequenzen sowie der zugehörigen Schwingungsamplituden vom Verlustfaktor des viskoelastischen Klebstoffs betrachtet. Darauf aufbauend ergänzen Vaziri et al. (2005) diese Erkenntnisse um die Betrachtungen von variablen Fehlstellen in der Klebschicht der einschnittig geklebten Balkenelemente sowie deren Einfluss auf das dynamische Antwortverhalten. Das entwickelte analytische Modell wird durch Vaziri und Nayeb-Hashemi (2006) um die Berechnung des dynamischen Verhaltens von reparierten Balken aus Verbundmaterialien mit aufgeklebten Lamellen aus glasfaserverstärktem Kunststoff erweitert. Neben den Ergebnissen theoretischer Untersuchungen werden zusätzlich die Ergebnisse experimenteller Untersuchungen zur Validierung des Berechnungsmodells vorgestellt.

Eine numerische Methode zur Berechnung des dynamischen Antwortverhaltens einseitig eingespannter, einschnittig geklebter Balkenelemente wird in (He, X. 2012) vorgestellt. Hierbei werden die Auswirkungen verschiedener Geometrieparameter auf die Eigenmoden und -frequenzen sowie der Einfluss der klebstoffinhärenten Dämpfung auf die Schwingungsamplituden untersucht. Die Ergebnisse der numerischen Berechnungen werden anhand von experimentellen Untersuchungen validiert.

Almitani und Othman (2016) entwickeln ein analytisches Modell, mit dem der Einfluss viskoelastischer Klebschichten sowie variierender Geometrieparameter auf das dynamische Antwortverhalten axial, vorwiegend schubbeanspruchter, ein- und zweischnittiger Überlappverbindungen analysiert werden kann. Die Füge-teile bestehen hierbei sowohl aus metallischen als auch aus polymeren Werkstoffen. Die Untersuchungen fokussieren sich auf den Einfluss des Verlustfaktors des Klebstoffs auf die maximalen Schwingungsamplituden sowie auf die durchschnittlichen und maximalen Schubspannungen innerhalb der untersuchten Probekörper im Bereich der Eigenfrequenzen.

Untersuchungen zum Dämpfungsverhalten geklebter, mehrschichtiger Komposit-Strukturen für den Einsatz in Luft- und Raumfahrzeugen, Transportmitteln und mechanischen Systemen sind Gegenstand von (Yaman und Şansveren 2021). Der Fokus der Untersuchungen liegt auf der Optimierung der Verklebung im Hinblick auf die Steifigkeit und das Energiedissipationsvermögen von Strukturen, die mit verschiedenen Arten von Klebverbindungen gefügt werden. Zudem wird der Einfluss verschiedener geometrischer Parameter wie Klebschichtdicke, Überlappungslänge, Anzahl der Lagen sowie der Faserorientierung auf die Eigenfrequenz sowie die Dämpfungseigenschaften sowohl numerisch als auch experimentell untersucht.

Neben der Bestimmung der Dämpfungseigenschaften in Abhängigkeit der Probekörpergeometrie und der Art der harmonischen Anregung stehen auch die Auswirkungen von Umwelteinflüssen auf die mechanischen Eigenschaften viskoelastischer Klebstoffe im Fokus der Forschung. Wang, J. et al. (2017) entwickeln und validieren vor diesem Hintergrund ein analytisches Berechnungsmodell, mit dem der Einfluss der Temperatur auf die Dämpfungseigenschaften schubbeanspruchter, hyper-viskoelastischer Klebstoffe in numerischen Berechnungen berücksichtigt werden kann.

In (Khoshmanesh et al. 2020) werden die Dämpfungseigenschaften der Klebverbindungen geklebter Rotorblätter für Windenergieanlagen zur praktischen Beurteilung der Ermüdungsschädigung herangezogen. Eine fortschreitende Schädigung der Klebschicht wird durch die Autoren mit einem Anstieg der experimentell bestimmbaren Dämpfung assoziiert. Dabei steigt die Dämpfung im Versuchsverlauf um bis zu 45 % an, bevor ein Versagen der Klebverbindung detektiert werden kann. Die Autoren zeigen zudem, dass die Änderung der Eigenfrequenz der Probekörper infolge einer fortschreitenden Schädigung weniger als 1 % beträgt.

2.5.2 Zylindrische Kreishohlprofilsteckverbindungen

Neben der Untersuchung der Dämpfungseigenschaften an ebenen Überlappverbindungen existieren ebenfalls Arbeiten zu Untersuchungen an geklebten, zylindrischen Kreishohlprofilsteckverbindungen. Rao und Zhou (1994) entwickeln in frühen Arbeiten ein analytisches Modell zur Untersuchung der Biegeschwin-

gungen von beidseitig gelagerten Kreishohlprofilsteckverbindungen. Hierbei werden die Dämpfungseigenschaften unter Annahme einer viskoelastischen Klebschicht und elastischer Füge­teile berechnet. Wie bereits in anderen Arbeiten der Autoren werden zum Herleiten des analytischen Berechnungsansatzes die Energiemethode und das Hamiltonsche Prinzip verwendet. Die Auswertung des Dämpfungseinflusses der viskoelastischen Klebschicht geschieht auf Grundlage der Analyse der Eigenfrequenzen und des berechneten Verlustfaktors des Gesamtsystems. Es werden dabei sowohl Material- als auch Geometrieparameter variiert. Darüber hinaus wird der Einfluss der Temperatur auf die Dämpfungseigenschaften der Klebschicht berücksichtigt. Die gewonnenen Erkenntnisse werden durch Zhou und Rao (1993) durch die Betrachtung einer Torsionsbelastung erweitert. Hierbei stehen neben dem sich einstellenden Spannungszustand die Dämpfungseigenschaften der Kreishohlprofilsteckverbindung und die Ableitung von Konstruktionsempfehlungen im Fokus der Untersuchungen.

In darauf aufbauenden Arbeiten untersuchen Vaziri und Nayeb-Hashemi (2002) die dynamischen Eigenschaften von Kreishohlprofilsteckverbindungen unter einer harmonischen Axialbelastung. Zur Berechnung der Spannungsverteilung in der Klebschicht und der Systemantwort gegenüber der harmonischen Anregung wird ein shear-lag-Modell verwendet. Die Füge­teile werden hierfür ebenfalls als elastisch angenommen und durch eine viskoelastische Klebschicht miteinander verbunden. Neben dem Einfluss verschiedener Geometrieparameter wird der Einfluss der Materialeigenschaften der Füge­teile und des Klebstoffs untersucht. Zusätzlich wird der Einfluss von Fehlstellen in der Klebschicht auf die Spannungsverteilung in Richtung der Überlapplänge sowie auf die Eigenfrequenzen analysiert. Diese Untersuchungen werden durch Vaziri und Nayeb-Hashemi (2005) durch die Betrachtung einer harmonischen Anregung durch eine Torsionsbelastung erweitert.

Die computergestützte Optimierung der Knotengeometrie zur Maximierung der Eigenfrequenzen bei gleichzeitiger Minimierung der modalen Dehnungsenergie für die jeweilige Mode ist das Ziel der Untersuchungen von Gunes et al. (2011). Die untersuchten Füge­teile bestehen aus abgestuften Rohren mit einem über die Füge­teildicke variierenden, schichtförmigen Aufbau aus Keramik bzw. Nickel. Die optimalen Konstruktionsrandbedingungen werden unter Variation von

Geometrie- und Materialparametern mit Hilfe von neuronalen Netzen und genetischen Algorithmen ermittelt.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass sich die vorgestellten Arbeiten primär auf die Erarbeitung analytischer Modelle zur Beschreibung der Dämpfungseigenschaften weniger komplexer ebener Überlappklebungen sowie zylindrischer Kreishohlprofilsteckverbindungen in einem für das Bauwesen weniger relevanten Maßstab beschränken. Die analytischen Modelle werden häufig zusätzlich durch numerische Berechnungen bzw. experimentelle Untersuchungen validiert. Die Implementierung geklebter Anschlüsse in eine praxisrelevante Konstruktion und die Analyse deren Auswirkungen auf das dynamische Verhalten der betrachteten Konstruktion stellen Vervaeke et al. (2019) anhand der systematischen Untersuchung einer Fräsmaschine vor. Zunächst werden die während dem Produktionsprozess entstehenden Vibrationen im Rahmen experimenteller und numerischer Untersuchungen analysiert. Darauf aufbauend werden Möglichkeiten zur Optimierung der globalen Struktur durch die Anordnung geklebter Knotenpunkte anhand experimenteller und numerischer Untersuchungen von Kleinbauteilen diskutiert. Die Validierung der Ergebnisse findet abschließend an einer Konstruktion statt, die durch die Anordnung geklebter Anschlüsse optimiert wird. In Rao (2003) kann der positive Einfluss viskoelastischer Materialien auf die Innenraumakustik von Automobilen und Flugzeugen im Realmaßstab experimentell aufgezeigt werden.

Die bisherigen Erkenntnisse, die sich primär auf den Maschinen- und Automobilbau beschränken, wurden bislang allerdings nicht umfassend auf Verbindungen in einem für den Stahlbau relevanten Maßstab (Bauteilmaßstab) sowie realitätsnahe Stahlbaustrukturen mit einem oder mehreren geklebten Anschlüssen erweitert. Bislang ist noch weitgehend ungeklärt, wie dynamisch beanspruchte Stahlbaukonstruktionen mit Klebverbindungen optimiert werden können, um die vorteilhaften Dämpfungseigenschaften viskoelastischer Klebstoffe bei der dynamischen Abstimmung zu nutzen. Hierbei ist speziell die Auswirkung lokal wirkender Dämpfung bei Tragstrukturen mit mehreren geklebten Anschlüssen von Interesse. Diese Fragestellungen, die die Grundlage der numerischen Untersuchungen in Kapitel 4 bilden, umfassen neben der konstruktiven Auslegung geklebter Anschlüsse auch deren Auswirkung sowie die damit verbundene

lokale Knotendämpfung auf das statische sowie das dynamische Strukturverhalten.

Die in der Literatur vorhandene, experimentelle Datengrundlage umfasst bislang fast ausschließlich Ergebnisse von Versuche an technologischen Probekörpern im Kleinbauteilmaßstab. Insbesondere die betrachteten Klebschichtabmessungen sowie die untersuchten Beanspruchungsrandbedingungen sind dabei für das Bauwesen von untergeordneter Relevanz (vgl. Abschnitt 3.2). Der bisherige Kenntnisstand zu den Dämpfungseigenschaften von Klebverbindungen wird somit durch die in Kapitel 7 vorgestellten experimentellen Untersuchungen an geklebten Verbindungen in einem für den Stahlbau relevanten Maßstab umfangreich erweitert. Hervorzuheben sind dabei insbesondere die betrachteten Klebschichtabmessungen sowie die untersuchten Beanspruchungsrandbedingungen, die die Anforderungen des Bauwesens berücksichtigen. Ergänzend hierzu werden bisher veröffentlichte, komplexe analytische Lösungen zur Bestimmung der Dämpfungseigenschaften von Klebverbindungen in Kapitel 8 um eine Methode zur Identifikation und Beschreibung funktionaler Zusammenhänge einer experimentellen Datengrundlage ergänzt. Gegenüber bekannten analytischen Modellen bietet die entwickelte Methode den Vorteil einer deutlich einfacheren, praktischen Anwendung. Die entwickelte Methode kann zukünftig die Grundlage zur Prognose der Dämpfungseigenschaften geklebter Verbindungen im Rahmen der praktischen Auslegung von dynamisch beanspruchten Stahlbaustrukturen bilden.

2.6 Dämpfungsmaßnahmen im Bauwesen

2.6.1 Schwingungsphänomene von Baukonstruktionen

Die häufigste Ursache für dynamische Anregungen von Bauwerken, insbesondere in Küstennähe sowie in Regionen mit häufigen Starkwindereignissen, sind böige Winde. Diese bewirken böen- oder wirbelinduzierte Schwingungen. Böeninduzierte Schwingungen treten in Richtung der Hauptströmung des Windes auf und werden durch Windturbulenzen ausgelöst. Demgegenüber verlaufen wirbelinduzierte Schwingungen orthogonal zur Windhaupttrichtung und entstehen

meist durch Wirbel, die sich von der angeströmten Struktur ablösen. Hierbei kann sich eine sog. Karmansche Wirbelstraße ausbilden, die durch die Intensität sowie die Ablösefrequenz der Wirbel charakterisiert werden kann.

Neben böen- und wirbelinduzierten Schwingungen können sich infolge von Starkwindereignissen bewegungsinduzierte Schwingungen ausbilden, die meist bei schlanken Bauteilen wie Seilen, Stangen und Stäben auftreten. Von besonderer Bedeutung ist in diesem Zusammenhang das sog. Galloping, das bei bestimmten Querschnittsformen durch eine schräge Anströmung des Querschnitts ausgelöst werden kann. Hierdurch werden Kräfte aktiviert, die die Struktur weiter anregen und die auftretenden Schwingungen verstärken. Die anfängliche Anregung geht dabei häufig von Turbulenzen oder Wirbelinduzierungen aus und kann somit durch eine Karmansche Wirbelstraße hervorgerufen werden (Petersen und Werkle 2017).

Ein Schwingungsphänomen, welches bei der Konstruktion und Auslegung von Fußgängerbrücken beachtet werden muss, sind personeninduzierte Vertikal- oder Horizontalschwingungen. Diese werden vom Menschen häufig als störend empfunden. Dies gilt insbesondere dann, wenn die Nutzer passiv betroffen sind, d.h. nicht aktiv als Fußgänger die schwingungsrelevanten Impulse erzeugen. Dieses Schwingungsphänomen wird durch das Betreten der Brücke durch Menschen ausgelöst, deren Schrittfrequenz der Eigenfrequenz der Brücke entspricht (Petersen und Werkle 2017). Im Rahmen der Planung sind Brücken mit einer Eigenfrequenz bis zu 5 Hz auf personeninduzierte Schwingungen zur Sicherstellung der Gebrauchstauglichkeit zu untersuchen (Petersen 2013).

Weitere Ursachen für dynamische Anregung können sich aus Nutzung und Betrieb einer Konstruktion ergeben. Insbesondere Brücken und Aussichtstürme können durch Fahrzeug- bzw. Personenverkehr dynamisch angeregt werden (Strogatz et al. 2005). Konstruktionen des Maschinen- und Anlagenbaus können die beim Anlagenbetrieb auftretenden Vibrationen nur bis zu einem, von der erforderlichen Produktionsgenauigkeit abhängigen Maß tolerieren. Daher werden derzeit Produktions- und Fräsmaschinen meist deutlich unter der maximal möglichen Produktionsgeschwindigkeit betrieben (Vervaeke et al. 2019).

Zur Vermeidung oder Reduzierung auftretender Schwingungsamplituden können Elemente zur Schwingungsisolation oder Schwingungsdämpfer einge-

setzt werden. Im Fokus dieser Arbeit steht die Schwingungsdämpfung durch viskoelastische Klebstoffe und damit hergestellte Verbindungen. Um eine Einordnung dieser Dämpfungsform in den Stand der Technik zu ermöglichen, werden im Folgenden im Bauwesen eingesetzte Dämpfungsmaßnahmen zusammengefasst.

2.6.2 Passive Dämpfungsmaßnahmen

Im Bauwesen werden überwiegend schwingungstilgende oder schwingungsdämpfende Elemente zur Schwingungsreduktion eingesetzt. Durch den Einsatz isolierender Elemente, wie Federn oder Elastomerlager, wird die Kopplung zwischen einer Struktur und der Umgebung gezielt so beeinflusst, dass Anrege- und Eigenfrequenz möglichst weit auseinanderliegen. Demgegenüber führen Schwingungsdämpfer zu einer Reduzierung der Schwingungsamplitude durch Energiedissipation. Im Allgemeinen unterscheidet man hierbei aktive und passive Dämpfungsmaßnahmen, die entsprechend ihrer Wirkungsweise charakterisiert werden. Aktive Dämpfungssysteme können direkt aktiviert sowie gesteuert werden und sind daher auf das Vorhandensein externer Energiequellen angewiesen. Demgegenüber werden passive Dämpfungssysteme ausschließlich durch die Bewegung der zu dämpfenden Struktur aktiviert und können nicht direkt gesteuert werden (Petersen und Werkle 2017). Die Dämpfung einer Struktur durch geklebte Anschlüsse kann den passiven Dämpfungsmaßnahmen zugeordnet werden.

Schwingungstilger und Tuned-Mass-Damper

Eine im Maschinenbau entwickelte und inzwischen auch im Bauwesen eingesetzte Maßnahme zur Reduzierung von Strukturschwingungen sind Schwingungstilger. Dabei wird an der zu dämpfenden Struktur eine Zusatzmasse angebracht, die selbst keine Dämpfungseigenschaften besitzt. Die Zusatzmasse wird über eine Feder an das zu dämpfende Tragwerk gekoppelt. Schwingungstilger eignen sich insbesondere zur Schwingungsreduzierung von schlanken Bauwerken, die zu stationären Querschwingungen infolge Windanregung (Karmansche Wirbelstraße) neigen. Dies gilt insbesondere für Turmstrukturen und Brücken-

bauwerke. Die Amplitudenreduktion wird durch gegenläufige Schwingungen der Struktur und der Zusatzmasse erreicht. Schwingungstilger können nur für eine definierte Anregfrequenz ausgelegt werden. Neben den zusätzlichen Kosten zur Anbringung der erforderlichen Zusatzmassen ist vor allem die hohe Sensitivität gegenüber Änderungen der Anregfrequenz als Nachteil von Schwingungstilgern zu nennen (Bachmann 2004).

Aufgrund der zuvor genannten Nachteile werden Schwingungstilger häufig mit dissipativen Elementen gekoppelt, wodurch Schwingungsdämpfer entstehen. Schwingungsdämpfer bieten die Möglichkeit einer breitbandigeren Auslegung und können daher sinnvoll bei Konstruktionen eingesetzt werden, die mit variierenden Frequenzen angeregt werden (Friedl und Mangerig 2020). Sie werden aufgrund ihrer gegenüber reinen Schwingungstilgern optimierten Dämpfungseigenschaften auch als Tuned-Mass-Damper (TMD) bezeichnet.

Der Vorteil von Schwingungsdämpfern liegt in der Möglichkeit der kompakten Anordnung der Zusatzmasse, durch die die modale Masse im Schwingungszustand gezielt beeinflusst werden kann. Zudem können Schwingungsdämpfer weitestgehend unabhängig von der vorliegenden Art der Anregung eingesetzt werden. Die Möglichkeit des nachträglichen Einbaus stellt einen weiteren wesentlichen Vorteil von Schwingungsdämpfern dar (Jia 2017).

Zur Auslegung der Feder- und Dämpfercharakteristik eines TMDs wird die Struktur häufig zunächst in einen Einfreiheitsgradschwinger mit äquivalenten, kinetischen Systemeigenschaften überführt. Der Einfreiheitsgradschwinger besitzt somit eine kinetisch äquivalente Masse. Die Zusatzmasse wird aufgrund der höchsten Wirksamkeit stets an den Punkt der maximalen Schwingungsamplitude gekoppelt (Jia 2017).

Ein bekanntes Beispiel für den gezielten Einsatz von Schwingungstilgern ist die im Jahr 2000 fertiggestellte Millennium Bridge in London. Die ursprüngliche Brückenkonstruktion wurde durch den Personenverkehr im Bereich der Eigenfrequenz angeregt, wodurch Schwingungsamplituden von mehr als 100 mm auftraten. Zur Reduzierung der Schwingungen der Brücke wurden auf Grundlage durchgeführter Messungen und Berechnungen nachträglich horizontal sowie vertikal wirkende Tilgermassen dimensioniert und an der Brückenkonstruktion angebracht (Strogatz et al. 2005). In Abbildung 2.22 ist die Einbausituation der

Schwingungstilger zur Reduzierung der Vertikalbewegung der Brückenstruktur dargestellt.



Abbildung 2.22: Einbausituation von Tuned-Mass-Dampfern (TMD) zur Reduzierung der vertikalen Schwingungsamplituden der Millennium Bridge; Anbringung von zwei TMDs an jedem Querträger an der Unterseite des Brückendecks (© GERB GmbH & Co. KG)

Der in Abbildung 2.23 dargestellte TK Elevator Testturm Fa. ThyssenKrupp in Rottweil ist eine speziell für den Testbetrieb von Aufzügen konzipierte, 246 m hohe, schlanke Turmstruktur, die durch einen Schwingungstilger gedämpft wird. Der Turm wurde in Stahlbetonbauweise mit einer Stoffhülle aus Glasfasergewebe errichtet. Der passiv wirkende Schwingungstilger ist in einer Höhe von 193 m angebracht und soll insbesondere wirbelerregte Querschwingungen dämpfen. Neben einer passiven Nutzung des Schwingungstilgers kann die Tilgermasse zur aktiven Anregung der Turmstruktur genutzt werden, wodurch ein Testbetrieb der Aufzüge unter verschiedenen Spektren der Anregung ermöglicht wird. Die aktive Anregung der Turmstruktur über die Tilgermasse wird über elektromagnetische Linearmotoren gesteuert (ThyssenKrupp Elevator (CENE) GmbH 2015).

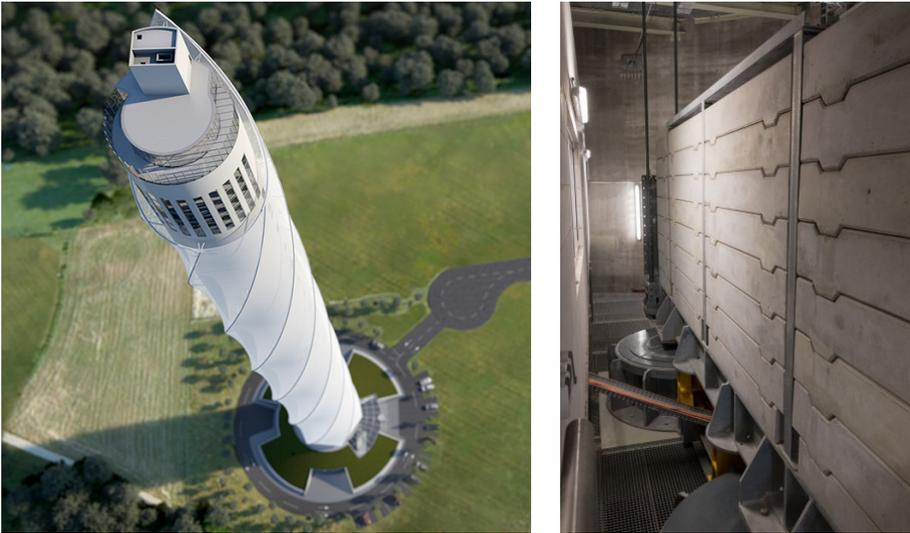


Abbildung 2.23: TK Elevator Testturm der Fa. ThyssenKrupp (links, ©ThyssenKrupp) und im Gebäudeinneren installierte Tilgermasse zur Dämpfung wirbelerregter Querschwingungen (rechts, ©Werner Pluta/Golem.de)

Schwingungsdämpfer werden darüber hinaus zur gezielten Reduktion der Schwingungsamplituden von Hochhäusern eingesetzt. Als Beispiel kann der im Jahr 2003 fertiggestellte Taipei 101 Tower in Taipei, Taiwan (s. Abbildung 2.24, links) genannt werden. Die Dämpfung des Taipei 101 Tower ist insbesondere vor dem Hintergrund der regional häufig auftretenden Extremwindereignisse sowie Erdbeben relevant (Li et al. 2011). Die Eigenschwingung des Gebäudes wird durch eine im Gebäudeinneren aufgehängene Stahlkugel mit einem Gewicht von 660 t gedämpft. Die Stahlkugel hängt frei an 12 m langen Pendeln. Die Schwingungen der Stahlkugel werden zudem durch in Umfangsrichtung an der Stahlkugel angebrachte Dämpfungselemente gedämpft. Das Konstruktionsprinzip des Schwingungsdämpfers ist rechts in Abbildung 2.24 dargestellt.

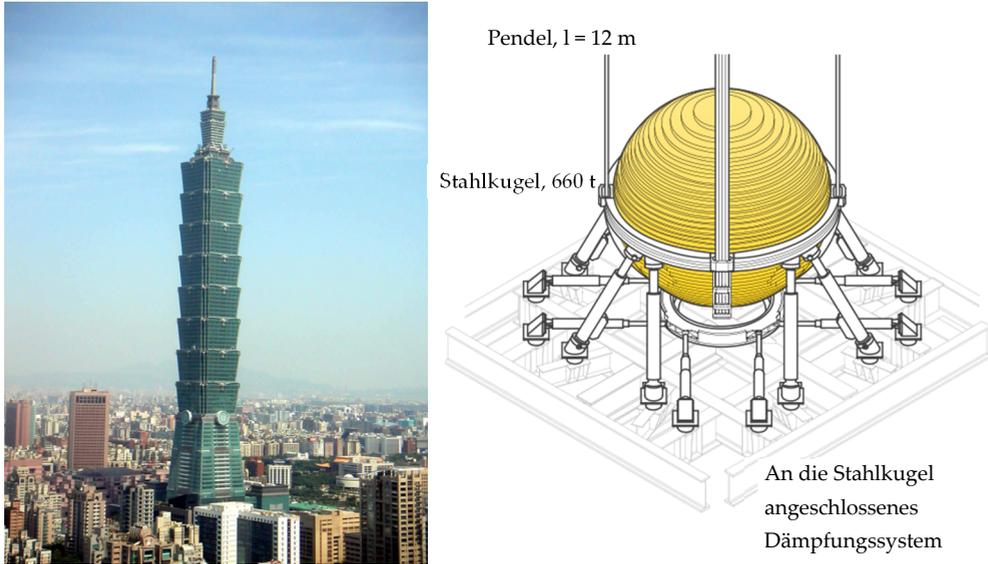


Abbildung 2.24: Ansicht Taipei Tower 101 (links, (Poon et al. 2004)) und Konstruktionsprinzip des Schwingungsdämpfers als abgehängte Stahlkugel mit angeschlossenen Dämpfungselementen (rechts, © Taipei 101 Ltd)

Reibungsdämpfer

Bauwerkschwingungen können neben Schwingungstilgern oder TMDs auch über eine reine Schwingungsdämpfung reduziert werden. Die Dämpfung eines Bauwerks wird in diesem Fall über eine im Inneren der Struktur stattfindende Energiedissipation erreicht. In diesem Zusammenhang ist zunächst die Energiedissipation über die Erzeugung von Reibung und der damit verbundenen Reibungsenergie, die dem System in Form von Wärme entzogen wird, zu nennen. Hierzu können sog. Reibungsdämpfer eingesetzt werden. Die Energiedissipation in Reibungsdämpfern findet durch das Aneinanderreiben von zwei oder mehr Komponenten statt. Das Prinzip der Energiedissipation in Form von Reibungswärme findet bereits in unterschiedlichen Branchen und Konstruktionen wie z.B. bei Scheibenbremsen von Fahrrädern oder Fahrzeugen Anwendung. In Stahlbaustrukturen tritt Reibungsdämpfung bspw. in geschraubten Fügstellen auf. Die Energiedissipation wird dabei maßgeblich durch die Verteilung der Pressung zwischen den durch Schrauben verbundenen Bauteilen sowie der damit verbundenen Reibung bestimmt. Die Dämpfung, die in einem einzelnen An-

schluss generiert wird, kann demnach stark variieren. Die Erfassung des Einflusses der lokal wirkenden Fügstellendämpfung erfordert somit einen hohen Berechnungsaufwand (Geisler 2010). Darüber hinaus ist es möglich, statisch nicht erforderliche Reibungsdämpfer in Strukturen zu integrieren, um deren Dämpfung zu erhöhen.

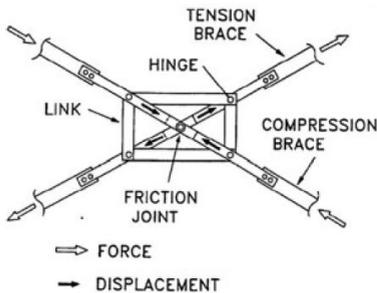


Abbildung 2.25: Konstruktionsprinzip eines Reibungsdämpfers nach Pall; Einbausituation in einem Aussteifungsverband (Jia 2017)



Abbildung 2.26: Anordnung eines Reibungsdämpfers nach Pall in einem Aussteifungsverband des 14-story tower in Seattle (Pall et al. 2006)

Im Bauwesen können Reibungsdämpfer bspw. in axial belasteten Aussteifungsverbänden eingesetzt werden. Ein Beispiel hierfür ist der durch Pall entwickelte Reibungsdämpfer, der aus insgesamt vier Zug- und Druckstäben besteht, die x-förmig angeordnet und im Mittelpunkt verbunden werden. Die Verbindung wird über Stahlplatten hergestellt, die mit hochfesten Schrauben verspannt werden. Das Konstruktionsprinzip eines Reibungsdämpfers nach Pall unter Angabe der wirkenden Kräfte ist in Abbildung 2.25 dargestellt. In Abbildung 2.26 ist die praktische Anwendung eines Reibungsdämpfers nach Pall in einem Aussteifungsverband des 14-story tower in Seattle abgebildet. Bei diesem Hochhaus wurden nachträglich insgesamt 12 Reibungsdämpfer in vorhandenen Aussteifungsverbänden zur kostengünstigen, dynamischen Optimierung der Tragstruktur integriert (Pall et al. 2006).

Reibungsdämpfer können zusätzlich zur Anordnung im Mittelpunkt von Aussteifungsverbänden so konstruiert werden, dass Sie am Endpunkt jeder normalkraftbelasteten Strebe angeordnet werden können. Neben einem großen Einsatz-

gebiet liegen die Vorteile von Reibungsdämpfern gegenüber anderen Dämpfungssystemen vor allem in den zunächst niedrigen Produktions- und Einbaukosten. Zudem sind die Dämpfungseigenschaften eines Reibungsdämpfers nahezu unabhängig von den Umgebungsbedingungen sowie der Beanspruchungsgeschwindigkeit. Allerdings besitzen Reibungsdämpfer keinen Rückstellmechanismus, weshalb sie nicht für jede Anregungsform geeignet sind. Darüber hinaus reagieren Reibungsdämpfer vergleichsweise träge auf plötzliche auftretende, hochfrequente Anregungen. Die für die Aktivierung der Dämpfung erforderliche Verschiebung innerhalb des Reibungsdämpfers sinkt dabei mit zunehmender Anregefrequenz, weshalb hochfrequente Impulse direkt an die Struktur weitergegeben werden. Aufgrund der planmäßig auftretenden Reibung und dem damit zusammenhängenden Verschleiß der Reibkomponenten sind kürzere Wartungsintervalle der Reibdämpfer erforderlich, die mit hohen Folgekosten verbunden sein können. Hierbei muss zudem stets die vorhandene Reibungskraft bestimmt werden, die im Laufe der Zeit durch Relaxationsprozesse abnehmen kann (Jia 2017).

Viskose Dämpfer

Eine weitere Möglichkeit zur Dämpfung von Schwingungen sind viskose Dämpfer, die bisher in Konstruktionen der Automobil- sowie der Luft- und Raumfahrtindustrie, dem Maschinenbau und zunehmend auch des Stahlbaus eingesetzt werden. Die Energiedissipation in viskosen Dämpfern wird über die Durchströmung von viskosen Flüssigkeiten (bspw. Silikon oder hochviskose Öle) durch die im Dämpfer befindlichen Öffnungen erreicht. Die hierfür erforderliche Kraft wird über einen Stempel aufgebracht, der eine Lochscheibe durch die im Dämpfer eingeschlossene Flüssigkeit bewegt. Das Konstruktionsprinzip eines viskosen Dämpfers ist in Abbildung 2.27 dargestellt. Während des Durchströmens der Flüssigkeit durch die Öffnungen der Lochscheibe entsteht Reibungsenergie, die an die Umgebung abgegeben und dem System entzogen wird (Jia 2017).

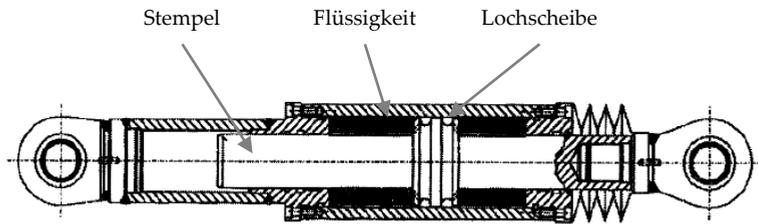


Abbildung 2.27: Querschnittsdarstellung eines viskosen Dämpfers in Anlehnung an (Petersen und Werkle 2017)

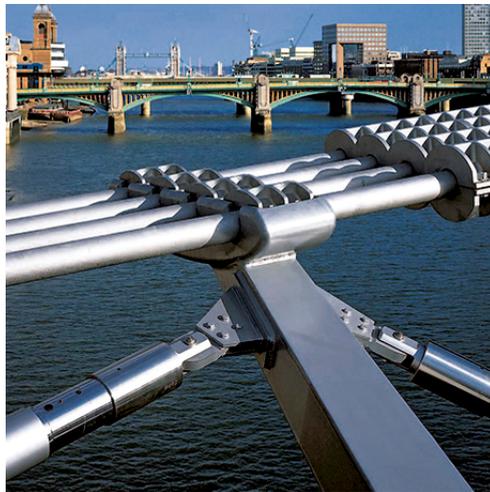


Abbildung 2.28: Anordnung von viskosen Dämpfern im Bereich des Anschlusses der Kabel über auskragende Kabelklemmen an das Brückentragwerk der Millennium Bridge in London (© Nigel Young)

In Baukonstruktionen werden viskose Dämpfer typischerweise in diagonalen Aussteifungsverbänden oder unterhalb von Bodenplatten im Bereich der Gründungsstruktur angeordnet. Bei der in Abbildung 2.22 dargestellten Millennium Bridge wurden viskose Dämpfer bereits während des Neubaus der Brücke vorgesehen. Die an beiden Seiten der Brücke verlaufenden Kabel sind über auskragende Hohlprofile mit am Ende befestigten Kabelklemmen mit dem eigentlichen Brückentragwerk verbunden.

Die Horizontalschwingungen der Hohlprofile werden dabei beidseitig über viskose Dämpfer begrenzt (Jia 2017). Die Detailausbildung im Bereich des Anschlusses der Kabel an das Brückentragwerk sowie die angeschlossenen viskosen Dämpfer sind in Abbildung 2.28 dargestellt.

Viskoelastische Dämpfer

Anstelle viskoser Dämpfer, die aufgrund ihrer ausschließlich viskosen Dämpfercharakteristik keine Rückstellwirkung besitzen, können viskoelastische Materialien zur Dämpfung von Baukonstruktionen eingesetzt werden. Viskoelastische Dämpfer, für deren Konstruktion häufig Polymere verwendet werden, besitzen sowohl viskose als auch elastische Eigenschaften und kommen dadurch nach jedem Schwingungszyklus in ihre Ausgangslage zurück. Die Energie-dissipation in viskoelastischen Materialien findet durch innere Reibungsvorgänge und die dabei freiwerdende Reibungswärme statt. Das Maß der Energie-dissipation pro Schwingungszyklus hängt daher maßgeblich vom Aufbau sowie dem Vernetzungsgrad des verwendeten Polymers ab (vgl. Abschnitt 2.4).

Die Konstruktion von viskoelastischen Dämpfern kann dabei so gestaltet sein, dass elastische und viskose Eigenschaften durch eine Komponente mit viskoelastischem Materialverhalten (bspw. viskoelastische Polymere) oder getrennte Komponenten mit jeweils ausschließlich elastischem bzw. viskosem Materialverhalten bereitgestellt werden. Hierdurch wird eine flexible Auslegung des viskoelastischen Dämpfers auf Grundlage des jeweiligen Anforderungsprofils ermöglicht. In diesem Zusammenhang besteht ein weiterer wesentlicher Vorteil viskoelastischer Dämpfer gegenüber passiven Dämpfungsmaßnahmen in der flexiblen Anpassbarkeit der Konstruktion des Dämpfers, wodurch dieser in eine Vielzahl an Konstruktionen implementiert werden kann. Ein Beispiel hierfür sind die in Abbildung 2.29 und Abbildung 2.30 dargestellten realen Einsatzmöglichkeiten viskoelastischer Dämpfer.

In Abbildung 2.29 ist das Konstruktionsprinzip eines viskoelastischen Dämpfers dargestellt, in dem zwei Flanschplatten durch eine Zwischenschicht aus einem viskoelastischen Elastomer verbunden sind. Diese Konstruktionsform eines viskoelastischen Dämpfers kann in axial belasteten Verbands- oder Aussteifungssystemen eingesetzt werden. Als Beispiel hierfür kann die in Abbil-

dung 2.30 dargestellte Anordnung viskoelastischer Dämpfer im Deckensystem in Fachwerkbauweise des World Trade Center genannt werden. Der viskoelastische Dämpfer wurde am Untergurt des Fachwerkträgers im Anschlussbereich zwischen Träger und Stütze eingesetzt, wodurch Schwingungen des Deckensystems aus Personenverkehr gedämpft wurden (McAllister et al. 2013).

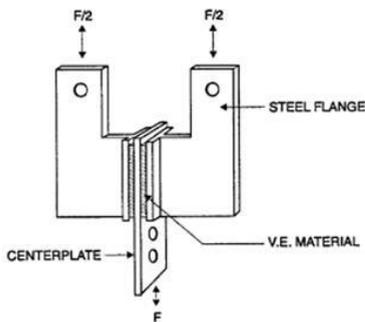


Abbildung 2.29: Viskoelastischer Dämpfers zur Anwendung in axial belasteten Verbundsystemen (Samali und Kwok 1995)

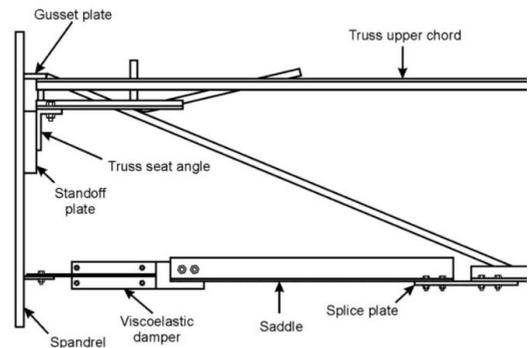


Abbildung 2.30: Anordnung viskoelastischer Dämpfer im Deckensystem des World Trade Center (Sunder et al. 2005)

Die Dämpfung durch Klebverbindungen ist den passiven, viskoelastischen Dämpfungsmaßnahmen zuzuordnen. Im Gegensatz zu den bislang eingesetzten, viskoelastischen Dämpfern bieten Klebverbindungen den Vorteil, dass sie Teil der eigentlichen Tragstruktur sein können und dementsprechend nicht zusätzlich ins Tragwerk integriert werden müssen. Hierdurch können die Baukosten deutlich reduziert werden. Darüber hinaus gestaltet sich die konstruktive Ausführung von Klebverbindungen im Vergleich zu konventionellen, viskoelastischen Dämpfern deutlich einfacher. Die Praxisbeispiele in Abbildung 2.29 und Abbildung 2.30 veranschaulichen dieses konstruktive Optimierungspotential durch den Einsatz geklebter Verbindungen im Vergleich zu bisher eingesetzten, passiven Dämpfungsmaßnahmen.

3 Auswahl und Charakterisierung der Klebstoffe

3.1 Allgemeines

Die Herstellung geklebter Verbindungen und Anschlüsse im Stahlbau, die sowohl eine hohe Festigkeit als auch hohe Dämpfungseigenschaften besitzen, stellt hohe Anforderungen an die verwendeten Klebstoffe. Aus diesem Grund werden in diesem Abschnitt die notwendigen Anforderungen zur Auswahl geeigneter Klebstoffe zusammengetragen. Hierbei werden die Randbedingungen des konstruktiven Ingenieur- und Stahlbaus im Hinblick auf Maß- und Fertigungstoleranzen, Oberflächenbeschaffenheiten sowie die thermische und mechanische Beanspruchung einer Klebung zugrunde gelegt. Auf Basis eines entwickelten Anforderungskatalogs werden zwei Klebstoffe ausgewählt und deren statisch-mechanische sowie dynamisch-mechanische Eigenschaften in Abschnitt 3.4 charakterisiert.

3.2 Anforderungen

Im Folgenden werden die Anforderungen an geklebte Verbindungen zusammengefasst, die sich unter anderem aus baupraktischen Randbedingungen ergeben. Zunächst sind in diesem Zusammenhang die im Bauwesen insbesondere für warm- bzw. kaltgefertigte Kreishohlprofile üblichen Maßtoleranzen nach (DIN EN 10210-2) bzw. (DIN EN 10219-2) zu nennen. Für die Fertigung einer geklebten Überlappverbindung aus Kreishohlprofilen (Kreishohlprofilsteckverbindung) ergeben sich Fertigungstoleranzen in Form einer in Längs- und Umfangsrichtung veränderlichen Klebschichtdicke, die sich negativ auf die statische sowie dynamische Tragfähigkeit auswirken kann. Dieser Effekt wird durch eine Überlagerung mit montagebedingten Imperfektionen aus einer Schiefstellung oder ausmittigen Anordnung der Fügeiteile verstärkt. Aus diesem Grund müssen die auszuwählenden Klebstoffe Dickschichtklebungen ermöglichen, wodurch auftretende Fertigungstoleranzen ausgeglichen werden können (Albiez et al. 2019a).

Eine weitere Anforderung an die zu verwendenden Klebstoffe resultiert aus der Oberflächenbeschaffenheit der verwendeten Füge­teile. Im Rahmen dieser Arbeit liegt der Fokus auf Stahlwerkstoffen mit korundgestrahlten Füge­teiloberflächen. Aus diesem Grund ist auf die Ausbildung einer ausreichend hohen Adhäsion der verwendeten Klebstoffe auf den definierten Füge­teiloberflächen zu achten.

Zusätzlich zu Anforderungen aus Maß­toleranzen und Oberflächenbeschaffenheiten resultieren hohe Anforderungen aus thermischen Beanspruchungen durch Umwelteinflüsse. Aus der in Deutschland gültigen Norm (DIN EN 1991-1-5) sowie dem zugehörigen nationalen Anhang (DIN EN 1991-1-5/NA) zur Ermittlung der Temperatureinwirkung auf Bauwerke und Gebäude ergibt sich ein Temperatureinsatzbereich der Klebstoffe von -24 °C bis $+67\text{ °C}$. Dieser Temperaturbereich gilt für helle, farbige Oberflächen. Bei der Auswahl von Klebstoffen für den baupraktischen Einsatz ist demnach auf eine entsprechende Eignung zu achten, die anhand der Glasübergangstemperatur charakterisiert und bewertet werden kann. Die Glasübergangstemperatur kennzeichnet vereinfachend beschrieben den Temperaturbereich, ab dem die mechanischen Kennwerte eines Klebstoffs signifikant abnehmen. Weiterführende Erläuterungen hierzu können den Abschnitten 2.4 sowie 3.4.2 entnommen werden. Es ist anzustreben, dass die Glasübergangstemperatur der priorisierten Klebstoffe außerhalb des zuvor genannten Temperatureinsatzbereichs liegt.

Aus baupraktischen Erfordernissen resultieren darüber hinaus Anforderungen an die mechanischen Eigenschaften der Klebstoffe. Es sind Klebstoffe zu priorisieren, die neben einer hohen Festigkeit zudem hohe dissipative Eigenschaften aufweisen. Allerdings zeigen Untersuchungen in (da Silva et al. 2018), dass die Dämpfungseigenschaften von Klebstoffen häufig mit zunehmender Klebstoffsteifigkeit und –festigkeit abnehmen. Numerische Analysen in (Damm et al. 2022b) weisen zudem darauf hin, dass das geringere Deformationsvermögen hochsteifer Klebstoffe dazu führt, dass die aktivierte Materialdämpfung im Bereich geklebter Anschlüsse abnimmt. Die Festlegung einer erforderlichen Mindestklebstofffestigkeit muss daher vor dem Hintergrund einer spezifischen Anwendung unter Beachtung sowohl statischer als auch dynamischer Erfordernisse erfolgen.

Neben der Festigkeit bestehen baupraktische Anforderungen an die Dämpfungseigenschaften der Klebstoffe, die anhand der Ergebnisse in (Damm et al. 2022b) sowie Kapitel 4 abgeleitet werden können. Eine signifikante positive Beeinflussung des dynamischen Tragverhaltens von geklebten Stahlbaustrukturen kann für Klebstoffe mit einem Verlustfaktor von mindestens 0,1 beobachtet werden. Die Dämpfungseigenschaften geklebter Verbindungen werden maßgeblich durch die generelle Klebstoffsteifigkeit beeinflusst (Damm et al. 2022b). Aufgrund der Tatsache, dass die Dämpfungseigenschaften von Klebstoffen infolge einer Deformation der Klebschicht aktiviert werden, sind Klebstoffe mit einem geringen Elastizitätsmodul sowie einem damit einhergehenden, hohen Deformationsvermögen zu priorisieren.

Eine Vielzahl von Tragwerken weist einen hohen Anteil ständig wirkender Lasten aus Eigengewicht auf. Aus diesem Grund ist bei der Klebstoffauswahl auf eine möglichst geringe Kriechneigung zu achten. Allgemein sinkt die Kriechneigung mit zunehmendem E-Modul der Klebstoffe. Alternativ können die geklebten Anschlüsse innerhalb einer Struktur so ausgebildet werden, dass diese ausschließlich dynamische Lasten übertragen. Ein entsprechendes Konstruktionskonzept für geklebte Kreishohlprofilsteckverbindungen in Fachwerkstrukturen wurde im FOSTA Forschungsprojekt P 1123 (Albiez et al. 2021) untersucht. Darüber hinaus ist insbesondere für die Fertigung geklebter Kreishohlprofilverbindungen auf die Auswahl von Klebstoffen mit einer möglichst geringen Härtungsschrumpfung zu achten. Die durch Schrumpfungen entstehenden Eigenstressungen reduzieren sowohl die Festigkeit als auch das Verformungsvermögen einer Klebung.

Die in dieser Arbeit untersuchten Probekörper werden durch Injektion des jeweiligen Klebstoffs in einen Fügespalt klebtechnisch gefügt. Aus der geplanten Fertigung resultieren weitere Anforderungen an die verwendeten Klebstoffe. Die Injektion eines Klebstoffs in einen Fügespalt erfordert, unabhängig von der Klebfugengeometrie, einen niedrigviskosen Klebstoff mit einem hohen Fließvermögen. Zudem sind Zweikomponenten-Klebstoffe zu priorisieren, die eine hohe Anfangsfestigkeit besitzen. Darüber hinaus bieten diese Klebstoffe aus baupraktischer Sicht den Vorteil, dass für die Klebstoffaushärtung keine zusätzlichen Arbeitsschritte erforderlich sind.

3.3 Auswahl der Klebstoffe

Die in Abschnitt 3.2 beschriebenen Anforderungen an Klebstoffe in Bezug auf die statischen und dynamischen Eigenschaften stellen die Grundlage für eine Auswahl geeigneter Klebstoffe dar. Ausgehend von den technischen Daten kommerziell verfügbarer Klebstoffe werden im Forschungsprojekt P 1272 (Damm et al. 2022a) fünf verschiedene Klebstoffe vorausgewählt. Diese fünf Klebstoffe werden in experimentellen Versuchen an Substanz- und Verbundproben umfangreich hinsichtlich ihrer statisch-mechanischen und dynamisch-mechanischen Eigenschaften charakterisiert (Göddecke et al. 2023). Auf Basis der Ergebnisse dieser experimentellen Untersuchungen werden zwei Zweikomponenten-Klebstoffe für die weiteren Untersuchungen ausgewählt.

Die für die weiteren Untersuchungen ausgewählten Klebstoffe sind ein 2K-Polyurethanklebstoff (PUR) und ein 2K-Epoxy-Hybridklebstoff (EPH), die durch Versuche an Substanz- und Verbundproben charakterisiert werden. Die experimentellen Untersuchungen zur Charakterisierung der Klebstoffe finden im Rahmen des Forschungsprojekts P 1272 (Damm et al. 2022a) am Laboratorium für Werkstoff- und Fügetechnik (LWF) der Universität Paderborn statt. Beide Klebstoffe eignen sich für eine Applikation durch Injektion. Die Einsetzbarkeit der Klebstoffe auf korundgestrahlten Oberflächen kann durch in (Damm et al. 2022a) dokumentierte Zugversuche an Zugscher- und Kopfzugproben nachgewiesen werden.

3.3.1 Klebstoff EPH

Der Klebstoff *Sikadur F51-60* der SIKA AG ist ein Zweikomponenten-Klebstoff auf Epoxy-Hybridbasis, der im Folgenden als Klebstoff EPH bezeichnet wird.

Die Aushärtung erfolgt über Polyaddition. Der Klebstoff EPH wurde in einer ähnlichen chemischen Formulierung bereits in dem abgeschlossenen Forschungsprojekt FOSTA P 1123 (Albiez et al. 2021) charakterisiert. Relevante Eigenschaften des Klebstoffs EPH, die durch den Hersteller zur Verfügung gestellt wurden, sind in Tabelle 3.1 zusammengefasst.

Tabelle 3.1: Technische Daten des Klebstoffs EPH (Damm et al. 2022a)

Klebstoff EPH	
Basis	Epoxy-Hybrid-System
Aushärtungsmechanismus	Polyaddition
Konsistenz bei 20 °C	zähflüssig
Farbe	orange/braun
Dichte (unausgehärtet)	1,08 g/cm ³
Topfzeit	60 Minuten bei 20° C

3.3.2 Klebstoff PUR

Der Klebstoff *Körapur 842* der Kömmerling Chemische Fabrik GmbH ist ein semistruktureller Zweikomponenten-Polyurethanklebstoff. Dieser Klebstoff wird im Folgenden als Klebstoff PUR bezeichnet. Der Klebstoff PUR härtet durch Polyaddition aus. Laut Herstellerangaben wird er im Bereich der Automobil- und Transportindustrie zur Montage von Seitenwand-, Boden- und Dachelementen eingesetzt. Darüber hinaus wird der Klebstoff bei Bau- und Industrieanwendungen zur Herstellung von Kernverbundelementen verwendet. Relevante Eigenschaften des Klebstoffs PUR, die der Produktbeschreibung im technischen Datenblatt entnommen wurden (TD PUR 2020), sind in Tabelle 3.2 zusammengefasst.

Tabelle 3.2: Technische Daten des Klebstoffs PUR (TD PUR 2020)

Klebstoff PUR	
Basis	Polyurethan
Aushärtungsmechanismus	Polyaddition
Konsistenz bei 20 °C	zähflüssig
Farbe	beige
Dichte (ausgehärtet)	1,46 g/cm ³
Viskosität	65 000 mPas
Topfzeit	20 Minuten bei RT
Shore-Härte (Typ D)	45

3.4 Experimentelle Untersuchungen

3.4.1 Statisch-mechanische Eigenschaften

Zur Bestimmung der statisch-mechanischen Eigenschaften (Elastizitätsmodul, Dehnungsvermögen) sowie des Spannungs-Dehnungs-Verhaltens der Klebstoffe werden im Projekt P 1272 (Damm et al. 2022a) je Klebstoff fünf uniaxiale Zugversuche an Substanzproben am LWF der Universität Paderborn durchgeführt. Die Herstellung und Prüfung der Substanzproben erfolgt in Anlehnung an (DIN EN ISO 527-2). Es wird der mit Schultern versehene Probekörpertyp 5A nach (DIN EN ISO 527-2) verwendet. Die Probekörper beider Klebstoffe werden durch Fräsen hergestellt. Vor der Prüfung werden die Proben mindestens sieben Tage bei 23 °C und 50 % rel. Luftfeuchtigkeit in einem Klimaraum konditioniert (Damm et al. 2022a).

Die Zugversuche an Substanzproben werden wegeregelt mit einer konstanten Prüfgeschwindigkeit von 7,5 mm/min bis zum Bruch der Probe durchgeführt. Die Prüfgeschwindigkeit entspricht einer Dehnrates von 15 % min⁻¹. Die Versuche werden bei Raumtemperatur durchgeführt. Neben der Maschinenkraft wird die lokale Dehnung der Substanzprobe in der Mitte der Probe mit einem digitalen Bildkorrelationssystem erfasst und aufgezeichnet. Die Berechnung der Spannungs-Dehnungs-Beziehungen der Klebstoffe wird auf Grundlage der aufgezeichneten Messergebnisse sowie der Probekörperabmessung vor Versuchsbeginn vorgenommen. Neben allgemeinen Aussagen über die Arbeitslinie der beiden Klebstoffe können der Elastizitätsmodul, die Zugfestigkeit sowie das Dehnvermögen aus den Versuchsergebnissen abgeleitet werden (Damm et al. 2022a).

Die Spannungs-Dehnungs-Kurven der Versuche an Substanzproben des Klebstoffs EPH sind in Abbildung 3.1 dargestellt. Mit steigender Spannung wächst die auftretende Dehnung zunächst näherungsweise linear an. Ab einer Dehnung von 2,5 % flacht die Kurve zunehmend ab und verläuft im Bereich zwischen einer Dehnung von 10 % bis 40 % mit geringerer Steifigkeit erneut linear. Ab einer Dehnung von 40 % findet eine Versteifung statt. Bis zum Bruch der Probe bei einer Dehnung von ca. 80 % verläuft die Kurve erneut annähernd linear. Die Substanzproben versagen duktil.

In Abbildung 3.2 sind die Spannung-Dehnung-Kurven der Versuche an Substanzproben des Klebstoffs PUR dargestellt. Der lineare Anfangsbereich ist gegenüber Klebstoff EPH deutlich stärker ausgeprägt. Die Kurve verläuft bis zu einer Dehnung von 1,0 % näherungsweise linear und flacht dann bis zum Sprödbruch der Substanzprobe zunehmend ab.

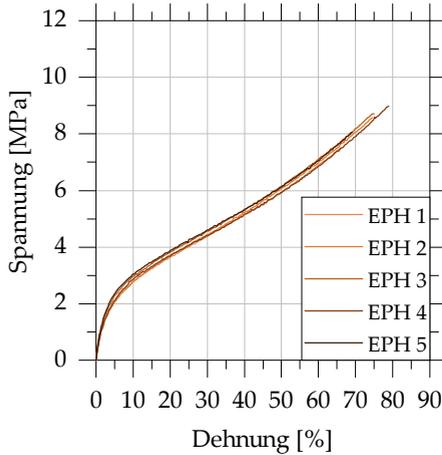


Abbildung 3.1: Spannung-Dehnungs-Diagramm des uniaxialen Zugversuchs an Substanzproben des Klebstoffs EPH nach (Damm et al. 2022a)

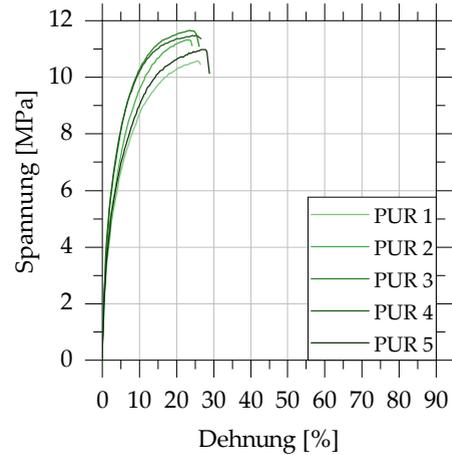


Abbildung 3.2: Spannung-Dehnungs-Diagramm des uniaxialen Zugversuchs an Substanzproben des Klebstoffs PUR nach (Damm et al. 2022a)

Aus dem Kurvenverlauf im linear-elastischen Anfangsbereich kleiner Dehnungen kann der Elastizitätsmodul des jeweiligen Klebstoffs bestimmt werden. Hierzu wird zunächst aus den fünf Einzelversuchen eine gemittelte Versuchskurve gebildet. Für diese Mittelwertkurve wird der Wert der Spannung bei einer Dehnung von 1,0 % ermittelt. Aus dem Quotienten aus dem ermittelten Wert der Spannung sowie dem Wert von 1,0 % Dehnung berechnet sich der Elastizitätsmodul. Der E-Modul des Klebstoffs EPH ergibt sich anhand des beschriebenen Vorgehens auf zwei Stellen gerundet zu 86 MPa. Die zugehörige Querdehnzahl bei einer Dehnung von 1,0 % beträgt 0,42. Der E-Modul des Klebstoffs PUR liegt deutlich darüber und lässt sich auf zwei Stellen gerundet zu 356 MPa bestimmen. Die zugehörige Querdehnzahl beträgt 0,41.

Die Bestimmung weiterer charakteristischer mechanischer Kennwerte der Klebstoffe EPH und PUR erfolgt anhand der im Projekt P 1272 (Damm et al. 2022a) ermittelten Beziehung zwischen der wahren Spannung und der wahren Dehnung der beiden Klebstoffe. Zur Bestimmung der wahren Spannungen sowie der wahren Dehnungen werden die Messwerte der Maschinenkraft und der Dehnung nicht auf den Ausgangsquerschnitt, sondern auf den im Versuchsverlauf tatsächlich vorliegenden Querschnitt der Substanzproben bezogen. Hierfür werden vorhandene Querschnittsreduzierungen durch Einschnürung und die tatsächliche Länge der Substanzproben bei der Berechnung berücksichtigt. Die so ermittelten Diagramme zur Beziehung zwischen wahrer Spannung und wahrer Dehnung der Klebstoffe EPH und PUR können dem Anhang (Abbildung A.1 und Abbildung A.2) entnommen werden. Hieraus lassen sich die gesamte Dehnung beim Bruch sowie die Zugfestigkeit der Substanzproben ermitteln. Die ermittelten mechanischen Kennwerte der Klebstoffe EPH und PUR sind in Tabelle 3.3 zusammengefasst dargestellt (Damm et al. 2022a).

Tabelle 3.3: Statisch-mechanische Kennwerte der Klebstoffe EPH und PUR (Damm et al. 2022a)

Klebstoff	E-Modul bei 1,0 % Dehnung [MPa]	Querdehnzahl bei 1,0 % Dehnung [-]	Wahre Dehnung beim Bruch [%]	Zugfestigkeit [MPa]
EPH	86	0,42	54,6	16,0
PUR	356	0,41	23,4	13,3

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass sich die beiden Klebstoffe EPH und PUR in Bezug auf ihr Last-Verformungsverhalten deutlich voneinander unterscheiden. Der Klebstoff EPH weist einen für Klebstoffe vergleichsweise geringen Elastizitätsmodul auf und ist deutlich niedrigmoduliger als der Klebstoff PUR. Dieser Unterschied im Last-Verformungsverhalten kann auch bei der Betrachtung der Bruchdehnung beobachtet werden. Der Klebstoff EPH weist eine um mehr als Faktor zwei größere Dehnung beim Bruch auf. Die Dehnung beim Bruch ist für die Klebstoffe PUR und EPH als mäßig bzw. hoch einzustufen. Die Zugfestigkeit der beiden Klebstoffe unterscheidet sich nicht wesentlich und liegt in einem für semistrukturale Klebstoffe üblichen Bereich.

Der niedrige E-Modul des Klebstoffs EPH in Verbindung mit einer vergleichsweise hohen Bruchdehnung sowie einer hohen Zugfestigkeit sind positiv hervorzuheben.

Das Kriechverhalten der Klebstoffe EPH und PUR wurde im Projekt P 1272 (Damm et al. 2022a) nicht explizit untersucht. Am LWF der Universität Paderborn durchgeführte und in (Damm et al. 2022a) dokumentierte Abklingversuche an Verbundproben mit angehängter Zusatzmasse deuten jedoch darauf hin, dass beide Klebstoffe zu Kriechverformungen unter Dauerlast neigen. Aus diesem Grund muss bei der Auslegung von Strukturen ein Abtrag von kriechrelevanten Dauerlasten aus Eigengewicht über die Klebschichten durch konstruktive Lösungen ausgeschlossen werden (vgl. (Albiez et al. 2022b)).

3.4.2 Dynamisch-mechanische Eigenschaften

Die dynamisch-mechanischen Eigenschaften der Klebstoffe EPH und PUR werden durch Dynamisch-Mechanische-Analysen (DMA) an Klebstoffsubstanzproben ermittelt. Hierbei werden der Speicher- und Verlustmodul in Abhängigkeit der Temperatur und der Frequenz bestimmt, aus denen anschließend der Verlustfaktor ermittelt werden kann (vgl. Abschnitt 2.4). Die Temperatur, für die das Maximum des Verlustfaktors erreicht wird, wird als Glasübergangstemperatur bezeichnet (vgl. Abschnitt 2.4). Die Glasübergangstemperatur ist eine elementare Kenngröße zur Auswahl eines geeigneten Klebstoffs (Göddecke et al. 2023).

Die DMA von Substanzproben der Klebstoffe EPH und PUR erfolgt im Rahmen von Projekt P 1272 (Damm et al. 2022a) am LWF der Universität Paderborn mit dem dort vorhandenen Rheometer Haake Mars 40 der Firma Thermo Fisher Scientific unter einer vorwiegenden Schubbeanspruchung. Hierzu werden stabförmige Substanzproben mit den Nennabmessungen $40,0 \times 10,0 \times 2,0$ [mm] verwendet, die im Rheometer mit einer definierten Torsionsbelastung beansprucht werden. Hierdurch können die dynamisch-mechanischen Klebstoffeigenschaften unter einer vorwiegenden Schubbeanspruchung ermittelt werden (Damm et al. 2022a).

Die zur Charakterisierung der Klebstoffe EPH und PUR aufgebrachte Gleitung beträgt 0,04 %. Die Temperatur wird während der DMA von -80 °C auf 120 °C in

Schritten von 5 °C gesteigert. Die Frequenz wird während eines Temperaturdurchlaufs konstant gehalten. Es werden verschiedene Prüffrequenzen im Spektrum von 0,1 Hz bis 3,33 Hz untersucht. In Abbildung 3.3 sowie Abbildung 3.4 sind die Ergebnisse der Dynamisch-Mechanischen-Analysen der Klebstoffe EPH und PUR exemplarisch im Temperaturbereich von -50 °C bis 100 °C für die Frequenzen 1 Hz und 3,33 Hz dargestellt.

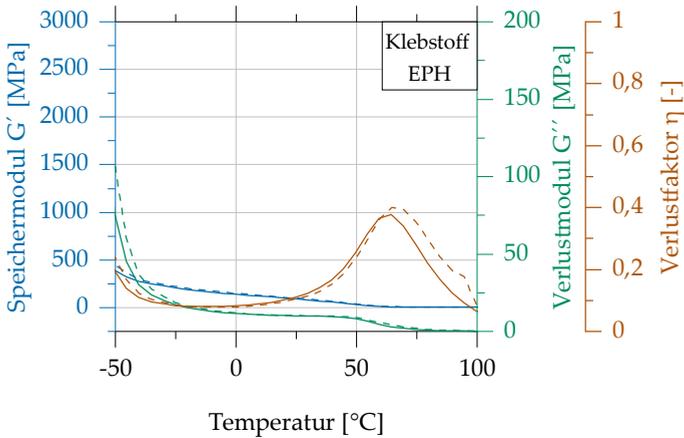


Abbildung 3.3: Ergebnisse der Dynamisch-Mechanischen-Analyse des Klebstoffs EPH für die Frequenzen 1 Hz (—) sowie 3,33 Hz (- -) (Damm et al. 2022a)

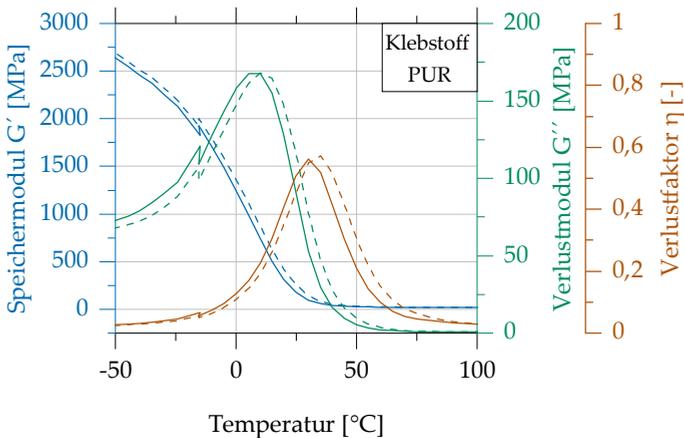


Abbildung 3.4: Ergebnisse der Dynamisch-Mechanischen-Analyse des Klebstoffs PUR für die Frequenzen 1 Hz (—) sowie 3,33 Hz (- -) (Damm et al. 2022a)

Die DMA-Ergebnisse für den Klebstoff EPH in Abbildung 3.3 zeigen ein Maximum des Verlustfaktors in Abhängigkeit der Frequenz im Temperaturbereich zwischen 60 °C und 70 °C. Für die Prüffrequenz 1 Hz beträgt der maximale Verlustfaktor 0,38. Die zugehörige Glasübergangstemperatur beträgt 64,4 °C. Darüber hinaus zeigt sich ein Zusammenhang zwischen der Frequenz, der Temperatur sowie den dynamisch-mechanischen Eigenschaften des Klebstoffs EPH. Bei Raumtemperatur (RT = 23 °C) nimmt der Verlustfaktor des Klebstoffs EPH infolge einer Erhöhung der Frequenz von 1 Hz auf 3,33 Hz um ca. 9 % ab.

Die Ergebnisse der DMA des Klebstoffs PUR sind in Abbildung 3.4 dargestellt. Für eine Frequenz von 1 Hz zeigt sich eine Glasübergangstemperatur von 30 °C. Der zugehörige maximale Verlustfaktor beträgt 0,56. Für den Klebstoff PUR zeigt sich ebenfalls ein temperaturabhängiger Einfluss der Frequenz. Unterhalb einer Temperatur von ca. 64 °C sinkt der Verlustfaktor mit steigender Frequenz. Die prozentuale Abnahme des Verlustfaktors des Klebstoffs PUR infolge einer Erhöhung der Frequenz von 1 Hz auf 3,33 Hz beträgt bei Raumtemperatur (RT = 23 °C) ca. 10 %. Ab 64 °C kehrt sich der Einfluss der Frequenz auf den Verlustfaktor um (Damm et al. 2022a).

Tabelle 3.4: Dynamisch-mechanische Kennwerte der Klebstoffe EPH und PUR nach (Damm et al. 2022a)

Kennwert	Frequenz [Hz]	Klebstoff	
		EPH	PUR
η (RT)	1	0,11	0,50
	3,33	0,10	0,45
Max. η	1	0,38	0,56
	3,33	0,40	0,57
T_G	1	64,4	30,0
	3,33	64,5	35,2

Die auf Grundlage der durchgeführten DMA ermittelten Kennwerte der Klebstoffe EPH und PUR sind in Tabelle 3.4 zusammengefasst. Es zeigt sich, dass die Dämpfungseigenschaften des Klebstoffs PUR deutlich über denen des Klebstoffs EPH liegen. Ein Vergleich der Dämpfungseigenschaften bei Raumtempera-

tur (RT) zeigt für den Klebstoff PUR einen um Faktor 4,5 höheren Verlustfaktor. Der Verlustfaktor bei Raumtemperatur nimmt infolge einer Erhöhung der Frequenz von 1 Hz auf 3,33 Hz für beide Klebstoffe um ca. 10 % ab.

Für beide Klebstoffe kann ein Anstieg der Glasübergangstemperatur sowie des damit assoziierten Verlustfaktors infolge einer Erhöhung der Prüffrequenz festgestellt werden. An dieser Stelle sei angemerkt, dass die in Tabelle 3.4 angegebenen Glasübergangstemperaturen insbesondere für den Klebstoff PUR innerhalb des in Deutschland in (DIN EN 1991-1-5; DIN EN 1991-1-5/NA) normativ vorgegebenen Temperaturbereichs von -24 °C bis $+67\text{ °C}$ liegen. Für den Klebstoff EPH kann davon ausgegangen werden, dass die Glasübergangstemperatur durch einen Temperprozess über den normativ vorgegebenen Grenzwert von $+67\text{ °C}$ angehoben werden kann. Entsprechende Untersuchungen an vergleichbaren Klebstoffen sind in (Ummenhofer et al. 2015) und (Albiez et al. 2021) dokumentiert.

3.5 Zusammenfassung

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass sich die beiden Klebstoffe EPH und PUR aufgrund ihrer statisch-mechanischen Eigenschaften für Anwendungen im Stahlbau eignen können. Der niedrige E-Modul des Klebstoffs EPH in Verbindung mit einer vergleichsweise hohen Bruchdehnung sowie einer hohen Zugfestigkeit sind positiv hervorzuheben und ermöglichen eine Anwendung des Klebstoffs in dynamisch beanspruchten Strukturen. Beide Klebstoffe eignen sich für die Applikation auf korundgestrahlten Stahloberflächen durch Injektion (Damm et al. 2022a). Im Hinblick auf die Dämpfungseigenschaften zeigen sich deutliche Unterschiede zwischen den beiden Klebstoffen, wobei Klebstoff PUR signifikant höhere Dämpfungseigenschaften aufweist. Die Tatsache, dass die Glasübergangstemperatur des Klebstoffs PUR im normativ vorgegebenen Temperatureinsatzbereich liegt, ist kritisch zu sehen. Aus diesem Grund wird der Klebstoff EPH in den Fokus der in Kapitel 7 dokumentierten, experimentellen Untersuchungen der Dämpfungseigenschaften geklebter, bauteilähnlicher Probekörper gestellt. Eine umfassende Untersuchung von mit dem Klebstoff EPH gefertigten Probekörpern soll durch exemplarische Vergleiche mit Probekörpern erfolgen, die mit dem Klebstoff PUR hergestellt werden.

4 Numerische Untersuchungen zum Dämpfungspotential geklebter Anschlüsse

4.1 Zielsetzung und prinzipielle Vorgehensweise

Vor dem Hintergrund des Stands der Forschung zu den Dämpfungseigenschaften geklebter Verbindungen in Abschnitt 2.5 besteht das Ziel der nachfolgenden numerischen Untersuchungen in der Identifikation des Potentials geklebter Anschlüsse zur Optimierung des dynamischen Verhaltens typischer Stahlbaustrukturen unter Variation geometrischer und werkstofflicher Parameter. Zudem wird das Ziel verfolgt, Aussagen zum Einfluss der untersuchten Parameter auf die Dämpfungseigenschaften geklebter Strukturen abzuleiten, die im Rahmen der praktischen Strukturauslegung angewendet werden können. Dabei muss der Einfluss einer in diesem Kapitel vorgenommenen vereinfachten Implementierung des Materialverhaltens der untersuchten Klebstoffe berücksichtigt werden. Eine Übertragbarkeit der quantifizierten Dämpfungspotentiale auf kommerzielle Klebstoffe muss vor dem Hintergrund realer Klebstoffeigenschaften bewertet werden. Dies kann unter Zuhilfenahme der in Abschnitt 4.2 dokumentierten Diskussion des Einflusses der vereinfachten Werkstoffmodellierung auf die Berechnungsergebnisse erfolgen.

Die im Folgenden vorgestellten Untersuchungen basieren auf den in (Damm et al. 2022b) sowie (Damm et al. 2021a) dokumentierten Arbeiten. Im ersten Schritt wird ein statisch bestimmtes Einknotensystem (EKS) in Form einer Lichtzeichenanlage (LZA) mit Fußpunkteinspannung betrachtet. Die Struktur der LZA wird sowohl mit geschweißtem Anschluss als auch mit einem Anschluss durch Überlappklebung am Fußpunkt modelliert. Anhand dieses statisch bestimmten Systems wird untersucht, wie sich die unterschiedlichen Knotensteifigkeiten beider Modelle auf das statische und dynamische Tragverhalten der LZA auswirkt. Darauf aufbauend wird der Einfluss der Implementierung lokal wirkender Werkstoffdämpfung auf das dynamische Antwortverhalten der Struktur analysiert. Es werden numerische Simulationen im Zeit- und Frequenzbereich durch-

geführt, wobei die Steifigkeit und der Verlustfaktor des Klebstoffs sowie die Geometrieparameter der Klebfuge variiert werden.

Die Erkenntnisse der Untersuchung des EKS mit einem geklebten Anschluss werden anschließend durch die Analyse eines Mehrknotensystems (MKS) mit mehreren geklebten Knoten erweitert. Diese Untersuchungen werden am Beispiel eines Aussichtsturms in stahlbautypischer Fachwerkbauweise mit geklebten Strebenanschlüssen durchgeführt. Die Ausbildung der Knotenanschlüsse erfolgt in Anlehnung an das in (Albiez et al. 2021) vorgestellte Konstruktionskonzept für geklebte Strebenanschlüsse für Hohlprofilfachwerkstrukturen. Auf Grundlage der Untersuchung des Fachwerkmodells mit mehreren geklebten Knotenanschlüssen werden Aussagen über die Interaktion mehrerer Knoten untereinander abgeleitet. Im Fokus der Untersuchungen steht die Überprüfung der Übertragbarkeit der am EKS gewonnenen Erkenntnisse auf eine Struktur mit mehreren geklebten Anschlüssen.

Aufgrund der Größe der untersuchten Strukturen und der damit verbundenen, großen Elementanzahl, wird für die Analysen das Prinzip der modalen Superposition verwendet. Durch die Verwendung faktorisierter Eigenvektoren, die einer Modalanalyse entnommen werden, wird die Analyse von Modellen mit einer sehr großen Elementanzahl ermöglicht (ANSYS Inc. 2019).

4.2 Werkstoffgesetze

Die Eigenschaften der verwendeten Klebstoffe zur Durchführung der numerischen Berechnungen werden in Anlehnung an die in Kapitel 3 dokumentierten Ergebnisse einer Klebstoffcharakterisierung definiert. Die in den Simulationen untersuchten Klebstoffeigenschaften repräsentieren exemplarisch die mechanischen Eigenschaften kommerziell verfügbarer Klebstoffe. Im Rahmen der numerischen Simulationen wird für alle Werkstoffe vereinfachend ein linear-elastisches Materialverhalten angenommen. Die folgenden Untersuchungen stellen in Bezug auf den gewählten Ansatz sowie den Untersuchungsumfang einen originären Beitrag dar (vgl. Abschnitt 2.5), weshalb im Rahmen dieser Arbeit bewusst auf die komplexe Berücksichtigung materieller Nichtlinearitäten verzichtet wird. Zudem kann die definierte Zielstellung (vgl. Abschnitt 4.1) auch

unter Berücksichtigung einer vereinfachten Annahme eines linear-elastischen Klebstoffverhaltens erreicht werden.

Das Vorhandensein materieller Nichtlinearitäten führt dazu, dass die Eigenfrequenz einer Struktur nicht konstant, sondern eine Funktion der Schwingungsamplitude ist. Bei einer gegebenen, konstanten Anregungsfrequenz werden auftretenden Resonanzamplituden somit durch eine Verschiebung der Eigenfrequenz begrenzt. Hieraus folgt, dass Resonanzamplituden maximal werden, wenn linear-elastisches Materialverhalten unterstellt werden kann (Petersen und Werkle 2017). Für die durchgeführten numerischen Simulationen kann begründet davon ausgegangen werden, dass die Berücksichtigung von ausschließlich linear-elastischem Materialverhalten eine konservative Annahme in Bezug auf die ermittelten Schwingungsamplituden im Resonanzfall darstellt. Dies gilt analog für die von der Gleit- bzw. Dehnrate abhängige Steifigkeit vieler kommerziell verfügbarer Klebstoffe. Am LWF in Paderborn durchgeführte und in (Damm et al. 2022a) dokumentierte Untersuchungen an Zugscher- und Kopfzugproben zeigen eine Zunahme der Steifigkeit der Klebstoffe EPH und PUR mit ansteigender Gleit- bzw. Dehnrate.

Das Materialverhalten der Klebstoffe EPH und PUR wird durch die Eingabe eines E-Moduls sowie einer Querdehnzahl in die numerischen Berechnungsmodelle implementiert. Der E-Modul des Klebstoffs PUR ist gegenüber dem E-Modul von Klebstoff EPH deutlich größer (vgl. Abschnitt 3.4). Hierdurch wird die Analyse des Einflusses einer variierenden Klebstoffsteifigkeit auf die dynamischen Eigenschaften der untersuchten Strukturen ermöglicht. Dies schließt die anhand einer DMA festgestellte temperaturabhängige Veränderung der Steifigkeit der Klebstoffe EPH und PUR ein (s. Abschnitt 3.4.2).

Der Stahlwerkstoff der Sorte S355 wird anhand der Angaben zu den mechanischen Eigenschaften aus (DIN EN 1993-1-1) definiert. Für den Stahlwerkstoff wird ein Elastizitätsmodul von 210 GPa angenommen. Grundlage der Ermittlung und Implementierung der Werkstoffgesetze der Klebstoffe sind die experimentellen Untersuchungen an Substanzproben der Klebstoffe aus Abschnitt 3.4.1. Das linear-elastische Materialverhalten der Klebstoffe wird durch die Eingabe der bei einer Dehnung von 1,0 % ermittelten Elastizitätsmoduln der Klebstoffe EPH und PUR in das FE-Programm ANSYS Workbench 2019 R1 implementiert.

Die verwendeten Werkstoffkennwerte, die im Rahmen der numerischen Simulationen berücksichtigt werden, sind in Tabelle 4.1 zusammengefasst.

Tabelle 4.1: Mechanische und physikalische Kennwerte der in den numerischen Untersuchungen verwendeten Werkstoffe

Kennwert		Fügeteile (Stahl S355)	Klebstoff EPH	Klebstoff PUR
Elastizitätsmodul	E	210 GPa	86 MPa	356 MPa
Querdehnzahl	ν	0,3	0,42	0,41
Dichte	ρ	7,85 g/cm ³	1,50 g/cm ³	1,46 g/cm ³
Verlustfaktor	η	$\eta_{\text{Stahl}} = 0,0002$	$\eta_{\text{EPH}} = 0 - 0,3$	$\eta_{\text{PUR}} = 0 - 0,3$

Neben der Bestimmung und Implementierung mechanischer Kennwerte der Klebstoffe erfordert die Untersuchung des Einflusses der lokal wirkenden Klebstoffdämpfung zusätzlich die Definition klebstoffabhängiger Dämpfungsparameter. In Abschnitt 3.4.2 wurde hierzu bereits der Verlustfaktor als Maß für die klebstoffinhärente Dämpfung eingeführt. Dieser kann in den numerischen Simulationen über die Eingabe eines materialabhängigen Dämpfungskennwerts berücksichtigt werden. Allerdings zeigen die in Abschnitt 3.4.2 dokumentierten Ergebnisse, dass die Höhe des Verlustfaktors auch von der Temperatur, der Prüf- bzw. Beanspruchungsfrequenz sowie dem vorliegenden Spannungszustand in der Klebschicht abhängt. Daher wird im Rahmen der numerischen Untersuchungen ein breites, realitätsnahes Spektrum an fiktiven Verlustfaktoren untersucht, wodurch eine Übertragbarkeit der Ergebnisse auf andere Klebstoffe ermöglicht werden soll. Die Auswahl der betrachteten Verlustfaktoren ist an die Ergebnisse der DMA in Abschnitt 3.4.2 angelehnt und orientiert sich zudem an Verlustfaktoren kommerziell verfügbarer Klebstoffe, die u.a. in (Almitani und Othman 2016) und (da Silva et al. 2018) dokumentiert sind. Für die Klebstoffe EPH und PUR wird der in Tabelle 4.1 angegebene Bereich des Verlustfaktor untersucht. Zur Berücksichtigung der Dämpfungseigenschaften des Stahlwerkstoffs S355 wird ein Verlustfaktor von $\eta_{\text{Stahl}} = 0,0002$ definiert. Die Auswahl findet auf Grundlage der in (Niehues 2015) dokumentierten Übersicht zu in der Literatur dokumentierten Dämpfungseigenschaften konventioneller Stahlwerkstoffe

statt. Bei der Bewertung der Ergebnisse der numerischen Untersuchungen muss beachtet werden, dass der Anteil der Dämpfung geklebter Anschlüsse an der gesamten Strukturdämpfung stark vom gewählten Verlustfaktor abhängt und mit steigendem Verlustfaktor des Stahlwerkstoffs abnimmt.

4.3 Untersuchung eines Einknotensystems

4.3.1 Numerisches Modell und Netzkonvergenzstudie

Zur Untersuchung eines Systems mit einem geklebten Anschluss wird das Modell einer Lichtzeichenanlage (LZA) herangezogen, die am Fußpunkt an eine Fußplatte angebunden wird. Die LZA wird als dreidimensionales, kombiniertes Balken-Volumenkörper-Modell modelliert. Die Abmessungen des numerischen Berechnungsmodells, das verwendete Koordinatensystem sowie die Abmessungen der verwendeten Querschnitte sind in Abbildung 4.1 dargestellt. Im Bereich des Auslegers werden die Lichtzeichen durch zwei Punktmassen mit einer Masse von je 30 kg abgebildet.

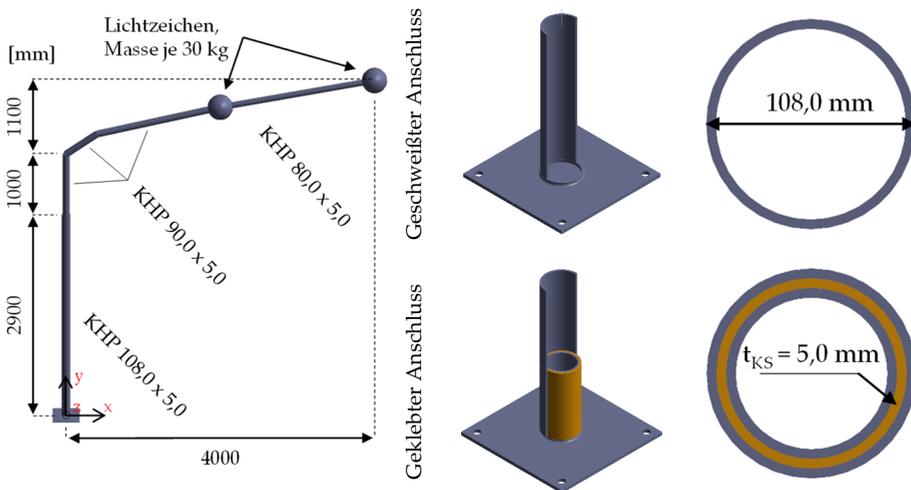


Abbildung 4.1: Numerisches Berechnungsmodell und Anschlussvarianten der LZA (Damm et al. 2022b)

Die Dimensionierung der Querschnittsabmessungen erfolgte in Anlehnung an (DIN 67544). Die LZA ist in den beiden untersuchten Ausführungsvarianten des Anschlusses am Fußpunkt biegesteif an eine Fußplatte mit einer Dicke von $t = 10,0$ mm angeschlossen. Die Fußplatte ist im Bereich der vier eingebrachten Schraubenbohrungen eingespannt gelagert, wodurch die Einspannwirkung eines geschraubten Anschlusses in der realen Struktur abgebildet wird. In der Modellvariante mit geschweißtem Anschluss wird die LZA direkt über eine Kehlnaht mit einer Dicke von $a = 5,0$ mm an die Fußplatte angeschlossen. Diese Variante wird im Folgenden als *geschweißter Anschluss* bezeichnet. Für die Modellvariante *geklebter Anschluss* wird zusätzlich ein Ständerprofil aus einem Kreishohlprofil mit den Abmessungen $88,0 \times 5,0$ mm und einer Länge von 210 mm modelliert. Dieses Ständerprofil wird über eine Kehlnaht mit einer Dicke von $a = 5,0$ mm an die Fußplatte angeschlossen. Das untere Kreishohlprofil der LZA wird über dieses Ständerprofil gesteckt und mit einem Abstand von 10,0 mm zur Fußplatte positioniert, wodurch eine Überlappungslänge der beiden Rohre von $L_{\text{ü}} = 200$ mm entsteht. Die resultierende Klebfugenbreite beträgt $t_{\text{ks}} = 5,0$ mm.

Der Bereich des geschweißten bzw. geklebten Anschlusses wird aus Volumenelementen modelliert. Der Ausleger der LZA wird aus Balkenelementen modelliert, die am Kontaktpunkt über MPC184-Kontaktelemente starr an die Volumenelemente gekoppelt sind. Die Volumenelemente werden mit dreidimensionalen Volumenelementen vom Typ SOLID186 sowie SOLID 187 diskretisiert (s. Abbildung 4.2). Das Hexaeder-Element SOLID186 besteht aus insgesamt 20 Knotenpunkten. Die acht Eckknotenpunkte werden durch zwölf Elementmittelnknoten ergänzt. Das Tetraeder-Element SOLID187 besteht aus insgesamt zehn Knotenpunkten. Die vier Eckknotenpunkte werden durch sechs Elementmittelnknoten ergänzt (ANSYS Inc. 2019).

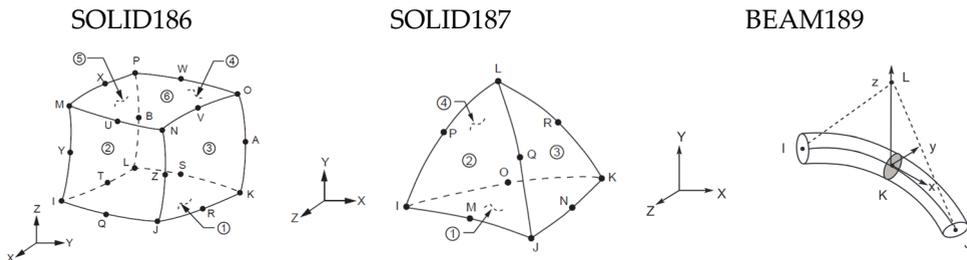


Abbildung 4.2: Verwendete Elementtypen SOLID186, SOLID187 und BEAM189 (ANSYS Inc. 2019)

Jeder dieser Knotenpunkte der beiden genannten Elemente kann translatorische Bewegungen in x -, y - und z -Richtung ausführen und besitzt somit drei Freiheitsgrade. Durch die gewählten Elementtypen können plastische Deformationen, Kriechvorgänge und große Verformungen beschrieben werden. Sie eignen sich daher sehr gut zur Diskretisierung der LZA. Beide Elemente bieten die Möglichkeit einer Berechnung mit quadratischer Ansatzfunktion. Durch die Wahl von Elementen mit quadratischer Ansatzfunktion wird zusätzlich das Problem von shear-locking vermieden. Shear-locking tritt bei voll integrierten Elementen mit linearer Ansatzfunktion auf. Elemente mit linearer Ansatzfunktion können Biegeverformungen nicht abbilden. Werden dennoch Biegeverformungen aufgebracht, reagieren diese Elemente mit künstlichen Schubspannungen an den Gauss-Punkten, was zu einer Versteifung des gesamten Elements führt. Dies kann insbesondere bei steifigkeitsbasierten, dynamischen Analysen einen signifikanten Einfluss auf das Berechnungsergebnis haben.

Tabelle 4.2: Spezifikationen der untersuchten Netzdiskretisierungen A und B des Modells der LZA im Rahmen einer Konvergenzstudie

Netzdiskretisierung	A	B
Elementlänge Klebschicht und Stahlbauteile	5 mm	4 mm
Elementlänge Balkenelemente	50 mm	
Elementlänge Fußplatte	5	
Anzahl Elemente über die Dicke der Klebschicht	3	
Anzahl Elemente über die Dicke der Hohlprofile	2	3
Anzahl Elemente über die Dicke der Fußplatte	2	

Die Balkenelemente werden mit Elementen vom Typ BEAM189 mit quadratischer Ansatzfunktion diskretisiert. Es eignet sich für die Berechnung von vergleichsweise dicken Balkenstrukturen. Das Element besteht aus insgesamt drei Knotenpunkten. Jeder dieser Knotenpunkte kann translatorische Bewegungen in x -, y - und z -Richtung und rotatorische Bewegungen um die x -, y - und z -Achse

ausführen und besitzt demnach sechs Freiheitsgrade. Im Rahmen einer Netzkonvergenzstudie werden zwei unterschiedliche Netzfeinheiten untersucht und die damit ermittelten Berechnungsergebnisse gegenübergestellt. Die untersuchten Netzdiskretisierungen A und B sind in Tabelle 4.2 spezifiziert. Die beiden Modellvarianten mit geschweißtem sowie geklebtem Anschluss werden dabei analog vernetzt. Die Netzdiskretisierungen werden anhand der Ergebnisse einer Modal- sowie einer Frequenzganganalyse der untersuchten Systeme bewertet. Es wird exemplarisch Klebstoff EPH mit einem Verlustfaktor von $\eta_{EPH} = 0,2$ zur Analyse des Systems mit geklebtem Anschluss verwendet.

Modalanalyse

Die Auswertung der Ergebnisse der Modalanalyse im Rahmen der Netzkonvergenzstudie ist in Abbildung 4.3 dargestellt. Die Abweichung der Eigenfrequenzen der Moden 1 bis 6 für die beiden untersuchten Diskretisierungen A und B liegt stets deutlich unter 0,1 %. Somit ist Netzdiskretisierung A ausreichend, um die Eigenfrequenzen der untersuchten Systeme abzubilden. Eine ausführliche Darstellung der Ergebnisse der Modalanalyse kann Abschnitt 4.3.2 entnommen werden.

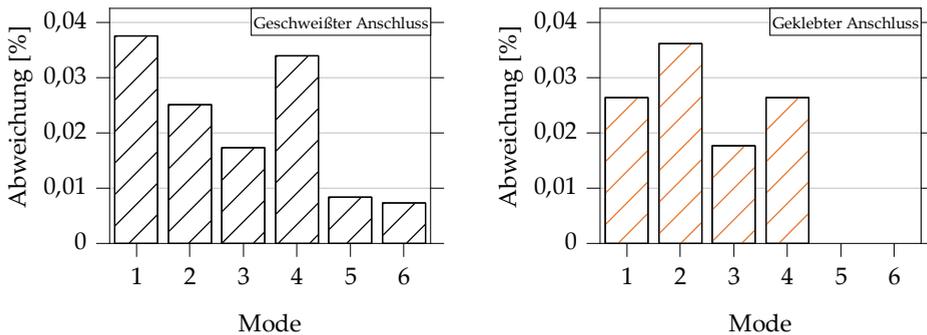


Abbildung 4.3: Ergebnisse der Modalanalyse der Modelle der LZA mit geschweißtem (links) und geklebtem Anschluss (rechts); Auswertung der Abweichungen von Netzdiskretisierung B bezogen auf Netzdiskretisierung A

Frequenzganganalyse

Die Frequenzganganalyse zur Überprüfung der Netzkonvergenz wird unter der Annahme einer horizontal auf die LZA wirkenden, harmonisch anregenden Windbelastung durchgeführt. Die komplette Struktur wird hierfür mit einem in globaler z-Richtung wirkenden Winddruck von $w_D = 1,0 \text{ kN/m}^2$ harmonisch, sinusförmig angeregt. Die Flächenlast wird für die Balkenelemente anhand der Durchmesser der einzelnen Querschnitte vereinfacht in eine äquivalente Linienlast umgerechnet. Der Einfluss der untersuchten Netzdiskretisierungen auf die Qualität der Berechnung wird dabei erneut als Abweichungen von Netzdiskretisierung B bezogen auf Netzdiskretisierung A im Frequenzbereich zwischen 0 Hz und 15 Hz ausgewertet. Dieser Frequenzbereich deckt die zuvor in der Modalanalyse betrachteten Moden 1 bis 6 ab.

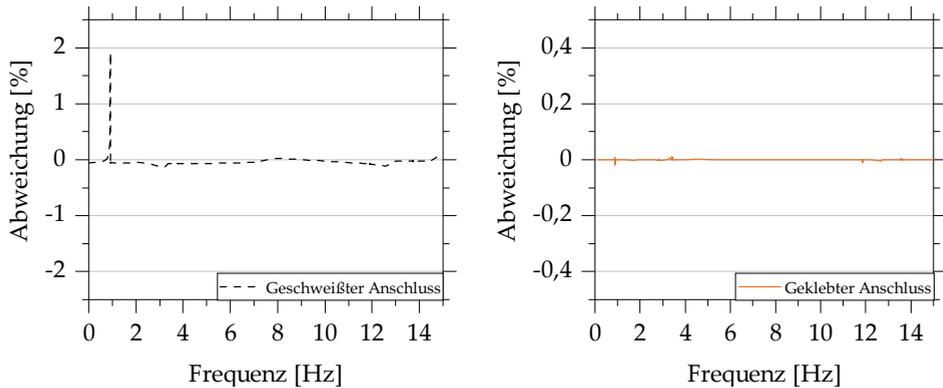


Abbildung 4.4: Ergebnisse der Frequenzganganalyse der Modelle der LZA mit geschweißtem (links) und geklebtem Anschluss (rechts) im Frequenzbereich von 0 Hz bis 15 Hz; Auswertung der Abweichungen von Netzdiskretisierung B bezogen auf Netzdiskretisierung A

Die Auswertungen der Ergebnisse der Frequenzganganalyse im Rahmen der Netzkonvergenzstudie sind in Abbildung 4.4 dargestellt. Die Analyse der Abweichungen findet auf Grundlage der Auswertung der Schwingungsamplituden der Spitze des Auslegers in globaler z-Richtung statt. Abbildung 4.4 zeigt, dass für beide Anschlussvarianten für Netzdiskretisierung A bereits ein quasi konvergentes Ergebnis erreicht wird. Lediglich im Bereich der ersten Eigenfrequenz der LZA mit geschweißtem Anschluss zeigt sich eine Abweichung von ca. 2 %,

was durch die großen Strukturverformungen im Resonanzbereich erklärt werden kann. Im übrigen Frequenzbereich liegen die Abweichungen deutlich unter 1 %. Eine ausführliche Darstellung der Ergebnisse durchgeführter Frequenzganganalysen sowie einer Parameterstudie können Abschnitt 4.3.3 entnommen werden.

Auf Grundlage der Ergebnisse der Netzkonvergenzstudie in Abbildung 4.3 und Abbildung 4.4 wird für die weiteren Untersuchungen die Netzdiskretisierung A verwendet. Das mit der Netzdiskretisierung A erstellte Berechnungsmodell der LZA ist in Abbildung 4.5 in einer Schnittansicht im Bereich des geklebten Anschlusses sowie einer Detailansicht der Vernetzung über die Dicke der einzelnen Komponenten dargestellt. Im Rahmen der numerischen Untersuchungen steht die Analyse der dynamischen Struktureigenschaften im Fokus. Aus diesem Grund kann auf die für Spannungsberechnungen empfohlene Diskretisierung einer Klebschicht mit mindestens fünf Elementen in Dickenrichtung verzichtet werden (Albiez et al. 2019b).

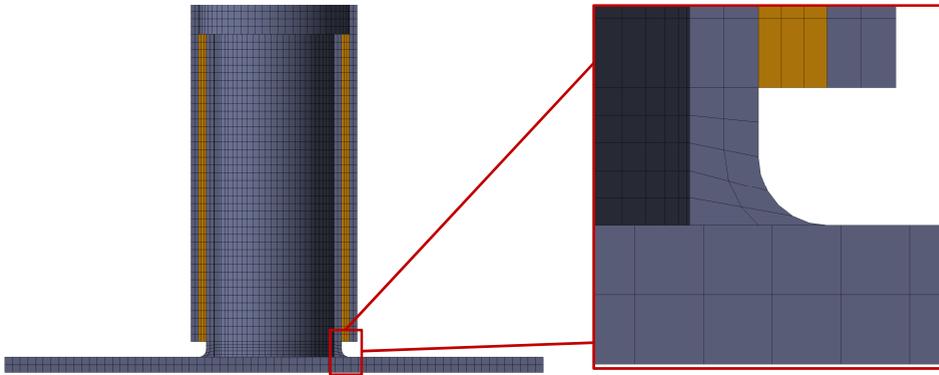


Abbildung 4.5: Gewählte Netzdiskretisierung A des Berechnungsmodells der LZA; Links: Schnittansicht im Bereich des geklebten Anschlusses; Rechts: Detaildarstellung der Vernetzung über die Dicke der einzelnen Bauteile

4.3.2 Eigenfrequenzen und -moden

Die Kenntnis der Eigenschwingungsformen sowie der zugehörigen Eigenfrequenzen eines Systems ist in der praktischen Baudynamik von großer Relevanz. Ein schwingungsfähiges System reagiert auf eine äußere Anregung mehr oder

weniger zeitversetzt mit einer Schwingungsantwort im Bereich einer Eigenfrequenz bzw. einer gewichteten Superposition mehrerer Eigenfrequenzen und -formen. Der ersten Eigenfrequenz, die die durch die niedrigste Frequenz aller Eigenfrequenzen charakterisiert ist, kommt baupraktisch meist die größte Bedeutung zu (vgl. Abschnitt 2.6).

Die Eigenformen und -frequenzen einer Struktur können im Rahmen einer Modalanalyse berechnet werden. Hierbei werden die Bewegungsgleichungen eines Systems in Abhängigkeit von Masse, Steifigkeit und evtl. vorhandener Dämpfung analytisch oder numerisch gelöst. Im Folgenden werden numerische Berechnungsverfahren zur Lösung der Bewegungsgleichungen verwendet.

Die ermittelten Eigenfrequenzen der ersten sechs Eigenmoden des geschweißten Systems sowie der Systeme mit geklebtem Anschluss mit den Klebstoffen EPH und PUR sind in Abbildung 4.6 dargestellt.

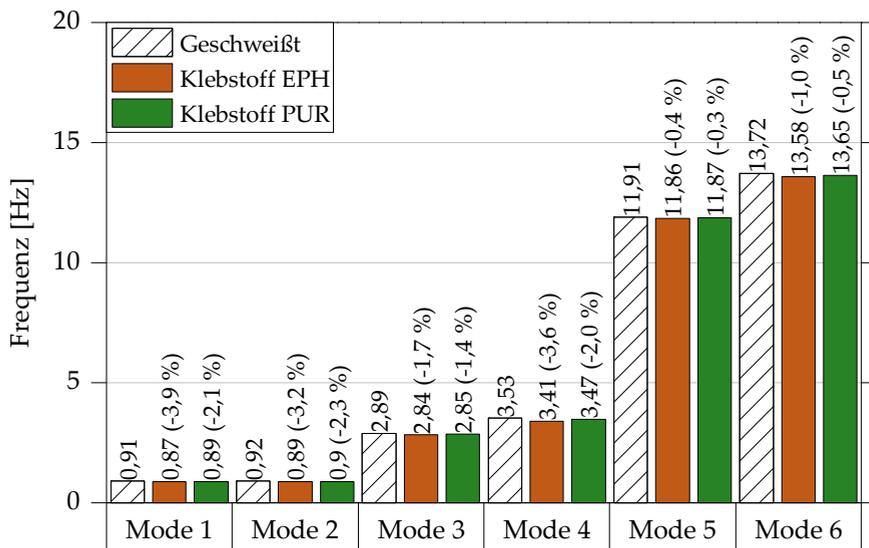


Abbildung 4.6: Vergleich der Eigenfrequenzen von Moden 1 bis 6 der LZA mit geschweißtem sowie geklebtem Anschluss; Klebstoffe EPH und PUR

Aufgrund eines vernachlässigbaren Einflusses vorhandener Dämpfungseffekte auf die Eigenfrequenzen bleiben diese in der Modalanalyse unberücksichtigt. In (Almitani und Othman 2016) sowie (Vaziri und Nayeb-Hashemi 2002) dokumen-

tierte Untersuchungen zeigen, dass der Einfluss vorhandener Dämpfungseffekte auf die Eigenfrequenzen insbesondere für den im Folgenden betrachteten Frequenzbereich von 0 Hz bis 15 Hz vernachlässigt werden kann.

Die Ergebnisse der Eigenfrequenzanalyse sind sowohl für den geschweißten Anschluss der LZA als auch für die Verbindung durch eine geklebte Steckverbindung mit den Klebstoffen EPH und PUR dargestellt. Zudem sind die prozentualen Abweichungen zwischen den Systemen mit geklebten Verbindungen mit den Klebstoffen EPH und PUR und dem System mit geschweißtem Anschluss in Abbildung 4.6 dokumentiert. Die Analyse der Eigenfrequenzen zeigt, dass für das System mit geschweißtem Anschluss in den dargestellten sechs Moden jeweils die größte Eigenfrequenz erreicht wird. Die Eigenfrequenzen der Systeme mit geklebtem Anschluss liegen geringfügig darunter. Unter Annahme einer annähernd konstanten Masse der Struktur folgt hieraus, dass der geschweißte Anschluss im Vergleich zu den Anschlüssen durch eine geklebte Steckverbindung eine höhere lokale Anschlusssteifigkeit aufweist.

Die Abweichung zwischen geschweißtem und geklebtem Anschluss beträgt im Maximum lediglich 3,9 % (Mode 1, Klebstoff EPH). Offensichtlich wird die Verringerung der Steifigkeit durch die Verwendung semistruktureller Klebstoffe im Anschlussbereich durch den Verbundquerschnitt der Steckverbindung und der damit verbundenen erhöhten Biegesteifigkeit teilweise kompensiert. Der Vergleich der Moden der beiden geklebten Systeme zeigt, dass die Eigenfrequenzen des mit dem Klebstoff PUR modellierten Systems geringfügig größer sind. Dies kann durch die höhere Klebstoffsteifigkeit erklärt werden. Allerdings ist der Einfluss der Klebstoffsteifigkeit auf die Eigenmoden des Systems von untergeordneter Bedeutung. Darüber hinaus kann beobachtet werden, dass durch die unterschiedlichen Steifigkeitsverhältnisse im Anschlussbereich kein Tausch der Eigenmoden der untersuchten Systeme stattfindet. Die Eigenformen des Systems mit geklebtem Anschluss sind in Abbildung 4.7 exemplarisch für den Klebstoff EPH dargestellt. Zusätzlich ist in Abbildung 4.7 für jede Eigenform die verformungsdominante Koordinatenrichtung angegeben. Mode 1 zeigt eine Biegeschwingung des Auslegers in globaler z-Richtung und eine Torsionschwingung des Mastes. Die Moden 2 und 3 weisen Biegeschwingungen in allen Querschnittsteilen in globaler y-Richtung auf. Die Moden 4 bis 6 zeigen entgegengesetzte Biegeschwingungen des Mastes oder des Auslegers. Diese gegenläu-

figen Schwingungen werden durch harmonische Anregung weniger stark ange-
regt und sind daher für weitere Untersuchungen von untergeordneter Bedeu-
tung.

Im Hinblick auf die Bemessung von Stahlbaustrukturen sind die geringen Aus-
wirkungen der Anordnung eines geklebten anstelle eines geschweißten Anschlusses auf die Eigenfrequenz und -formen eines Systems positiv hervorzuhe-
ben. Zudem bietet die Anordnung geklebter Anschlüsse gegenüber
geschweißten Anschlüssen das Potential, das Antwortverhalten bestehender
Strukturen gegenüber einer dynamischen Anregung zu optimieren. Die Aus-
wirkungen klebstoffinhärenter Dämpfung auf das Schwingungsverhalten der
LZA unter einer harmonischen Windanregung wird im Folgenden Ab-
schnitt näher untersucht.

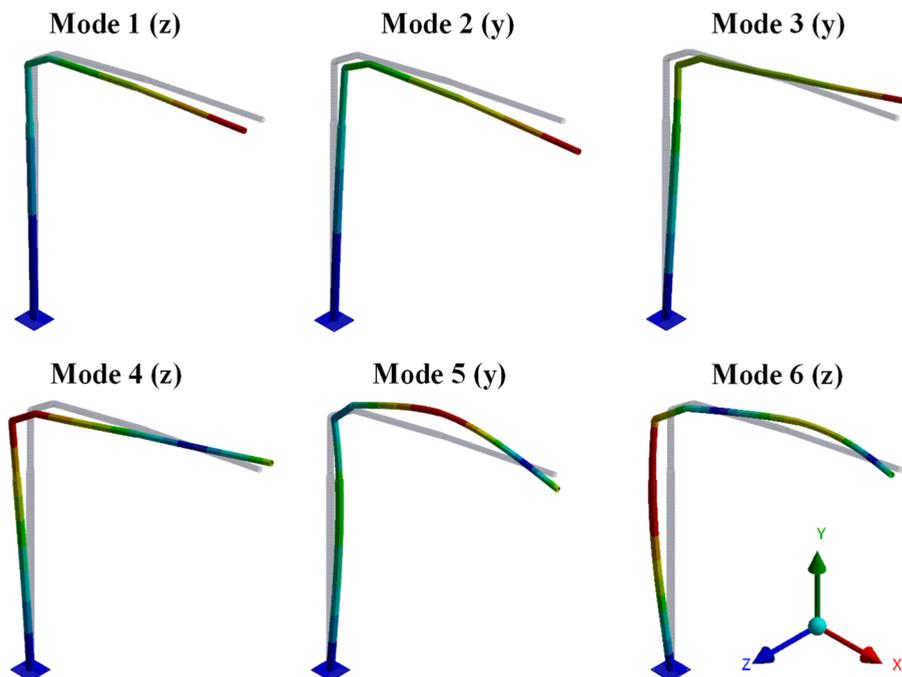


Abbildung 4.7: Eigenformen der Moden 1 bis 6 der LZA mit geklebtem Anschluss unter Angabe der verformungsdominanten Koordinatenrichtung (Damm et al. 2022b)

4.3.3 Stationäre Schwingungszustände

Die Auswirkung klebstoffinhärenter Dämpfung auf das harmonische Antwortverhalten der LZA wird bei unterschiedlichen Anregungsfrequenzen im Rahmen einer harmonischen Frequenzganganalyse untersucht. Infolge einer harmonischen Anregung klingt die partikuläre Lösung der Bewegungsgleichung ab und das System folgt mit einem zeitlichen Versatz dem Beanspruchung-Zeit-Verlauf. Man spricht dann von einem zeitinvarianten, stationären Schwingungszustand.

Dynamisch beanspruchte Strukturen werden häufig so ausgelegt, dass die Eigenfrequenzen nicht im Bereich der bemessungsrelevanten Systemanregungen liegen. Dies kann durch die gezielte Veränderung der Masse sowie der Steifigkeit einer Struktur erfolgen. Allerdings lassen sich diese dynamischen Optimierungen nicht für alle Strukturen gleichermaßen effektiv umsetzen. Zudem gibt es eine Vielzahl praktischer Anwendungsfälle, bei denen Baukonstruktionen oder Strukturen des Maschinenbaus betriebsbedingt zeitlich mehr oder weniger lange Anregungen im Bereich ihrer jeweiligen Eigenfrequenzen erfahren. Hierzu zählen z.B. Windkraftanlagen (Nagel et al. 2019) oder Schwingungs- und Produktionsmaschinen (Vervaeke et al. 2019). Zudem können breitfrequente Anregungsspektren, wie sie beispielsweise bei Erdbeben auftreten, dazu führen, dass Strukturen unplanmäßig im Bereich der Eigenfrequenzen angeregt werden (Petersen und Werkle 2017). Hieraus leitet sich das Erfordernis der Dämpfung von Strukturschwingungen im Bereich der Eigenfrequenzen ab. Im Folgenden soll daher eine Darstellung des Dämpfungseinflusses auf die Amplituden im Resonanzfall im Bereich der Eigenfrequenzen das Potential von Klebverbindungen zur Dämpfung dieser Schwingungsphänomene aufzeigen.

Die stationäre Systemantwort gegenüber einer harmonischen Anregung kann für den relevanten Frequenzbereich durch eine Frequenzganganalyse ermittelt werden. Hierfür wird die Methode der modalen Superposition herangezogen. Die komplette Struktur wird mit einem in globaler z-Richtung wirkenden Winddruck von $w_D = 1,0 \text{ kN/m}^2$ harmonisch, sinusförmig angeregt. Auf die Berücksichtigung von Sekundäreffekten, wie eine Anregung durch die Kármánsche Wirbelstrasse, aus der sich eine zusätzliche vertikale Anregung ergeben könnte, wird in der Analyse verzichtet. Die Analyse des Einflusses einer lokal wirkenden Knotendämpfung auf die dynamischen Eigenschaften der untersuchten Struktur

kann auf Grundlage vereinfachter Annahmen zur Art und Höhe der Anregung erfolgen. Die gewonnenen Erkenntnisse lassen sich anschließend auf komplexere Anregungen übertragen.

Die Frequenzganganalyse wird für einen Frequenzbereich von 0 Hz bis 15 Hz durchgeführt, wodurch alle zuvor ermittelten Eigenmoden innerhalb des betrachteten Frequenzbereichs liegen. Der Einfluss unterschiedlich großer Werkstoffdämpfung des Klebstoffs auf die Resonanzamplituden wird über die Variation des Verlustfaktors entsprechend der Angaben in Tabelle 4.1 untersucht. Zur Bewertung der Ergebnisse dient das System mit geschweißtem Anschluss als Referenzsystem.

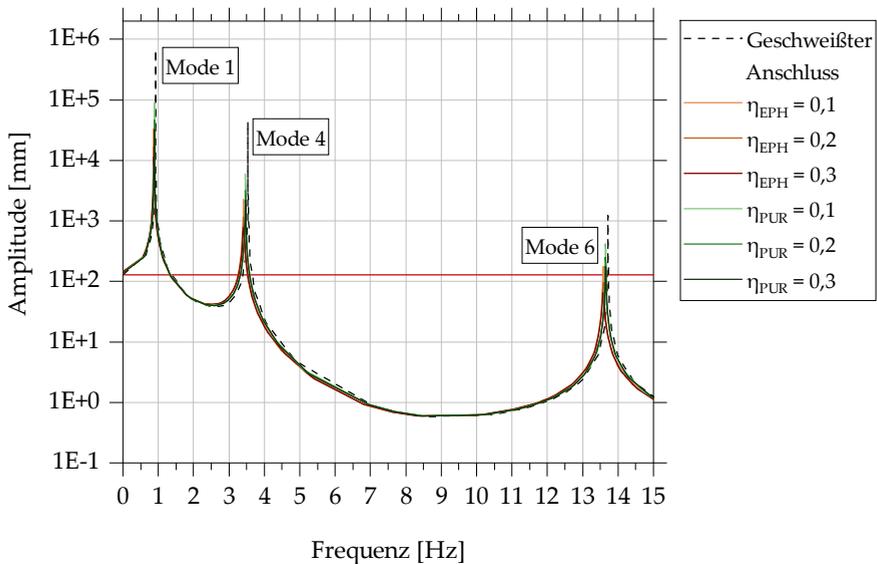


Abbildung 4.8: Ergebnisse der Frequenzganganalyse infolge harmonischer Anregung mit $w_D = 1,0 \text{ kN/m}^2$ für den Frequenzbereich von 0 Hz bis 15 Hz für das Referenzsystem mit geschweißtem Anschluss sowie für die Systeme mit geklebtem Anschluss; Klebstoffe EPH und PUR mit den Verlustfaktoren $\eta = 0,1, 0,2$ und $0,3$

Die für das Referenzsystem mit geschweißtem Anschluss und den Systemen mit geklebtem Anschluss ermittelten Frequenzgänge sind in Abbildung 4.8 dargestellt. Hierfür werden die ermittelten maximalen Schwingungsamplituden in globaler z-Richtung über der Anregungsfrequenz aufgetragen. Die maximale Schwingungsamplitude tritt systemübergreifend an der Spitze des Auslegers auf.

Die angegebenen Amplituden entsprechen der stationären Schwingungsantwort des Systems für die jeweiligen Anregungsfrequenzen. Die größten Amplituden treten im Resonanzfall im Bereich der Moden 1, 4 und 6 auf.

Das Berechnungsergebnis für eine Frequenz von 0 Hz entspricht der Amplitude für eine statische Beanspruchung der LZA. Die maximale Auslenkung des Systems mit geschweißtem Anschluss infolge einer statischen Belastung liegt bei 128 mm. Diese Auslenkung ist als horizontale Referenzlinie in Abbildung 4.8 kenntlich gemacht. Eine Analyse der Systeme mit geklebtem Anschluss zeigt, dass die maximalen Auslenkungen unter einer statischen Belastung für den geklebten Anschluss bei Verwendung des Klebstoffs EPH um ca. 12,5 % (+16 mm) bzw. bei Verwendung des Klebstoffs PUR um ca. 8,5 % (+11 mm) im Vergleich zum geschweißten Referenzsystem zunehmen. Die Anordnung eines geklebten anstelle eines geschweißten Anschlusses sowie die Verwendung weniger steifer, semistruktureller Klebstoffe wirkt sich somit nur vernachlässigbar auf die Verformungen der LZA unter einer statischen Belastung aus. Wie bereits in Abschnitt 4.3.2 festgestellt werden konnte, wird die lokal geringere Steifigkeit durch die Anordnung einer Klebschicht aus semistrukturalem Klebstoff durch den entstehenden Verbundquerschnitt teilweise kompensiert.

Detailbetrachtung der Resonanzstelle im Bereich der ersten Eigenfrequenz

Die Analyse des in Abbildung 4.8 dargestellten Frequenzgangs für den Frequenzbereich von 0 Hz bis 15 Hz zeigt, dass die LZA lediglich in einem schmalen Frequenzband um die Eigenfrequenzen große Schwingungsamplituden aufweist. In diesen Frequenzbereich liegt eine Resonanzstelle der LZA vor. Dies gilt unabhängig von der betrachteten Anschlussvariante. Zudem werden nur die Eigenmoden mit großen Verformungsanteilen in Richtung der aufgetragenen Belastung in globaler z-Richtung angeregt. Die Moden 2, 3 und 5, deren Eigenformen große Verformungsanteile in globaler y-Richtung und nur geringe Verformungsanteile in globaler z-Richtung aufweisen, werden durch den aufgetragenen Winddruck nicht angeregt. Die Bereiche zwischen den Eigenfrequenzen liegen deutlich unterhalb der maximalen Auslenkung des geschweißten Systems infolge einer statischen Belastung. Sie sind daher für eine dynamische Auslegung der Struktur nicht relevant. Der Einfluss unterschiedlicher Dämpfungseigenschaften

der Klebstoffe auf die maximalen Schwingungsamplituden im Bereich der Resonanzstelle um die erste Eigenfrequenz wird durch Variation des Verlustfaktors analysiert. Die Analyse der Amplituden in Abbildung 4.9 zeigt die maximalen Amplituden sowohl für den geschweißten (schwarz) als auch für den geklebten Anschluss für den Klebstoff EPH (orange) und den Klebstoff PUR (grün) im Bereich der ersten Eigenfrequenz.

In Abschnitt 4.3.2 konnte bereits gezeigt werden, dass sich die Eigenfrequenzen der betrachteten Systeme geringfügig unterscheiden, weshalb die Maxima der Schwingungsamplituden in Abbildung 4.9 im Bereich der ersten Eigenfrequenz nicht übereinanderliegen. Ein Vergleich der maximalen Schwingungsamplituden in Abbildung 4.9 zeigt, dass sich für die Systeme mit geklebtem Anschluss im Vergleich zum Referenzsystem mit geschweißtem Anschluss deutlich geringere Amplituden im Bereich der ersten Eigenfrequenz ergeben. Dies gilt unabhängig vom betrachteten Verlustfaktor sowohl für den Klebstoff EPH als auch für den Klebstoff PUR.

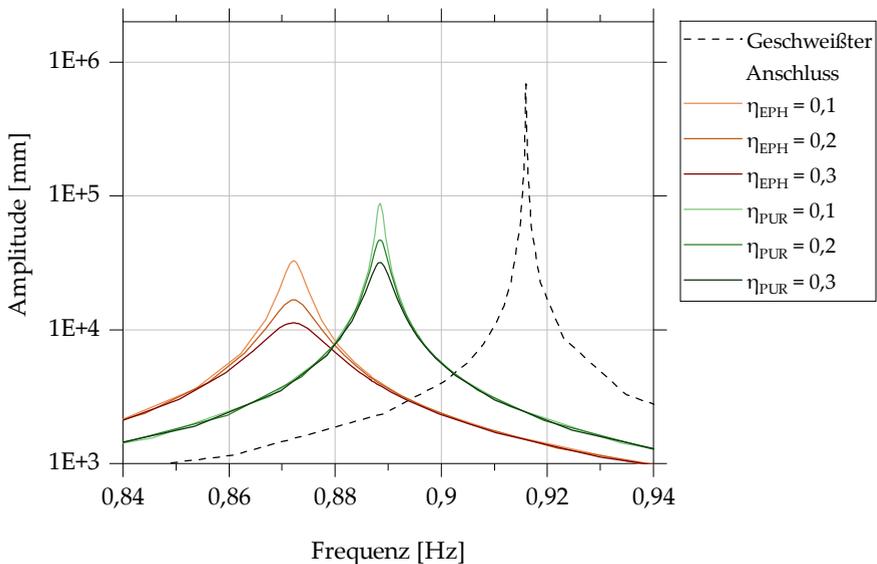


Abbildung 4.9: Ergebnisse der Frequenzganganalyse infolge harmonischer Anregung mit $w_D = 1,0 \text{ kN/m}^2$ für den Resonanzbereich um die erste Eigenfrequenz für das Referenzsystem mit geschweißtem Anschluss sowie für die Systeme mit geklebtem Anschluss; Klebstoffe EPH und PUR mit den Verlustfaktoren $\eta = 0,1, 0,2$ und $0,3$

In Abbildung 4.10 ist ein prozentualer Vergleich der maximalen Schwingungsamplituden der betrachteten Systeme mit geklebtem Anschluss bezogen auf die Amplitude des Referenzsystems mit geschweißtem Anschluss dargestellt. Die Analyse der auftretenden Maxima zeigt, dass bei Verwendung des weniger steifen Klebstoffs EPH ($E_{EPH} = 86 \text{ MPa}$) eine deutlich stärkere Abnahme der Maximalamplitude zu beobachten ist. Dies gilt für alle untersuchten Verlustfaktoren. Für den Klebstoff EPH reduzieren sich die Amplituden bereits mit einem Verlustfaktor von 0,1 auf 4,8 % der Amplitude des geschweißten Referenzsystems. Eine Erhöhung des Verlustfaktors auf 0,2 bzw. 0,3 reduziert die maximale Schwingungsamplitude auf 2,5 % bzw. 1,6 % der Amplitude des geschweißten Referenzsystems. Der Vergleich mit dem Klebstoff PUR ($E_{PUR} = 356 \text{ MPa}$) zeigt eine deutlich geringere Amplitudenreduktion für die Verwendung steiferer Klebstoffe bei gleichem Verlustfaktor. Die Amplitudenreduktionen, die für einen Verlustfaktor des Klebstoffs PUR zwischen 0,1 und 0,3 erreicht werden, liegen zwischen 87,1 % und 95,3 %.

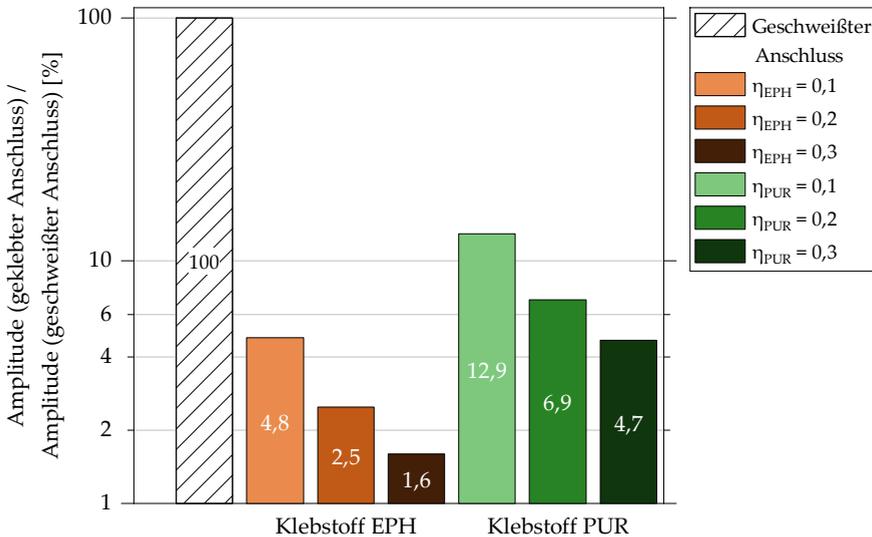


Abbildung 4.10: Prozentualer Vergleich der maximalen Schwingungsamplituden im Bereich der ersten Eigenfrequenz des Referenzsystems mit geschweißtem Anschluss sowie den Systemen mit geklebtem Anschluss; Klebstoffe EPH und PUR mit den Verlustfaktoren $\eta = 0,1, 0,2$ und $0,3$

Die bisherigen Ergebnisse zeigen, dass die maximale Schwingungsamplitude im Resonanzbereich der LZA durch die Dämpfungseigenschaften eines geklebten Anschlusses signifikant reduziert werden kann. Positiv hervorzuheben ist, dass dies bereits für geringe Verlustfaktoren sowie für die beiden untersuchten Klebstoffe beobachtet werden kann. In diesem Zusammenhang muss jedoch festgehalten werden, dass die maximale Amplitude durch den Einsatz des weniger steifen Klebstoffs EPH bei gleichem Verlustfaktor effektiver reduziert werden kann.

Parameterstudie

Im Rahmen einer Parameterstudie wird im Folgenden der Einfluss der Klebschichtdicke sowie der Überlapplänge auf die maximale Schwingungsamplitude im Bereich der ersten Eigenfrequenz untersucht. In allen Untersuchungen wird für die Klebstoffe EPH und PUR ein Verlustfaktor von $\eta = 0,2$ festgelegt. Neben der bisher untersuchten Klebschichtdicke von 5,0 mm werden sowohl kleinere als auch größere Klebschichtdicken untersucht. Die Abmessungen des Außenrohrs der LZA werden dabei konstant gehalten.

Der Durchmesser des innenliegenden Kreishohlprofils wird an die betrachtete Klebschichtdicke angepasst. Die Ergebnisse der Untersuchung in Abbildung 4.11 zeigen die absoluten Amplituden in Abhängigkeit der untersuchten Klebschichtdicke sowie die prozentuale Zu- und Abnahme der Amplitude gegenüber der Referenzklebschichtdicke 5,0 mm.

Eine globale Betrachtung von Abbildung 4.11 zeigt, dass eine Erhöhung der Klebschichtdicke mit einer Reduktion der maximalen Schwingungsamplitude einhergeht. Die dargestellten Kurven der beiden Klebstoffe nähern sich mit zunehmender Klebschichtdicke asymptotisch einem Grenzwert der minimalen Amplitude an. Ein Anstieg der Klebschichtdicke auf 12,5 mm führt für beide Klebstoffe zu einer Abnahme der Amplitude gegenüber der Referenzklebschichtdicke von mehr als 50 %. Die prozentuale Abnahme der maximalen Schwingungsamplitude scheint mit zunehmender Klebschichtdicke nicht mehr von der Klebstoffsteifigkeit bestimmt zu werden.

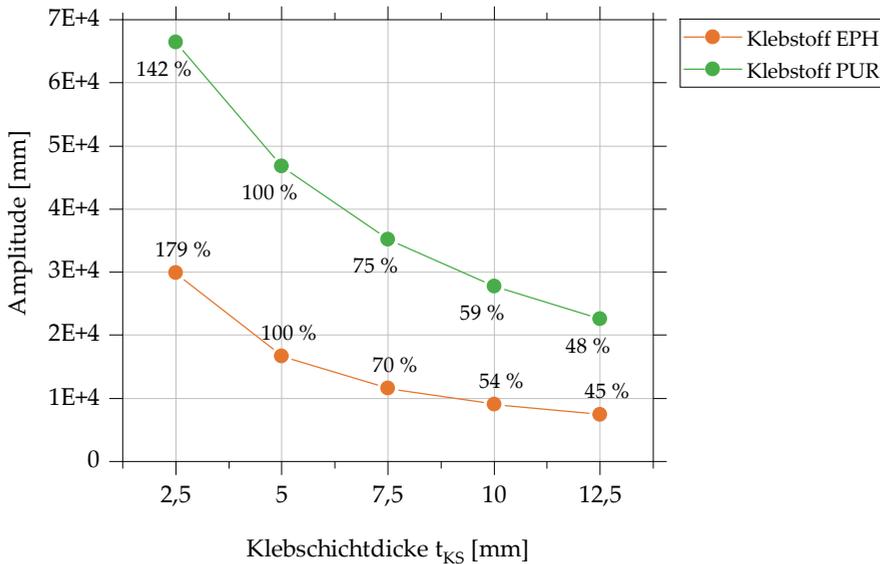


Abbildung 4.11: Untersuchung des Einflusses der Klebschichtdicke auf die Schwingungsamplitude im Bereich der ersten Eigenfrequenz der Systeme mit geklebtem Anschluss mit den Klebstoffen EPH und PUR mit dem konstanten Verlustfaktor $\eta = 0,2$ und einer konstanten Überlapplänge von 200 mm; Auswertung des absoluten und prozentualen Einflusses der Variation der Klebschichtdicke bezogen auf die Referenzklebschichtdicke 5,0 mm

Eine Verringerung der Klebschichtdicke führt bei Verwendung des weniger steifen Klebstoffs EPH ($E_{EPH} = 86 \text{ MPa}$) zu einer deutlich größeren prozentualen Amplitudenzunahme. Für die Klebschichtdicke 2,5 mm nimmt die Amplitude gegenüber der Referenzklebschichtdicke von 5,0 mm für den Klebstoff EPH um 79 % zu. Für den Klebstoff PUR ($E_{PUR} = 356 \text{ MPa}$) steigt die Amplitude unter gleichen Randbedingungen um lediglich 42 % an. Die Zunahme der Resonanzamplitude mit abnehmender Klebschichtdicke begründet sich durch eine Reduzierung der Dämpfung im Bereich des geklebten Anschlusses. Die klebstoffinhärente Dämpfung im numerischen Berechnungsmodell wird durch eine Deformation der Klebschicht während der Schwingung der Gesamtstruktur aktiviert. Daher können die zunehmenden Schwingungsamplituden mit abnehmender Klebschichtdicke durch die veränderte resultierende Gesamtsteifigkeit des geklebten Anschlusses begründet werden. Diese ergibt sich aus der vorhandenen Anschlussgeometrie sowie der Steifigkeit des verwendeten Klebstoffs. Die

Auswirkungen einer steigenden Gesamtsteifigkeit der Struktur mit abnehmender Klebschichtdicke und der damit einhergehenden reduzierten Deformation der Klebschicht bzw. der Klebstoffdämpfung sind für den steiferen Klebstoff erwartungsgemäß geringer. Die Ergebnisse für den Klebstoff EPH zeigen, dass der insgesamt weniger steife Anschluss deutlich stärker durch eine reduzierte Klebschichtdicke beeinflusst wird.

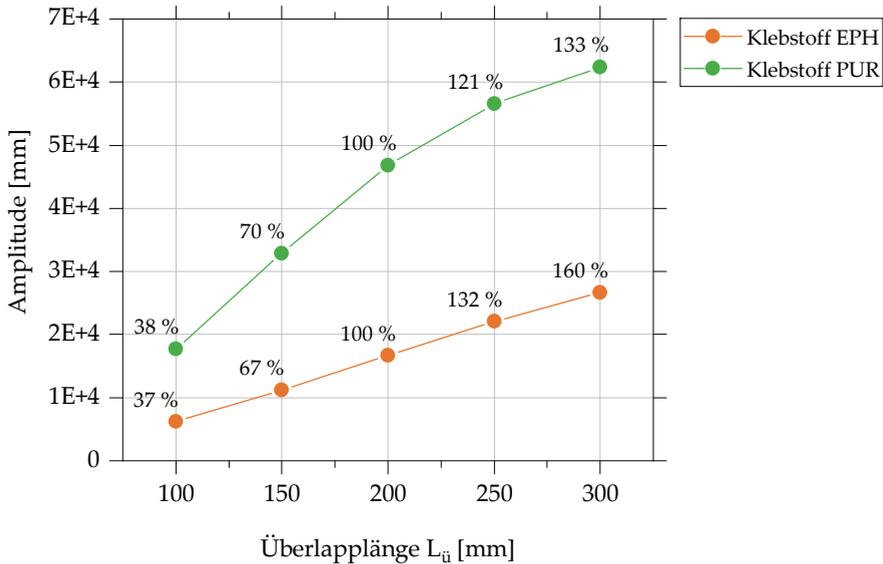


Abbildung 4.12: Untersuchung des Einflusses der Überlapplänge auf die Schwingungsamplitude im Bereich der ersten Eigenfrequenz der Systeme mit geklebtem Anschluss mit den Klebstoffen EPH und PUR mit dem konstanten Verlustfaktor $\eta = 0,2$ und einer konstanten Klebschichtdicke von 5,0 mm; Auswertung des absoluten und prozentualen Einflusses der Variation der Überlapplänge bezogen auf die Referenzüberlapplänge 200 mm

Die lokale Steifigkeit des geklebten Anschlusses sowie die damit verbundene Aktivierung der klebstoffinhärenten Dämpfung wird neben der Klebschichtdicke durch die Überlapplänge beeinflusst, deren Zusammenhang im Folgenden untersucht wird. Das gewählte Referenzsystem besitzt eine Überlapplänge von 200 mm und eine Klebschichtdicke von 5,0 mm. Die Klebschichtdicke wird für alle folgenden Untersuchungen konstant gehalten. Es werden sowohl kleinere als auch größere Überlappängen im Verhältnis zur Referenzüberlapplänge unter-

sucht und deren Einfluss auf die maximale Schwingungsamplitude im Bereich der Resonanzstelle um die erste Eigenfrequenz quantifiziert. Die Ergebnisse sind in Abbildung 4.12 dargestellt. Die Ergebnisse der Untersuchung des Einflusses der Überlapplänge in Abbildung 4.12 zeigen für beide Klebstoffe, dass eine Zunahme der Überlapplänge mit einem Anstieg der maximalen Schwingungsamplitude einhergeht. Der Zusammenhang zwischen der Überlapplänge und der maximalen Schwingungsamplitude ist für den Klebstoff EPH annähernd linear. Für den Klebstoff PUR kann dagegen ein nichtlinearer Zusammenhang beobachtet werden.

Für beide Klebstoffe führt eine Reduzierung der Überlapplänge auf 100 mm zu einer Abnahme der auftretenden Resonanzamplitude von mehr als 60 %. Die Abnahme der Schwingungsamplitude mit sinkender Überlapplänge kann durch die damit einhergehende Reduzierung der Biegesteifigkeit des geklebten Anschlusses erklärt werden. Eine reduzierte Biegesteifigkeit führt zu größeren Deformationen der Klebschicht und damit zu einer erhöhten Klebschichtdämpfung. Aus diesem Grund liegen die maximalen Amplituden, die sich für den steiferen Klebstoff PUR ergeben, oberhalb der Werte für den weniger steifen Klebstoff EPH. Die geringere Steifigkeit des Klebstoffs EPH führt bei gleicher Anschlussgeometrie aus den genannten Gründen zu einer höheren aktivierten Werkstoffdämpfung. Ein Vergleich der beiden Kurven zeigt, dass sich die maximalen Amplituden mit abnehmender Überlappungslänge annähern. Die aktivierte Materialdämpfung hängt demnach mit abnehmender Überlapplänge zunehmend weniger von der Steifigkeit des Klebstoffs ab.

Zusammenfassung

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass sich sowohl die Klebschichtdicke als auch die Überlapplänge eines geklebten Anschlusses auf die Höhe der aktivierten Werkstoffdämpfung im Bereich der Eigenfrequenzen auswirken. Mit einer Erhöhung der Klebschichtdicke geht eine Steigerung der Werkstoffdämpfung einher. Für die Überlapplänge zeigt sich, dass die aktivierte Werkstoffdämpfung innerhalb der Klebschicht durch die Reduzierung der Überlapplänge gesteigert werden kann. Beide Beobachtungen lassen sich durch eine Reduzierung der Anschlusssteifigkeit und einen damit verbundenen Anstieg der Defor-

mation der Klebschicht erklären. Die Deformation der Klebschicht steht dabei in direktem Zusammenhang mit der Aktivierung klebstoffinhärenter Dämpfung im numerischen Berechnungsmodell. Es sei darauf hingewiesen, dass neben der dynamischen Auslegung zusätzlich auch die statischen Anforderungen an eine Klebverbindung berücksichtigt werden müssen. Ausgehend hiervon können die Dämpfungseigenschaften eines geklebten Anschlusses durch die Anpassung von Geometrie- und Werkstoffparametern optimiert werden. Dabei ist darauf zu achten, dass sich eine Änderung der Klebschichtdicke bzw. der Überlapplänge gegenteilig auf die Festigkeit sowie die Dämpfungseigenschaften einer Klebverbindung auswirken. Eine Erhöhung der Klebschichtdicke sowie eine Verringerung der Überlappungen führen zu einer Reduzierung der statischen Tragfähigkeit geklebter Verbindungen. Demgegenüber ist eine derartige Anpassung der Klebfugegeometrie mit einem Anstieg der Dämpfungseigenschaften assoziiert.

4.3.4 Instationäre Schwingungszustände

Die Analyse des Einflusses klebstoffinhärenter Dämpfung auf transiente, zeitvariante Schwingungszustände erfolgt anhand einer Simulation eines transienten Schwingungsvorgangs im Zeitbereich. Dazu wird die Bewegungsgleichung des Systems in jedem definierten Zeitschritt gelöst.

Definition des Spektrums der Anregung

Das System der LZA wird mit einem periodisch wirkenden Winddruck belastet, der sich aus der Überlagerung von einzelnen harmonisch anregenden Winddrücken mit unterschiedlichen Frequenzen ergibt. Die einzelnen harmonischen Anregungen folgen der Formulierung in Gl. 4.1.

$$-\frac{P_{wd}}{2} + \frac{P_{wd}}{2} \times \cos(2 \times \pi \times f \times t) \quad (4.1)$$

mit $P_{wd,i}$ = Maximale Amplitude des Winddrucks der jeweiligen harmonischen Grundanregung [kN/m²]
 f = Frequenz [Hz]
 t = Zeitschritt [s]

Zur Ermittlung des Winddrucks der einzelnen harmonischen Anregungen wird zunächst ein Referenzwert des resultierenden Gesamwinddrucks ermittelt, der als realitätsnaher Wert für die Untersuchung der LZA herangezogen werden kann. Hierfür werden die Regelungen zur Ermittlung von Windbelastungen auf Bauwerke aus (DIN EN 1991-1-4) sowie dem zugehörigen nationalen Anhang (DIN EN 1991-1-4/NA) zugrunde gelegt. Da es sich bei den vorgestellten Untersuchungen lediglich um eine verallgemeinerte Analyse des Dämpfungspotentials geklebter Anschlüsse handelt, werden konservative Annahmen zur vereinfachten Berechnung einer repräsentativen Windbelastung getroffen.

Die Grundlage für die Ermittlung einer repräsentativen Windbelastung nach (DIN EN 1991-1-4) bildet die Basiswindgeschwindigkeit v_b , die als der 10-Minuten-Mittelwert der Windgeschwindigkeit in einer Höhe von 10 m definiert ist. Dieser Mittelwert der Windgeschwindigkeit, der als quasi-statischer Anteil der Windbelastung betrachtet werden kann, wird mit einem turbulenten, dynamischen Anteil der Windbelastung überlagert. Der als Böenwindgeschwindigkeit bezeichnete dynamische Anteil der Windbelastung ergibt sich aus dem Produkt der Basiswindgeschwindigkeit, der Dichte der Luft sowie einem Faktor zur Berücksichtigung der Geländebeschaffenheit. Die Böenwindgeschwindigkeit sowie der sich daraus ergebende Böenwindgeschwindigkeitsdruck kann nach (DIN EN 1991-1-4/NA) vereinfacht unter der Annahme der Windzone III für einen fiktiven Standort der LZA in Norddeutschland sowie einer Bauwerkshöhe von weniger als 10 m zu $q_p = 0,80 \text{ kN/m}^2$ bestimmt werden. Die vereinfachte Ermittlung des Böengeschwindigkeitsdrucks gilt dabei unter der Annahme nicht schwingungsanfälliger Bauwerke und Bauteile. Schwingungsanfällige Bauwerke nach (DIN EN 1991-1-4) reagieren nachgiebig auf einwirkende Windbelastungen, wodurch dynamische Überhöhungen durch Schwingungen im Resonanzbereich induziert werden können. Zudem muss bei der Berechnung der Spitzenwinddrücke berücksichtigt werden, dass diese nicht zeitgleich auf der gesamten Bauwerksoberfläche auftreten können. Beides kann durch einen kombinierten Strukturbeiwert c_{scd} nach (DIN EN 1991-1-4) berücksichtigt werden. Für den vorliegenden Fall der LZA sind die in (DIN EN 1991-1-4) angegebenen Voraussetzungen hinsichtlich der Bauwerkshöhe sowie der Abmessungen der LZA zur vereinfachten Annahme von $c_{scd} = 1,0$ erfüllt. Es sind demnach keine dynamischen Überhöhungen durch die Schwingungsanfälligkeit des Bauwerks zu

berücksichtigen. Aufgrund des gewählten Ansatzes einer konservativen Berechnung der auftretenden Windlasten wird der Böengeschwindigkeitsdruck pauschal auf den Wert $q_p = 0,9 \text{ kN/m}^2$ erhöht, was einer Erhöhung um 12,5 % entspricht. Dieser Wert wird als oberer Grenzwert des auftretenden Böengeschwindigkeitsdrucks definiert.

Zur Ermittlung der repräsentativen Windanregung der LZA werden vier harmonische Grundanregungen mit verschiedenen Frequenzen überlagert. Alle Grundanregungen haben dabei vereinfacht die gleiche maximale Winddruckamplitude von $P_{wd,i} = 0,25 \text{ kN/m}^2$. Die Grundanregungen sind in Tabelle 4.3 zusammengefasst.

Tabelle 4.3: Harmonische Grundanregungen 1 bis 4 sowie zugehörige Anregungsfrequenzen und -amplituden

Grundanregung	Frequenz	Winddruckamplitude
1	0,10 Hz	0,25 kN/m ²
2	0,25 Hz	0,25 kN/m ²
3	0,33 Hz	0,25 kN/m ²
4	0,50 Hz	0,25 kN/m ²

Die in Tabelle 4.3 angegebenen Frequenzen der Anregung werden auf Grundlage von in (Ciupack et al. 2019b) und (Ciupack et al. 2019a) dokumentierten Auswertungen von Daten eines Wettermasts des Instituts für Meteorologie und Klimaforschung des KIT in Karlsruhe definiert. Die Frequenz der Böen repräsentativer Windereignisse liegt demnach im Bereich von 0,1 Hz und wird so auch für den fiktiven Standort der LZA angenommen. Es werden zudem drei weitere Anregungsfrequenzen untersucht, die jedoch deutlich unterhalb der ersten Eigenfrequenz der LZA liegen.

Die resultierende Winddruckverteilung durch Überlagerung der in Tabelle 4.3 dokumentierten harmonischen Grundanregungen ist in Abbildung 4.13 dargestellt. Zudem sind in Abbildung 4.13 der Basisdruck sowie der Böengeschwindigkeitsdruck (Böendruck) als horizontale Linien gekennzeichnet.

Der Mittelwert der ermittelten Winddruckverteilung durch Überlagerung von vier harmonischen Grundanregungen mit variierenden Frequenzen liegt bei $0,50 \text{ kN/m}^2$ und entspricht dabei in etwa dem ermittelten Basisdruck von $v_b = 0,47 \text{ kN/m}^2$. Zudem zeigt sich, dass die auftretenden Spitzenwerte des Winddrucks im Bereich zwischen $0,8 - 0,9 \text{ kN/m}^2$ liegen und somit den normativ ermittelten, maximalen Böengeschwindigkeitsdruck übersteigen.

Die periodische Winddruckverteilung in Abbildung 4.13 wird durch Multiplikation mit dem Durchmesser der Kreishohlprofile in eine äquivalente Linienlast umgerechnet und so auf die einzelnen Kreishohlprofile aufgebracht.

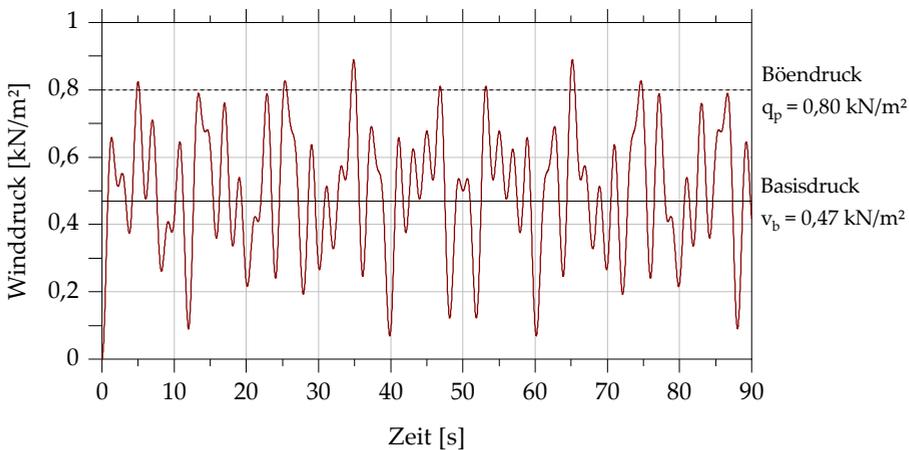


Abbildung 4.13: Resultierende periodische Winddruckverteilung durch Überlagerung von vier harmonischen Grundanregungen mit einer konstanten Amplitude von $0,25 \text{ kN/m}^2$ und den Anregefrequenzen $0,1 \text{ Hz}$, $0,25 \text{ Hz}$, $0,33 \text{ Hz}$ und $0,5 \text{ Hz}$

Im Bereich des aus Volumenelementen modellierten Anschlusspunkts wird die Winddruckverteilung auf die Oberflächen der außenliegenden Stahlbauteile aufgebracht. Für die Berechnung der resultierenden Linienlasten auf die LZA wird der Kraftbeiwert nach (DIN EN 1991-1-4) konservativ zu $c_f = 1,0$ gesetzt, wodurch die in Bezug auf die Umströmung günstige Querschnittsform der Kreishohlprofile vernachlässigt wird. Zudem werden wirbelerregte Querschwingungen vernachlässigt, die durch sich alternierend ablösende Wirbel orthogonal zur Anregerichtung des Windes entstehen (vgl. Abschnitt 4.3.3).

Im Rahmen der transienten Analyse sollen sowohl das erzwungene Ein- als auch das anschließende freie Ausschwingverhalten untersucht werden. Hierfür wird die LZA über einen Zeitraum von 200 s mit dem in Abbildung 4.14 dargestellten Verlauf des Winddrucks angeregt.

Bis zu einer Zeit von $t \approx 100$ s wird die LZA mit der zuvor ermittelten Winddruckverteilung angeregt. Ab dem, dem Zeitpunkt $t = 100$ s nächstgelegenen lokalen Maximum des Winddrucks, findet bis zum Zeitpunkt $t = 200$ s keine weitere Anregung der LZA statt. Die LZA kann in diesem Zeitraum frei ausschlagen.

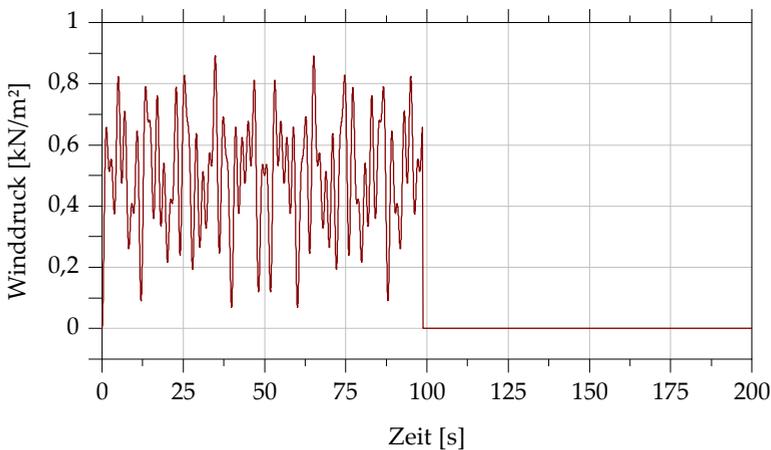


Abbildung 4.14: Winddruckverteilung über einen Zeitraum von 200 s zur Untersuchung des Ein- und Ausschwingverhaltens der LZA

Die Untersuchungen werden für den geklebten Anschluss ($t_{KS} = 5,0$ mm; $L_{\bar{a}} = 200$ mm) exemplarisch mit einem Verlustfaktor für die beiden Klebstoffe EPH und PUR von $\eta = 0,3$ durchgeführt. Die numerische Dämpfung wird für die transienten Analysen zu Null gesetzt. Im Rahmen numerischer Zeitintegrationsverfahren werden die Berechn

ungen in Abhängigkeit des gewählten Zeitschritts durch die Implementierung numerischer Dämpfung stabilisiert (Bathe und Baig 2005). Aufgrund der in allen numerischen Berechnungsmodellen implementierten Werkstoffdämpfung werden die Integrationsverfahren ausreichend stabilisiert. Zudem werden die Be-

rechnungsergebnisse so nicht durch das zusätzliche Auftreten numerischer Dämpfung beeinflusst.

Ergebnisse

Die Ergebnisse der transienten Analysen sind als Vergleich des geschweißten Referenzsystems mit den Systemen mit geklebtem Anschluss für die beiden Klebstoffe EPH und PUR in Abbildung 4.15 dargestellt. Die Schwingungsantwort wird dabei an der Spitze des Auslegers der LZA ausgewertet.

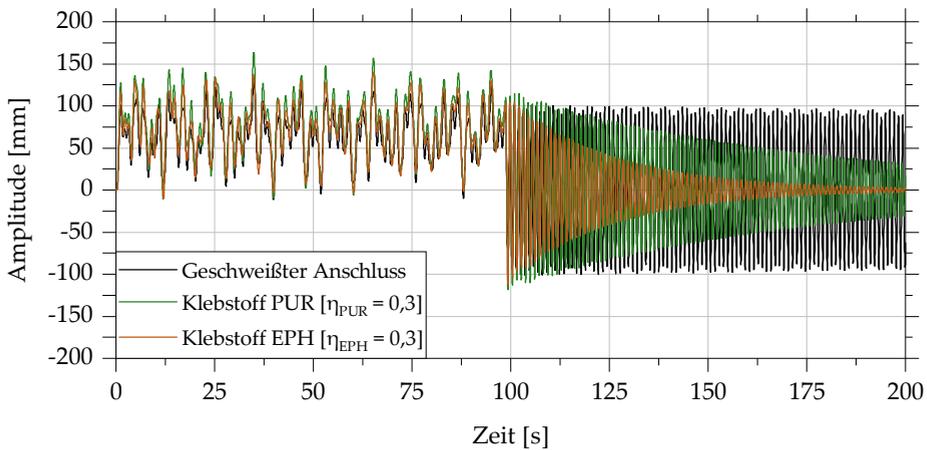


Abbildung 4.15: Auswertung der Schwingungsantwort an der Spitze des Auslegers der LZA infolge einer windinduzierten, erzwungenen Anregung und anschließender freier Abklingung; Vergleich des geschweißten Referenzsystems mit den Systemen mit geklebtem Anschluss; Klebstoffe EPH und PUR mit einem Verlustfaktor von $\eta = 0,3$

Im Zeitbereich der windinduzierten, erzwungenen Anregung der LZA zeigt sich für die beiden geklebten Systeme ein ähnlicher Schwingungsverlauf. Die Anzahl sowie der Zeitpunkt des Auftretens lokaler Schwingungsmaxima ist für die mit den Klebstoffen EPH ($E_{EPH} = 86 \text{ MPa}$) und PUR ($E_{PUR} = 356 \text{ MPa}$) geklebten Systeme annähernd identisch. Eine Auswertung der Schwingungsamplituden der einzelnen Systeme in Lastrichtung zeigt, dass sich für das mit dem Klebstoff PUR geklebte System gegenüber den beiden anderen Systemen geringfügig größere Amplituden zeigen. Diese Erkenntnis ist insbesondere vor dem Hintergrund des höheren E-Moduls des Klebstoffs PUR interessant. Die Schwingungsamplituden

der LZA infolge einer windinduzierten, erzwungenen Anregung steigen offensichtlich mit zunehmender Steifigkeit des verwendeten Klebstoffs an. Aufgrund der Tatsache, dass ein Anstieg der Material- sowie der daraus folgenden Systemsteifigkeit mit geringeren Deformationen assoziiert ist, scheint die aktivierte Werkstoffdämpfung ursächlich für die Unterschiede im Schwingungsverhalten der beiden geklebten Systeme zu sein. Die geringere Steifigkeit des Klebstoffs EPH führt zu einer Umlagerung der Verformungen der Struktur in den Bereich des geklebten Anschlusses. Hierdurch steigt das Integral der Deformation bzw. Verzerrung der EPH-Klebschicht gegenüber der PUR-Klebschicht an, wodurch die Energiedissipation im Bereich der Klebschicht ansteigt. Die Schwingungsamplituden des geschweißten Referenzsystems liegen im Zeitraum der Anregung trotz einer deutlich geringeren Werkstoffdämpfung des Stahlwerkstoffs unterhalb derer der geklebten Systeme. Die geringere systeminhärente Dämpfung des geschweißten Systems wird offenbar durch dessen deutlich höhere Gesamtsteifigkeit kompensiert.

In der zweiten Hälfte der transienten Analyse, in dem die LZA frei abklingt, kann ein deutlicher Unterschied im Schwingungsverhalten der einzelnen Systeme festgestellt werden. Zu Beginn der freien Abklingung reagieren alle Systeme zunächst mit einer Schwingung entgegen der vorherigen Anregung, deren Amplitude in etwa der zuvor erreichten Amplitude in Lastrichtung entspricht. Diese Schwingungsamplitude, die entgegen der Richtung der vorherigen Windanregung verläuft, kann durch die in den Systemen elastisch gespeicherte Energie begründet werden. Zu Beginn der freien Abklingung wird die elastisch gespeicherte Energie frei und führt zu einer Oszillation der LZA um die Ruhelage. Im Folgenden wird die Schwingungsantwort sowie die Abnahme der Schwingungsamplitude des Systems maßgeblich durch die aktivierte Werkstoffdämpfung dominiert. Für das System mit geschweißtem Anschluss kann lediglich eine vernachlässigbare Abnahme der Amplitude während der freien Abklingung festgestellt werden. Dies kann durch die geringe Werkstoffdämpfung des Werkstoffs Stahl begründet werden. Demgegenüber kann für die beiden Systeme mit geklebtem Anschluss eine deutliche Abnahme der Schwingungsamplitude im Betrachtungszeitraum beobachtet werden. Die maximale Amplitude des mit dem Klebstoff EPH hergestellten Systems nimmt dabei im Vergleich zum mit dem Klebstoff PUR gefertigten System deutlich schneller ab. Die Schwingung

des mit dem Klebstoff EPH modellierten Systems ist zum Zeitpunkt $t = 200$ s annähernd abgeklungen (Amplitude bei $t = 200$ s: 0,85 mm). Für den Klebstoff PUR liegt die Amplitude zum Zeitpunkt $t = 200$ s um Faktor 17,3 darüber (Amplitude bei $t = 200$ s: 17,8 mm). Offensichtlich wird bei Verwendung des weniger steifen Klebstoffs EPH bei gleichem Verlustfaktor mehr Energie pro Schwingungszyklus dissipiert. Der positive Effekt einer geringeren Klebstoffsteifigkeit durch einen Anstieg der aktivierten Werkstoffdämpfung kann somit auch in transienten Schwingungsszenarien beobachtet werden.

Logarithmisches Dekrement der frei abklingenden Schwingung

Die Abnahme der Amplitude einer exponentiell abklingenden Schwingung pro Zeiteinheit kann durch das logarithmische Dekrement in Gl. 4.2 beschrieben werden (da Silva et al. 2018).

$$\Delta = \frac{1}{N} \ln \frac{u_n}{u_{n+N}} \quad (4.2)$$

mit N = Anzahl der Schwingspielzahl im Betrachtungszeitraum [-]

u_n = Amplitude zu Beginn des Betrachtungszeitraums [mm]

u_{n+N} = Amplitude nach dem $n+N$ -ten Lastzyklus [mm]

Das logarithmische Dekrement kann zudem in den Verlustfaktor η überführt werden, wodurch das Dämpfungsverhalten einer Struktur charakterisiert werden kann (da Silva et al. 2018). Weiterführende Ausführungen können Abschnitt 2.4.3 entnommen werden. Es gilt:

$$\eta = \frac{\Delta}{\pi} \quad (4.3)$$

mit η = Verlustfaktor [-]

Δ = logarithmisches Dekrement [-]

In Tabelle 4.4 sind das logarithmische Dekrement und der sich daraus ergebende Verlustfaktor der frei abklingenden Schwingungen aus Abbildung 4.15 für die drei untersuchten Systeme angegeben. Der angegebene Verlustfaktor setzt sich aus der Gesamtheit aller in der Struktur aktivierten Werkstoffdämpfungen

zusammen. Für die LZA mit geschweißtem Anschluss ergibt sich ein Verlustfaktor als Maß der Gesamtdämpfung der Struktur von $\eta = 0,0002$. Dieser Wert entspricht erwartungsgemäß dem für den Stahlwerkstoff vorgegebenen Verlustfaktor. Demgegenüber setzt sich die Dämpfung der Systeme mit geklebtem Anschluss anteilig aus der Dämpfung der Stahlbauteile sowie der vorhandenen Klebschicht zusammen und liegt demnach zwischen den Verlustfaktoren des Stahlwerkstoffs sowie des Klebstoffs. Der für den Stahlwerkstoff gewählte Verlustfaktor hat somit einen großen Einfluss auf die im Folgenden dargestellten Ergebnisse transienter Analysen (vgl. Abschnitt 4.2).

Tabelle 4.4: Logarithmisches Dekrement Δ und Verlustfaktor η der frei abklingenden Schwingung in Abbildung 4.15 für das Referenzsystem mit geschweißtem Anschluss sowie die beiden Systeme mit geklebtem Anschluss; Klebstoffe EPH und PUR mit einem Verlustfaktor von $\eta = 0,3$

System	Δ [-]	η [-]	Faktor
Geschweißter Anschluss	0,0008	0,0002	-
Geklebter Anschluss, Klebstoff PUR	0,0150	0,0048	+ 19,3
Geklebter Anschluss, Klebstoff EPH	0,0424	0,0135	+ 54,5

Von besonderem Interesse ist demnach, inwieweit die Dämpfungseigenschaften der reinen Stahlstruktur durch den gezielten Einsatz eines geklebten Anschlusses gesteigert werden können. Die Auswertung des aus dem logarithmischen Dekrement der freien Abklingung abgeleiteten Verlustfaktor der beiden Systeme mit geklebtem Anschluss zeigt einen deutlichen Anstieg der Dämpfung innerhalb der Gesamtstrukturen. Gegenüber einem geschweißten Anschluss steigt die Dämpfung des Gesamtsystems mit geklebtem Anschluss für den Klebstoff PUR um Faktor 19,3 sowie für den Klebstoff EPH um Faktor 54,5 an. Der absolute Verlustfaktor der Strukturen mit geklebtem Anschluss liegt allerdings deutlich näher am Verlustfaktor des Stahlwerkstoffs, was durch die dominierenden Anteile der Stahlbauteile am Gesamtvolumen der LZA erklärt werden kann. Jedoch kann an dieser Stelle festgehalten werden, dass sich die Implementierung eines geklebten Anschlusses signifikant auf die Dämpfungseigenschaften einer Gesamtstruktur auswirken kann. Inwieweit sich die Dämpfungseigenschaften der Gesamtstruktur durch die Optimierung der Klebfugegeometrie sowie

durch die Anordnung mehrerer geklebter Anschlüsse optimieren lassen, wird im Folgenden und in Abschnitt 4.4 untersucht.

Parameterstudie

Der Einfluss der Geometrie der Klebschicht auf die dynamischen Struktureigenschaften wird durch Variation der Klebschichtdicke t_{ks} und der Überlapplänge $L_{\ddot{u}}$ untersucht. Der jeweils andere Parameter wird dabei konstant gehalten. Die Auswirkung einer Änderung der Klebfugengeometrie wird anhand des Schwingungsverhaltens infolge windinduzierter Fremdanregung sowie der freien Abklingung analysiert.

Zunächst steht die Klebschichtdicke im Fokus der Untersuchungen. In Abbildung 4.16 ist die Schwingungsantwort an der Spitze des Auslegers der LZA infolge einer windinduzierten, erzwungenen Anregung und anschließender freier Abklingung für die exemplarischen Schichtdicken 2,5 mm, 5,0 mm und 7,5 mm für den Klebstoff EPH ($E_{EPH} = 86 \text{ MPa}$) dargestellt. Die Überlapplänge beträgt bei allen Untersuchungen 200 mm. Die Ergebnisse der Untersuchung des Einflusses der Klebschichtdicke für den Klebstoff PUR ($E_{PUR} = 356 \text{ MPa}$) sind in Abbildung 4.17 dargestellt.

Für beide Klebstoffe EPH und PUR zeigt sich im Bereich der erzwungenen Schwingung, dass die Schwingungsamplituden in Richtung der Anregung durch eine Reduzierung der Klebschichtdicke nur geringfügig beeinflusst werden. Dies kann durch die zunehmende Steifigkeit im Anschlussbereich mit abnehmender Klebschichtdicke begründet werden.

Die Auswertung des logarithmischen Dekrements der freien Abklingung sowie der sich daraus ergebende Verlustfaktor sind für die drei untersuchten Klebschichtgeometrien der beiden Klebstoffe EPH und PUR in Tabelle 4.5 zusammengefasst. Für den Klebstoff EPH zeigt sich, dass der Verlustfaktor des Gesamtsystems für eine Vergrößerung der Klebschichtdicke von 5,0 mm auf 7,5 mm um 52 % gegenüber dem Referenzsystem ansteigt. Eine analoge Auswertung zeigt für Klebstoff PUR einen geringeren Einfluss der Klebschichtdicke auf die ermittelte Strukturdämpfung. Der Verlustfaktor des Gesamtsystems nimmt bei einer Zunahme der Klebschichtdicke auf 7,5 mm um 38 % zu.

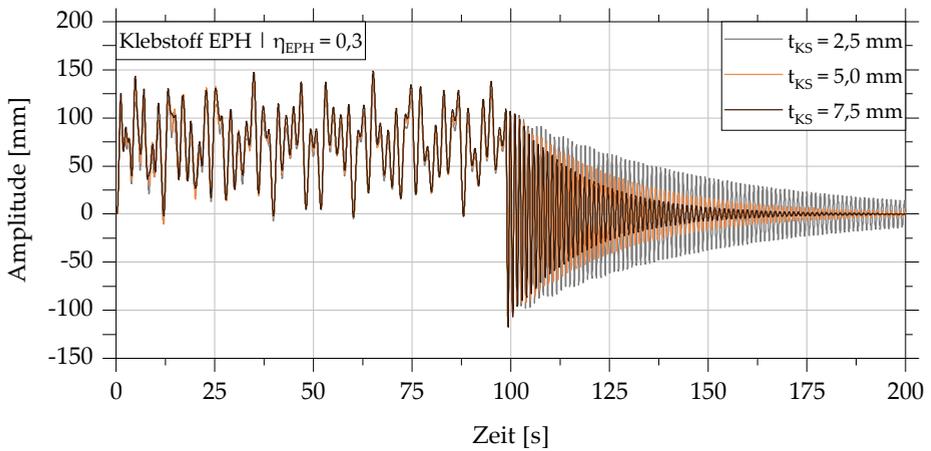


Abbildung 4.16: Untersuchung des Einflusses der Klebschichtdicke auf die Schwingungsantwort an der Spitze des Auslegers der LZA infolge einer windinduzierten, erzwungenen Anregung und anschließender freier Abklingung; Vergleich der Klebschichtdicken 2,5 mm, 5,0 mm und 7,5 mm; Klebstoff EPH mit einem Verlustfaktor von $\eta = 0,3$ und einer konstanten Überlapplänge von 200 mm

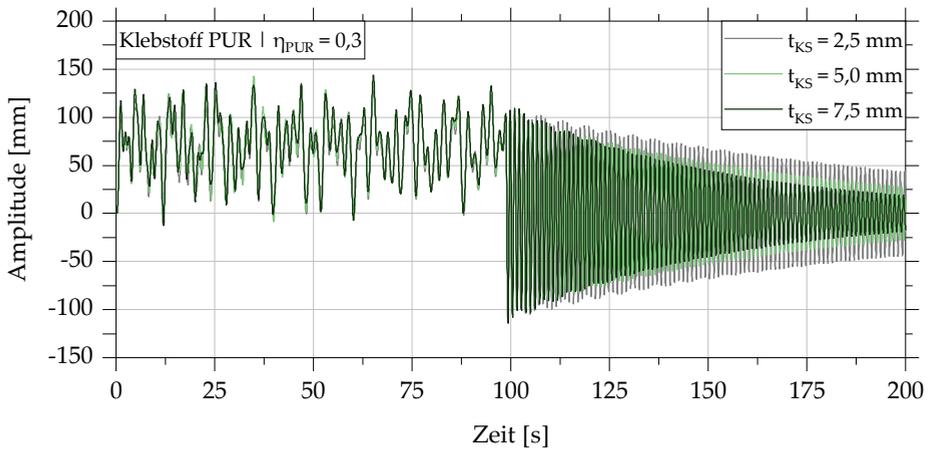


Abbildung 4.17: Untersuchung des Einflusses der Klebschichtdicke auf die Schwingungsantwort an der Spitze des Auslegers der LZA infolge einer windinduzierten, erzwungenen Anregung und anschließender freier Abklingung; Vergleich der Klebschichtdicken 2,5 mm, 5,0 mm und 7,5 mm; Klebstoff PUR mit einem Verlustfaktor von $\eta = 0,3$ und einer konstanten Überlapplänge von 200 mm

Tabelle 4.5: Logarithmisches Dekrement Δ und Verlustfaktor η der frei abklingenden Schwingung für das System mit geklebtem Anschluss mit einer Überlapplänge von 200 mm und den Klebschichtdicken 2,5 mm, 5,0 mm und 7,5 mm; Klebstoffe EPH und PUR mit einem Verlustfaktor von $\eta = 0,3$

System	t_{ks} [mm]	$L_{\ddot{u}}$ [mm]	Δ [-]	η [-]	
Geklebter Anschluss, Klebstoff EPH	2,5	200	0,0237	0,0075	-44 %
	5,0		0,0424	0,0135	-
	7,5		0,0643	0,0205	+52 %
Geklebter Anschluss, Klebstoff PUR	2,5	200	0,0100	0,0032	-33 %
	5,0		0,0150	0,0048	-
	7,5		0,0207	0,0066	+38 %

Demgegenüber sinkt der Verlustfaktor für eine Verringerung der Klebschichtdicke von 5,0 mm auf 2,5 mm für den Klebstoff EPH ($E_{EPH} = 86$ MPa) um 44 % ab. Die bisherigen Erkenntnisse zeigen demnach für den Klebstoff EPH im betrachteten Spektrum der Klebschichtdicke einen näherungsweise proportionalen Zusammenhang zwischen der Klebschichtdicke und dem Verlustfaktor der Gesamtstruktur. Einer prozentualen Zu- oder Abnahme der Klebschichtdicke um 50 % steht jeweils eine annähernd gleich große Zu- oder Abnahme der globalen Dämpfungseigenschaften der Gesamtstruktur gegenüber. Für Klebstoff PUR ($E_{PUR} = 356$ MPa) zeigt sich, dass die Strukturdämpfung weniger stark durch eine Änderung der Klebschichtdicke beeinflusst wird. Die Dämpfung des Gesamtsystems reduziert sich bei einer Verringerung der Klebschichtdicke auf 2,5 mm lediglich um 33 %. Niedrigmoduligere Klebstoffe reagieren demnach erwartungsgemäß stärker auf die Änderung der Abmessungen der Klebschicht, die zu einem Anstieg der Steifigkeit im Anschlussbereich führt.

Die Auswirkung einer Änderung der Überlapplänge wird anhand der exemplarischen Überlapplängen 150 mm, 200 mm und 250 mm und einer konstanten Klebschichtdicke von 5,0 mm untersucht. In Abbildung 4.18 bzw. Abbildung 4.19 ist die Schwingungsantwort an der Spitze des Auslegers der LZA infolge einer windinduzierten, erzwungenen Anregung und anschließender freier Abklingung für den Klebstoff EPH sowie den Klebstoff PUR dargestellt.

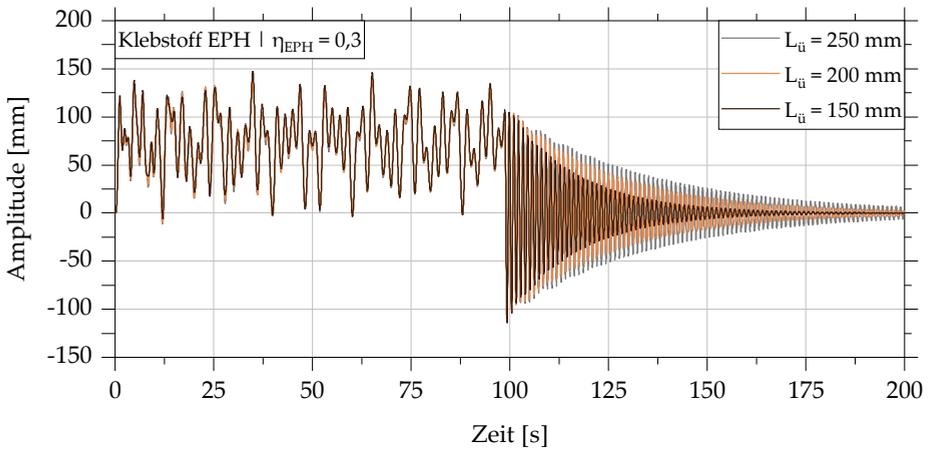


Abbildung 4.18: Untersuchung des Einflusses der Überlapplänge auf die Schwingungsantwort an der Spitze des Auslegers der LZA infolge einer windinduzierten, erzwungenen Anregung und anschließender freier Abklingung; Vergleich der Überlappplängen 150 mm, 200 mm und 250 mm; Klebstoff EPH mit einem Verlustfaktor von $\eta = 0,3$ und einer konstanten Klebschichtdicke von 5,0 mm

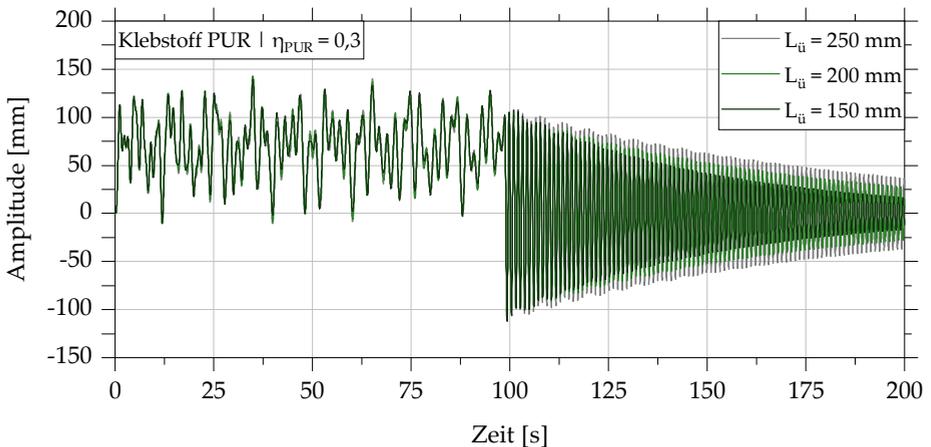


Abbildung 4.19: Untersuchung des Einflusses der Überlapplänge auf die Schwingungsantwort an der Spitze des Auslegers der LZA infolge einer windinduzierten, erzwungenen Anregung und anschließender freier Abklingung; Vergleich der Überlappplängen 150 mm, 200 mm und 250 mm; Klebstoff PUR mit einem Verlustfaktor von $\eta = 0,3$ und einer konstanten Klebschichtdicke von 5,0 mm

Die Schwingungsantwort im Bereich der freien Abklingung zeigt eine Zunahme des logarithmischen Dekrements mit abnehmender Überlapplänge. Die Auswertungen der Schwingungsantworten sind in Abbildung 4.18 für den Klebstoff EPH sowie in Abbildung 4.19 für den Klebstoff PUR dargestellt. Für Klebstoff EPH kann beobachtet werden, dass sich abnehmende Überlappängen deutlich stärker auf die Strukturdämpfung auswirken. Dies kann durch die Auswertung der logarithmischen Dekremente sowie der Verlustfaktoren der Gesamtsysteme in Tabelle 4.6 bestätigt werden. Der Verlustfaktor des Systems mit einer Überlapplänge von 250 mm nimmt gegenüber dem System mit der Referenzüberlapplänge von 200 mm für den Klebstoff EPH um 26 % und für den Klebstoff PUR um 21 % ab. Demgegenüber nimmt der Verlustfaktor bei einer Reduzierung der Überlapplänge von 200 mm auf 150 mm um 57 % für den Klebstoff EPH bzw. 44 % für den Klebstoff PUR zu.

Tabelle 4.6: Logarithmisches Dekrement Δ und Verlustfaktor η der frei abklingenden Schwingung für das System mit geklebtem Anschluss mit einer Klebschichtdicke von 5,0 mm und den Überlappängen 150 mm, 200 mm und 250 mm; Klebstoffe EPH und PUR mit einem Verlustfaktor von $\eta = 0,3$

System	Lü [mm]	t _{ks} [mm]	Δ [-]	η [-]	
Geklebter Anschluss, Klebstoff EPH	250	5,0	0,0313	0,0100	-26 %
	200		0,0424	0,0135	
	150		0,0665	0,0212	+ 57 %
Geklebter Anschluss, Klebstoff PUR	250	5,0	0,0118	0,0038	-21 %
	200		0,0150	0,0048	-
	150		0,0216	0,0069	+44 %

Die bisherigen Betrachtungen zeigen, dass das dynamische Tragverhalten der LZA stark von der Überlapplänge abhängt. Der Einfluss der Überlapplänge auf die aktivierte Klebschichtdämpfung ist nichtlinear und nimmt mit abnehmender Überlapplänge zu. Durch die Reduzierung der Überlapplänge wird der Bereich des Sandwich-Querschnitts reduziert. Hierdurch wird die Biegesteifigkeit im Anschlussbereich reduziert. Das zugehörige Flächenträgheitsmoment ineinander liegender Kreishohlprofile ist ein Term in der vierten Potenz. Der nichtlineare Einfluss der Überlapplänge kann somit durch den nichtlinearen, exponentiellen

Zusammenhang zwischen der Überlapplänge und der daraus resultierenden Biegesteifigkeit im Anschlussbereich begründet werden. Die Auswertung der Verlustfaktoren des Gesamtsystems in Tabelle 4.6 zeigt zudem, dass der detektierte Überlapplängeneinfluss auf die Strukturdämpfung mit zunehmender Klebstoffsteifigkeit abnimmt.

Zusammenfassung

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass sich die Dämpfungseigenschaften einer Stahlstruktur bereits durch die Anordnung eines einzelnen geklebten Anschlusses optimieren lassen. Geringe Änderungen der Klebschichtdicke sowie der Überlapplänge führen in Abhängigkeit des betrachteten Klebstoffs zu einem Anstieg des Verlustfaktors des Gesamtsystems um mehr als 50 %. Ein Anstieg der Überlapplänge führt dabei, analog zur Reduzierung der Klebschichtdicke, zu einer erhöhten lokalen Anschlusssteifigkeit und somit auch zu einer erhöhten Steifigkeit des Gesamtsystems. Der Einfluss der Veränderungen der Klebschichtgeometrie wird dabei maßgeblich durch die mechanischen Zusammenhänge zwischen der Querschnittsform und dem daraus resultierenden Flächenträgheitsmoment im Bereich der Überlappung bestimmt. Ein hierdurch erhöhter Verformungswiderstand führt zu geringeren Deformationen bzw. Verzerrungen innerhalb der Klebschicht und so zu einer Abnahme der aktivierten Klebstoffdämpfung. Zudem zeigt sich, dass sich steifigkeitserhöhende Geometrieanpassungen der Klebfuge mit zunehmendem E-Modul des Klebstoffs weniger stark auf die Strukturdynamik auswirken. Besonders hervorzuheben ist in diesem Zusammenhang, dass der Einfluss einer Reduzierung der Überlapplänge im vorliegenden Fall für beide Klebstoffe in einer vergleichbaren Größenordnung liegt. Für die praktische Auslegung geklebter Strukturen ist diese Tatsache als positiv zu bewerten. Unter Beachtung der statischen Anforderungen an die Klebverbindung, kann die Dämpfung einer Struktur demnach direkt durch die Anpassung der Klebfugegeometrie unabhängig von der Klebstoffsteifigkeit optimiert werden.

4.4 Untersuchung eines Mehrknotensystems

4.4.1 Numerisches Modell und Netzkonvergenzstudie

Die Ergebnisse der numerischen Untersuchungen eines Systems mit einem geklebten Anschluss sollen im Folgenden durch die Betrachtung eines Systems mit mehreren geklebten Anschlüssen erweitert werden. Als repräsentative Struktur wird das fiktive Modell eines Aussichtsturms in Kreishohlprofilfachwerkbauweise gewählt. Der Aussichtsturm wird in Anlehnung an die in (Albiez et al. 2021) untersuchte Jacket-Fachwerkstruktur dimensioniert und modelliert. Zudem wird die in dieser Arbeit untersuchte Ausbildung geklebter Anschlüsse von Kreishohlprofilen für die Erstellung des numerischen Berechnungsmodells übernommen. Das numerische Mehrknotenmodell des Aussichtsturms ist in Abbildung 4.20 dargestellt.

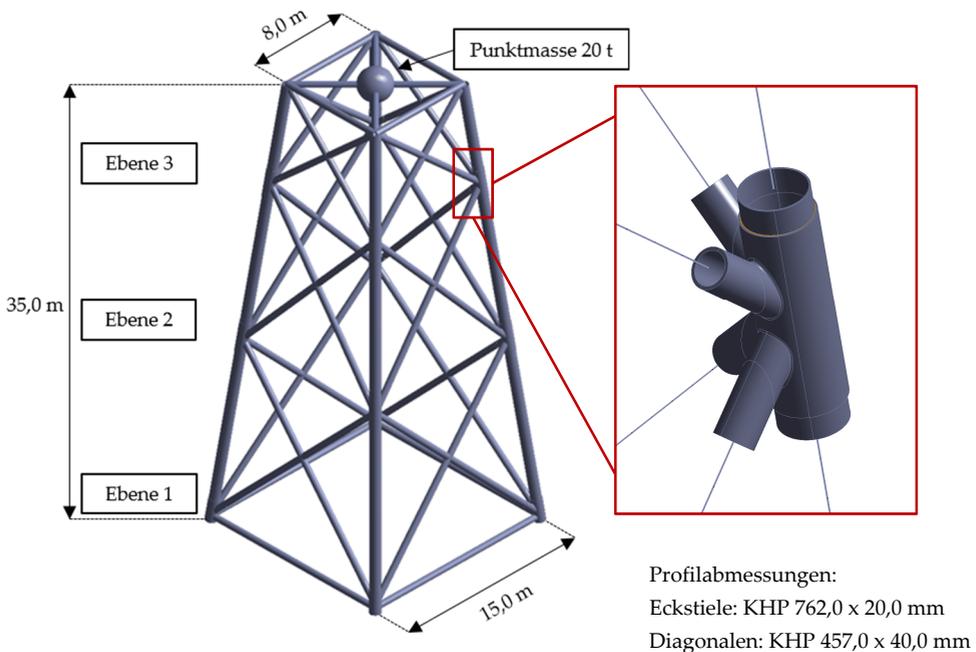


Abbildung 4.20: Numerisches Berechnungsmodell des Aussichtsturms in Hohlprofilfachwerkbauweise mit geklebten Strebenanschlüssen in Anlehnung an (Damm et al. 2022b)

Die Turmstruktur hat eine Höhe von 35 m. Der Abstand der Eckstiele beträgt am Fußpunkt 15 m und am Kopfpunkt 8 m. Die Turmstruktur wird durch insgesamt drei Auskreuzungen ausgesteift. Hierdurch ergeben sich Knotenanschlüsse auf drei Ebenen. Die Abmessungen der verwendeten Kreishohlprofile sind in Abbildung 4.20 dokumentiert. Am Kopfpunkt der Turmstruktur wird eine Punktmasse mit einer Gesamtmasse von 20 t angeordnet, wodurch das Gewicht einer Aussichtsplattform sowie der sich darauf befindenden Personen abgebildet wird. Die Punktmasse wird über eine Auskreuzung aus zwei biegesteifen Balkenelementen in die vier Eckstiele eingeleitet. Die Struktur wird an den vier Enden der Eckstiele unverschieblich gelagert (Damm et al. 2022b).

Das numerische Modell des Aussichtsturms wird analog zum Vorgehen in Abschnitt 4.3 als kombiniertes Balken-Volumen-Modell erstellt. Hierbei werden die zwölf geklebten Anschlüsse als Volumenkörper modelliert, im Raum positioniert und durch Balkenelemente untereinander verbunden. Die Volumenmodelle der geklebten Anschlüsse werden über eine den Eckstiel vollumfänglich umschließende Ringschale hergestellt. Die Ringschale wird segmentweise um den Eckstiel angeordnet. Die einzelnen Segmente können mit Schweißnähten oder Schrauben verbunden werden. Die Verbindung der Ringschalenelemente ist nicht Gegenstand der Untersuchungen, weshalb für den Aufbau des numerischen Modells die Variante über eine Verbindung durch Schweißnähte gewählt wird. An die Ringschale, die eine Dicke von $t_{\text{Ringschale}} = 20,0$ mm aufweist, werden die Diagonalen angeschweißt. Der Durchmesser der Ringschale wird so dimensioniert, dass zwischen Ringschale und dem innen laufenden Eckstiel ein Spalt mit einer Dicke von $t_{\text{KS}} = 10,0$ mm entsteht, der klebtechnisch gefügt wird. Zur Modellierung der Struktur werden die Werkstoffkennwerte aus Tabelle 4.1 herangezogen. Das Konstruktionskonzept der in (Albiez et al. 2021) vorgestellten, geklebten Strebenanschlüsse ist in Abbildung 4.21 veranschaulicht (Damm et al. 2022b). Diese konstruktive Gestaltung bietet den Vorteil, dass kriechrelevante Dauerlasten aus Eigengewicht nicht über die Klebschichten abgetragen werden, wodurch auftretende Kriechverformungen minimiert werden. Die Lasten aus dem Eigengewicht der Struktur werden vollständig durch die Eckstiele abgetragen. Die Klebverbindungen müssen lediglich die Lastanteile der Diagonalstreben abtragen und können so gezielt zur Dämpfung der Struktur aktiviert werden.

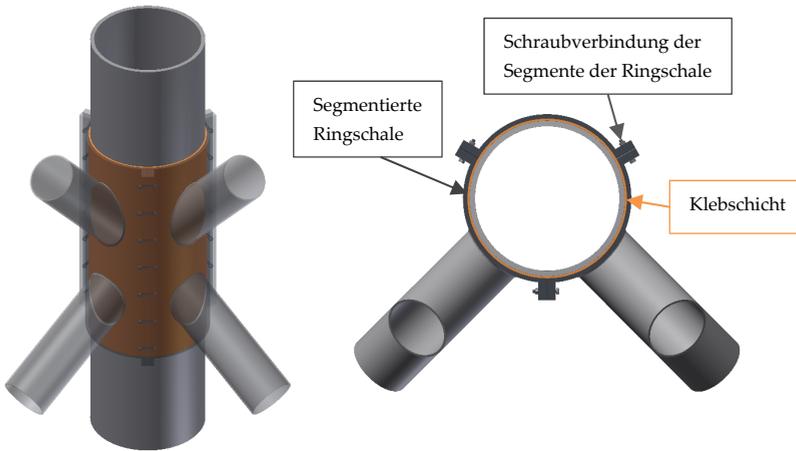


Abbildung 4.21: Konstruktion der geklebten Hohlprofilfachwerkanschlüsse; exemplarische Darstellung der durch Schraubverbindungen verbundenen, segmentierten Ringschalenelemente nach (Damm et al. 2022b)

Zur Diskretisierung der einzelnen Komponenten werden erneut die in Abschnitt 4.3.1 beschriebenen Elementtypen verwendet. Die Kopplung zwischen Balken- und Volumenelementen wird über MPC184-Kontaktelemente realisiert. Im Rahmen einer Netzkonvergenzstudie werden zwei unterschiedliche Netzfeinheiten untersucht und die damit ermittelten Berechnungsergebnisse gegenübergestellt. Die untersuchten Netzdiskretisierungen A und B sind in Tabelle 4.7 spezifiziert.

Tabelle 4.7: Spezifikationen der untersuchten Netzdiskretisierungen A und B des Modells des Aussichtsturms im Rahmen einer Konvergenzstudie

Netzdiskretisierung	A	B
Max. Elementkantenlänge Klebschicht und Stahlbauteile	60 mm	50 mm
Elementlänge Balkenelemente	500 mm	
Anzahl Elemente über die Dicke der Klebschicht	2	3
Anzahl Elemente über die Dicke der Stahlbauteile	2	

Zur Erhöhung der Elementqualität im Bereich der Verschneidung zwischen den Streben und den segmentierten Ringschalenelementen wird die angegebene Elementkantenlänge zur Diskretisierung der Stahlbauteile in diesem Bereich für beide Varianten der Netzdiskretisierung auf 40 mm reduziert.

Die in Tabelle 4.7 dokumentierten Netzdiskretisierungen werden für die beiden Modellvarianten mit geschweißten sowie geklebten Anschlüssen übernommen. Die Netzdiskretisierungen werden analog zum Vorgehen in Abschnitt 4.3.1 anhand der Ergebnisse einer Modal- und Frequenzganganalyse der untersuchten Systeme bewertet. Es wird exemplarisch der Klebstoff EPH mit einem Verlustfaktor von $\eta_{\text{EPH}} = 0,2$ zur Analyse der geklebten Struktur verwendet.

Modalanalyse

Die Auswertung der Ergebnisse der Modalanalyse im Rahmen der Netzkonvergenzstudie ist in Abbildung 4.22 dargestellt. Die Abweichung zwischen den Diskretisierungen A und B in Bezug auf die Eigenfrequenzen der Moden 1 bis 6 liegt unter 0,15 %. Die Netzdiskretisierung A ist somit ausreichend fein vernetzt, um die Eigenfrequenzen der untersuchten Systeme abzubilden. Eine ausführliche Darstellung der Ergebnisse der Modalanalyse kann Abschnitt 4.3.2 entnommen werden.

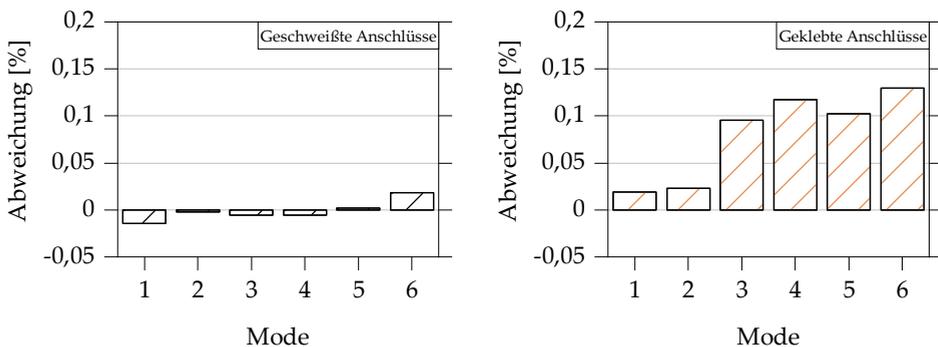


Abbildung 4.22: Ergebnisse der Modalanalyse der Modelle des Aussichtsturms mit geschweißten (links) und geklebten Anschlüssen (rechts); Auswertung der Abweichungen von Netzdiskretisierung B bezogen auf Netzdiskretisierung A

Frequenzganganalyse

Analog zum EKS wird die Netzkonvergenz des MKS zusätzlich anhand der Ergebnisse einer Frequenzganganalyse unter der Annahme einer horizontal auf die Turmstruktur wirkenden, harmonischen Windbelastung untersucht. Dabei werden sowohl die Belastungsansätze als auch das Vorgehen zur Implementierung der Belastung in das numerische Berechnungsmodell aus Abschnitt 4.3.1 übernommen.

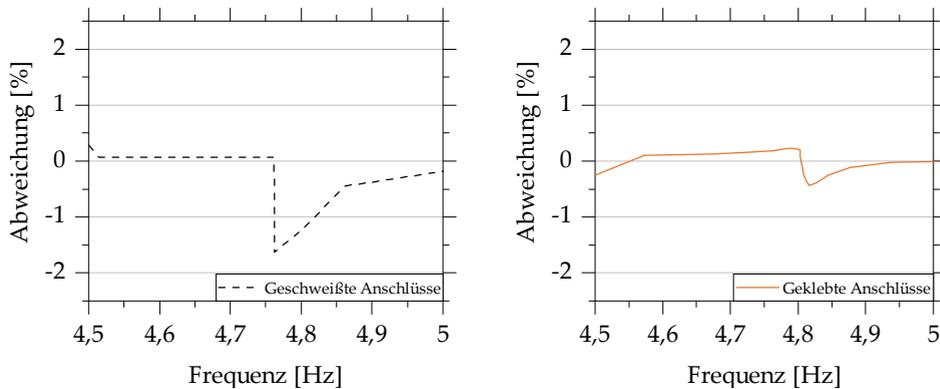


Abbildung 4.23: Ergebnisse der Frequenzganganalyse der Modelle des Aussichtsturms mit geschweißten (links) und geklebten Anschlüssen (rechts) im Frequenzbereich von 4,5 Hz bis 5 Hz; Auswertung der Abweichungen von Netzdiskretisierung B bezogen auf Netzdiskretisierung A

Der Einfluss der untersuchten Netzdiskretisierungen auf die Qualität der Berechnung wird als Abweichung von Netzdiskretisierung B bezogen auf Netzdiskretisierung A im Bereich um die erste Eigenfrequenz des Aussichtsturms ausgewertet. Aufgrund der Erkenntnisse der Untersuchung des EKS in Abschnitt 4.3 kann auf die Untersuchung eines größeren Frequenzbereichs verzichtet werden. Die Auswertung der Ergebnisse der Frequenzganganalyse im Rahmen der Netzkonvergenzstudie ist in Abbildung 4.23 dargestellt.

Die Analyse der Abweichungen findet auf Grundlage der Auswertung der Schwingungsamplituden am Kopf der Turmstruktur in globaler z-Richtung statt. Die größten Abweichungen können für beide Systeme im Bereich der ersten Eigenfrequenz ermittelt werden. Die maximale Abweichung liegt hierbei bei

unter zwei Prozent. Im übrigen Frequenzbereich liegen die Abweichungen deutlich unter 1 %. Eine ausführliche Darstellung der Ergebnisse durchgeführter Frequenzganganalysen mit unterschiedlichen Modellvarianten kann Abschnitt 4.4.3 entnommen werden. Die Ergebnisse der Netzkonvergenzstudie in Abbildung 4.22 und Abbildung 4.23 zeigen bereits für die Netzdiskretisierung A annähernd konvergente Berechnungsergebnisse, weshalb diese Netzdiskretisierung für die weiteren Berechnungen verwendet wird. Die gewählte Vernetzung ist in Abbildung 4.24 exemplarisch für einen geklebten Anschluss in Ebene 1 dargestellt.

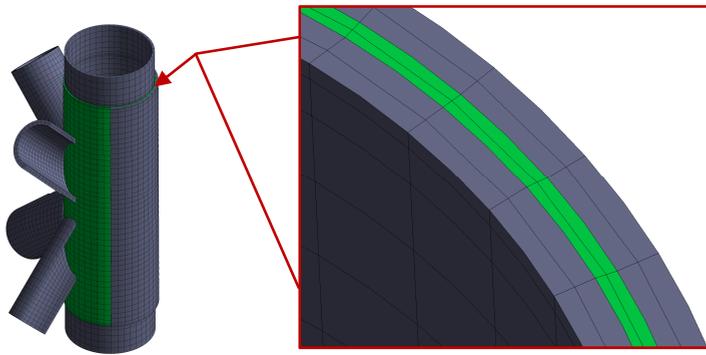


Abbildung 4.24: Gewählte Netzdiskretisierung A des Berechnungsmodells des Aussichtsturms; Links: Schnittansicht im Bereich eines geklebten Knotens (Ebene 1); Rechts: Detaildarstellung der Vernetzung über die Dicke der einzelnen Komponenten

4.4.2 Eigenfrequenzen und –moden

Die Modalanalyse einer LZA in Abschnitt 4.3.2 hat gezeigt, dass die Eigenfrequenzen sowie die zugehörigen Moden eines statisch bestimmten Systems durch die Anordnung eines geklebten Anschlusses im Bereich des Fußpunktes unabhängig vom E-Modul des Klebstoffs nur geringfügig beeinflusst werden. Diese Erkenntnis werden im Folgenden um die Untersuchungsergebnisse einer statisch unbestimmten Fachwerkstruktur mit mehreren geklebten Anschlüssen erweitert.

Die Eigenform von Mode 1 des Aussichtsturms ist in Abbildung 4.25 dargestellt. Die dargestellte Eigenform zeigt eine Biegeschwingung der kompletten Turmstruktur in Richtung der globalen z-Achse. Diese ist für die untersuchten Systemvarianten identisch. Die hier nicht dargestellte Eigenform von Mode 2 ent-

spricht aufgrund der Doppelsymmetrie der Turmstruktur einer um 90° gedrehten Eigenform der Mode 1 mit der gleichen Eigenfrequenz. Bei den Moden 3 bis 6 finden primär Schwingungen einzelner Aussteifungsdiagonalen statt, die teils gegenläufig schwingen. Diese Eigenmoden werden nicht näher untersucht, da sie durch in der Realität auftretende Einwirkungen nur bedingt angeregt werden. Eine Karmansche Wirbelanregung wird in diesem Fall ausgeschlossen.

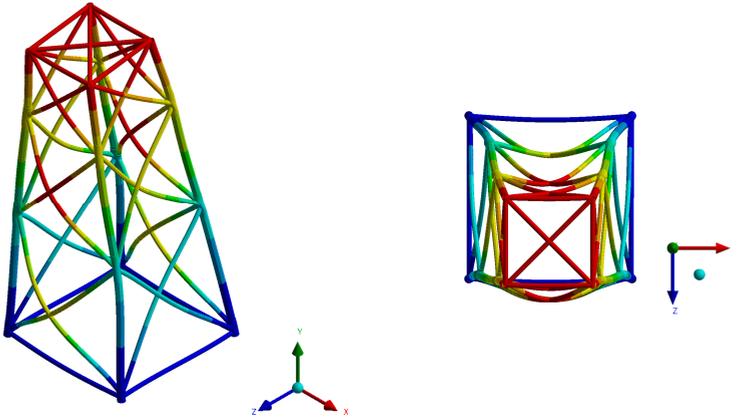


Abbildung 4.25: Eigenform der Mode 1 des Aussichtsturms mit geklebten Strebenanschlüssen; Ansicht (links) und Draufsicht (rechts)

Die den Moden 1 bzw. 2 zugehörigen Eigenfrequenzen der Turmstruktur mit geschweißten sowie geklebten Strebenanschlüssen sind in Abbildung 4.26 dargestellt. Die Eigenfrequenz des geschweißten Systems liegt bei 4,76 Hz. Die Eigenfrequenzen der Systeme mit geklebten Anschlüssen liegen für den Klebstoff EPH bei 4,80 Hz und für den Klebstoff PUR bei 4,90 Hz.

Entgegen der Erkenntnisse der Untersuchung der LZA liegen die Eigenfrequenzen der Systeme mit geklebten Anschlüssen für beide Klebstoffe oberhalb derer des geschweißten Referenzsystems (vgl. Abschnitt 4.3.2). Für den Klebstoff EPH steigt die Eigenfrequenz um 0,8 % und für den Klebstoff PUR um 2,9 % an. Hieraus folgt, dass die Systemsteifigkeit bei annähernd konstanter Masse durch die Implementierung geklebter Anschlüsse ansteigt. Das kann darauf zurückgeführt werden, dass die in Abbildung 4.21 dargestellten geklebten Strebenanschlüsse im Vergleich zu geschweißten Anschlüssen eine höhere Knotensteifig-

keit besitzen. Dies gilt für beide Klebstoffe. Die Höhe der Eigenfrequenz ist hingegen vom E-Modul des Klebstoffs abhängig und nimmt mit steigender Klebstoffsteifigkeit geringfügig zu.

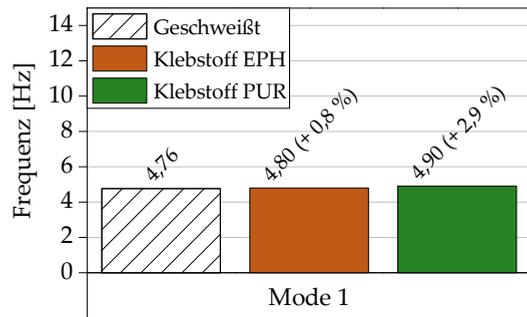


Abbildung 4.26: Vergleich der Eigenfrequenzen der Moden 1 der Systeme mit geschweißten sowie geklebten Anschlüssen; Klebstoffe EPH und PUR

Die Anzahl und Ausbildung geklebter Anschlüsse beeinflussen maßgeblich die Eigenfrequenz einer geklebten Hohlprofilfachwerkstruktur. Insbesondere die lokale Knotensteifigkeit ist in diesem Zusammenhang von großer Relevanz. Für die konstruktive Auslegung dynamisch beanspruchter Strukturen sind diese Erkenntnisse als positiv zu bewerten.

In diesem Zusammenhang ist zunächst der generell geringe Einfluss der Verwendung geklebter anstelle geschweißter Anschlüsse auf die globale Struktursteifigkeit hervorzuheben. Darüber hinaus lassen sich die Eigenfrequenzen von Strukturen mit geklebten Anschlüssen durch die Anpassung der Klebfugen-geometrie sowie durch die Klebstoffauswahl gezielt optimieren. Die Verschiebung der Eigenfrequenz um 5 % bis 10 % ist dabei insbesondere im Zusammenhang mit der Vermeidung der Anregung im Resonanzbereich von Interesse. Bei bestehenden, unveränderlichen Spektren der Anregung können die Systemeigenschaften durch Anpassung der Anschlussgeometrie so verändert werden, dass Anregungen im Resonanzbereich vermieden bzw. reduziert werden.

4.4.3 Stationäre Schwingungszustände

Die zuvor am System mit einem geklebten Anschluss gewonnenen Erkenntnisse sollen im Folgenden durch eine Frequenzganganalyse der Turmstruktur mit mehreren geklebten Strebenanschlüssen erweitert werden. Die mehrknotige Turmstruktur wird hierfür analog zum zuvor dokumentierten Vorgehen mit einem Winddruck von $w_D = 1,0 \text{ kN/m}^2$ harmonisch, sinusförmig angeregt. Der Winddruck wird in Richtung der globalen z-Achse aufgebracht und regt somit die Biegeschwingung der Eigenmode 1 an.

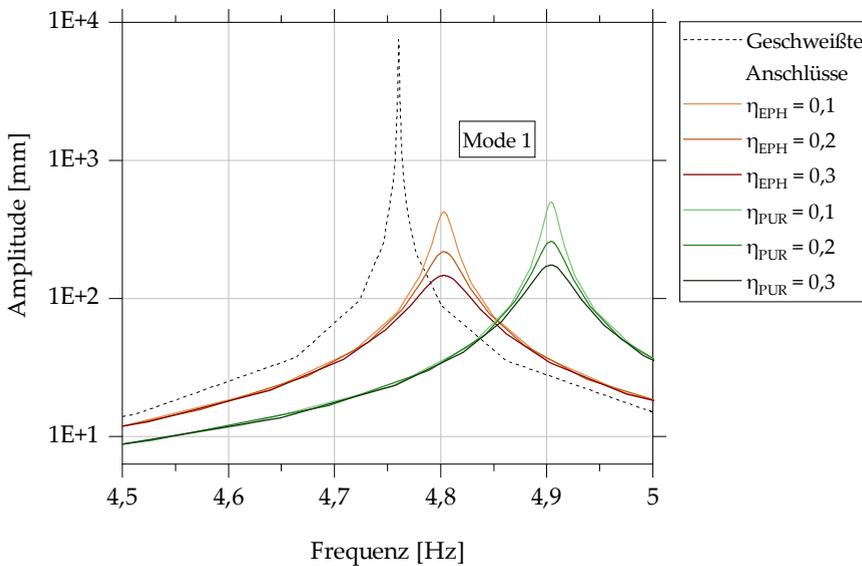


Abbildung 4.27: Ergebnisse der Frequenzganganalyse für den Bereich um die erste Eigenfrequenz des Referenzsystems mit geschweißten Anschlüssen sowie der Systeme mit geklebten Anschlüssen; Klebstoffe EPH und PUR mit den Verlustfaktoren $\eta = 0,1, 0,2$ und $0,3$

Die Ergebnisse der Frequenzganganalyse sind für das System mit geschweißten Anschlüssen sowie für die Systeme mit geklebten Anschlüssen für die beiden untersuchten Klebstoffe in Abbildung 4.27 dargestellt. Dass eine lokal wirkende Knotendämpfung einen positiven Effekt auf die Strukturdynamik hat, kann auch für die Turmstruktur beobachtet werden. Gegenüber den Ergebnissen der Frequenzganganalyse der LZA zeigt sich im dargestellten Frequenz-Amplituden-

Diagramm hingegen nur eine geringe Abhängigkeit von der Klebstoffsteifigkeit. Die ermittelten Amplituden im Bereich der jeweiligen Eigenfrequenz der untersuchten Systeme liegen für die Klebstoffe EPH und PUR bei gleichem Verlustfaktor auf einem ähnlichen Niveau. Zudem nimmt der Einfluss der Klebstoffsteifigkeit auf die Schwingungsamplituden mit zunehmendem Verlustfaktor ab.

Im Folgenden wird der Zusammenhang zwischen dem E-Modul der Klebstoffe und dem Einfluss der klebstoffinhärenten Dämpfung auf die Strukturodynamik der Turmstruktur näher untersucht. Die Ergebnisse der Frequenzganganalyse in Abbildung 4.27 werden hierzu in den in Abbildung 4.28 dargestellten prozentualen Vergleich der Maxima der Schwingungsamplitude überführt.

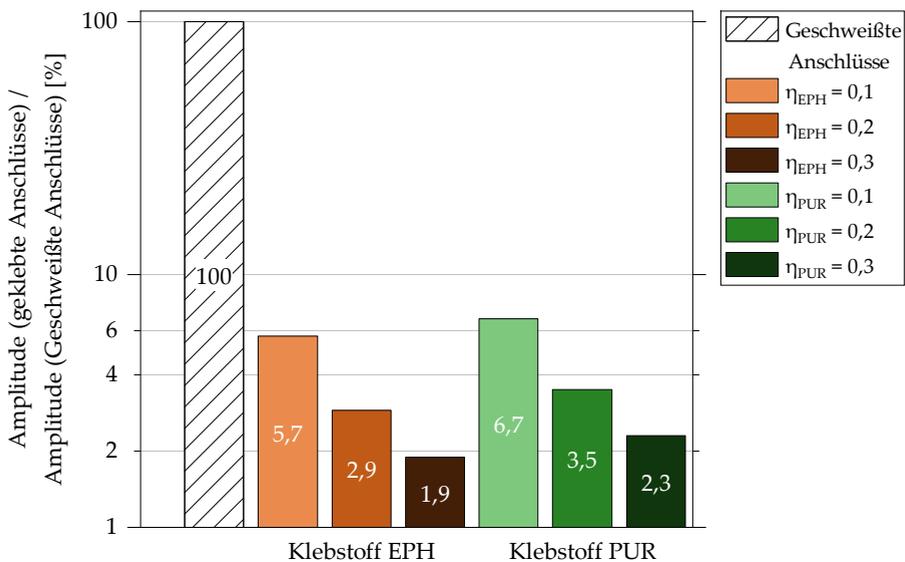


Abbildung 4.28: Prozentualer Vergleich der maximalen Schwingungsamplituden im Bereich der ersten Eigenfrequenz für das Referenzsystem mit geschweißten Anschlüssen sowie für die Systeme mit geklebten Anschlüssen; Klebstoffe EPH und PUR mit den Verlustfaktoren $\eta = 0,1, 0,2$ und $0,3$

Unabhängig vom Verlustfaktor zeigt sich zunächst für beide Klebstoffe, dass die maximalen Schwingungsamplituden der Systeme mit geklebten Anschlüssen weniger als 10 % der maximalen Amplitude des geschweißten Referenzsystems betragen. Die Abweichung der für die Klebstoffe EPH und PUR bestimmten,

maximalen Schwingungsamplituden beträgt für den Verlustfaktor $\eta = 0,1$ maximal 1 % und nimmt mit zunehmendem Verlustfaktor der Klebstoffe ab. Die Ergebnisse der Frequenzganganalyse des MKS ähneln somit quantitativ denen des EKS. Die Höhe der Klebstoffsteifigkeit ist mit zunehmender Anzahl geklebter Anschlüsse von geringerer Relevanz. Es wird daher begründet davon ausgegangen, dass sich die in Abschnitt 4.3.3 dokumentierten Ergebnisse zum Einfluss der Klebfugegeometrie des EKS analog auch für das MKS zeigen, weshalb auf die Durchführung weiterer Berechnungen hierzu verzichtet wird.

Untersuchung des Einflusses des Verlustfaktors

Auf Grundlage der Ergebnisse in Abbildung 4.28 stellt sich allerdings die Frage, ob die lokale Knotendämpfung durch die Erhöhung des Verlustfaktors weiter gesteigert werden kann. Zudem wurde der Einfluss der lokal wirkenden Klebstoffdämpfung bisher nicht für Verlustfaktoren kleiner 0,1 untersucht. Beide Betrachtungen sind aus baupraktischer Sicht von großer Bedeutung. In Abbildung 4.29 sind die sich ergebenden maximalen Schwingungsamplituden am Turmkopf exemplarisch für Mode 1 in Abhängigkeit des Verlustfaktors der Klebstoffe EPH und PUR dargestellt. Es wird ein Bereich des Verlustfaktors von 0,025 bis 0,8 betrachtet.

Die maximalen Schwingungsamplituden in Abbildung 4.29 nehmen erwartungsgemäß mit steigendem Verlustfaktor der Klebstoffe ab. Hierbei kann ein asymptotischer Zusammenhang zwischen der Schwingungsamplitude und dem Verlustfaktor der untersuchten Klebstoffe beobachtet werden, wobei sich die größten Amplituden für den geringsten Verlustfaktor ergeben. Zudem liegen die maximalen Amplituden der mit dem Klebstoff PUR hergestellten Struktur für einen Verlustfaktor $\eta < 0,2$ deutlich über denen, die sich für die mit dem Klebstoff EPH gefertigte Struktur zeigen. Dies kann den vorherigen Ausführungen entsprechend durch die unterschiedlichen Steifigkeiten der beiden Klebstoffe begründet werden. Die absolute Differenz der ermittelten Schwingungsamplituden sinkt mit zunehmendem Verlustfaktor.

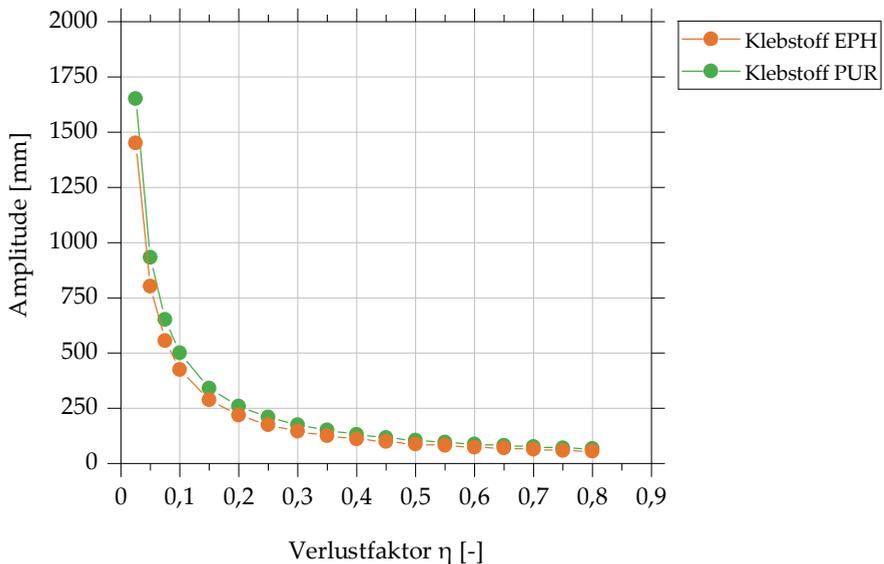


Abbildung 4.29: Einfluss des Verlustfaktors auf die maximalen Schwingungsamplituden im Bereich der ersten Eigenfrequenz der Systeme mit geklebten Anschlüssen; Klebstoffe EPH und PUR mit einem Verlustfaktor zwischen 0,025 und 0,8

Für eine praktische Auslegung dynamisch beanspruchter Strukturen folgt hieraus, dass die Klebstoffsteifigkeit mit zunehmenden Dämpfungseigenschaften des Klebstoffs vernachlässigt werden kann. Die dynamischen Eigenschaften einer Struktur werden dann primär durch die Dämpfungseigenschaften des Klebstoffs beeinflusst. Demgegenüber können die dynamischen Eigenschaften einer Struktur mit geklebten Anschlüssen durch die Verwendung weniger steifer Klebstoffe optimiert werden. Dies gilt insbesondere für Klebstoffe mit geringen Dämpfungseigenschaften. Aus baupraktischer Sicht kann festgehalten werden, dass Klebstoffe mit einem Verlustfaktor größer 0,1 zu priorisieren sind.

4.5 Zusammenfassung

Die Ergebnisse der durchgeführten numerischen Untersuchungen zum Potential der Dämpfung dynamisch beanspruchter, ein- und mehrknotiger Stahlbaustrukturen können wie folgt zusammengefasst werden:

- Auf Grundlage der durchgeführten numerischen Berechnungen können sowohl Aussagen zum Potential der Dämpfung dynamisch beanspruchter Stahlbaustrukturen als auch zur Optimierung der Strukturmechanik durch geometrische und werkstoffliche Anpassungen abgeleitet werden.
- Die vereinfachte Implementierung von Werkstoffen mit linear-elastischem Werkstoffverhalten stellt eine konservative Annahme in Bezug auf die ermittelten Schwingungsamplituden im Resonanzfall dar.
- Im Vergleich zu einem geschweißten Referenzsystem werden die Eigenfrequenzen ein- und mehrknotiger Strukturen nur geringfügig durch die Implementierung geklebter Anschlüsse beeinflusst. Dies kann durch die konstruktionsbedingte, höhere Steifigkeit geklebter Überlappverbindungen begründet werden. Der Einfluss des E-Moduls des Klebstoffs auf die Eigenfrequenz ist dabei abhängig von der Anzahl der geklebten Anschlüsse und liegt im betrachteten Steifigkeitsspektrum bei unter 5 %.
- Die Ergebnisse zeigen, dass die Schwingungsamplitude eines dynamisch beanspruchten Einknotensystems im baupraktisch relevanten Resonanzfall im Bereich der ersten Eigenfrequenz durch die Implementierung geklebter Anschlüsse deutlich reduziert werden kann. Im Vergleich zum geschweißten Referenzsystem können Amplitudenreduktionen von deutlich über 85 % erreicht werden.
- Klebstoffe mit einem niedrigeren Elastizitätsmodul sind bei identischem Verlustfaktor besser geeignet, die Schwingungsamplituden dynamisch beanspruchter Einknotensystems zu reduzieren. Die Analyse des EKS zeigt, dass die Amplituden des Systems mit dem Klebstoff EPH ($E_{EPH} = 86 \text{ MPa}$) ca. 35 % der Amplituden des Systems mit dem Klebstoff PUR ($E_{PUR} = 356 \text{ MPa}$) bei gleichem Verlustfaktor betragen.
- Im Fall der Resonanzanregung des Einknotensystems führen eine Erhöhung der Klebschichtdicke sowie eine Reduzierung der Überlapplänge zu einem Anstieg der lokal aktivierten Klebstoffdämpfung sowie zu ei-

ner Reduzierung der auftretenden Schwingungsamplituden. Durch diese Anpassungen wird die Knotensteifigkeit reduziert, wodurch die Deformationen der Klebschicht sowie die dadurch aktivierte Klebstoffdämpfung ansteigen. Die prozentuale Änderung der Schwingungsamplitude wird nur geringfügig durch den E-Modul des Klebstoffs beeinflusst.

- Neben dem stationären Schwingungszustand ist der Einfluss der Dämpfung auf das Strukturverhalten vor allem im Bereich der instationären Einschwing- und Abklingvorgänge erkennbar. Es zeigt sich, dass das logarithmische Dekrement der Gesamtstruktur durch den Einsatz des weniger steifen Klebstoffs EPH deutlich gesteigert werden kann. Der Einfluss der Klebschichtdicke und der Überlapplänge zeigt sich qualitativ auch für diesen Schwingungszustand. Zudem nimmt der Einfluss einer Geometrieangepassung der Klebschicht auf die auftretenden Resonanzamplituden im Bereich der ersten Eigenfrequenz mit sinkendem E-Modul des Klebstoffs zu.
- Untersuchungen der frei abklingenden Schwingung eines Einknotensystems im Zeitbereich zeigen, dass die aktivierte Strukturdämpfung durch die Implementierung eines geklebten Anschlusses um mehr als Faktor 50 gesteigert werden kann.
- Für das Mehrknotensystem sind die für den Klebstoff PUR dokumentierten Reduzierungen der maximalen Schwingungsamplitude im Resonanzfall im Bereich der ersten Eigenfrequenz im Vergleich zum Einknotensystem deutlich größer. Hieraus folgt, dass der positive Einfluss der Klebstoffdämpfung, insbesondere für steifere Klebstoffe und der damit verbundenen höheren Knotensteifigkeit, mit der Anzahl geklebter Anschlüsse zunimmt.
- Untersuchungen am Mehrknotensystem zeigen für beide Klebstoffe einen exponentiellen Zusammenhang zwischen dem Verlustfaktor und der maximalen Schwingungsamplitude. Dabei kann unabhängig von der Klebstoffsteifigkeit festgehalten werden, dass Klebstoffe mit einem Verlustfaktor von $\eta > 0,1$ für baupraktische Anwendungen zu priorisieren sind.

5 Konzeptionierung und Fertigung der Probekörper zur Ermittlung des quasi-statischen Tragverhaltens und der Dämpfungseigenschaften

5.1 Probekörpergeometrien

Im Rahmen der experimentellen Untersuchung der Dämpfungseigenschaften geklebter Probekörper werden einschnittige, ebene Überlappverbindungen sowie zylindrische Kreishohlprofilsteckverbindungen betrachtet. Nachfolgend werden die Probekörperfertigung sowie die untersuchten Geometrien der genannten Probekörpertypen beschrieben. Es werden drei Klebschichtdicken (Konfiguration A, B und C) sowie zwei Überlapplängen je Klebschichtdicke untersucht. Eine Übersicht der untersuchten Konfigurationen A, B und C ist in Tabelle 5.1 angegeben.

Tabelle 5.1: Übersicht der Klebschichtgeometrien der Probekörperkonfigurationen A, B und C

	Konfiguration A	Konfiguration B	Konfiguration C
Klebschichtdicke t_{KS}	2,50 mm	5,80 mm	8,00 mm
Überlapplängen $L_{Ü}$	20 / 60 mm	20 / 60 mm	20 / 60 mm

5.1.1 Überlappverbindung

Der Probekörpertyp der einschnittigen, ebenen Überlappverbindung (im Folgenden als Überlappverbindung bezeichnet) besteht aus zwei Flachblechen mit den Abmessungen L_F und B_F sowie der Blechdicke t_F , die mit einer definierten Überlapplänge $L_{Ü}$ sowie einer definierten Klebschichtdicke t_{KS} klebtechnisch gefügt werden. Die Fügeile der ebenen Überlappverbindung bestehen aus Flachstahlerzeugnissen der Sorte S355J2 nach (DIN EN 10058).

Eine schematische Darstellung der Überlappverbindung sowie Angaben zu relevanten geometrischen Abmessungen sind in Abbildung 5.1 dokumentiert. Bei den angegebenen Werten der Klebschichtdicke handelt es sich um nominelle Werte.

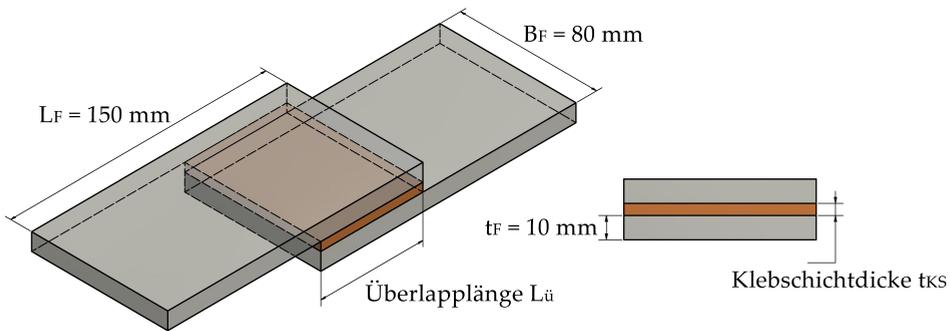


Abbildung 5.1: Schematische Darstellung der einschnittigen, ebenen Überlappverbindung unter Angabe relevanter geometrischer Abmessungen der Füge­teile und der Klebschicht

5.1.2 Kreishohlprofilsteckverbindung

Der Probekörpertyp der Kreishohlprofilsteckverbindung (im Folgenden als KHP-Steckverbindung bezeichnet) besteht aus zwei Kreishohlprofilen, die mit einer definierten Überlapplänge $L_{\ddot{u}}$ ineinandergesteckt und klebtechnisch gefügt werden. Die Kreishohlprofilabschnitte haben eine Länge von jeweils 300 mm. Das innere Kreishohlprofil besitzt einen Außendurchmesser von $D_i = 70,0 \text{ mm}$ sowie die Wanddicke $t_i = 10,0 \text{ mm}$. Die Außendurchmesser D_a und die Wanddicke t_a des äußeren Kreishohlprofils werden so gewählt, dass die in Tabelle 5.1 angegebenen Probekörperkonfigurationen realisiert werden. Die geklebte KHP-Steckverbindung ist in Abbildung 5.2 schematisch unter Angabe relevanter geometrischer Bezeichnungen dargestellt.

Die Querschnittsgeometrien der untersuchten Konfigurationen an Kreishohlprofilen sind zusätzlich in Abbildung 5.3 dargestellt. Die angegebenen Werte der Klebschichtdicke entsprechen nominellen Werten. Zur Fertigung der untersuchten Probekörper werden warmgefertigte, nahtlose Kreishohlprofile der Stahlsorte S355J2H nach (DIN EN 10210-1) verwendet. Zusätzlich gelten für die Fertigung die Maßtoleranzen entsprechend der Angaben in (DIN EN 10210-2). Untersuchungen zum Einfluss von Maßtoleranzen bei Kreishohlprofilen auf die tatsächlich vorliegende Klebschichtdicke sind in (Albiez 2016) dokumentiert. Bei mehr als 70 % der vermessenen Klebschichtdicken kann eine Abweichung zwischen tatsächlicher und nomineller Klebschichtdicke um weniger als $\pm 12,5 \%$

festgestellt werden. In der Regel führen die auftretenden Maßtoleranzen bei warmgefertigten Hohlprofilen dazu, dass die tatsächliche Klebschichtdicke geringer als die nominelle Klebschichtdicke ist.

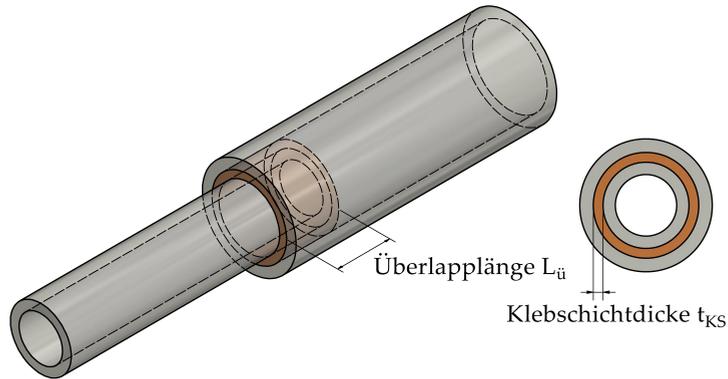


Abbildung 5.2: Schematische Darstellung der Kreishohlprofilverbindung unter Angabe relevanter geometrischer Bezeichnungen

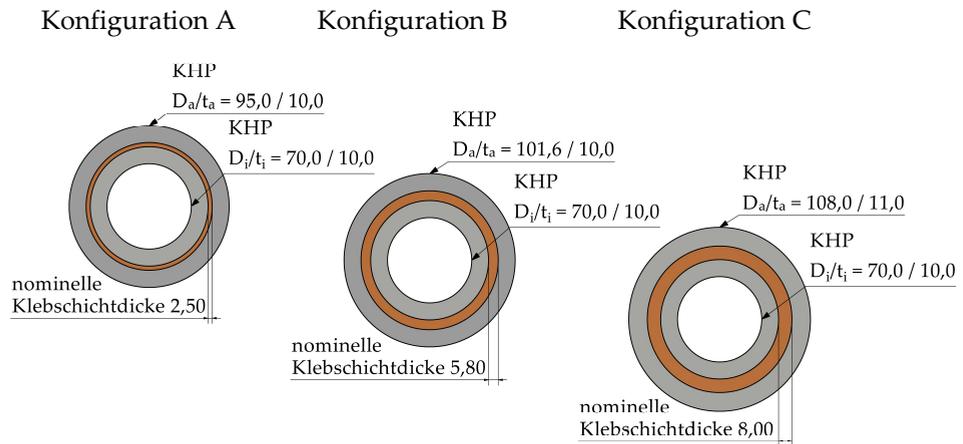


Abbildung 5.3: Untersuchte Kreishohlprofilabmessungen der Konfigurationen A,B und C der KHP-Steckverbindung in [mm] in Anlehnung an (Damm et al. 2021b)

5.1.3 Probekörperbezeichnung

Eine einfache Identifikation der Probekörper soll durch ein nachfolgend erläutertes Bezeichnungsschema ermöglicht werden. Der Probekörperbezeichnung kann dabei sowohl der verwendete Klebstoff als auch die untersuchte Probekörpergeometrie entnommen werden. Die Erläuterung erfolgt anhand des Probekörpers *EPH-2,5-20-1*.

<i>EPH</i>	Klebstoff	EPH – Sikadur F51-60
		PUR – Körapur 842
2,5	Klebschichtdicke t_{ks} in [mm]	2,5 – Konfiguration A
		5,8 – Konfiguration B
		8,0 – Konfiguration C
20	Überlapplänge $L_{\ddot{u}}$ in [mm]	20 bzw. 60
1	Laufende Probennummer	

5.2 Probekörperfertigung

5.2.1 Oberflächenvorbereitung der Fügeiteile

Die Qualität und die ordnungsgemäße Durchführung der klebtechnischen Fertigung ist sowohl im Hinblick auf die spätere statische sowie dynamische Tragfähigkeit von besonderer Bedeutung. Hierbei ist insbesondere auf die fachgerechte Oberflächenvorbereitung der Fügeiteile zu achten. Das Ziel dieser Oberflächenvorbereitung ist die Steigerung der Adhäsionskräfte zwischen Fügeiteil und Klebstoff und eine damit verbundene Steigerung der statischen sowie der dynamischen Tragfähigkeit. Darüber hinaus wird neben einer Steigerung der Alterungs- und Korrosionsbeständigkeit der Klebung zusätzlich ein gleichmäßiges Benetzungsvermögen der gesamten Klebfläche erreicht (Habenicht 2009).

Im ersten Arbeitsschritt werden die Fügeiteile von grobem Schmutz und Rost befreit. Dies geschieht durch das Abbürsten mit einer Drahtbürste. Anschließend werden Fügeiteiloberflächen großflächig mit Korund der Siebung

F100 (106 - 150 μm) auf die Oberflächengüte Sa 3 nach (DIN EN ISO 8501-1) gestrahlt. Die durch Strahlen gesäuberten Oberflächen der Füge­teile werden daraufhin mit Methylethylketon (MEK) gereinigt. Im letzten Schritt des Fertigungsprozesses werden die Füge­teile in speziellen Fertigungs­konstruktionen positioniert und kleb­technisch gefügt. Dieser Prozessschritt ist für die Über­lapp­verbindung in Abschnitt 5.2.2 und für die KHP-Steckverbindung in Abschnitt 5.2.3 beschrieben.

5.2.2 Klebtechnische Fertigung der Überlappverbindung

Für die Fertigung der Überlappverbindung wird eine aus Polyethylen (PE) bestehende Fertigungsvorrichtung verwendet. Das Vorgehen der kleb­technischen Fertigung basiert auf dem in (Albiez 2016) beschriebenen Füge­prozess geschäftet geklebter Stahlproben. Die Prozessschritte der kleb­technischen Fertigung der Überlappverbindung sind in Abbildung 5.4 visualisiert.

Die verwendete Vorrichtung besteht aus einer Grundplatte, auf der ausge­klinkte Formteile montiert werden. Zunächst werden alle Komponenten der Fertigungs­vorrichtung gesäubert und entfettet. Anschließend wird die Fertigungs­vorrichtung montiert (*Schritt 1.*). Die Formteile werden so positioniert, dass sie einen Abstand von 10 mm zueinander haben, wodurch sie die Füge­teile mit einer Dicke von 10 mm in ihrer Position fixieren. Durch die Dimensionierung der Ausklinkung wird sowohl die Größe der Überlappung als auch der Klebschicht­dicke gesteuert. Zur Stabilisierung der Vorrichtung sowie zur Fixierung der Füge­teile in Richtung der Überlappung sind an beiden Enden zwei rechteckige Formteile orthogonal zur Richtung der Überlappung angeordnet. Diese werden jeweils mit zwei Winkeln aus Aluminium fixiert. Abschließend werden die gesäuberten, gestrahlten und entfetteten Füge­teile in die Fertigungs­vorrichtung eingesetzt (*Schritt 2.*).

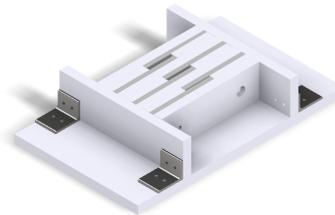
Die Fertigung der geklebten Überlappverbindungen in der zuvor beschriebenen Fertigungs­vorrichtung bietet den Vorteil, dass die Klebschichtdicke und die Über­lapp­länge direkt durch die Fertigungs­vorrichtung vorgegeben und die Füge­teile während des gesamten Klebprozesses in ihrer Position fixiert werden. Zusätzlich werden so unplanmäßige Schiefstellungen der Füge­teile vermieden. Ein weiterer Vorteil besteht darin, dass die Klebfuge an allen erforderlichen

Seiten abgedichtet wird. Dadurch sind keine weiteren Abdichtungsmaßnahmen erforderlich.

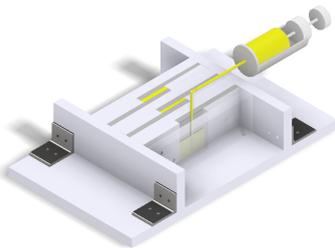
Das klebtechnische Fügen der beiden Füge­teile erfolgt durch eine Injektion des Klebstoffs in den ebenen Füge­spalt. Der Klebstoff wird dabei je nach Klebschichtdicke mit einer Kanülen- oder Kartuschenspritze von oben in den Füge­spalt eingebracht (*Schritt 3.*). Der Klebstoff wird vom Boden des Füge­spalts aufsteigend eingebracht. So werden vorhandene Lu­fteinschlüsse zur Oberseite des Füge­spalts transportiert und verbleiben nicht in der Klebschicht. Die Spitze der Kanülen- bzw. Kartuschenspritze wird während des Anstiegs des Klebstoffs im Füge­spalt kontinuierlich aus dem Füge­spalt herausgeführt. Der Injektionsprozess ist abgeschlossen, sobald der Klebstoff an der Oberseite des Füge­spalts austritt (*Schritt 4.*).



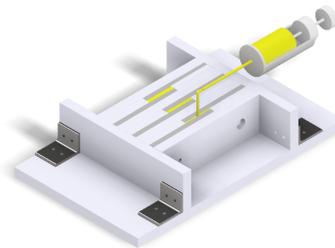
1. Säubern und Bereitstellen der Fertigungsvorrichtung



2. Einlegen der gestrahlten und entfetteten Bleche in die Fertigungsvorrichtung



3. Klebstoffapplikation durch Injektion an der Unterseite des ebenen Füge­spalts



4. Abschluss der Klebstoffinjektion bei Austritt des Klebstoffs an der Oberseite des Füge­spalts

Abbildung 5.4: Klebtechnische Fertigung der Überlappverbindung: exemplarische Darstellung von Probekörpern mit den Klebschichtdicken 2,50 mm, 5,80 mm und 8,00 mm sowie der Überlapplänge 60 mm

5.2.3 Klebtechnische Fertigung der Kreishohlprofilsteckverbindung

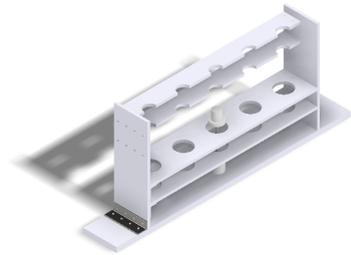
Die KHP-Steckverbindungen werden analog zur in Abschnitt 5.2.2 beschriebenen Fertigung geklebter Überlappverbindungen in einer Fertigungsvorrichtung aus Polyethylen gefertigt. Die Prozessschritte der klebtechnischen Fertigung der KHP-Steckverbindung sind in Abbildung 5.5 visualisiert.

Die Fertigungsvorrichtung besteht aus insgesamt vier Platten, die übereinander in einer Rahmenkonstruktion angeordnet werden. Zunächst werden alle PE-Komponenten der Fertigungsvorrichtung sowie der Positionierungshilfe gesäubert und entfettet. Anschließend werden der Rahmen der Fertigungsvorrichtung sowie die Platten der unteren beiden Ebenen montiert (*Schritt 1.*). Die Platten enthalten Bohrungen, die die Außendurchmesser der verwendeten Rohre aufweisen.

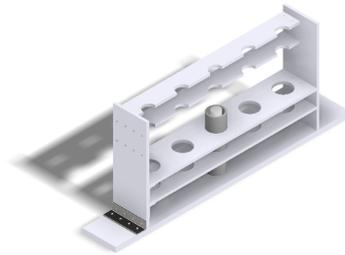
Die Fertigung der KHP-Steckverbindung findet stehend statt. Hierfür wird das gesäuberte, gestrahlte und entfettete Außenrohr der Steckverbindung über einen auf der Grundplatte positionierten Sockel gesteckt und anschließend auf die Grundplatte gestellt (*Schritt 2.*). Das Außenrohr wird durch die unteren beiden Ebenen in seiner Position fixiert. Der verwendete Sockel am Fußpunkt dient zum einen zur Stabilisierung des Außenrohrs und zum anderen zur Positionierung des Innenrohrs. Zur Positionierung des Innenrohrs wird zusätzlich ein hutförmiges Drehteil aus PE verwendet. Das Drehteil besitzt eine Bohrung an der Unterseite mit Innengewinde M10, in die eine Gewindestange M10 eingeschraubt wird. Anschließend wird das Hutprofil von oben in das obere Ende des äußeren Hohlprofils eingeschoben und das Ende der Gewindestange wird in die Bohrung an der Oberseite des Sockels eingeführt. Das Hutprofil besitzt im unteren Teil den Innendurchmesser des Außenrohrs und im oberen Teil den Innendurchmesser des Innenrohrs. Die Überlapplänge zwischen Innen- und Außenrohr kann durch die Anpassung der Gewindestange eingestellt und anschließend durch Kontern mit einer Mutter M10 fixiert werden. Eine schematische Darstellung der verwendeten Positionierungshilfe ist in Abbildung A.3 im Anhang dokumentiert.

Im nächsten Fertigungsschritt wird das gesäuberte, gestrahlte und entfettete Innenrohr von oben auf das Hutprofil aufgeschoben (*Schritt 3.*). Nach der Kon-

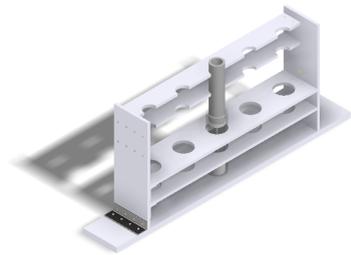
trolle der Klebfugengeometrien werden die oberen beiden Ebenen der Fertigungsvorrichtung montiert. Diese beiden Ebenen besitzen Bohrungen mit dem Außendurchmesser des Innenrohrs, wodurch dieses ebenfalls in seiner Position fixiert wird (*Schritt 4.*).



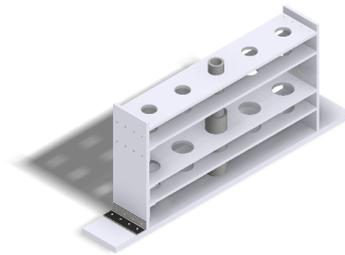
1. Säubern und Bereit- bzw. Einstellen des Unterteils der Fertigungsvorrichtung sowie der zweiteiligen Positionierungshilfe



2. Einsetzen des gestrahlten und entfetteten Außenrohrs in die Fertigungsvorrichtung



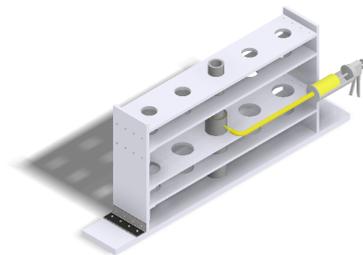
3. Ausrichten der Positionierungshilfe; anschließendes Einsetzen des Innenrohrs



4. Kontrolle der Geometrieparameter; anschließend Zusammenbau des Oberteils der Fertigungsvorrichtung



5. Klebstoffapplikation durch Injektion an der Unterseite des zylindrischen Fugespalts



6. Abschluss der Klebstoffinjektion bei Austritt des Klebstoffs an der Oberseite des Fugespalts

Abbildung 5.5: Klebtechnische Fertigung der KHP-Steckverbindung: exemplarische Darstellung eines Probekörpers mit der Klebschichtdicke 2,5 mm und der Überlapplänge 60 mm

Ein wesentlicher Vorteil der klebtechnischen Fertigung der KHP-Steckverbindung in der in Abbildung 5.5 dargestellten Fertigungsvorrichtung besteht in der Fixierung der Füge­teile sowohl in horizontaler als auch vertikaler Richtung. In horizontaler Richtung wird eine Fixierung über die Ebenen der Fertigungsvorrichtung erreicht. In vertikaler Richtung findet eine exakte Positionierung speziell des Innenrohrs durch die verwendete Positionierungshilfe statt. Diese bietet zudem den Vorteil, dass die Überlapp­länge über die verwendete Gewindestange eingestellt werden kann. Darüber hinaus bietet die stehende Fertigung den Vorteil, dass die Geometrie der Klebfuge kontrolliert und angepasst werden kann. Ein weiterer wesentlicher Vorteil besteht darin, dass keine zusätzliche Abdichtung der Klebfuge erforderlich ist. Das Hutprofil verhindert einen Austritt des Klebstoffs sowohl nach unten in das Außenrohr als auch einen Aufstieg des Klebstoffs in das Innenrohr.

Der Klebstoff wird über eine Injektion durch zwei seitlich am Außenrohr angeordnete, gegenüberliegende Bohrungen mit einem Durchmesser von 7 mm eingebracht. Die Bohrungen sind so positioniert, dass der Klebstoff am Boden der Klebfuge oberhalb des Hutprofils injiziert wird. Die Injektion des Klebstoffs findet abwechselnd über die beiden Bohrungen statt, um eine gleichmäßige Füllung der Klebfuge zu erreichen. Die stehende Fertigung ermöglicht es, die Fließfronten des Klebstoffs über den kompletten Fertigungsprozess hinweg zu beobachten (*Schritt 5.*). Der Injektionsprozess ist abgeschlossen, sobald der Klebstoff in der Klebfuge bis zur Stirnfläche des Außenrohrs aufgestiegen ist (*Schritt 6.*).

6 Quasi-statisches Tragverhalten geklebter Überlapp- und Kreishohlprofilsteckverbindungen unter Axialbelastung

6.1 Ansatz und Zielsetzung

Die Dämpfungseigenschaften geklebter Überlapp- und KHP-Steckverbindungen hängen von unterschiedlichen Faktoren ab. Neben der Geometrie der Probekörper sowie der zugehörigen Klebfugengeometrie haben der Deformations- bzw. Verzerrungszustand sowie der sich daraus ergebende Spannungszustand innerhalb der Klebschicht einen maßgeblichen Einfluss auf die dissipativen Klebstoffeigenschaften (Jones 2001).

Ein Ziel der vorliegenden Arbeit ist die Untersuchung der Dämpfungseigenschaften schubbeanspruchter Klebverbindungen unter definierten Beanspruchungsrandbedingungen. Hierzu werden zunächst uniaxiale, quasi-statische Zugversuche zur Ermittlung des Last-Verformungsverhaltens durchgeführt. Hierdurch können die Kraft-Weg- bzw. Schubspannung-Gleitungsverläufe der untersuchten Probekörper für eine Schubbeanspruchung der Klebschicht ermittelt werden.

Auf Grundlage der ermittelten Last-Verformungsverhalten der unterschiedlichen Probekörpertypen und -konfigurationen unter Axialbelastung werden anschließend verformungsbasierte Prüfniveaus abgeleitet. Diese erlauben eine Durchführung der in Kapitel 7 dokumentierten dynamischen Untersuchungen unter definierten Beanspruchungsrandbedingungen. In den Fokus der Betrachtungen wird der Bereich bis zu einer maximalen Gleitung von 10 % gestellt (Damm et al. 2022a). Der betrachtete Gleitungsbereich umfasst zum einen den linear-viskoelastischen Bereich (LVE) kleiner Deformationen, der in (Damm et al. 2022a) durch einen Amplituden-Sweep bestimmt wird. Für höhere Gleitungen wird zum anderen eine Betrachtung des Einflusses zunehmender materieller Nichtlinearitäten auf die Dämpfungseigenschaften ermöglicht.

6.2 Experimentelle Untersuchungen

6.2.1 Versuchsprogramm

Versuche zur Ermittlung des Last-Verformungsverhaltens der geklebten Probekörper werden für beide Probekörpertypen sowie für die beiden Klebstoffe EPH und PUR durchgeführt. Das Versuchsprogramm der statischen Zugversuche je Probekörpertyp ist in Tabelle 6.1 dargestellt. Es werden die Probekörperkonfigurationen A ($t_{ks} = 2,5$ mm) mit der geringsten Klebschichtdicke und C ($t_{ks} = 8,0$ mm) mit der größten Klebschichtdicke untersucht. Zudem werden je Probekörperkonfiguration die beiden Überlappplängen 20 mm und 60 mm untersucht. Auf die Untersuchung der Probekörperkonfiguration B mit der Klebschichtdicke 5,8 mm wird im ersten Schritt verzichtet. Die Ergebnisse quasi-statischer Zugversuche in Abschnitt 6.3 zeigen, dass durch die Untersuchung der Probekörperkonfigurationen mit der kleinsten sowie der größten Klebschichtdicke eine ausreichende Datengrundlage für die Ableitung von Prüfniveaus vorliegt. Je untersuchter Probekörperkonfiguration und Überlapplänge werden zwei Versuche durchgeführt. Insgesamt werden somit je Probekörpertyp 16 Versuche durchgeführt.

Tabelle 6.1: Versuchsprogramm der statischen Zugversuche an geklebten Überlapp- und KHP-Steckverbindungen

		Probekörpergeometrie		Anzahl Versuche
		Klebschicht- dicke[mm]	Überlapp- länge [mm]	
Klebstoff EPH	2,5	20	2	
		60	2	
	8,0	20	2	
		60	2	
Klebstoff PUR	2,5	20	2	
		60	2	
	8,0	20	2	
		60	2	

6.2.2 Einfluss der Prüfgeschwindigkeit

Die Prüfgeschwindigkeit kann die Festigkeit geklebter Verbindungen beeinflussen. Eine erhöhte Prüfgeschwindigkeit geht für viele Klebstoffe mit einem Anstieg von Festigkeit und Steifigkeit sowie einem verminderten Verformungsvermögen einher (Albiez 2016). Die in diesem Kapitel dokumentierten Zugversuche werden allerdings mit einer geometrieübergreifenden, konstanten Prüfgeschwindigkeit von 1 mm/min durchgeführt. Hierdurch werden die Randbedingungen realer Schwingungserscheinungen abgebildet. In (Damm et al. 2022b) konnte gezeigt werden, dass die Eigenfrequenz geklebter Stahlbaustrukturen und damit auch die Deformationsgeschwindigkeit der Klebschichten während auftretenden Schwingungsereignissen nur vernachlässigbar durch die vorhandene Klebfugengeometrie beeinflusst wird.

Die gewählte Prüfgeschwindigkeit von 1 mm/min entspricht für die Klebschichtdicke 2,5 mm einer Gleitrate von $0,007 \text{ s}^{-1}$. Für die Klebschichtdicke 8,0 mm ergibt sich eine Gleitrate von $0,002 \text{ s}^{-1}$. Im Forschungsprojekt P 1272 (Damm et al. 2022a) durchgeführte Untersuchungen zur Charakterisierung der Klebstoffe EPH und PUR zeigen, dass der Einfluss unterschiedlicher Gleitraten auf das mechanische Verhalten der Klebstoffe für die genannten Gleitraten vernachlässigt werden kann.

6.2.3 Versuchsaufbau der Zugversuche an Überlappverbindungen

Die experimentelle Prüfung der geklebten Überlappverbindung erfolgt auf einer Universalprüfmaschine *inspekt 250 kN* in stehender Zweisäulenbauweise der Fa. Hegewald & Peschke. Die Prüfmaschine besitzt eine maximale statische Prüfkraft von 250 kN. Im Kraftbereich von 0,2 kN bis 250 kN ist die Prüfmaschine in der Genauigkeitsklasse 1 nach (DIN EN ISO 7500-1) kalibriert.

Der Versuchsaufbau der statischen Zugversuche an Überlappverbindungen ist in Abbildung 6.1 dargestellt. Der Probekörper wird beidseitig durch die hydraulischen Spannbacken der Prüfmaschine geklemmt. An der oberen Spannvorrichtung findet eine beidseitige Bewegung der Spannbacken statt, wodurch der Probekörper zentrisch geklemmt wird. Der Ausgleich der probekörperbedingten Exzentrizität findet an der unteren Spannvorrichtung statt. Der Spanndruck der

Maschine ist so dimensioniert, dass kein Schlupf zwischen Probekörper und den Spannbacken der Prüfmaschine auftritt.

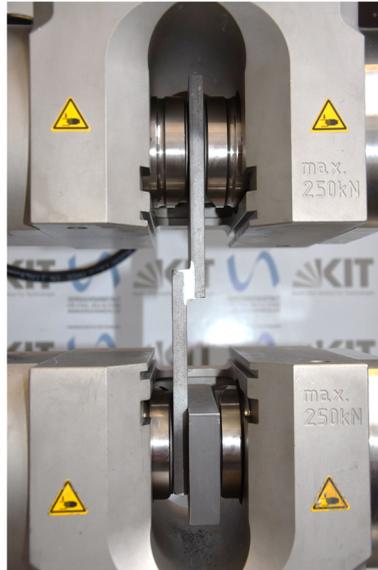


Abbildung 6.1: Versuchsaufbau der statischen Zugversuche an Überlappverbindungen

Während der Durchführung der statischen Zugversuche werden Maschinenkraft und Maschinenweg aufgezeichnet. Die Aufzeichnung des Kraft-Weg-Verlaufs erfolgt über die Kraftmesszelle sowie den Traversenweg der Prüfmaschine.

6.2.4 Versuchsaufbau der Zugversuche an Kreishohlprofilsteckverbindungen

Die experimentelle Prüfung der KHP-Steckverbindungen erfolgt auf einer servohydraulischen Prüfmaschine in stehender Zweisäulenbauweise der Fa. Instron. Die Prüfmaschine besitzt eine maximale statische Prüfkraft von 225 kN sowie eine maximale dynamische Prüfkraft von 180 kN und ist im Kraftbereich von 1 kN bis 250 kN in der Genauigkeitsklasse 1 nach (DIN EN ISO 7500-1) kalibriert. Die Prüfmaschine wird über die Regelsoftware MessTek Dyn.Reg Version 10.0 gesteuert. Die Aufzeichnung der Messwerte von Maschinenkraft und Maschinenweg wird über die Datenerfassungssoftware MessTek DAQ Vers.

10.3 gesteuert. Der Versuchsaufbau der statischen Zugversuche an KHP-Steckverbindungen ist in Abbildung 6.2 dargestellt.



Abbildung 6.2: Versuchsaufbau der statischen Zugversuche an KHP-Steckverbindungen

Zur Einleitung der Prüfkraft in den Probekörper werden beidseitig gabelförmige Lasteinleitungsstrukturen verwendet. Die Lasteinleitungsstrukturen werden an die Probekörperenden über dort angeordnete Durchgangsbohrungen durch Bolzen mit einem Durchmesser von $D = 20$ mm angeschlossen. Der Anschluss der Lasteinleitungsstrukturen erfolgt über zylindrische Bauteile, die durch das hydraulische Spannzeug der Prüfmaschine fixiert werden. Analog zur Überlappverbindungen steht auch bei der Prüfung der KHP-Steckverbindungen eine Prüfung der Probekörper unter einer vorwiegenden Schubbeanspruchung der Klebschicht im Fokus der Untersuchungen. Zur Vermeidung unplanmäßiger Einspannmomente, wodurch Normalspannungen in der Klebschicht hervorgerufen werden, werden die Bolzen am oberen bzw. unteren Probekörperende um 90° versetzt zueinander angeordnet. Durch diesen Einbau in die Prüfmaschine wird eine gelenkige Lagerung des Probekörpers um zwei voneinander unabhängig und orthogonal zueinander stehende Achsen ermöglicht.

Neben Maschinenkraft und Maschinenweg, die über die Datenerfassungssoftware der Prüfmaschine erfasst werden, wird die Lokalverschiebung im Bereich der Überlappung der beiden Kreishohlprofile zusätzlich durch zwei induktive Wegaufnehmer der Fa. Hottinger Baldwin Messtechnik aufgezeichnet. Es werden Wegaufnehmer mit einem maximalen Weg von ± 50 mm verwendet, die nach (DIN EN ISO 9513) in Genauigkeitsklasse 1 kalibriert sind. Die Wegaufnehmer sind in Umfangsrichtung in einem Winkel von $90 - 180^\circ$ zueinander angeordnet und werden im Bereich der Stirnfläche des Außenrohrs angeschlossen. Zur Berechnung der lokalen Verschiebung im Bereich der Überlappung werden die Messwerte der beiden induktiven Wegaufnehmer gemittelt, wodurch der Einfluss von eventuell vorhandenen Verkippungen des Probekörpers während der Versuche erfasst werden kann.

6.3 Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen

6.3.1 Ergebnisse Überlappverbindung

Klebstoff EPH

Während der Durchführung der uniaxialen Zugversuche werden Maschinenkraft und Maschinenweg der Prüfmaschine bis zum Bruch der Probe aufgezeichnet. Die Maschinenkraft-Maschinenweg-Verläufe (kurz: Kraft-Weg-Verläufe) sind für den Klebstoff EPH in Abbildung 6.3 dargestellt. Aufgrund der festgestellten Reproduzierbarkeit der Versuchsergebnisse wird lediglich ein exemplarischer Verlauf je Probekörperkonfiguration dargestellt. Der Punkt der maximalen Kraft ist mit einem Stern gekennzeichnet.

Die Kraft-Weg-Verläufe der mit dem Klebstoff EPH gefertigten Überlappverbindungen zeigen zunächst geometrieübergreifend einen linearen Anstieg bis zu einem Maschinenweg von ca. 0,25 mm. Anschließend flachen die Kraft-Weg-Verläufe aller untersuchten Probekörper zunehmend ab. Ab einem Maschinenweg zwischen 0,5 mm und 1,0 mm verlaufen die Kraft-Weg-Verläufe erneut linear bis zum Bruch der Probe. Die Steigung in diesem zweiten linearen Bereich liegt jedoch deutlich unter der Anfangssteifigkeit. Bei gleicher Klebschichtdicke liegen die Kurven der Probekörper mit einer Überlapplänge von 60 mm erwar-

tungsgemäß über denen der Probekörper mit einer Überlapplänge von 20 mm. Die ermittelten Tragfähigkeiten aller durchgeführten Versuche liegen in Abhängigkeit der Klebfugegeometrie zwischen 4,3 kN und 31,9 kN.

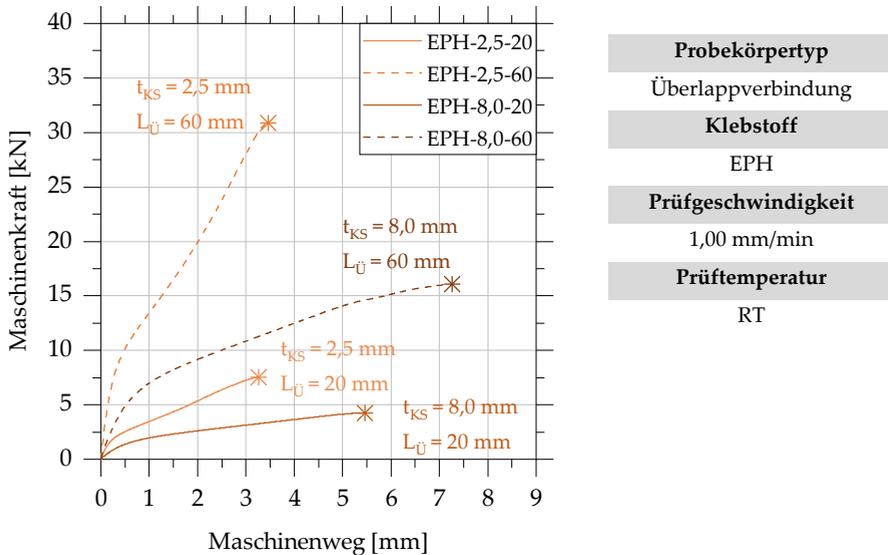


Abbildung 6.3: Maschinenkraft-Maschinenweg-Diagramm der statischen Zugversuche an Überlappverbindungen; Klebstoff EPH

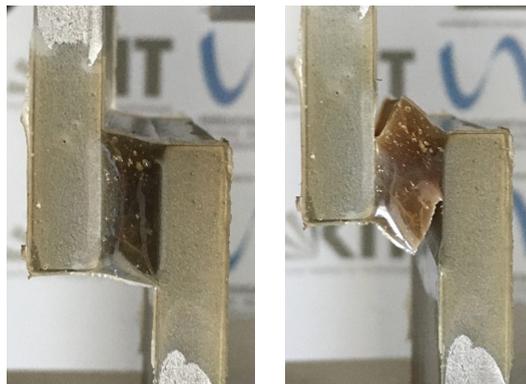


Abbildung 6.4: Zugversuche an geklebten Überlappverbindungen: Exemplarische Dokumentation des fortschreitenden duktilen Versagens der Klebschicht im Versuchsverlauf für die Konfiguration C mit einer Überlapplänge von 20 mm; Klebstoff EPH

Für alle mit dem Klebstoff EPH gefertigten Überlappverbindungen kann ein duktileres Versagen festgestellt werden. In Abbildung 6.4 ist das fortschreitende duktile Versagen der Klebschicht im Versuchsverlauf exemplarisch für die Konfiguration C mit einer Überlapplänge von 20 mm dokumentiert. Aufgrund der zunehmenden Schubverformung der Klebschicht entsteht eine Querkzugbeanspruchung an den Enden der Klebschicht, die ursächlich für den dort lokalisierten Versagensbeginn ist. Im weiteren Versuchsverlauf führt diese Querkzugbeanspruchung zu einem Abschälen der Klebschicht von einem der beiden Fügebauteile.

Klebstoff PUR

Die in Abbildung 6.5 dargestellten Kraft-Weg-Verläufe, die sich für Versuche an mit dem Klebstoff PUR gefertigten Überlappverbindungen ergeben, zeigen im Anfangsbereich ein lineares Verhalten der Probekörper.

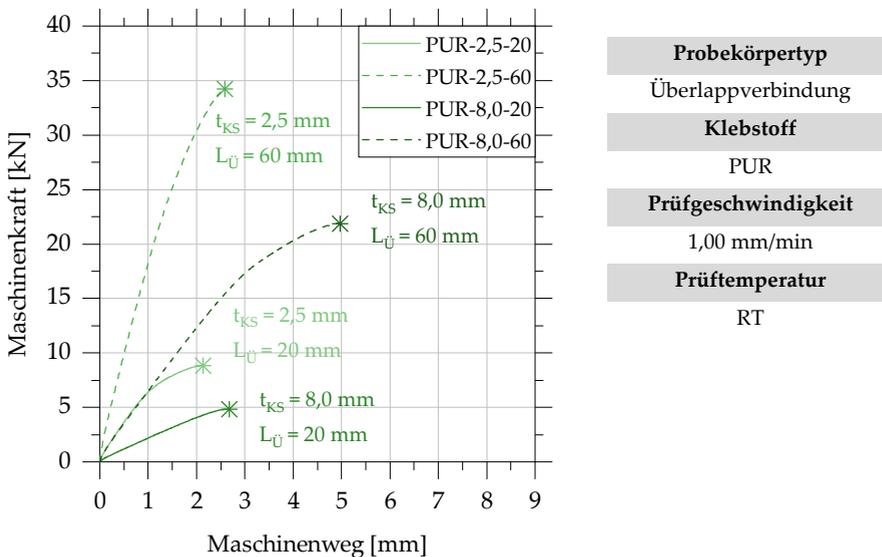


Abbildung 6.5: Maschinenkraft-Maschinenweg-Diagramm der statischen Zugversuche an Überlappverbindungen; Klebstoff PUR

Mit zunehmendem Weg flachen die Versuchskurven ab. Im Folgenden versagen die Probekörper ohne eine deutliche Zunahme der Verformung. Die Versagenslasten, die anhand der statischen Zugversuche ermittelt werden, liegen in Abhängigkeit der Klebfugegeometrie zwischen 4,8 kN und 34,2 kN.

Die mit dem Klebstoff PUR gefertigten Überlappverbindungen zeigen ein duktiler Versagen. In Abbildung 6.6 ist das fortschreitende, duktile Versagen der Klebschicht im Versuchsverlauf für die Konfiguration C mit einer Überlapplänge von 20 mm dokumentiert. Infolge einer zunehmenden Schubverformung der Klebschicht entsteht eine Querkzugbeanspruchung an den Enden der Klebschicht, die zu einem Versagen der Klebschicht in diesem Bereich führt. Im weiteren Versuchsverlauf kann ein Abschälen der Klebschicht von einem der beiden Fügebauteile beobachtet werden.

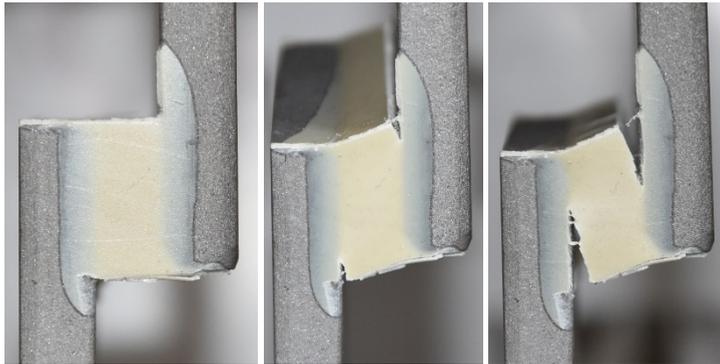


Abbildung 6.6: Zugversuche an geklebten Überlappverbindungen: Exemplarische Dokumentation des fortschreitenden, duktilen Versagens der Klebschicht im Versuchsverlauf für die Konfiguration C mit einer Überlapplänge von 20 mm; Klebstoff PUR

Exemplarische Bruchbilder der Versuche an mit den Klebstoffen EPH und PUR gefertigten Überlappverbindungen können dem Anhang entnommen werden. Die Probekörper zeigen für beide Klebstoffe ein substratnah kohäsives Versagen. Auf den Fügebauteiloberflächen können Klebstoffreste anhand einer optischen Analyse mit bloßem Auge festgestellt werden. Die einzelnen Bruchbilder unterscheiden sich lediglich durch die Größe der an den beiden Fügebauteilen verbleibenden Klebstoffteilflächen.

Es kann sowohl für die mit dem Klebstoff EPH gefertigten, als auch für die mit dem Klebstoff PUR hergestellten Probekörper festhalten werden, dass sich die Steifigkeiten der unterschiedlichen Probekörperkonfigurationen deutlich voneinander unterscheiden. Darüber hinaus zeigen die Probekörper mit einer Klebschichtdicke von 8,0 mm im Vergleich zur Klebschichtdicke 2,5 mm bei gleicher Überlapplänge klebstoffunabhängig deutlich größere Verformungen bei Erreichen der maximalen Kraft. Durch eine Verdreifachung der Überlapplänge steigt die Tragfähigkeit der untersuchten Probekörper um näherungsweise Faktor vier an. Dies gilt für beide Klebstoffe sowie für beide Überlapplängen. Bei gleicher Überlapplänge führt eine Reduzierung der Klebschichtdicke von 8,0 mm auf 2,5 mm für Klebstoff EPH zu einem Anstieg der Versagenslast um Faktor 1,8 ($L_{\text{Ü}} = 20 \text{ mm}$) bzw. 1,9 ($L_{\text{Ü}} = 60 \text{ mm}$). Für Klebstoff PUR kann ein Anstieg der Tragfähigkeit um Faktor 1,8 ($L_{\text{Ü}} = 20 \text{ mm}$) bzw. 1,6 ($L_{\text{Ü}} = 60 \text{ mm}$) infolge einer Reduzierung der Klebschichtdicke festgestellt werden.

6.3.2 Ergebnisse Kreishohlprofilsteckverbindung

Klebstoff EPH

Die Aufzeichnung und Auswertung der Ergebnisse der statischen Zugversuche an geklebten KHP-Steckverbindungen findet analog zu den in Abschnitt 6.3.1 dokumentierten Untersuchungen an geklebten Überlappverbindungen statt. Die Kraft-Weg-Verläufe sind für den Klebstoff EPH in Abbildung 6.7 dargestellt.

Der dargestellte Weg entspricht dabei dem mittleren Weg der beiden am Probekörper angebrachten induktiven Wegaufnehmer, die die Lokalverschiebung zwischen den beiden Kreishohlprofilen aufzeichnen. Aufgrund der auch für die KHP-Steckverbindung festgestellte Reproduzierbarkeit der Versuche wird je Probekörperkonfiguration erneut ein exemplarischer Verlauf dargestellt. Der Punkt der maximalen Kraft ist mit einem Stern gekennzeichnet. Die ermittelten Tragfähigkeiten aller durchgeführten Versuche liegen in Abhängigkeit der Klebfugegeometrie zwischen 14,5 kN und 61,5 kN.

Die qualitativen Verläufe der geklebten KHP-Steckverbindungen ähneln für beide Klebstoffe denen der ebenen Überlappverbindung (vgl. Abschnitt 6.3.1). Für die mit dem Klebstoff EPH gefertigten KHP-Steckverbindungen zeigt sich

ein von der Klebschichtgeometrie abhängiger, mehr oder weniger stark ausgeprägter bilinearer Kraft-Weg-Verlauf. Durch die zylindrische Klebschicht und den damit verbundenen nichtlinearen Verzerrungszustand in radialer Richtung variiert der dokumentierte Weg der Wegaufnahme für die einzelnen Probekörperkonfigurationen, ab dem der Bereich der linearen Anfangssteifigkeit verlassen wird. Der Übergang von der linearen Anfangssteifigkeit in einen zweiten, linear verlaufenden Abschnitt mit geringerer Steifigkeit liegt jedoch für alle Probekörperkonfigurationen unterhalb einer Relativverschiebung der beiden Kreishohlprofile von 2,0 mm. Im Anschluss verlaufen die Kraft-Weg-Verläufe der einzelnen Probekörper erneut näherungsweise linear bis zum Bruch der Probe. Die erreichten Maximalkräfte liegen dabei für die Überlapplänge 60 mm bei gleicher Klebschichtdicke deutlich über denen, die für eine Überlapplänge von 20 mm gemessen werden.

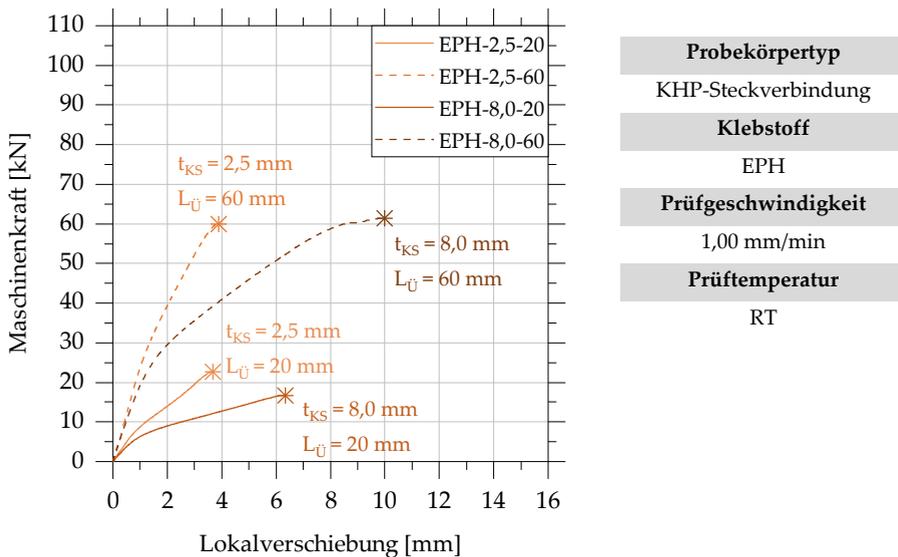


Abbildung 6.7: Maschinenkraft-Lokalverschiebung-Diagramm der statischen Zugversuche an KHP-Steckverbindungen; Klebstoff EPH in Anlehnung an (Damm et al. 2021b)



Abbildung 6.8: Zugversuche an geklebten KHP-Steckverbindungen: Exemplarische Dokumentati-
on des fortschreitenden Versagens der Klebschicht im Versuchsverlauf für die Kon-
figuration A mit einer Überlapplänge von 60 mm; Klebstoff EPH

Analog zur Überlappverbindung zeigen auch die mit dem Klebstoff EPH gefertigten KHP-Steckverbindungen ein duktilen Versagen. In Abbildung 6.8 ist das fortschreitende, duktile Versagen der Klebschicht im Versuchsverlauf für die Konfiguration A mit einer Überlapplänge von 60 mm dokumentiert. Für alle Proben zeigt sich eine Mischform aus adhäsivem und substratnah kohäsivem Versagen der Klebverbindung. Dominierend ist der Anteil an adhäsivem Versagen. Die einzelnen Proben unterscheiden sich durch den Anteil der am Innen- bzw. Außenrohr verbliebenen Klebflächen, wobei das Versagen der Probekörperkonfiguration C mit einer Klebschichtdicke von 8,0 mm stets an der Außenseite des Innenrohrs lokalisiert ist. Für die Probekörperkonfiguration A mit einer Klebschichtdicke von 2,5 mm variiert der Ort des Versagens zwischen Außenseite des Innenrohrs sowie der Innenseite des Außenrohrs. Zudem können Mischformen beobachtet werden.

Klebstoff PUR

Die Kraft-Weg-Verläufe der mit dem Klebstoff PUR gefertigten KHP-Steckverbindungen in Abbildung 6.9 weisen einen deutlich ausgeprägten, linearen Anfangsbereich auf. Wie bereits für die Überlappverbindung beobachtet werden konnte, flacht die Kurve erst mit zunehmender Relativverschiebung der beiden Füge-teile zunehmend ab. Die Versagenslasten, die anhand der statischen Zugversuche ermittelt werden, liegen in Abhängigkeit der Klebfugegeometrie zwischen 23,2 kN und 199,3 kN.

Die KHP-Steckverbindungen versagen im Anschluss ohne eine deutliche, zusätzliche Verformungszunahme. Analog zu den mit dem Klebstoff EPH gefertigten KHP-Steckverbindungen liegen die erreichten Maximalkräfte der Probekörper mit einer Überlapplänge von 60 mm bei gleicher Klebschichtdicke deutlich über denen mit einer Überlapplänge von 20 mm.

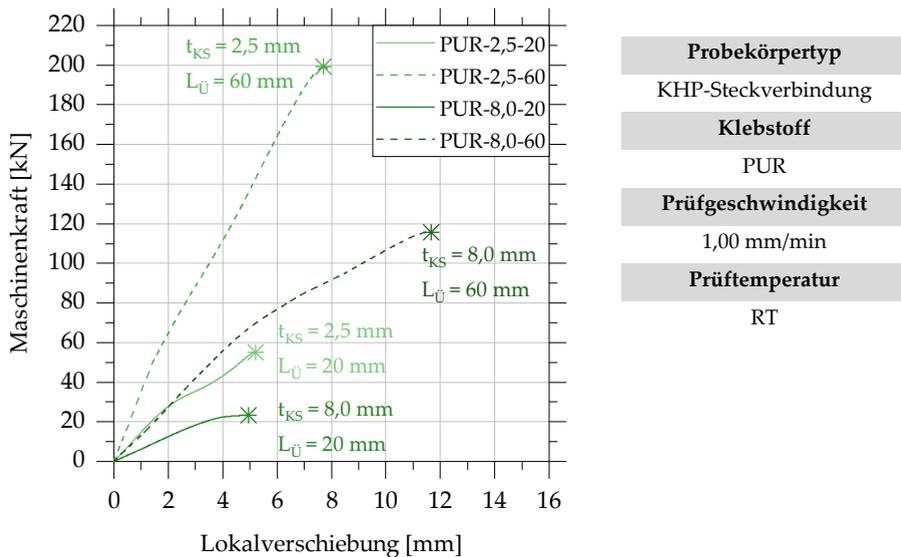


Abbildung 6.9: Maschinenkraft-Lokalverschiebung-Diagramm der statischen Zugversuche an KHP-Steckverbindungen; Klebstoff PUR in Anlehnung an (Damm et al. 2021b)

Für alle Probekörper kann ein duktiler Versagen festgestellt werden. In Abbildung 6.10 ist das fortschreitende, duktile Versagen der Klebschicht im Versuchverlauf für die Konfiguration A mit einer Überlapplänge von 60 mm dokumentiert. Für alle Proben zeigt sich eine Mischform aus kohäsivem und substratnah kohäsivem Versagen der Klebverbindung. Dominierend ist der Anteil an substratnah kohäsivem Versagen. Die einzelnen Proben unterscheiden sich durch den Anteil der an Innen- bzw. Außenrohr verbliebenen Klebflächen.



Abbildung 6.10: Zugversuche an geklebten KHP-Steckverbindungen: Exemplarische Dokumentati-
on des fortschreitenden Versagens der Klebschicht im Versuchsverlauf für die Kon-
figuration A mit einer Überlapplänge von 60 mm; Klebstoff PUR

Exemplarische Bruchbilder der Versuche an mit den Klebstoffen EPH und PUR gefertigten KHP-Steckverbindungen können dem Anhang entnommen werden. Auf den Fügeteiloberflächen können Klebstoffreste anhand einer optischen Analyse mit bloßem Auge festgestellt werden. Die einzelnen Bruchbilder unterscheiden sich durch die Größe der an den beiden Fügeteilen verbleibenden Klebstoffteilflächen.

Sowohl für die mit dem Klebstoff EPH gefertigten, als auch für die mit dem Klebstoff PUR hergestellten Probekörper kann ein Zusammenhang zwischen der Probekörpergeometrie sowie der zugehörigen Steifigkeit der untersuchten Probekörperkonfigurationen festgestellt werden. Ein Vergleich der Probekörper mit den Klebschichtdicken 2,5 mm bzw. 8,0 mm bei gleicher Überlapplänge zeigt zudem, dass die Verformungen bei Erreichen der maximalen Last mit zunehmender Klebschichtdicke erwartungsgemäß ansteigen.

Für die mit Klebstoff EPH geklebten Probekörper führt eine Verdreifachung der Überlapplänge zu einem Anstieg der Tragfähigkeit um Faktor 2,6 ($t_{KS} = 2,5$ mm) bzw. 3,7 ($t_{KS} = 8,0$ mm). Der Einfluss der Überlapplänge auf die ermittelten Versagenslasten ist für Klebstoff PUR größer. Die Tragfähigkeit infolge einer Überlapplängenerhöhung steigen um Faktor 3,6 ($t_{KS} = 2,5$ mm) bzw. 4,9 ($t_{KS} = 8,0$ mm).

Die Tragfähigkeit der mit Klebstoff EPH geklebten KHP-Steckverbindungen wird nur vernachlässigbar durch eine Reduzierung der Klebschichtdicke von 8,0 mm auf 2,5 mm beeinflusst. Demgegenüber zeigt sich für Klebstoff PUR ein Anstieg der Tragfähigkeit infolge einer Reduzierung der Klebschichtdicke bei gleicher Überlapplänge um Faktor 2,4 ($L_{\ddot{u}} = 20$ mm) bzw. 1,7 ($L_{\ddot{u}} = 60$ mm).

6.4 Ableitung von Prüfniveaus

Im Fokus der dynamischen Untersuchungen in Kapitel 7 steht neben der experimentellen Bestimmung der Dämpfungseigenschaften geklebter Überlapp- und KHP-Steckverbindungen die Analyse des Einflusses verschiedener Geometrie- und Prüfparameter. Die Vergleichbarkeit der Ergebnisse verschiedener Probekörperkonfigurationen mit variierenden Klebschichtdicken und Überlappplängen wird durch die Durchführung der dynamischen Versuche mit zuvor definierten Prüfniveaus ermöglicht. Ein Prüfniveau ist durch die Vorgabe einer maximalen Verzerrung der Klebschicht charakterisiert. Die Definition dieser maximalen Verzerrung erfolgt auf Grundlage der in Abschnitt 6.3 dokumentierten Ergebnisse statischer Zugversuche an geklebten Überlapp- und KHP-Steckverbindungen. Im Folgenden Abschnitt werden die ermittelten Kraft-Weg-Verläufe hierfür in Schubspannung-Gleitungs-Verläufe überführt.

6.4.1 Auswertung der Ergebnisse quasi-statischer Zugversuche an Überlapp- und Kreishohlprofilsteckverbindungen

Ergebnisse Überlappverbindung

Für die Überlappverbindung resultiert die zeitabhängige Nennschubspannung τ entsprechend Gl. 6.1 aus dem Quotienten der Kraft F zum Zeitpunkt t und der Klebfläche, die sich aus der Breite der Klebfläche (80 mm) sowie der jeweiligen Überlapplänge $L_{\ddot{u}}$ ergibt.

$$\tau(t)_{\text{Nenn}} = \frac{F(t)}{80 \text{ mm} \times L_{\ddot{u}}} \quad (6.1)$$

Der zugehörige Wert der Gleitung γ kann anhand von Gl. 6.2 aus dem Quotienten aus dem Weg w zum Zeitpunkt t und der Klebschichtdicke t_{KS} ermittelt werden.

$$\gamma(t) = \frac{w(t)}{t_{\text{KS}}} \quad (6.2)$$

Die so ermittelten Schubspannung-Gleitungs-Verläufe der mit den Klebstoffen EPH und PUR gefertigten Überlappverbindungen sind in Abbildung 6.11 bis zu

einem für die weiteren Betrachtungen definierten maximalen Wert der Gleitung von 10 % dargestellt.

Die Schubspannung-Gleitung-Verläufe der mit dem Klebstoff EPH gefertigten Überlappverbindungen zeigen, dass die Anfangssteifigkeiten bis zu einer Gleitung von 1,5 % für alle betrachteten Probekörpergeometrien annähernd identisch sind. Für den Klebstoff EPH kann eine signifikante Abweichung der Kurvenverläufe in Abhängigkeit der Probekörpergeometrie ab einem Wert der Gleitung von ca. 2 % bis 2,5 % beobachtet werden. Ab einer Gleitung von 3 % flachen die Kurven zunehmend ab und verlaufen anschließend mit einer geringeren Steigung. Für Klebstoff PUR kann ein deutlich kleinerer Bereich mit linear-elastischem Materialverhalten festgestellt werden. Ab einem Wert der Gleitung von ca. 0,2 % endet der Bereich der linearen Anfangssteifigkeit und die Kurven verlaufen anschließend linear mit geringerer Steigung.

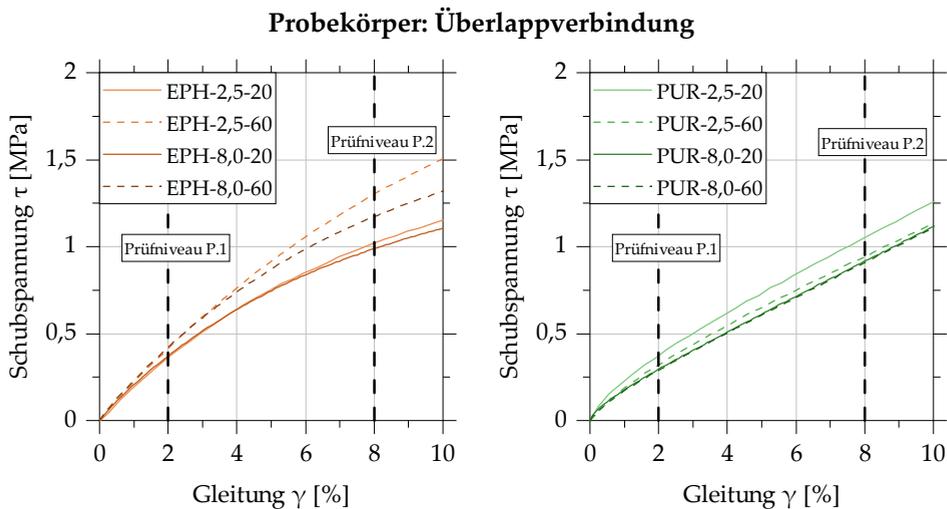


Abbildung 6.11: Ableitung der Prüfniveaus P.1 und P.2 auf Grundlage der Schubspannung-Gleitung-Verläufe der Zugversuche an Überlappverbindungen für die Klebstoffe EPH (links) und PUR (rechts)

Anhand der Betrachtung eines diskreten Werts der Gleitung kann festgestellt werden, dass die in der Überlappverbindung auftretende Schubspannung bei gleicher Überlapplänge mit zunehmender Klebschichtdicke geringfügig abnimmt. In (Yi 1988) dokumentierte Untersuchungen zeigen, dass die Festigkeit

einer Überlappklebung mit ansteigender Klebschichtdicke aufgrund der Zunahme von Biegemomenten an den Überlappungsenden abnimmt. Hierdurch werden Normal- und Schälbeanspruchungen in der Klebschicht hervorgerufen. Zudem werden Querkontraktionen der Klebschicht mit steigender Klebschichtdicke erleichtert, wodurch die Steifigkeit der gesamten Klebung reduziert wird (Habenicht 2009). Die größten Schubspannungen werden bei gleichem Wert der Gleitung für die Probekörper mit einer Klebschichtdicke von 2,5 mm und einer Überlapplänge von 60 mm (EPH-2,5-60) erreicht. In Bezug auf die hier nicht untersuchte Klebschichtdicke 5,8 mm kann begründet davon ausgegangen werden, dass die Schubspannung-Gleitung-Kurven für diesen Fall zwischen den beiden dargestellten Klebschichtdicken liegen würden.

Ergebnisse KHP-Steckverbindung

Die in der Klebschicht der KHP-Steckverbindung auftretende, zeitabhängige Nennschubspannung τ kann über Gl. 6.3 aus dem Quotient aus der Kraft F zum Zeitpunkt t sowie der Klebfläche bestimmt werden. Die Fläche der Klebung errechnet sich aus der Breite der Klebschicht in Umfangsrichtung sowie der jeweiligen Überlapplänge. Im Rahmen von Tragfähigkeits- und Festigkeitsbetrachtungen geklebter KHP-Steckverbindungen wird die Nennschubspannung in der Regel auf den Umfang der Klebschicht am Innenrohr bezogen, wodurch die Schubspannungen maximal werden (Albiez 2016). Da für die Untersuchung der dynamischen Eigenschaften der geklebten Probekörper das Integral der Verzerrung und der daraus entstehenden Schubspannung innerhalb der Klebschicht von Interesse ist, wird eine Auswertung der Schubspannung in der Klebschichtmitte vorgenommen.

$$\tau(t)_{\text{Nenn}} = \frac{F(t)}{2\pi \times (35 \text{ mm} + \frac{t_{\text{KS}}}{2}) \times L_{\text{Ü}}} \quad (6.3)$$

Die korrespondierenden Werte der Gleitung können ebenfalls mit Gl. 6.2 ermittelt werden. In Abbildung 6.12 sind die ermittelten Schubspannung-Gleitungsverläufe der mit den Klebstoffen EPH und PUR gefertigten KHP-Steckverbindungen bis zu einem maximalen Wert der Gleitung von 10 % dargestellt.

Die Verläufe der Schubspannung-Gleitung-Kurven der mit dem Klebstoff EPH gefertigten KHP-Steckverbindung unterscheiden sich unmittelbar nach Versuchsbeginn voneinander. Alle Kurven zeigen bis zu einem Wert der Gleitung von ca. 6 % einen näherungsweise linearen Verlauf. Die Steifigkeit ist abhängig von der Klebfugegeometrie und nimmt mit steigender Klebschichtdicke und sinkender Überlapplänge zu. Die Schubspannung-Gleitung-Kurven der mit dem Klebstoff PUR gefertigten Probekörper verlaufen im dargestellten Bereich näherungsweise linear. Der Einfluss der Klebfugegeometrie auf die Steifigkeit des Klebverbunds ist weniger stark ausgeprägt.

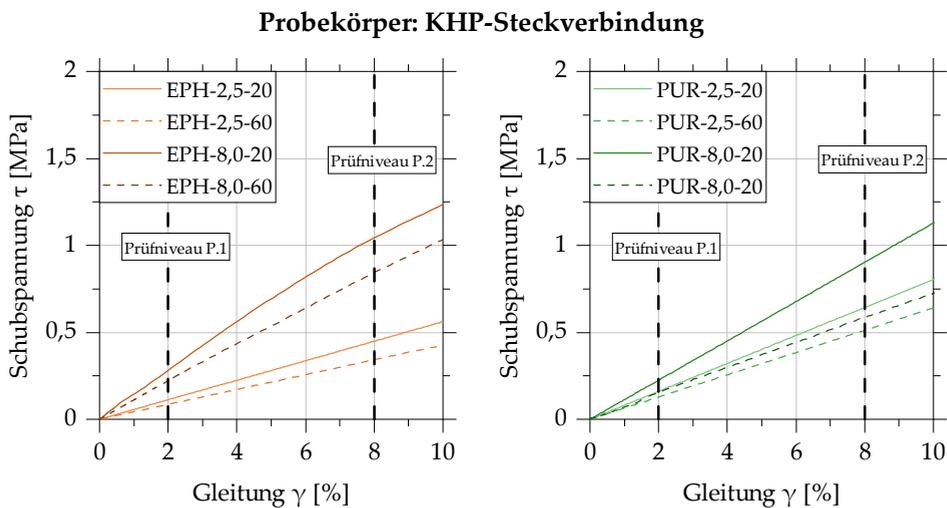


Abbildung 6.12: Ableitung der Prüfniveaus P.1 und P.2 auf Grundlage der Schubspannung-Gleitung-Verläufe der Zugversuche an KHP-Steckverbindungen für die Klebstoffe EPH (links) und PUR (rechts)

6.4.2 Charakterisierung der Prüfniveaus

Auf Grundlage der zuvor ermittelten Schubspannung-Gleitung-Verläufe werden die Prüfniveaus P.1 und P.2 zur Durchführung der dynamischen Versuche abgeleitet, die in Tabelle 6.2 zusammengefasst werden.

Prüfniveau P.1 folgt dem Ziel einer Prüfung der Probekörper näherungsweise im Bereich der linearen Viskoelastizität (LVE). Hierfür müssen die auftretenden Amplituden so gewählt werden, dass die Klebschicht über den kompletten

Anregungszyklus hinweg ausschließlich im Bereich der LVE beansprucht wird. Am LWF in Paderborn durchgeführte und in (Damm et al. 2022a) dokumentierte Untersuchungen zum Einfluss des Gleitungs-niveaus auf den Speichermodul der Klebstoffe EPH und PUR zeigen, dass der linear-viskoelastische Bereich beider Klebstoffe ab einem Wert der Gleitung von ca. 1 % endet.

Vor dem Hintergrund der versuchstechnischen Umsetzbarkeit wurde im Projekt P 1272 (Damm et al. 2022a) für Prüfniveau P.1 ein maximaler Wert der Gleitung von 2 % definiert. Die zuvor dargestellten Schubspannung-Gleitungs-Verläufe der untersuchten Überlapp- und KHP-Steckverbindung zeigen, dass der Zusammenhang zwischen Schubspannung und Gleitung speziell für die mit dem Klebstoff EPH gefertigten Überlappverbindungen bereits ab einem Wert der Gleitung von 1,5 % zunehmend nichtlinear ist. Hierdurch können in Abhängigkeit der Probekörpergeometrie im Versuchsverlauf plastische Deformationen in der Klebschicht auftreten. Diese sind insbesondere mit einer Erhöhung der Dämpfungseigenschaften der Probekörper im Vergleich zu einer Prüfung im Bereich der LVE assoziiert (Khoshmanesh et al. 2020).

Tabelle 6.2: Zusammenfassung der Prüfniveaus zur experimentellen Untersuchung der Dämpfungseigenschaften geklebter Überlapp- und KHP-Steckverbindungen

Prüfniveau	Randbedingung	Charakterisierung
P.1	$\gamma_{\max} = 2 \%$	<ul style="list-style-type: none"> • Näherungsweise linear-viskoelastisches Materialverhalten • Geringer Einfluss auftretender Nichtlinearitäten
P.2	$\gamma_{\max} = 8 \%$	<ul style="list-style-type: none"> • Bereich mit nichtlinear-viskoelastischem Materialverhalten (insbesondere für Klebstoff EPH) • Zunehmender Einfluss auftretender Nichtlinearitäten

In **Prüfniveau P.2** steht die Untersuchung von zunehmend nichtlinearem Material- bzw. Klebstoffverhalten und deren Auswirkungen auf die Dämpfungseigenschaften der geklebten Probekörper im Fokus. Hierfür wird eine maximale

Gleitung der Klebschicht von 8 % festgelegt. Für diesen Wert der Gleitung zeigt sich insbesondere für den Klebstoff EPH sowohl für die Überlappverbindung als auch für die KHP-Steckverbindung ein zunehmend nichtlinearer Zusammenhang zwischen Schubspannung und Gleitung der Klebschicht. Es kann begründet davon ausgegangen werden, dass die Dämpfungseigenschaften der Probekörper durch auftretende plastische Deformationen beeinflusst werden.

7 Dämpfungseigenschaften geklebter Überlapp- und Kreishohlprofilsteckverbindungen

7.1 Ansatz und Zielsetzung

Die Voraussetzung zur Berücksichtigung dissipativer Klebstoffeigenschaften im Rahmen der Auslegung von Stahlbaustrukturen ist die Kenntnis der Dämpfungseigenschaften geklebter Verbindungen im Bauteilmaßstab. Daher stellt die experimentelle Ermittlung der Dämpfungseigenschaften im Bauwesen einsetzbarer Überlapp- und KHP-Steckverbindungen einen Schwerpunkt der vorliegenden Arbeit dar. Die experimentellen Untersuchungen finden für axial belastete Klebverbindungen mit vorwiegend schubbeanspruchten Klebschichten statt. Im Rahmen der experimentellen Untersuchungen wird zunächst der Verlustfaktor als Maß für die Dämpfungseigenschaften unter Variation wesentlicher Geometrie- und Beanspruchungsrandbedingungen ermittelt:

- Versuche mit unterschiedlichen Prüffrequenzen liefern Erkenntnisse über die Frequenzabhängigkeit dissipativer Klebstoffeigenschaften.
- Zur Quantifizierung des Einflusses der Überlapplänge werden Probekörper mit zwei unterschiedlichen Überlappungen untersucht.
- Der Einfluss der Klebschichtdicke kann durch die Untersuchung von drei unterschiedlichen Probekörperkonfigurationen mit verschiedenen Klebschichtdicken ermittelt werden.
- Aufgrund der in Strukturen und deren Verbindungen wechselnden Beanspruchungen stellt die Untersuchung verschiedener Beanspruchungsintensitäten der Klebschicht einen weiteren Gegenstand der Untersuchungen dar. Im Fokus steht dabei zum einen der Bereich kleiner Deformationen ($\gamma \leq 2\%$), für den näherungsweise die Gültigkeit der linearen Viskoelastizität unterstellt werden kann. Der Einfluss auftretender Nichtlinearitäten ist gering. Anhand von Prüfniveau P.2 ($\gamma \leq 8\%$) wird zudem die Untersuchung des Einflusses von zunehmend nicht-linear-viskoelastischem Materialverhalten auf die Dämpfungseigenschaften der geklebten Überlapp- und KHP-Steckverbindungen ermöglicht.

Der Fokus der Untersuchungen der Dämpfungseigenschaften geklebter Verbindungen liegt auf Klebstoff EPH. Für diesen Klebstoff findet eine umfassende Untersuchung der Dämpfungseigenschaften auf Grundlage der zuvor genannten Geometrie- und Beanspruchungsrandbedingungen statt. Darauf aufbauend wird der Einfluss des Klebstoffs exemplarisch anhand vergleichender Darstellungen mit dem Klebstoff PUR analysiert.

7.2 Experimentelle Untersuchungen

7.2.1 Allgemeines

Die Versuche zur Untersuchung der Dämpfungseigenschaften geklebter Überlapp- und KHP-Steckverbindungen werden auf der servohydraulischen Prüfmaschine in stehender Zweisäulenbauweise der Fa. Instron durchgeführt, die auch für die in Abschnitt 6.3.2 dokumentierten statischen Zugversuche an KHP-Steckverbindungen verwendet wird. Die Versuchsaufbauten der dynamischen Versuche sind in den nachfolgenden Abschnitten 7.2.3 sowie 7.2.4 beschrieben.

Die dynamischen Versuche werden sowohl für die Überlappverbindung als auch für die KHP-Steckverbindung als hysteretische Versuche unter Zug-Druck-Wechselbelastung durchgeführt. Die Versuchsaufbauten sind so konzeptioniert, dass beim Wechsel der Belastungsrichtung kein Schlupf innerhalb des Probekörpers sowie dem Anschluss des Probekörpers an die Prüfmaschine auftritt. Das Vorhandensein von Schlupf oder der Reibung zwischen einzelnen Komponenten führt während der Durchführung der dynamischen Versuche neben der in der Klebschicht dissipierten Energie zu einer zusätzlichen Energiedissipation. Dies führt zu einer insgesamt höheren Energiedissipation, wodurch die Dämpfungseigenschaften der geklebten Verbindungen überschätzt werden.

7.2.2 Versuchsprogramm

In Tabelle 7.1 ist das Versuchsprogramm der dynamischen Versuche an mit den Klebstoffen EPH und PUR gefertigten Überlapp- und KHP-Steckverbindungen zusammengefasst. Die Untersuchungen finden für verschiedene Geometrie- und

Beanspruchungsrandbedingungen statt. Es werden die Probekörperkonfigurationen A, B und C mit den Klebschichtdicken 2,5 mm, 5,8 mm und 8,0 mm sowie den Überlapplängen 20 mm und 60 mm untersucht. Die Prüfung der mit Klebstoff EPH gefertigten Probekörper erfolgt für die Prüfniveaus P.1 und P.2 sowie für die baupraktisch relevanten Prüffrequenzen 1 Hz, 3 Hz und 5 Hz. Die Auswahl ist dadurch begründet, dass typische Baukonstruktionen, wie bspw. Hochhäuser (Li et al. 2011) sowie Turm- (Castellaro et al. 2016) und Brückenkonstruktionen (Fojtík et al. 2014) häufig eine erste Eigenfrequenz im Bereich zwischen 1 Hz und 5 Hz besitzen. Die Untersuchungen an den mit Klebstoff PUR gefertigten Probekörper finden ausschließlich für die Prüffrequenz 1 Hz statt.

Tabelle 7.1: Versuchsprogramm der experimentellen Untersuchung der Dämpfungseigenschaften geklebter Überlapp- und KHP-Steckverbindungen

	Probekörpergeometrie		Beanspruchungsrandbedingungen		
	Klebschichtdicke[mm]	Überlapplänge [mm]	Prüfniveaus	Prüffrequenzen	Anzahl Versuche
Klebstoff EPH	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 PUR	2,5	20	1	1	2
		60			2
	5,8	20	1	1	2
		60			2
	8,0	20	1	1	2
		60			2

7.2.3 Versuchsaufbau Überlappverbindung

Der Versuchsaufbau der dynamischen Versuche an geklebten Überlappverbindungen ist in Abbildung 7.1 dargestellt. Wie bereits bei den statischen Zugversuchen wird der Probekörper beidseitig durch die hydraulischen Spannbacken

der Prüfmaschine geklemmt. Zusätzlich werden beidseitig in Abhängigkeit der geprüften Klebschichtdicke unterschiedlich dicke Distanzstücke eingelegt. Diese dienen zum Ausgleich der probekörperbedingten Exzentrizität, wodurch das Auftreten von Einspannmomenten verhindert wird. Die Wirkungslinie der Prüflast verläuft mittig durch die Klebschicht, wodurch die Klebschicht unter vorwiegender Schubbeanspruchung steht.

In Abbildung 7.2 ist die geklebte Überlappverbindung schematisch dargestellt. Zusätzlich sind die Distanzstücke (blau) sowie deren Positionierung während der Versuchsdurchführung visualisiert.



Abbildung 7.1: Versuchsaufbau der dynamischen Versuche an geklebten Überlappverbindungen

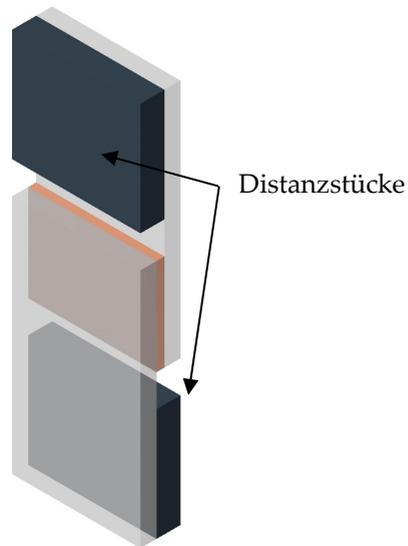


Abbildung 7.2: Schematische Darstellung einer Überlappverbindung sowie der Komponenten zum Anschluss des Probekörpers an die Prüfmaschine (blau)

7.2.4 Versuchsaufbau Kreishohlprofilsteckverbindung

Der Versuchsaufbau der dynamischen Versuche an KHP-Steckverbindungen ist in Abbildung 7.3 dargestellt. Zum Anschluss eines Probekörpers an die Prüfmaschine werden an beiden Enden zylindrische Einsätze in die Öffnungen der

Kreishohlprofile eingeschoben. Der Durchmesser der zylindrischen Einsätze wird so gewählt, dass er dem Innendurchmesser des jeweiligen Kreishohlprofils entspricht. Die zylindrischen Einsätze besitzen an der Unterseite zentrisch angeordnete Durchgangsbohrungen mit einem Durchmesser von $D = 18,5 \text{ mm}$.



Abbildung 7.3: Versuchsaufbau der dynamischen Versuche an KHP-Steckverbindungen (Damm et al. 2021b)

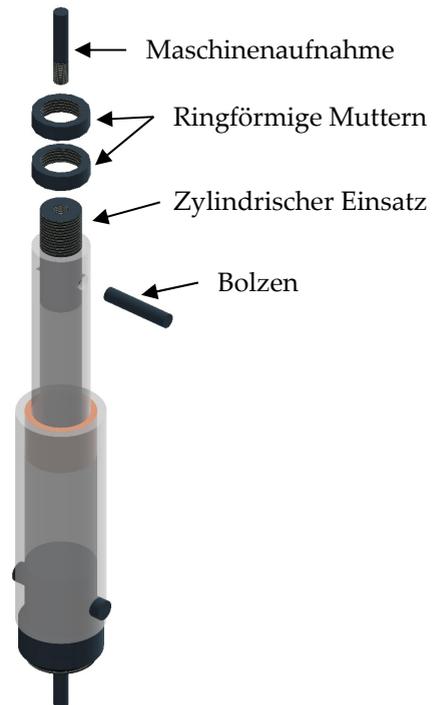


Abbildung 7.4: Schematische Darstellung einer KHP-Steckverbindung und der Komponenten zum Anschluss des Probekörpers an die Prüfmaschine (blau nach (Damm et al. 2021b)

An der Oberseite der Einsätze wird ein Gewinde eingeschnitten. Die Kreishohlprofile besitzen ebenfalls Durchgangsbohrungen mit gleichem Durchmesser, wodurch die Einsätze durch eingeschobene Bolzen mit den Kreishohlprofilen verbunden werden können. An der Oberseite der zylindrischen Einsätze sind zentrische Bohrungen mit einem Gewinde M18 eingebracht. In die Gewindeboh-

rungen wird ein Bolzen M18 eingeschraubt, der zum Einbau des Probekörpers in die Prüfmaschine durch die Spannbacken der Prüfmaschine geklemmt wird.

Nach dem Einschieben des zylindrischen Einsatzes in die Öffnung des Kreishohlprofils werden die beiden Komponenten durch einen Bolzen (Durchmesser $D = 18,0 \text{ mm}$) verbunden. Der Bolzen wird dabei vollständig durch das Kreishohlprofil sowie durch den zylindrischen Einsatz geschoben. Anschließend wird der Bolzen zwischen Kreishohlprofil und dem eingeschobenen Einsatz vorgespannt. Hierfür werden beidseitig nacheinander zwei ringförmige Muttern auf das Gewinde der zylindrischen Einsätze geschraubt. Eine Mutter wird an die Stirnfläche des Kreishohlprofils angelegt, wodurch eine Vorspannung erzeugt wird. Abschließend wird die zweite Mutter auf das Gewinde des Einsatzes aufgeschraubt und mit der ersten Mutter verspannt. Durch das Aufschrauben einer zweiten Sicherungsmutter wird ein Verlust der Vorspannung durch ein Lösen der ersten Mutter während der dynamischen Versuche verhindert.

In Abbildung 7.4 sind eine geklebte KHP-Steckverbindung sowie die Komponenten zum Anschluss des Probekörpers an die Prüfmaschine blau eingefärbt dargestellt. Hierbei sind die Komponenten zum Anschluss des Innenrohrs zur Veranschaulichung des Versuchsaufbaus in der Explosionsansicht dargestellt.

7.3 Versuchsdurchführung

Grundlage der Versuche sind die in Abschnitt 6.4 abgeleiteten Prüfniveaus. Die abgeleiteten Werte der Gleitung der Prüfniveaus P.1 und P.2 werden hierfür in Abhängigkeit der untersuchten Klebschichtdicke in eine äquivalente Verformung umgerechnet und anschließend als oberer und unterer Grenzwert des Maschinenwegs in der Regelungssoftware der Prüfmaschine hinterlegt. Nach dem Einbau der Probekörper in die Prüfmaschine werden zunächst ca. 100 Schwingspiele bei 1 Hz in Prüfniveau P.1 gefahren, um eventuell vorhandene, fertigungsbedingte Setzungen zu eliminieren. Zudem besteht in dieser Versuchsphase die Möglichkeit, über eine Auswertung der Form der im Maschinenkraft-Maschinenweg-Diagramm entstehenden Hysterese, den korrekten Einbau des Probekörpers zu kontrollieren. Ein exzentrischer oder nicht axialer Einbau

des Probekörpers kann an einer nicht-elliptischen Form der Hysterese detektiert werden.

Die Aufzeichnung des Versuchs wird nach Abschluss des Einschwingvorgangs gestartet. Die Prüffrequenz wird innerhalb eines Prüfniveaus variiert. Es werden nacheinander die Prüffrequenzen 1 Hz, 3 Hz und 5 Hz eingestellt. Anschließend wird das Prüfniveau gewechselt. Je Prüfniveau und –frequenz werden mindestens zehn vollständige Schwingenspiele aufgezeichnet. Hierbei werden Maschinenkraft und Maschinenweg über die Zeit dokumentiert. Zur Aufzeichnung der Daten wird die Abtastrate der Datenerfassungssoftware in Abhängigkeit der Prüffrequenz festgelegt und beträgt zwischen 1200 Hz (Prüffrequenz 1 Hz) und 2400 Hz (Prüffrequenz 5 Hz).

7.4 Versuchsauswertung

Der Verlustfaktor wird als Kenngröße zur Auswertung und Quantifizierung der Dämpfungseigenschaften der Probekörper herangezogen. Dieser lässt sich gem. Gl. 7.1 aus dem Quotienten aus der dissipierten Energie W_d sowie der elastisch gespeicherten Energie W_e pro Lastzyklus bestimmen (vgl. Abschnitt 2.4.3). Die Energiedissipation findet dabei fast ausschließlich innerhalb der Klebschicht statt. Der Anteil der Energie, die in den Fügeteilen pro Lastzyklus dissipiert wird, kann vernachlässigt werden. Zum einen finden in den Fügeteilen lediglich geringe Dehnungen im linear-elastischen Bereich statt. Der Anteil der Fügeteildehnungen an der aufgebrachtten Gesamtverformung liegt mehrheitlich zwischen 1 % und 3 % und beträgt im Maximum 5 %. Dies begründet sich durch die geringen Prüflasten, die für die Durchführung der dynamischen Prüfungen mit den definierten Prüfniveaus erforderlich sind. Zum anderen liegt der Verlustfaktor üblicher Baustähle entsprechend übereinstimmender Angaben in (Kollmann et al. 2006), (Möser und Kropp 2009) sowie (Jung et al. 2014) im Bereich zwischen $\eta_s = 0,0001 - 0,003$ und beträgt damit weniger als 1 % der Verlustfaktoren, die im Rahmen der Charakterisierung der untersuchten Klebstoffe EPH und PUR ermittelt wurden.

Die Verwendung des Verlustfaktors als Kenngröße zur Quantifizierung der Dämpfungseigenschaften bietet zwei wesentliche Vorteile. Der Verlustfaktor

lässt sich nach Gl. 7.1 in weitere bekannte Kenngrößen zur Charakterisierung der Dämpfungseigenschaften überführen. Hierzu zählen die spezifische Dämpfungskapazität, das logarithmische Dekrement oder der Tangens des Phasenwinkels (da Silva et al. 2018). Die Äquivalenz zwischen Verlustfaktor und Tangens des Phasenwinkels ist hierbei von besonderem Interesse (vgl. Abschnitt 2.4.3). Der Tangens des Phasenwinkels wird im Rahmen einer Dynamisch-Mechanischen-Analyse (DMA) von Klebstoffsubstanzproben aus dem Quotienten aus Verlust- und Speichermodul ermittelt. Dadurch wird eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse der Klebstoffcharakterisierung aus Abschnitt 3.4.2 sowie den in diesem Abschnitt vorgestellten Untersuchungsergebnissen ermöglicht.

Ein weiterer Vorteil besteht in der Tatsache, dass der Verlustfaktor als Kenngröße zur Charakterisierung der Dämpfungseigenschaften von Klebstoffen in einer Vielzahl internationaler Forschungsarbeiten verwendet wird. Als Beispiele hierfür können die Arbeiten von (Vaziri und Nayeb-Hashemi 2005), (Almitani und Othman 2016) sowie (Vaziri und Nayeb-Hashemi 2002) genannt werden. Die im Rahmen dieser Arbeit generierten Ergebnisse können somit direkt in den Stand der Forschung integriert werden.

$$\eta = \frac{W_d}{2\pi W_e} = \tan \delta \quad (7.1)$$

mit:

η – Verlustfaktor

W_d/W_e – Quotient aus dissipierter und elastisch gespeicherter Energie

$\tan \delta$ – Tangens des Phasenwinkels δ

Die Auswertung der Versuchsdaten zur Bestimmung der Dämpfungseigenschaften der untersuchten Probekörper kann sowohl energie- als auch zeitbasiert erfolgen. Hierzu wird das Datenanalyse und -darstellungsprogramm OriginLab 2020b der OriginLab Corp verwendet. Vor Beginn der Auswertung werden die Versuchsdaten geglättet, um ein vorhandenes Rauschen der Messdaten zu reduzieren. Zur Glättung der Versuchsdaten werden die Datenbearbeitungs-Tools in Origin 2020b verwendet.

7.4.1 Energiebasierte Auswertung

Die energiebasierte Auswertung der Versuchsergebnisse folgt dem Ansatz, den Verlustfaktor über den in Gl. 7.1 enthaltenen Quotienten aus dissipierter und elastisch gespeicherter Energie pro Lastzyklus zu ermitteln. Hierfür werden die Versuchsergebnisse in einem Maschinenkraft-Maschinenweg-Diagramm (kurz: Kraft-Weg-Diagramm) aufgetragen.

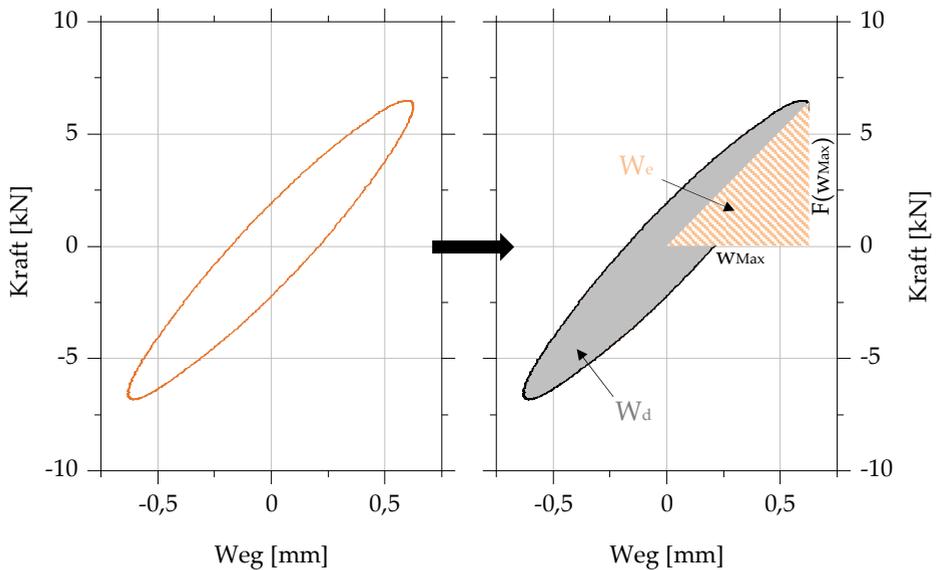


Abbildung 7.5: Darstellung der Versuchsdaten als elliptische Hysterese im Kraft-Weg-Diagramm (links); Schematische Auswertung der Versuchsdaten durch Flächenintegration der dissipierten Energie W_d sowie der elastisch gespeicherten Energie W_e (rechts)

Im linken Diagramm in Abbildung 7.5 ist ein exemplarisches Versuchsergebnis im Kraft-Weg-Diagramm dargestellt. Der Flächeninhalt der dargestellten Hysterese entspricht der dissipierten Energie pro Lastzyklus und ist somit ein Maß für die geleistete Dämpfungsarbeit. Die im System pro Lastzyklus elastisch gespeicherten Energie kann mit Hilfe von Gl. 7.2 bestimmt werden (da Silva et al. 2018; Jones 2001).

$$W_e = \frac{1}{2} \cdot w_{Max} \cdot F(w_{Max}) \quad (7.2)$$

Die elastisch gespeicherte Energie entspricht dem Integral einem im Ursprung des Diagramms beginnenden Dreiecks mit den Kantenlängen w_{Max} , also dem maximalen Maschinenweg im betrachteten Lastzyklus sowie der zugehörigen Maschinenkraft $F(w_{\text{Max}})$ (Sauer 2016). Die energiebasierte Auswertung der Versuchsergebnisse ist rechts in Abbildung 7.5 dargestellt.

Die Bestimmung des Flächenintegrals der Hysterese erfolgt mit Hilfe von OriginLab 2020b. Hierzu wird ein programminternes Analysetool zur Bestimmung von Polygonflächen verwendet. Die Ermittlung des Flächenintegrals der elastisch gespeicherten Energie erfolgt durch die Bestimmung des maximalen Maschinenwegs sowie der zugehörigen Maschinenkraft pro Lastzyklus. Die Ermittlung der Fläche der Hysterese kann jeweils nur pro Lastzyklus erfolgen. Die Lastzyklen müssen einzeln grafisch dargestellt und ausgewertet werden, wodurch keine automatisierte Auswertung erfolgen kann.

7.4.2 Zeitbasierte Auswertung

Die zeitbasierte Auswertung beruht auf der Tatsache, dass ein viskoses bzw. viskoelastisches Material auf eine äußere, sinusförmige Belastung mit einer zeitlich verzögerten, ebenfalls sinusförmigen Materialantwort reagiert. Aus diesem zeitlichen Versatz von Systemanregung und der zugehörigen Systemantwort kann der Phasenwinkel der beiden Sinuskurven bestimmt werden. Die Höhe des zeitlichen Versatzes wird durch die materialabhängige Zusammensetzung elastischer und viskoser Eigenschaften bestimmt (Habenicht 2009). Der Tangens des Phasenwinkels entspricht dem Verlustfaktor.

Die Versuchsdaten werden zur Auswertung in einem Kraft-Zeit- bzw. Weg-Zeit-Diagramm übereinander aufgetragen. Hierbei verläuft die Anregung des Systems in Form der Maschinenkraft mit einem zeitlich positiven Versatz vor dem Maschinenweg als Systemantwort. In Abbildung 7.6 sind die Ergebnisse eines exemplarischen Versuchs im Zeitbereich dargestellt. Zur Auswertung des zeitlichen Versatzes Δt werden zunächst die Maxima des Kraft- und Wegsignals der Prüfmaschine pro Lastzyklus bestimmt. Die Maxima des Kraft- und Zeitsignals sind in Abbildung 7.6 als vertikal verlaufende Striche markiert. Der Phasenwinkel errechnet sich mit Hilfe von Gl. 7.3 aus dem zeitlichen Versatz Δt zwischen dem sinusförmigen Kraft- und Wegsignal.

$$\delta = \Delta t \cdot f \cdot 360^\circ \quad (7.3)$$

Der Faktor f bezeichnet die Prüffrequenz. 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.

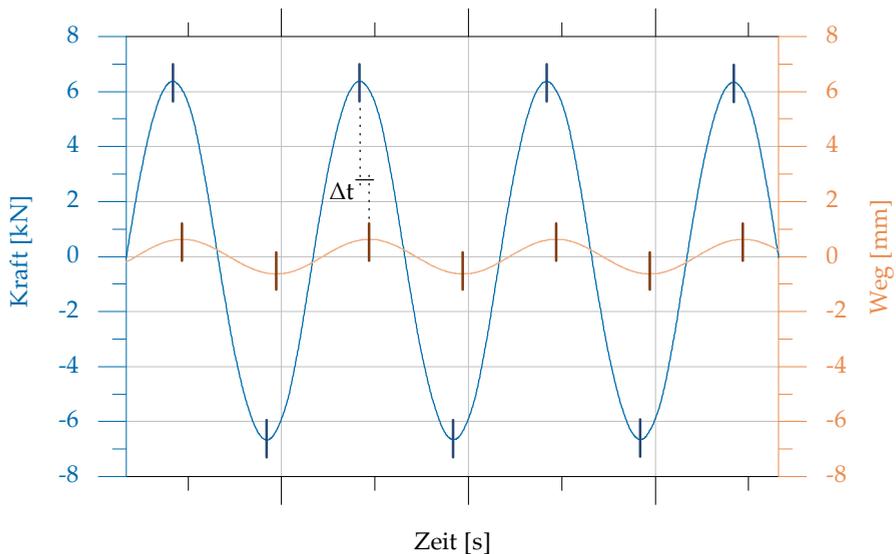


Abbildung 7.6: Darstellung der Versuchsdaten im Kraft-Zeit- bzw. Weg-Zeit-Diagramm zur zeitbasierten Auswertung des Verlustfaktors über den Phasenwinkel zwischen Systemanregung und Systemantwort (Damm et al. 2021b)

Vergleichende Untersuchungen in (Damm et al. 2022a) haben gezeigt, dass sich durch die energie- und zeitbasierte Auswertung der Versuchsergebnisse identische Verlustfaktoren ergeben. Hierdurch wird sowohl die Methodik der zeitbasierten Auswertung als auch die Auswertung des zeitlichen Versatzes im Maxima des Kraft- und Wegsignals validiert. Auf die in der Literatur teilweise empfohlene Auswertung im Nulldurchgang der Kurvenverläufe kann somit verzichtet werden.

Aufgrund der Möglichkeit zur automatisierten Auswertung der Versuchsdaten wird im Folgenden die zeitbasierte Auswerteroutine verwendet. Für die Darstellung der Versuchsergebnisse in den folgenden Abschnitten wird aus den Einzel-

ergebnissen der aufgezeichneten Lastzyklen zunächst der arithmetische Mittelwert über alle Lastzyklen ermittelt. Anschließend werden die bestimmten Mittelwerte der beiden durchgeführten Versuche je Probekörperkonfiguration arithmetisch gemittelt.

7.5 Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse experimenteller Untersuchungen an mit dem Klebstoff EPH gefertigten Überlapp- und KHP-Steckverbindungen zusammengefasst. Aus den in den dynamischen Versuchen aufgezeichneten zeitabhängigen Kraft-Weg-Verläufen werden anhand der in Abschnitt 7.4.2 vorgestellten zeitbasierten Auswertung die Verlustfaktoren der untersuchten Probekörper abgeleitet. Der Verlustfaktor wird in Abhängigkeit der Probekörperkonfiguration sowie der Prüffrequenz angegeben. Je Probekörperkonfiguration und Beanspruchungsrandbedingung werden zwei Versuche durchgeführt. Die Ergebnisse werden in Form des arithmetischen Mittelwerts der Verlustfaktoren beider Versuche dokumentiert.

Aufgrund der großen Anzahl an Versuchsergebnissen sind die Ergebnisse getrennt für jedes Prüfniveau in einer separaten Abbildung dargestellt. Innerhalb der grafischen Darstellung der Ergebnisse werden sowohl die Klebschichtdicke und Überlapplänge als auch die Prüffrequenz variiert. Die Ergebnisse der untersuchten Überlapplängen 20 mm und 60 mm werden zusammen in einem Diagramm aufgetragen. Eine Unterscheidung ist über die Verwendung einer einheitlichen Farbgebung möglich. Zur Visualisierung der unterschiedlichen Frequenzen wird eine einheitliche Symbolik über alle Auswertungen hinweg verwendet.

7.5.1 Ergebnisse Überlappverbindung

Die Ergebnisse der dynamischen Untersuchung der Überlappverbindungskonfigurationen A, B und C in Prüfniveau P.1 sind in Abbildung 7.7 grafisch dargestellt (vgl. (Damm und Albiez 2023)). Die ermittelten Verlustfaktoren liegen zwischen 0,16 und 0,28. Der geringste Verlustfaktor wird für Konfiguration A erreicht und ist unabhängig von der Überlapplänge. Der maximale Verlustfaktor

in Prüfniveau P.1 beträgt 0,28 und ergibt sich für Konfiguration B und C mit einer Überlapplänge von 20 mm.

Die Ergebnisse in Prüfniveau P.1 zeigen für alle Konfigurationen und beide Überlapplängen eine Abnahme des Verlustfaktors mit zunehmender Prüffrequenz. Eine Erhöhung der Klebschichtdicke ist hingegen für beide Überlapplängen mit einem Anstieg des Verlustfaktors assoziiert. Für die beiden untersuchten Überlapplängen zeigt sich eine asymptotische Zunahme des Verlustfaktors mit zunehmender Klebschichtdicke. Die Betrachtung der Ergebnisse der Konfigurationen A und B zeigt einen deutlichen Anstieg des Verlustfaktors mit Zunahme der Klebschichtdicke. Die Vergrößerung der Klebschichtdicke auf 8,0 mm führt für beide untersuchten Überlapplängen zu keinem weiteren signifikanten Anstieg des Verlustfaktors.

Eine Analyse des Einflusses der Überlapplänge zeigt, dass der Verlustfaktor mit Zunahme der Überlapplänge bei sonst gleichen Randbedingungen abnimmt. Die Ergebnisse für Konfiguration A liegen für beide Überlapplängen auf einem vergleichbaren Niveau. Der Einfluss der Überlapplänge auf den Verlustfaktor nimmt demnach mit ansteigender Klebschichtdicke zu.

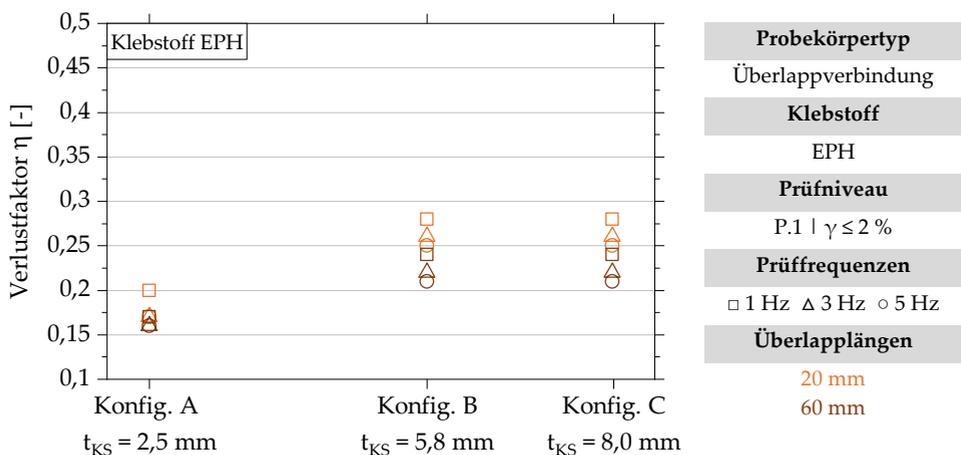


Abbildung 7.7: Ergebnisse der dynamischen Untersuchung an Überlappverbindungen der Konfigurationen A, B und C zur Bestimmung des Verlustfaktors in Prüfniveau P.1

Die Analyse der Auswirkungen einer Erhöhung des Gleitungs niveaus auf 8 % wird durch die Betrachtung der Ergebnisse in Prüfniveau P.2 in Abbildung 7.8 ermöglicht. In Prüfniveau P.2 kann mit einem minimalen Verlustfaktor von 0,26 und einem maximalen Verlustfaktor von 0,41 ein Anstieg des minimalen und maximalen Verlustfaktors mit Zunahme der maximalen Gleitung der Klebschicht beobachtet werden. In Prüfniveau P.2 kann eine Veränderung des Einflusses der Prüffrequenz beobachtet werden. Eine Prüfung aller Probekörperkonfigurationen mit einer maximalen Gleitung von 8 % führt geometrieübergreifend zu einem Anstieg des Verlustfaktors mit zunehmender Prüffrequenz.

Analog zu den Ergebnissen in Prüfniveau P.1 zeigt sich auch in Prüfniveau P.2 eine asymptotische Zunahme des Verlustfaktors mit steigender Klebschichtdicke. Ein Vergleich der absoluten Verlustfaktoren in den Prüfniveaus P.1 und P.2 zeigt, dass die Dämpfung mit steigender Gleitung der Klebschicht zunimmt und demnach nichtlinear verläuft.

Die Abnahme des Verlustfaktors mit zunehmender Überlapplänge kann auch in Prüfniveau P.2 beobachtet werden. Eine detaillierte Diskussion der experimentellen Ergebnisse der dynamischen Versuche an Überlappverbindungen kann Abschnitt 7.6 entnommen werden.

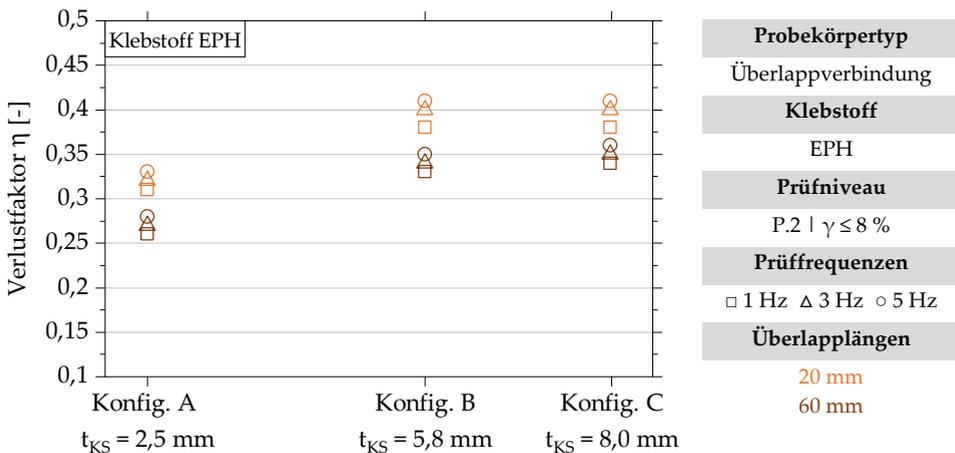


Abbildung 7.8: Ergebnisse der dynamischen Untersuchung an Überlappverbindungen der Konfigurationen A, B und C zur Bestimmung des Verlustfaktors in Prüfniveau P.2

7.5.2 Ergebnisse Kreishohlprofilsteckverbindung

Die Ergebnisse der dynamischen Untersuchung an mit dem Klebstoff EPH gefertigten KHP-Steckverbindungen in Prüfniveau P.1 sind in Abbildung 7.9 zusammengefasst. Der Verlustfaktor in Prüfniveau P.1 liegt zwischen 0,09 und 0,23. Der minimale Verlustfaktor wird für Konfiguration A mit einer Überlapplänge von 60 mm erreicht. Die Ergebnisse in Prüfniveau P.1 zeigen für alle Konfigurationen, dass ein Anstieg der Prüffrequenz von 1 Hz auf 5 Hz mit einer Reduktion des Verlustfaktors von weniger als 0,05 einhergeht. Mit zunehmender Klebschichtdicke zeigt sich für beide Überlappslängen eine annähernd lineare Zunahme des Verlustfaktors. Der maximale Verlustfaktor in Prüfniveau P.1 ergibt sich für Konfiguration C mit einer Überlappung von 20 mm. Für alle untersuchten Konfigurationen ist eine signifikante Abhängigkeit der ermittelten Verlustfaktoren von der Überlapplänge festzustellen. Hierbei bleibt die Differenz der Verlustfaktoren für die beiden untersuchten Überlappslängen mit zunehmender Klebschichtdicke annähernd konstant.

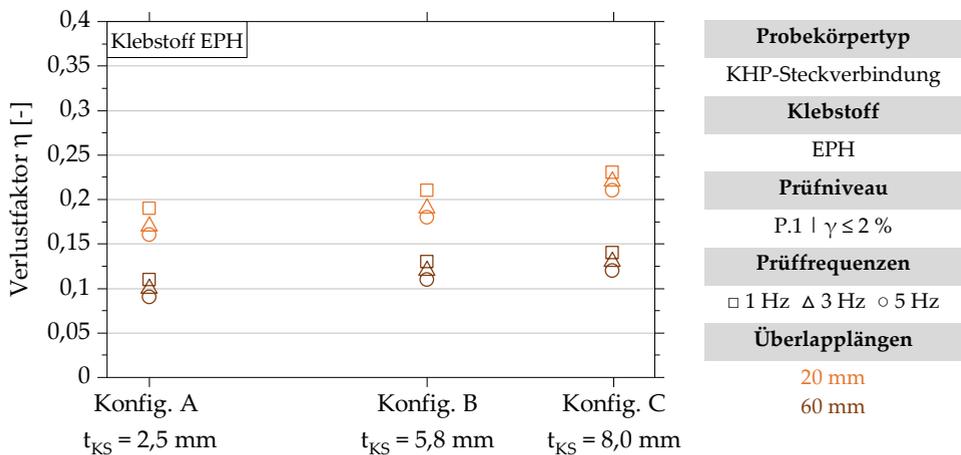


Abbildung 7.9: Ergebnisse der dynamischen Untersuchung an KHP-Steckverbindungen der Konfigurationen A, B und C zur Bestimmung des Verlustfaktors in Prüfniveau P.1

Die Ergebnisse in Prüfniveau P.2 sind in Abbildung 7.10 dargestellt. Die ermittelten Verlustfaktoren liegen zwischen 0,15 und 0,38. Für alle untersuchten Klebschichtdicken und Überlappslängen zeigt sich eine Zunahme des Verlustfaktors

mit steigender Prüffrequenz. Für beide Überlappplängen kann ein linearer Zusammenhang zwischen der Klebschichtdicke und dem Verlustfaktor beobachtet werden. Die absolute Zunahme des Verlustfaktors infolge einer Klebschichtdickenerhöhung ist dabei für beide Überlappplängen annähernd identisch. Im Vergleich zu den Ergebnissen in Prüfniveau P.1 kann für alle Konfigurationen und Überlappplängen ein Anstieg des Verlustfaktors mit Zunahme der maximalen Gleitung der Klebschicht festgestellt werden. Hieraus kann ein nichtlineares Dämpfungsverhalten im betrachteten Bereich der Gleitung abgeleitet werden.

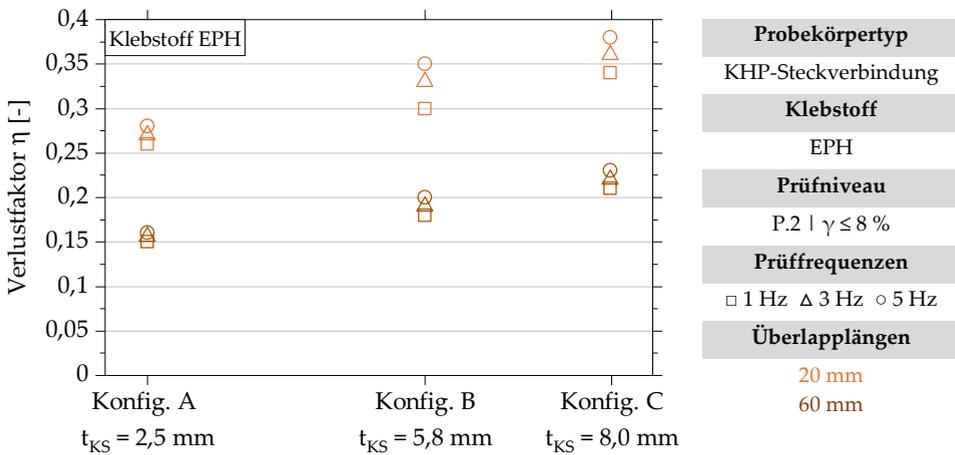


Abbildung 7.10: Ergebnisse der dynamischen Untersuchung an KHP-Steckverbindungen der Konfigurationen A, B und C zur Bestimmung des Verlustfaktors in Prüfniveau P.2

Eine globale Betrachtung der Ergebnisse der dynamischen Versuche in den Prüfniveaus P.1 und P.2 zeigt, dass die Dämpfungseigenschaften der mit dem Klebstoff EPH gefertigten KHP-Steckverbindungen primär durch das Maß der Verzerrung der Klebschicht in Form der maximalen Gleitung sowie durch die Länge der Überlappung beeinflusst werden. Der Einfluss der Klebschichtdicke auf den Verlustfaktor ist insbesondere für kleine Gleitungen der Klebschicht von geringerer Relevanz. Mit Zunahme der Gleitung steigt der Einfluss der Klebschichtdicke auf den Verlustfaktor an. Die Höhe der Prüffrequenz ist im betrachteten Frequenzspektrum von untergeordneter Bedeutung.

Eine detaillierte Diskussion der experimentellen Ergebnisse der dynamischen Versuche an KHP-Steckverbindungen kann Abschnitt 7.7 entnommen werden.

7.6 Diskussion der Ergebnisse experimenteller Untersuchungen an Überlappverbindungen

7.6.1 Allgemeines

In diesem Abschnitt werden die in Abschnitt 7.5.1 dokumentierten Ergebnisse der experimentellen Untersuchung der Dämpfungseigenschaften geklebter Überlappverbindungen diskutiert. Im Fokus steht der Klebstoff EPH. In den einzelnen Versuchsreihen werden verschiedene Geometrieparameter (Klebschichtdicke t_{KS} , Überlapplänge $L_{\bar{U}}$) sowie Beanspruchungsrandbedingungen (Prüfniveau, Prüffrequenz) variiert. Es finden zudem exemplarische Vergleiche zwischen den Klebstoffen EPH und PUR statt. Die Quantifizierung des Einflusses der untersuchten Parameter bezieht sich dabei primär auf die Dämpfungseigenschaften der untersuchten Überlappverbindungen in Form des Verlustfaktors.

Zur Analyse des Einflusses der untersuchten Parameter auf die Dämpfungseigenschaften der geklebten Überlappverbindung wird ein einheitliches Vorgehen gewählt. Zunächst wird der Einfluss der untersuchten Parameter qualitativ anhand der ermittelten Hysteresen im Kraft-Weg- bzw. Schubspannung-Gleitung-Diagramm analysiert. Im Anschluss findet eine quantitative Analyse statt. Hierzu werden die Versuchsergebnisse in eine normierte Form der Darstellung überführt.

7.6.2 Einfluss der Prüffrequenz

Zur qualitativen Analyse des Einflusses der Prüffrequenz werden exemplarischen Versuchsergebnisse von Probekörperkonfiguration B mit einer Überlapplänge von 20 mm für die untersuchten Prüffrequenzen 1 Hz, 3 Hz und 5 Hz zusammen in einem Kraft-Weg-Diagramm aufgetragen. In Abbildung 7.11 sind die sich so ergebenden Kraft-Weg-Diagramme getrennt für die beiden untersuchten Prüfniveaus dargestellt. Die Form der dargestellten Hysteresen kann als Ellipse charakterisiert werden. Für das untersuchte Frequenz- und Gleitungsspektrum kann somit kein Einfluss materieller Nichtlinearitäten auf die Form der Hysteresen beobachtet werden.

In Prüfniveau P.1 (Abbildung 7.11, links) zeigt sich, dass der Neigungswinkel der Hysteresen gegenüber der x-Achse und damit die Steifigkeit des Klebverbunds mit ansteigender Prüffrequenz zunimmt. Hieraus kann ein Anstieg der elastisch gespeicherten Energie mit steigender Prüffrequenz abgeleitet werden.

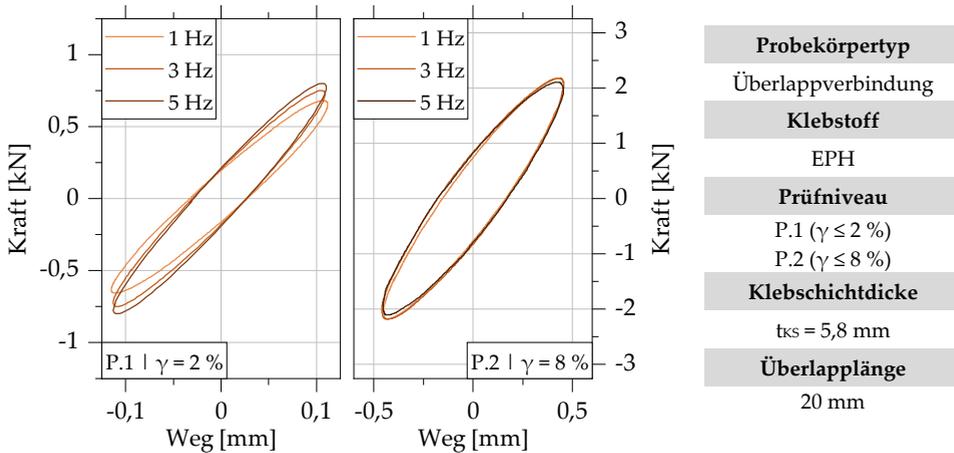


Abbildung 7.11: Auswertung der Kraft-Weg-Verläufe der Überlappverbindungskonfiguration B mit Überlapplänge 20 mm in den Prüfniveaus P.1 (links) und P.2 (rechts) für die Prüffrequenzen 1 Hz, 3 Hz und 5 Hz

Der Neigungswinkel der Hysteresen gegenüber der x-Achse ist in Prüfniveau P.2 für die drei dargestellten Frequenzen annähernd identisch (Abbildung 7.11, rechts). Eine in (Damm et al. 2022a) anhand von Untersuchungen an dicken Zugscherproben festgestellte frequenzabhängige Versteifung des Klebverbunds kann demnach in Prüfniveau P.2 nicht beobachtet werden. Demgegenüber zeigen die Hysteresen in Prüfniveau P.2 eine geringfügige Zunahme der Hysterese-Fläche mit steigender Prüffrequenz. Nach (Khoshmanesh et al. 2020) können diese Beobachtungen durch eine ermüdungsbedingte Schädigung der Klebschicht infolge zyklischer Beanspruchung erklärt werden. Die Autoren zeigen, dass ermüdungsbedingte Schädigungen der Klebschicht insbesondere zu einem Anstieg der dissipierten Energie pro Lastzyklus führen. Die Steifigkeit der untersuchten Klebverbindungen wird demgegenüber nur geringfügig beeinflusst. Somit kann für Prüfniveau P.2 begründet davon ausgegangen werden, dass die in (Damm et al. 2022a) beobachtete, dehnratenabhängige Versteifung des Kleb-

stoffs EPH durch die mit zunehmender Ermüdungsschädigung assoziierte Entfestigung des Klebverbunds kompensiert wird. Es kann zudem vermutet werden, dass der Einfluss von Ermüdungsschäden der Klebschicht durch den höheren Energieeintrag pro Zeiteinheit und die damit verbundene Erwärmung der Klebschicht mit Zunahme der Prüffrequenz ansteigt.

Eine Gegenüberstellung der in Abbildung 7.11 getrennt nach Prüfniveau dargestellten Hysteresen zeigt, dass der Einfluss der Prüffrequenz mit der Gleitung der Klebschicht assoziiert ist. Im Folgenden findet daher eine Betrachtung getrennt für jedes Prüfniveau statt. Zur Quantifizierung des Einflusses der Prüffrequenz werden die Versuchsergebnisse in eine auf die Prüffrequenz von 1 Hz normierte Darstellung überführt.

Prüfniveau P.1

Die auf die Frequenz 1 Hz normierten Ergebnisse in Prüfniveau P.1 sind in Abbildung 7.12 dargestellt. Bei Betrachtung der Ergebnisse zeigt sich für alle untersuchten Klebschichtdicken sowie für beide Überlapplängen eine Abnahme des Verlustfaktors mit steigender Prüffrequenz.

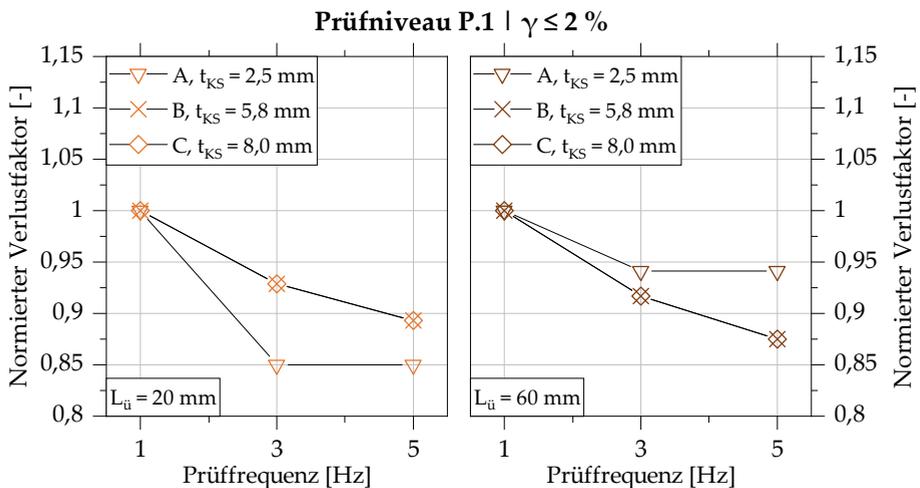


Abbildung 7.12: Auswertung des Einflusses der Prüffrequenz auf die Höhe des Verlustfaktors in Prüfniveau P.1 für die Überlappverbindungskonfigurationen A, B und C mit Überlapplängen 20 mm (links) sowie 60 mm (rechts); auf den Verlustfaktor der Prüffrequenz 1 Hz normierte Darstellung

Die prozentuale Abnahme des Verlustfaktors infolge der Erhöhung der Prüffrequenz von 1 Hz auf 5 Hz liegt zwischen 6 % und 15 %.

Der in Abbildung 7.12 grafisch dargestellte Zusammenhang zwischen der Prüffrequenz und dem Verlustfaktor wird in Tabelle 7.2 quantitativ zusammengefasst, wobei der prozentuale Einfluss im Folgenden auf volle Zahlen gerundet angegeben wird.

Tabelle 7.2: Prozentuale Auswertung des Einflusses der Prüffrequenz auf den Verlustfaktor der Überlappverbindungs-konfigurationen A, B und C mit Überlapplängen 20 mm und 60 mm in Prüfniveau P.1

Konfiguration	Überlapplänge $L_{\ddot{u}}$	1 Hz	3 Hz	5 Hz
A, $t_{KS} = 2,5 \text{ mm}$	20 mm	-	-15 %	-15 %
B, $t_{KS} = 5,8 \text{ mm}$		-	-7 %	-11 %
C, $t_{KS} = 8,0 \text{ mm}$		-	-7 %	-11 %
A, $t_{KS} = 2,5 \text{ mm}$	60 mm	-	-6 %	-6 %
B, $t_{KS} = 5,8 \text{ mm}$		-	-8 %	-13 %
C, $t_{KS} = 8,0 \text{ mm}$		-	-8 %	-13 %

Die prozentuale Reduktion des Verlustfaktors mit steigender Prüffrequenz ist für beide Überlapplängen, unabhängig von der Probekörperkonfiguration, ähnlich hoch. Ein Zusammenhang zwischen der Prüffrequenz und der Überlapplänge sowie der Klebschichtdicke der untersuchten Probekörper kann in Prüfniveau P.1 somit nicht festgestellt werden. Die dokumentierte, prozentuale Reduktion des Verlustfaktors mit steigender Prüffrequenz variiert je nach Probekörperkonfiguration. An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass es sich bei den dargestellten Auswertungen um einen Vergleich von Mittelwerten handelt (vgl. Abschnitt 7.4). Die absolute Abnahme der Verlustfaktoren von 0,01 bis 0,03 liegt im Streuband der gemittelten Versuchsergebnisse.

Prüfniveau P.2

Die auf die Frequenz von 1 Hz normierte Auswertung der Verlustfaktoren in Prüfniveau P.2 sind in Abbildung 7.13 dargestellt. Die Ergebnisse zeigen für alle

Konfigurationen einen näherungsweise linearen Anstieg des Verlustfaktors mit Zunahme der Prüffrequenz. Dies kann, den vorherigen Ausführungen folgend, durch einen Anstieg der dissipierten Energie bei annähernd konstanter Steifigkeit des Klebverbunds infolge ermüdungsbedingter Schädigungen der Klebschicht erklärt werden (Khoshmanesh et al. 2020).

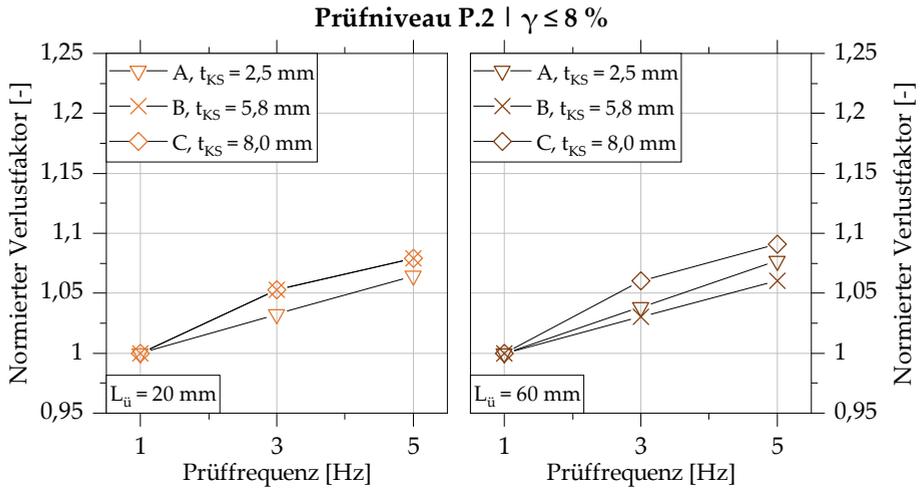


Abbildung 7.13: Auswertung des Einflusses der Prüffrequenz auf die Höhe des Verlustfaktors in Prüfniveau P.2 für die Überlappverbindungskonfigurationen A, B und C mit Überlappplängen 20 mm (links) sowie 60 mm (rechts); auf den Verlustfaktor der Prüffrequenz 1 Hz normierte Darstellung

Tabelle 7.3: Prozentuale Auswertung des Einflusses der Prüffrequenz auf den Verlustfaktor der Überlappverbindungskonfigurationen A, B und C mit Überlappplängen 20 mm und 60 mm in Prüfniveau P.2

Konfiguration	Überlapplänge L _ü	1 Hz	3 Hz	5 Hz
A, t _{KS} = 2,5 mm	20 mm	-	+3 %	+7 %
B, t _{KS} = 5,8 mm		-	+5 %	+8 %
C, t _{KS} = 8,0 mm		-	+5 %	+8 %
A, t _{KS} = 2,5 mm	60 mm	-	+4 %	+8 %
B, t _{KS} = 5,8 mm		-	+3 %	+6 %
C, t _{KS} = 8,0 mm		-	+6 %	+9 %

Im betrachteten Frequenzspektrum liegt die Zunahme des Verlustfaktors bei unter 10 %. Der größte Einfluss der Prüffrequenz ist unabhängig von der Überlapplänge und kann für Konfiguration C mit der größten Klebschichtdicke beobachtet werden. Die maximale absolute Zunahme des Verlustfaktors in Prüfniveau P.2 infolge einer Erhöhung der Frequenz von 1 Hz auf 5 Hz beträgt 0,03. Der quantitative Einfluss der Prüffrequenz auf die Dämpfungseigenschaften der Überlappverbindung in Prüfniveau P.2 ist in Tabelle 7.3 zusammengefasst.

Eine gesamtheitliche Betrachtung der Ergebnisse der untersuchten Prüfniveaus zeigt für den Klebstoff EPH einen Zusammenhang zwischen dem Maß der Gleitung bzw. Verzerrung der Klebschicht und dem Einfluss der Prüffrequenz. Für geringe Werte der Gleitung ($\gamma \leq 2\%$) führt eine dehnratenabhängige Versteifung des Klebverbunds zu einer Abnahme des Verlustfaktors mit steigender Prüffrequenz. Der Einfluss der Prüffrequenz hängt zudem nicht von der Klebschichtdicke oder der Überlapplänge ab. Die Steigerung der Gleitung in Prüfniveau P.2 ($\gamma \leq 8\%$) führt zu einem invertierten Einfluss der Prüffrequenz. Es kann für alle Konfigurationen sowie beide Überlappängen ein Anstieg des Verlustfaktors mit zunehmender Prüffrequenz beobachtet werden, der durch eine ermüdungsbedingte Schädigung der Klebschicht infolge zyklischer Beanspruchung begründet werden kann. Aufgrund der geringen Schwingenspielzahl wirken sich diese Schädigungen vorrangig auf die dissipativen Eigenschaften der Klebschicht aus. Der Einfluss auf die Steifigkeit des Klebverbunds ist gering und kann vernachlässigt werden (vgl. Abbildung 7.11). Mit zunehmender Schwingenspielzahl kann von einem ansteigenden Einfluss der Ermüdungsschäden auf das dynamische Tragverhalten des Klebverbunds ausgegangen werden (Khoshmanesh et al. 2020). Im Rahmen der praktischen Auslegung dynamisch beanspruchter, geklebter Konstruktionen muss somit berücksichtigt werden, dass der Verlustfaktor mit zunehmender Beanspruchung der Klebschicht nicht konstant und eine Funktion der Beanspruchung sowie der Schwingenspielzahl ist. Das nichtlineare Dämpfungsverhalten geklebter Verbindungen in Abhängigkeit der Schwingenspielzahl ist daher Gegenstand aktueller Forschungsvorhaben (Damm et al. 2023b).

Abschließend kann festgehalten werden, dass die Höhe der Frequenz im betrachteten Frequenz- und Gleitungsspektrum aus baupraktischer Sicht von untergeordneter Bedeutung ist. Die Ergebnisse numerischer Untersuchungen in

Kapitel 4 haben gezeigt, dass eine Änderung des Verlustfaktors deutlich unter 0,05 in einer aus baupraktischer Sicht vernachlässigbaren Größenordnung liegt. Die Untersuchung und Diskussion des Einflusses der Überlapplänge, der Klebschichtdicke sowie des Klebstoffs finden daher exemplarisch für die baupraktische relevante Prüffrequenz von 1 Hz statt (vgl. Abschnitt 7.2.2). Hierdurch kann der Einfluss einer ermüdungsbedingten Schädigung der Klebschicht auf die Ergebnisse in Prüfniveau P.2 minimiert werden, der begründet durch die Versuchsdurchführung insbesondere für die Prüffrequenzen 3 Hz und 5 Hz erwartet werden kann. Eine Auswertung der Ergebnisse für die Prüffrequenzen 3 Hz und 5 Hz kann dem Anhang entnommen werden.

7.6.3 Einfluss der Überlapplänge

Zur Diskussion des Einflusses der Überlapplänge werden zunächst exemplarisch ausgewählte Versuchsergebnisse von Probekörperkonfiguration C mit den Überlapplängen 20 mm und 60 mm für die Prüffrequenz 1 Hz in Prüfniveau P.2 im Schubspannung-Gleitungs-Diagramm in Abbildung 7.14 aufgetragen. Eine Darstellung der Hysterese im Schubspannung-Gleitungs-Diagramm bietet den Vorteil, dass die Probekörpergeometrien in der Darstellung berücksichtigt werden, wodurch die Vergleichbarkeit der Hysterese erleichtert wird.

Zunächst kann festgehalten werden, dass die Form der dargestellten Hysterese als Ellipse charakterisiert werden kann. Ein Einfluss des nichtlinearen Verhaltens des Klebstoffs EPH kann anhand einer Betrachtung der dargestellten Hysterese nicht festgestellt werden. Darüber hinaus zeigen die in Abbildung 7.14 dargestellten Hysterese eine Zunahme der Steifigkeit sowie der maximalen Schubspannung infolge einer Erhöhung der Überlapplänge. Hieraus kann ein überproportionaler Einfluss der Überlapplänge auf die Steifigkeit des Klebverbands abgeleitet werden. Anhand von Abbildung 7.14 ist allerdings nicht zweifelsfrei zu erkennen, wie sich eine Erhöhung der Überlapplänge auf den Flächeninhalt der dargestellten Hysterese und die daraus abgeleitete, dissipierte Energie pro Lastzyklus auswirkt.

Die qualitative Versuchsauswertung wird durch eine normierte Darstellung der Ergebnisse der Probekörperkonfigurationen A, B und C in Abbildung 7.15 für die exemplarische Prüffrequenz 1 Hz ergänzt, in der die Ergebnisse der Probe-

körper mit der Überlapplänge 60 mm auf die Ergebnisse der gleichen Konfiguration mit der Überlapplänge 20 mm normiert werden.

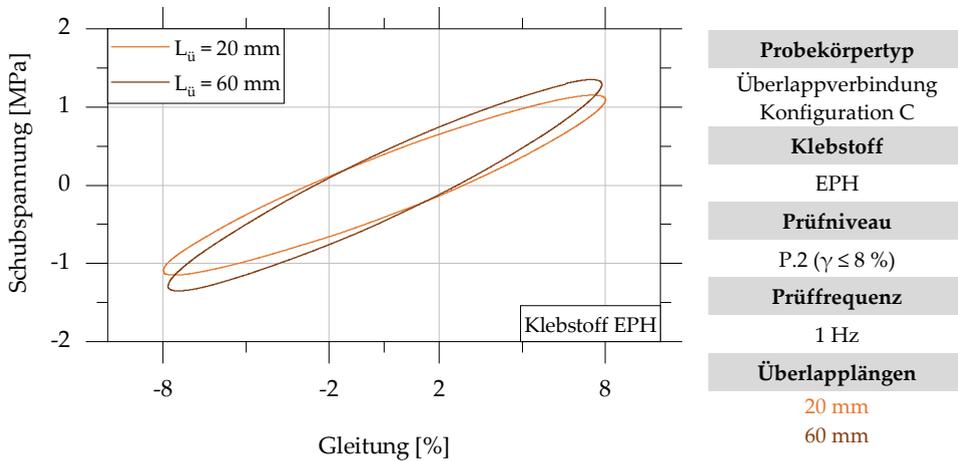


Abbildung 7.14: Analyse des Einflusses der Überlapplänge auf die Schubspannung-Gleitung-Hysteresen in Prüfniveau P.2; Exemplarische Darstellung für Überlappverbindungskonfiguration C mit Überlapplängen 20 mm und 60 mm für die Prüffrequenz 1 Hz

Die Auswertung der normierten Verlustfaktoren in Abbildung 7.15 zeigt für alle untersuchten Probekörperkonfigurationen eine Abnahme des Verlustfaktors mit Zunahme der Überlapplänge. Der normierte Verlustfaktor der Probekörper mit einer Überlapplänge von 60 mm liegt zwischen 84 % (Konfiguration A, $t_{KS} = 2,5$ mm) und 87 % (Konfiguration C, $t_{KS} = 8,0$ mm) und beträgt im Mittel 86 %. Der Einfluss der Überlapplänge auf den Verlustfaktor ist demnach nahezu unabhängig von der Klebschichtdicke. Für die Prüffrequenzen 3 Hz und 5 Hz kann ein vergleichbarer Zusammenhang zwischen der Überlapplänge und dem Verlustfaktor festgestellt werden (vgl. Abbildung A.9 und Abbildung A.10 im Anhang).

Eine Gegenüberstellung der Ergebnisse der untersuchten Prüfniveaus lässt für keine der untersuchten Konfigurationen einen Zusammenhang zwischen der Überlapplänge und der Gleitung der Klebschicht in Bezug auf deren Einfluss auf den Verlustfaktor erkennen. Die Abweichung der ermittelten Verlustfaktoren

infolge einer Variation der Überlapplänge in Prüfniveau P.1 und P.2 liegt für alle untersuchten Klebschichtdicken bei unter 2 %.

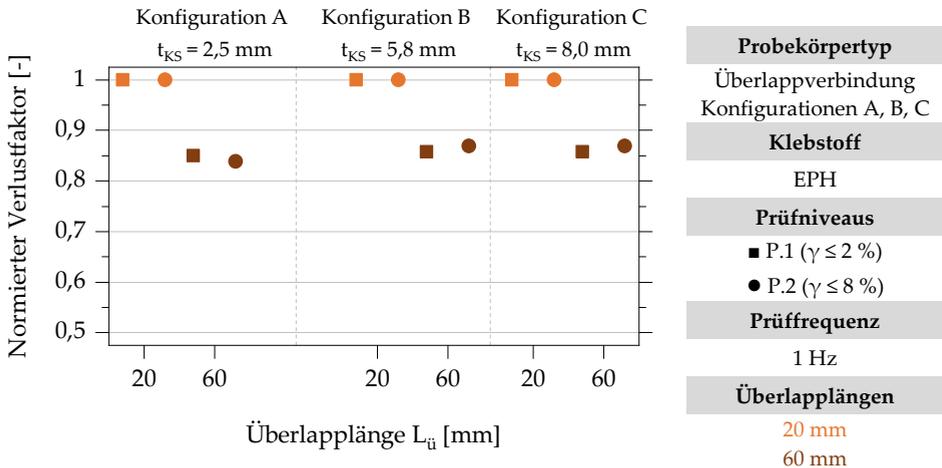


Abbildung 7.15: Auswertung des Einflusses der Überlapplänge auf den Verlustfaktor der Überlappverbindungskonfigurationen A, B und C mit Überlapplängen 20 mm und 60 mm in den Prüfniveaus P.1 und P.2 für die Prüffrequenz 1 Hz; auf den Verlustfaktor der Probekörper mit Überlapplänge 20 mm normierte Darstellung

Für eine weiterführende Analyse des Einflusses der Überlapplänge auf die Dämpfungseigenschaften der Überlappverbindung wird zunächst der mechanische Zusammenhang zwischen der Überlapplänge, der in der Klebschicht auftretenden Deformation und dem daraus resultierenden Schubspannungszustand betrachtet. Das Verformungsverhalten einer einschnittigen, ebenen Überlappverbindung unter einer Axialbelastung ist in Abbildung 7.16 dargestellt.

Die durch eine Last F entstehende Verzerrung der Klebschicht setzt sich aus einer in Lastrichtung konstanten Fügeiteilverchiebung (v) sowie einem ungleichmäßig verlaufenden Verzerrungsanteil aus den elastischen Dehnungen der Fügeiteile (ε_1 , ε_2) zusammen. Die elastischen Fügeiteildehnungen summieren sich ausgehend von der Mitte der Überlapplänge in Lastrichtung auf und werden am Ende der Überlappung maximal. Die Höhe der Fügeiteildehnungen hängt neben der Steifigkeit der Fügeiteile von der Steifigkeit des betrachteten Klebstoffs ab und sinkt mit steigendem Verformungsvermögen des Klebstoffs.

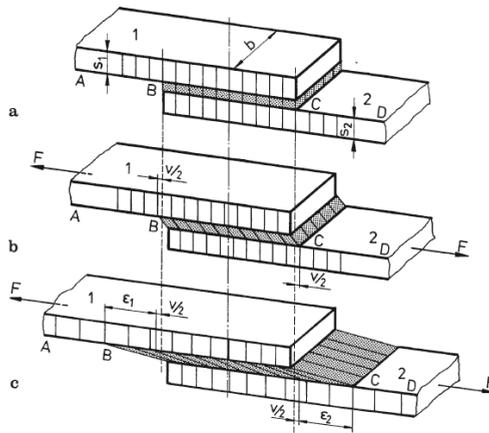


Abbildung 7.16: Verformungsverhalten einer einschnittigen, ebenen Überlappverbindung unter Axialbelastung (Habenicht 2009)

Aus der Überlagerung von Füge­teilverschiebungen und -dehnungen folgt der in Abbildung 7.17 dargestellte charakteristische, U-förmige Schubspannungsverlauf mit beidseitigen Maxima der Schubspannungen (Habenicht 2009).

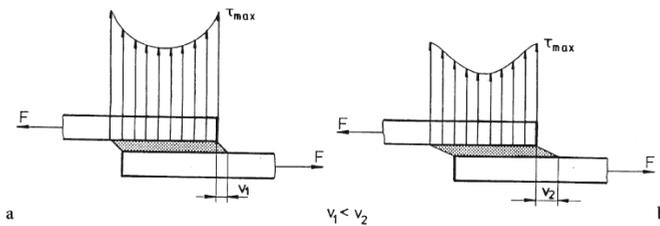


Abbildung 7.17: U-förmiger Schubspannungsverlauf einer einschnittigen, ebenen Überlappverbindung unter Axialbelastung für eine verformungsarme, steife Klebschicht (a) sowie eine viskoelastische Klebschicht (b) (Habenicht 2009)

Die mit steigender Überlapplänge abnehmenden Dämpfungseigenschaften können auf Grundlage von Abbildung 7.17 durch den von der Überlapplänge abhängigen Verzerrungszustand der Klebschicht erklärt werden. Zur Überprüfung dieses Erklärungsansatzes werden numerische Untersuchungen zur Bestimmung des Verzerrungszustands der Klebschicht in Abhängigkeit der Überlapplänge durchgeführt. Die Untersuchungen werden exemplarisch am numerischen Modell der Überlappverbindungskonfiguration C mit den Über-

lapplängen 20 mm und 60 mm in Prüfniveau P.2 durchgeführt (vgl. Abbildung 7.14). Zur Implementierung des Materialverhaltens des Klebstoffs EPH wird zunächst die Mittelwertkurve der im Wahre Spannung-Wahre Dehnung-Diagramm (vgl. Abbildung A.8 im Anhang) aufgetragenen Verläufe statischer Zugversuche an Substanzproben gebildet. Der Bereich der linearen Anfangssteifigkeit wird durch die Eingabe des Elastizitätsmoduls im numerischen Modell berücksichtigt. Im weiteren Verlauf wird die Mittelwertkurve durch die programmspezifische Eingabe eines mehrteiligen Polygonzugs approximiert (vgl. Abbildung A.8 im Anhang).

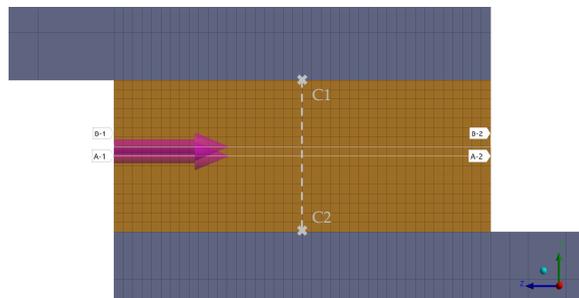


Abbildung 7.18: Auswertungspfade zur Ermittlung der Verschiebung in Lastrichtung an der Ober- und Unterseite der Elementreihe in Klebschichtmitte; Ausschnitt des numerischen Berechnungsmodells zur Visualisierung des Bereichs der Überlappung

Die Klebschicht wird mit einer maximalen Elementkantenlänge von 0,5 mm vernetzt. Die Netzkonvergenz konnte für diese Elementkantenlänge in hier nicht dokumentierten Untersuchungen nachgewiesen werden. Die Auswertung der Verzerrung findet für die Elementreihe in Klebschichtmitte statt. Hierzu werden zwei Auswertungspfade an der Ober- bzw. Unterseite der in Klebschichtmitte liegenden Elementreihe angeordnet (s. Abbildung 7.18). Entlang der Pfade wird die Verschiebung der Eckknoten der Elemente in Richtung der aufgetragenen Verformung in globaler z-Richtung ermittelt. Aus der Differenz der Verschiebung an Ober- und Unterseite kann die Verzerrung jedes Elements in Form einer prozentualen Gleitung ermittelt werden.

Die numerisch bestimmten Verläufe der Gleitung in Richtung der Überlappung für die beiden Überlappplängen 20 mm und 60 mm sind in Abbildung 7.19 dargestellt. Es zeigt sich, dass die durch Fügeteildehnungen induzierten Gleitungs-

maxima an den Rändern für beide Überlappplängen annähernd gleich groß sind. Die Gleitung der Klebschicht nimmt für beide Überlappplängen ausgehend von den Klebschichträndern zur Mitte hin ab. Für die Überlapplänge 60 mm liegt ein Großteil der in der Klebschicht vorhandenen Gleitung unterhalb der nominell aufgetragenen Gleitung von 8 %. Diese Bereiche werden aufgrund der geringeren Verzerrung zunehmend weniger zur Energiedissipation aktiviert. Für die Überlapplänge 20 mm liegt die Gleitung der Klebschicht zwischen den Maxima an den Rändern stets deutlich über einer Gleitung von 8 %. Der Verzerrungszustand wird mit steigender Überlapplänge zunehmend ungleichmäßig. Der Mittelwert der Gleitung über die gesamte Überlapplänge liegt bei 8,3 % ($L_{\text{Ü}} = 20 \text{ mm}$) bzw. 8,1 % ($L_{\text{Ü}} = 60 \text{ mm}$) und somit für beide Überlappplängen oberhalb der nominell aufgetragenen Gleitung von 8 %. Dies kann dadurch begründet werden, dass die Gleitung ausgehend von den Fügeteilen in Richtung der Klebschichtmitte zunehmen. Die mit zunehmender Überlapplänge einhergehende Abnahme der mittleren Gleitung der Klebschicht kann mit einer Reduzierung der pro Lastzyklus dissipierten Energie assoziiert werden. Hierdurch kann der detektierte Einfluss der Überlapplänge auf die Dämpfungseigenschaften ebener Überlappverbindungen teilweise erklärt werden.

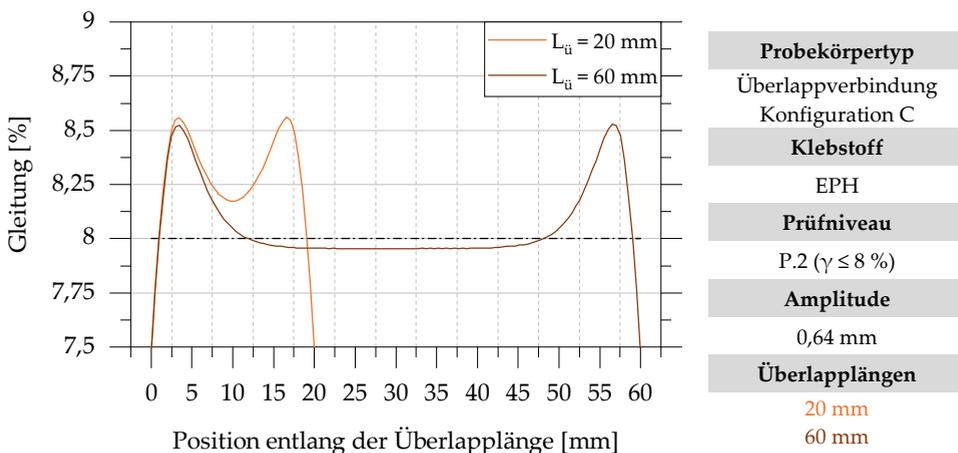


Abbildung 7.19: Numerisch berechnete Verläufe der Gleitung in Klebschichtmitte; Probekörperkonfiguration C mit den Überlappplängen 20 mm und 60 mm

Die mit steigender Überlapplänge abnehmende mittlere Gleitung der Klebschicht erklärt sich durch zunehmende Fügeilverformungen. Eine exemplarische Auswertung des Anteils der Fügeilverformungen erfolgt für die Konfigurationen A und C in der Mitte der Überlappung anhand des in Abbildung 7.18 dargestellten Auswertepfad C1-C2. Die summierten Fügeilverformungen sind in Tabelle 7.4 zusammengefasst.

Tabelle 7.4: Numerisch ermittelte Summe aller Fügeilverformungen in Abhängigkeit der Überlapplänge; Exemplarische Ermittlung für Überlappverbindungskonfiguration A und C in Prüfniveau P.2

Klebstoff	Konfiguration	$L_{\bar{u}}$ [mm]	Δl Fügeile [mm]
EPH	A ($t_{ks} = 2,5 \text{ mm}$)	20	0,0017
		60	0,0037
	C ($t_{ks} = 8,0 \text{ mm}$)	20	0,0016
		60	0,0036

Die Ergebnisse in Tabelle 7.4 zeigen erwartungsgemäß, dass die Fügeilverformungen mit steigender Überlapplänge zunehmen. Darüber hinaus zeigt sich, dass die entstehenden Fügeilverformungen mit steigender Klebschichtdicke nahezu konstant sind, was auf die niedrige Steifigkeit des Klebstoffs EPH zurückgeführt werden kann. Hierdurch kann der von der Klebschichtdicke nahezu unabhängige Einfluss der Überlapplänge erklärt werden.

7.6.4 Einfluss der Klebschichtdicke

Die Analyse des Einflusses der Klebschichtdicke erfolgt im Folgenden am Beispiel der Probekörperkonfigurationen A, B und C mit Überlapplängen von 20 mm. Die Auswahl kann durch den zuvor identifizierten, klebschichtdickenunabhängigen Einfluss der Überlapplänge sowie den geringen Einfluss der Prüffrequenz begründet werden.

Zunächst wird der Zusammenhang der Klebschichtdicke und dem mechanischen Verhalten der geklebten Überlappverbindung qualitativ analysiert. In Abbildung 7.20 sind die aufgezeichneten Hysteresen der Konfigurationen A, B

und C mit einer Überlapplänge von 20 mm in Prüfniveau P.2 für eine Prüffrequenz von 1 Hz im Schubspannung-Gleitungs-Diagramm dargestellt.

Ein Vergleich der drei dargestellten Hysteresen zeigt, dass deren Neigungswinkel gegenüber der x-Achse mit zunehmender Klebschichtdicke abnimmt. Der Einfluss der Klebschichtdicke auf die Steifigkeit des Klebverbunds ist demzufolge im betrachteten Dickenspektrum nichtlinear, woraus eine relative Abnahme der elastisch gespeicherten Energie mit steigender Klebschichtdicke abgeleitet werden kann. Der Einfluss der Klebschichtdicke auf die dissipativen Eigenschaften der Überlappverbindung kann anhand von Abbildung 7.20 nicht abschließend bewertet werden. Im weiteren Verlauf dieses Abschnitts wird deshalb eine energiebasierte Auswertung der Versuchsergebnisse durchgeführt.

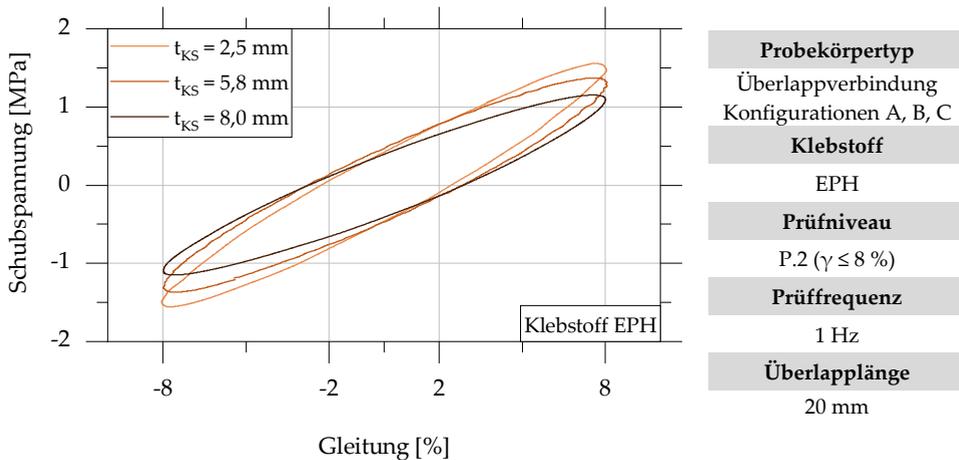


Abbildung 7.20: Schubspannung-Gleitungs-Diagramm der Hysteresen der Überlappverbindungskonfigurationen A, B und C mit Überlapplänge 20 mm in Prüfniveau P.2 für die Prüffrequenz 1 Hz

Die Grundlage der Diskussion des quantitativen Einflusses der Klebschichtdicke bildet die in Abbildung 7.21 dargestellte, auf die Klebschichtdicke von 2,5 mm normierte Auswertungen der Versuchsergebnisse. Die Auswertung findet getrennt für die beiden Prüfniveaus P.1 und P.2 statt.

Die Auswertung der Ergebnisse der Probekörper mit der Überlapplänge 60 mm für die Prüffrequenz 1 Hz sowie die Ergebnisse für die Prüffrequenzen 3 Hz und

5 Hz für beide untersuchten Überlappplängen können dem Anhang entnommen werden (s. Abbildung A.11 bis Abbildung A.15).

Abbildung 7.21 zeigt für die Klebschichtdicke 5,8 mm eine Zunahme des normierten Verlustfaktors. Die Zunahme des Verlustfaktors ist abhängig von der maximalen Gleitung der Klebschicht und beträgt 40 % in Prüfniveau P.1 sowie 23 % in Prüfniveau P.2. Der Einfluss der Klebschichtdicke nimmt demzufolge mit zunehmender Gleitung der Klebschicht ab. Infolge einer weiteren Erhöhung der Klebschichtdicke auf 8,0 mm kann keine weitere Zunahme des Verlustfaktors beobachtet werden. Diese Beobachtung gilt in beiden untersuchten Prüfniveaus.

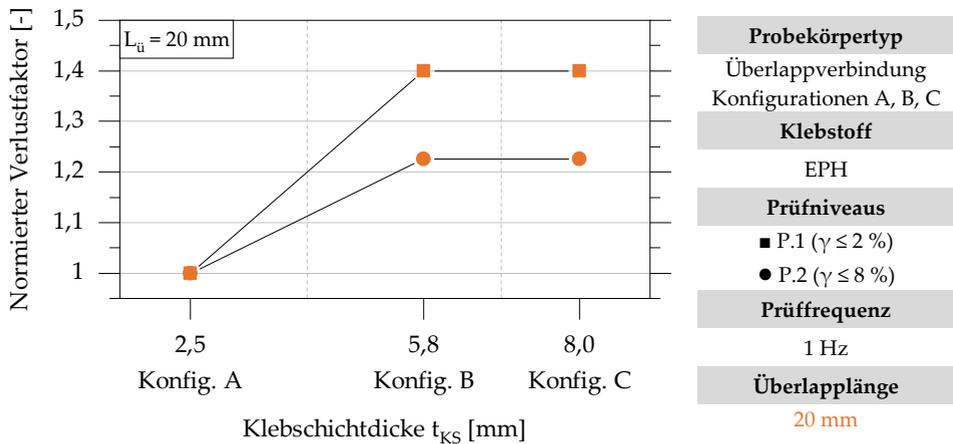


Abbildung 7.21: Auswertung des Einflusses der Klebschichtdicke auf den Verlustfaktor der Überlappverbindungskonfigurationen A, B und C mit Überlapplänge 20 mm in den Prüfniveaus P.1 und P.2 für die Prüffrequenz 1 Hz; auf den Verlustfaktor von Konfiguration A mit Klebschichtdicke 2,5 mm normierte Darstellung

Der Einfluss der Klebschichtdicke auf die Dämpfungseigenschaften von Überlappverbindungen wurde unter anderem in (da Silva et al. 2018) vereinfachend im Kleinbauteilmaßstab untersucht. Die Autoren zeigen, dass die Klebfugegeometrie sowie das damit verbundene Klebstoffvolumen nicht die dominanten Faktoren zur Erhöhung der Dämpfungseigenschaften geklebter Verbindungen sind. Der Einfluss der Klebschichtdicke steht demnach in Zusammenhang mit den generellen Dämpfungseigenschaften des betrachteten Klebstoffs sowie den Steifigkeitseigenschaften des untersuchten Probekörpers (da Silva et al. 2018).

Dass eine Erhöhung des Volumens der Klebschicht nicht direkt mit einem Anstieg des Verlustfaktors assoziiert ist, kann durch die vorliegenden Versuchsergebnisse bestätigt werden.

Bislang wurde nicht näher untersucht, in welcher Form die Klebschichtdicke das mechanische Verhalten sowie die Dämpfungseigenschaften der Überlappverbindung beeinflussen. Der Einfluss der Klebschichtdicke auf das Schubspannung-Gleitungsverhalten ebener Überlappverbindungen wurde bereits in einer Vielzahl an Arbeiten untersucht. Eine Zusammenfassung der wesentlichen Erkenntnisse kann (Habenicht 2009) entnommen werden. Neben einem geometrischen Einfluss der Klebschichtdicke existieren zusätzlich dickenabhängige Klebschichteigenschaften, die die Eigenschaften einer Klebung beeinflussen. Die Mehrzahl der dickenabhängigen Klebschichteigenschaften sind insbesondere vor dem Hintergrund der Analyse und Optimierung der Festigkeit und der maximalen Tragfähigkeit einer Klebung relevant. In Bezug auf die Dämpfungseigenschaften einer Klebschicht im Bereich von Gleitungen unter 10 % ist jedoch insbesondere die Ausbildung grenzflächennaher Adhäsionskräfte sowie deren Anteil an der Gesamtsteifigkeit von Interesse. Im Bereich kleiner Gleitungen wird die Steifigkeit des Klebverbunds zu einem großen Teil durch diese Grenzflächenkräfte bestimmt (Habenicht 2009). Der Zusammenhang zwischen auftretenden Grenzflächenkräften und der Verbundsteifigkeit ebener Überlappklebungen wird im Folgenden näher betrachtet.

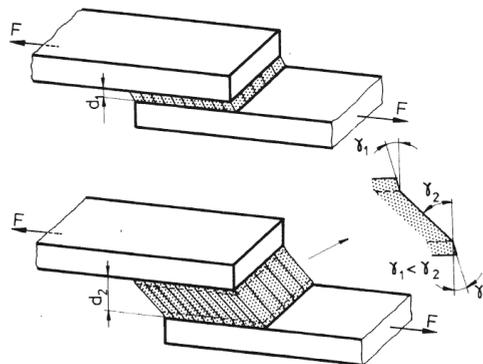


Abbildung 7.22: Schematische Darstellung des Einflusses der Klebschichtdicke auf die Schubverformung sowie die Verformungsbehinderung der Klebschicht einer einschnittigen, axial belasteten Überlappverbindung (Habenicht 2009)

Abbildung 7.22 zeigt den Einfluss der Klebschichtdicke auf die Verzerrung sowie die Verformungsbehinderung der Klebschicht einer einschnittigen Überlappverbindung unter einer aufgetragenen Axialbelastung. Infolge der in Fügeteilnähe auftretenden Adhäsionskräfte findet in diesem Bereich eine Verformungsbehinderung der angrenzenden Klebschicht statt. Die an die Klebschicht angrenzenden Fügeteile verhalten sich im Vergleich zur Klebschicht annähernd starr, wodurch Querkontraktionen sowie Schubverformungen in Fügeteilnähe behindert werden. Hieraus folgt, dass die Schubverformungen in Fügeteilnähe (γ_1) gegenüber denen in Klebschichtmitte (γ_2) deutlich geringer sind. In Grenzflächennähe entsteht ein dreidimensionaler Spannungszustand (Habenicht 2009).

Der Einfluss der im Bereich der Grenzfläche auftretenden Adhäsionskräfte und der damit einhergehenden Verformungsbehinderung auf die Dämpfungseigenschaften der Überlappverbindung wird im Folgenden anhand einer energie-basierten Auswertung der in Abbildung 7.20 dargestellten Hysteresen weitergehend untersucht. In Abbildung 7.23 sind die anhand der drei Hysteresen ermittelten dissipierten und elastisch gespeicherten Energien über der jeweiligen Klebschichtdicke aufgetragen.

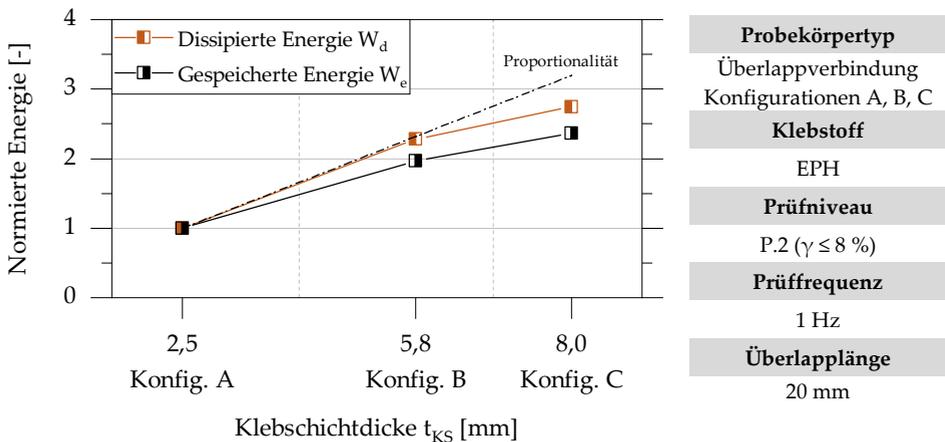


Abbildung 7.23: Auswertung des Einflusses der Klebschichtdicke auf die pro Lastzyklus dissipierte und elastisch gespeicherte Energie der Überlappverbindungskonfigurationen A, B und C in Prüfniveau P.2 für die Prüffrequenz 1 Hz; auf die dissipierte bzw. elastisch gespeicherte Energie von Konfiguration A mit Klebschichtdicke 2,5 mm normierte Darstellung

Die Auswertung erfolgt anhand einer auf die dissipierte bzw. elastisch gespeicherte Energie von Konfiguration A normierten Darstellung. Die in Abbildung 7.23 dargestellte Gerade kennzeichnet den proportionalen Zusammenhang zwischen Klebschichtdicke und normierter Energie.

Es zeigt sich, dass sowohl die elastische als auch die dissipierte Energie mit steigender Klebschichtdicke unterproportional zunehmen. Die elastische Energie wird durch eine Änderung der Klebschichtdicke deutlich stärker beeinflusst. Demgegenüber steigt die dissipierte Energie bis zu einer Klebschichtdicke von 5,8 mm zunächst annähernd proportional an und verläuft anschließend unterproportional.

Die abnehmende relative Steifigkeit der in Abbildung 7.20 dargestellten Hysteresen sowie der daraus abgeleitete, unterproportionale Anstieg der elastischen Energie mit steigender Klebschichtdicke kann durch den reduzierten Einfluss der grenzflächennahen Adhäsionskräfte und der damit einhergehenden Verformungsbehinderung begründet werden. Der Anteil der Klebschicht, deren Verformung nicht durch fügeteilnahe Adhäsionskräfte behindert wird, nimmt mit steigender Klebschichtdicke zu. Die dissipierte Energie hingegen wird durch die Gesamtheit der in der Klebschicht stattfindenden Verzerrungen bestimmt, unabhängig davon, wo diese auftreten (Jones 2001).

Der mit steigender Gleitung abnehmende Einfluss der Klebschichtdicke auf den Verlustfaktor erklärt sich durch die für den Klebstoff EPH identifizierte Spannung-Dehnung-Beziehung (vgl. Abschnitt 3.4.1). Die Steifigkeit des Klebstoffs EPH nimmt ab einer Dehnung von 2,5 % ab. Hierdurch werden Querkontraktionen der Klebschicht erleichtert, wodurch der dreidimensionale Spannungszustand in Fügeteilnähe und die daraus entstehende Steifigkeitserhöhung teilweise abgebaut werden können.

7.6.5 Einfluss des Klebstoffs

Zur Diskussion des Einflusses des Klebstoffs auf die Dämpfungseigenschaften geklebter Überlappverbindungen werden die Versuchsserien in Prüfniveau P.1 für die Prüffrequenz 1 Hz verwendet.

In Abbildung 7.24 sind die Schubspannung-Gleitung-Hysteresen von Probekörperkonfiguration B mit Überlapplänge 20 mm dargestellt, anhand derer die prinzipiellen Unterschiede im Dämpfungs- und Kraft-Verformungsverhalten der mit den Klebstoffen EPH und PUR gefertigten Überlappverbindungen analysiert werden.

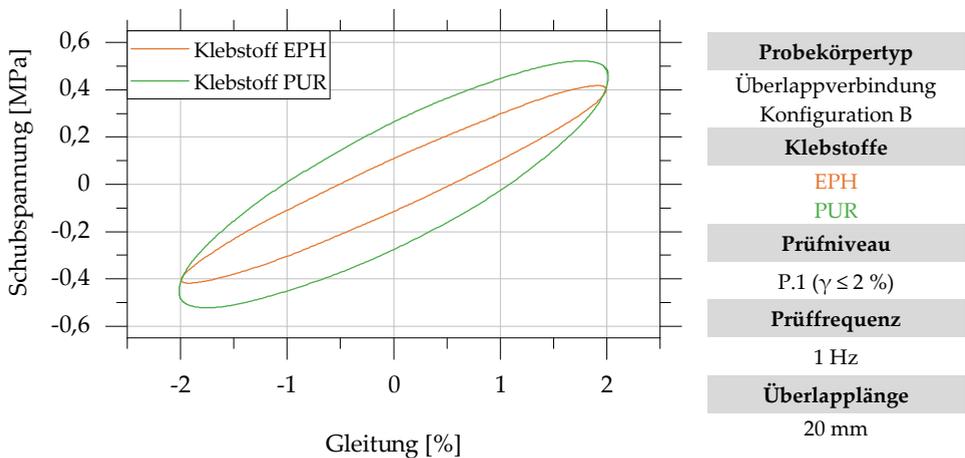


Abbildung 7.24: Analyse des Einflusses des Klebstoffs auf die Schubspannung-Gleitung-Hysteresen in Prüfniveau P.1; Exemplarische Darstellung für Probekörperkonfiguration B mit Überlapplänge 20 mm für die Prüffrequenz 1 Hz für die Klebstoffe EPH und PUR

Die vergleichende Darstellung der Hysteresen in Abbildung 7.24 zeigt, dass insbesondere der Flächeninhalt der dargestellten Hysteresen und somit die dissipierte Energie pro Lastzyklus für den Klebstoff PUR im Vergleich zum Klebstoff EPH größer ist. Der Flächeninhalt der dem Klebstoff PUR zugeordneten Hysterese ist um den Faktor 2,4 größer. Die Schubspannung bei Erreichen der maximalen Gleitungen wird demgegenüber deutlich weniger durch den verwendeten Klebstoff beeinflusst. Die Schubspannungen des mit dem Klebstoff

PUR gefertigten Probekörpers nehmen gegenüber der mit dem Klebstoff EPH geklebten Überlappverbindung lediglich um den Faktor 1,1 zu.

Aus den in Abbildung 7.24 dargestellten Hysteresen können die Verlustfaktoren der untersuchten Probekörper ermittelt werden und ergeben sich für den Klebstoff EPH zu 0,28 sowie für den Klebstoff PUR zu 0,63. Die Dämpfungseigenschaften der mit dem Klebstoff PUR gefertigten Überlappverbindungen sind demnach um Faktor 2,2 höher. Der anhand einer Dynamisch-Mechanischen-Analyse von Substanzproben festgestellte Unterschied im Dämpfungsverhalten der Klebstoffe EPH und PUR zeigt sich demnach qualitativ auch für die geklebte Überlappverbindung.

Ergänzend zu dem zuvor festgestellten, generellen Unterschied im Dämpfungsverhalten der beiden Klebstoffe wird im Folgenden exemplarisch der Einfluss der Überlapplänge auf die Dämpfungseigenschaften der mit den Klebstoffen EPH und PUR gefertigten Überlappverbindungen quantifiziert. In Abbildung 7.25 sind die Verlustfaktoren der Überlappverbindungskonfigurationen A, B und C für die Klebstoffe EPH und PUR auf die Überlapplänge von 20 mm normiert dargestellt.

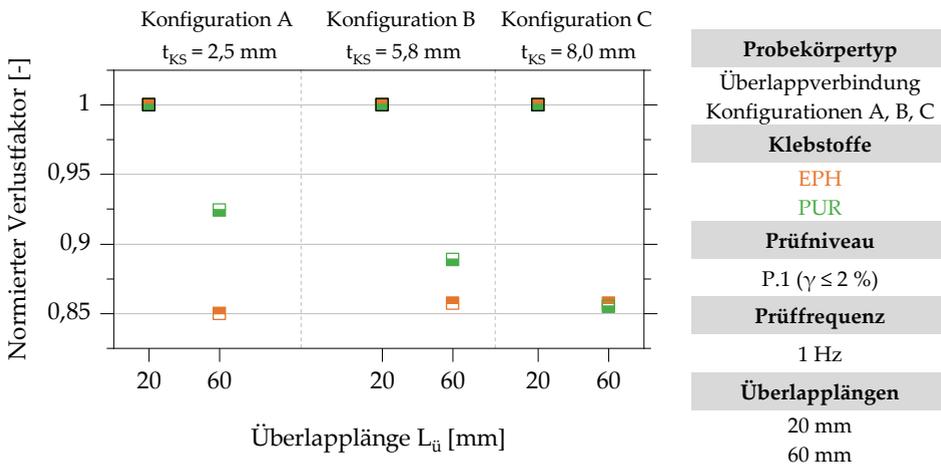


Abbildung 7.25: Auswertung des Einflusses der Überlapplänge auf den Verlustfaktor der Überlappverbindungskonfigurationen A, B und C mit Überlapplängen 20 und 60 mm in Abhängigkeit des verwendeten Klebstoffs; auf den Verlustfaktor der Probekörper mit Überlapplänge 20 mm normierte Darstellung für die Klebstoffe EPH und PUR

Ein Vergleich der Ergebnisse beider Klebstoffe zeigt für den Klebstoff PUR einen deutlichen Zusammenhang zwischen der Klebschichtdicke und dem Einfluss der Überlapplänge. Für Konfiguration A ($t_{KS} = 2,5 \text{ mm}$) mit Überlapplänge 60 mm beträgt der normierte Verlustfaktor 0,92 und liegt somit deutlich über dem, der für den Klebstoff EPH ermittelt werden kann. Hieraus kann ein abnehmender Einfluss der Überlapplänge mit zunehmender Klebstoffsteifigkeit sowie der daraus resultierenden Steifigkeit des Klebverbunds abgeleitet werden.

Mit steigender Klebschichtdicke kann für den Klebstoff PUR eine näherungsweise lineare Zunahme des Einflusses der Überlapplänge beobachtet werden. Infolge einer Erhöhung der Klebschichtdicke auf 8,0 mm (Konfiguration C) nimmt der auf eine Überlapplänge von 20 mm normierte Verlustfaktor um ca. 14 % ab. Der Einfluss der Überlapplänge ist für Überlappverbindungskonfiguration C für die beiden Klebstoffe EPH und PUR annähernd identisch.

7.7 Diskussion der Ergebnisse experimenteller Untersuchungen an Kreishohlprofilsteckverbindungen

7.7.1 Allgemeines

In diesem Abschnitt werden die in Abschnitt 7.5.2 dokumentierten Ergebnisse der experimentellen Untersuchung der Dämpfungseigenschaften geklebter KHP-Steckverbindungen diskutiert. Der Klebstoff EPH steht dabei im Fokus. Es werden die bereits für die Überlappverbindung untersuchten Geometrieparameter (Klebschichtdicke t_{KS} , Überlapplänge $L_{\ddot{u}}$) sowie Beanspruchungsrandbedingungen (Prüfniveau, Prüffrequenz) analysiert (vgl. Abschnitt 7.6). Darüber hinaus findet ein Vergleich der Klebstoffe EPH und PUR statt. Die Quantifizierung des Einflusses der untersuchten Parameter bezieht sich dabei primär auf die Dämpfungseigenschaften der untersuchten KHP-Steckverbindungen in Form des Verlustfaktors.

Die Analyse des Einflusses der untersuchten Parameter auf die Dämpfungseigenschaften der geklebten KHP-Steckverbindung findet analog zur Analyse der Überlappverbindung statt. Das Vorgehen ist mehrstufig aufgebaut und einheitlich über alle untersuchten Parameter. Aufbauend auf eine Analyse der ermittelten Hysterese findet eine vertiefende Untersuchung des Parametereinflusses durch normierte Darstellungen der Versuchsergebnisse statt.

7.7.2 Einfluss der Prüffrequenz

Der qualitative Einfluss der Prüffrequenz auf die mechanischen Eigenschaften des Klebstoffs EPH wurde bereits in Abschnitt 7.6.2 anhand der geklebten Überlappverbindung untersucht. Untersuchungen in (Damm et al. 2022a) sowie (Damm et al. 2023a) zeigen, dass die Versteifung des Klebverbunds infolge einer Zunahme der Frequenz bzw. Dehnrate auch für die KHP-Steckverbindungen beobachtet werden kann. Die Diskussion des Einflusses der Prüffrequenz auf die Dämpfungseigenschaften der mit dem Klebstoff EPH geklebten KHP-Steckverbindung findet daher im Folgenden ausschließlich auf Grundlage einer quantitativen Auswertung statt. Hierfür werden die Versuchsergebnisse in eine auf die Prüffrequenz von 1 Hz normierte Darstellung überführt.

Prüfniveau P.1

In Prüfniveau P.1 zeigt sich für beide Überlappängen eine annähernd lineare Abnahme des Verlustfaktors mit steigender Prüffrequenz. Die prozentuale Abnahme des Verlustfaktors infolge der Erhöhung der Prüffrequenz von 1 Hz auf 5 Hz liegt zwischen 9 % und 18 % (s. Abbildung 7.26).

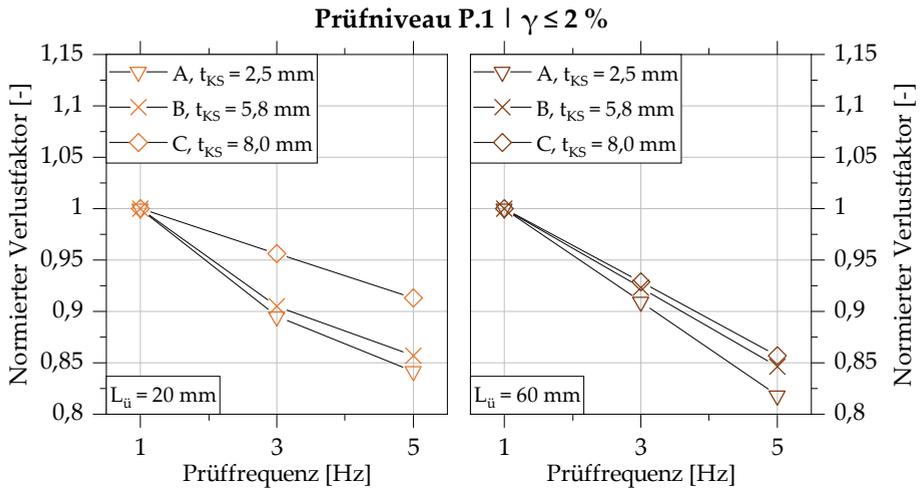


Abbildung 7.26: Auswertung des Einflusses der Prüffrequenz auf die Höhe des Verlustfaktors in Prüfniveau P.1 für die KHP-Steckverbindungskonfigurationen A, B und C mit Überlappängen 20 mm (links) sowie 60 mm (rechts), auf den Verlustfaktor der Prüffrequenz 1 Hz normierte Darstellung

Für die Probekörper mit einer Überlapplänge von 60 mm ist der Einfluss der Prüffrequenz nahezu unabhängig von der Klebschichtdicke. Demgegenüber nimmt der Einfluss der Prüffrequenz auf die Dämpfungseigenschaften der Überlappverbindung mit einer Überlapplänge von 20 mm mit steigender Klebschichtdicke ab.

Der in Abbildung 7.26 grafisch dargestellte Einfluss der Prüffrequenz wird in Tabelle 7.5 quantitativ zusammengefasst, wobei der prozentuale Einfluss hier und im Folgenden auf volle Zahlen gerundet angegeben wird. Die absolute Abnahme des Verlustfaktors beträgt in Prüfniveau P.1 im Maximum 0,03 und liegt im Bereich der Standardabweichung der Einzelergebnisse vom dargestellten Mittelwert.

Tabelle 7.5: Prozentuale Auswertung des Einflusses der Prüffrequenz auf den Verlustfaktor der KHP-Steckverbindungskonfigurationen A, B und C mit Überlappplängen 20 mm und 60 mm in Prüfniveau P.1

Konfiguration	Überlapplänge $L_{\ddot{u}}$	1 Hz	3 Hz	5 Hz
A, $t_{KS} = 2,5$ mm	20 mm	-	-11 %	-16 %
B, $t_{KS} = 5,8$ mm		-	-10 %	-14 %
C, $t_{KS} = 8,0$ mm		-	-4 %	-9 %
A, $t_{KS} = 2,5$ mm	60 mm	-	-9 %	-18 %
B, $t_{KS} = 5,8$ mm		-	-8 %	-15 %
C, $t_{KS} = 8,0$ mm		-	-7 %	-14 %

Prüfniveau P.2

Der Einfluss der Prüffrequenz auf die Dämpfungseigenschaften der KHP-Steckverbindung in Prüfniveau P.2 ist in Abbildung 7.27 dargestellt.

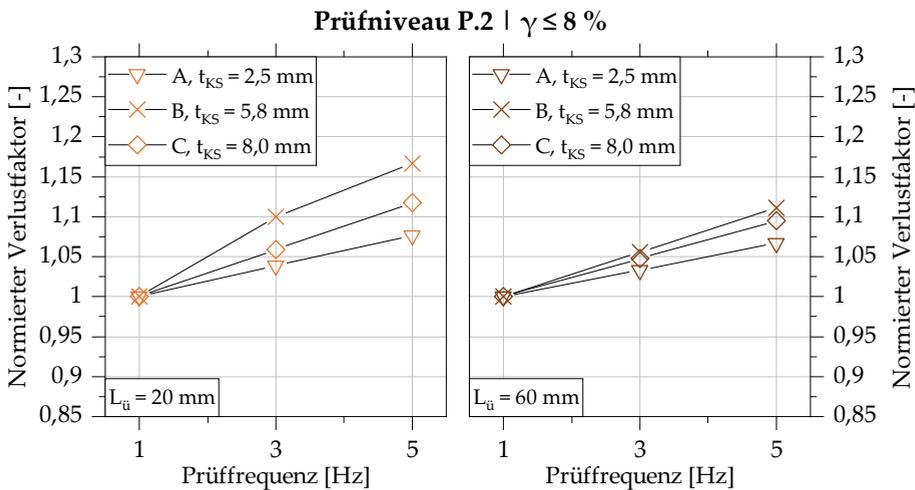


Abbildung 7.27: Auswertung des Einflusses der Prüffrequenz auf die Höhe des Verlustfaktors in Prüfniveau P.2 für die KHP-Steckverbindungskonfigurationen A, B und C mit Überlappplängen 20 mm (links) sowie 60 mm (rechts), auf den Verlustfaktor der Prüffrequenz 1 Hz normierte Darstellung

Der zuvor grafisch dargestellte Einfluss der Prüffrequenz wird in Tabelle 7.2 quantitativ zusammengefasst.

Tabelle 7.6: Prozentuale Auswertung des Einflusses der Prüffrequenz auf den Verlustfaktor der KHP-Steckverbindungskonfigurationen A, B und C mit Überlappplängen 20 mm und 60 mm in Prüfniveau P.2

Konfiguration	Überlapplänge $L_{\ddot{u}}$	1 Hz	3 Hz	5 Hz
A, $t_{KS} = 2,5$ mm	20 mm	-	+4 %	+8 %
B, $t_{KS} = 5,8$ mm		-	+10 %	+17 %
C, $t_{KS} = 8,0$ mm		-	+6%	+12 %
A, $t_{KS} = 2,5$ mm	60 mm	-	+3 %	+7 %
B, $t_{KS} = 5,8$ mm		-	+6 %	+11 %
C, $t_{KS} = 8,0$ mm		-	+5 %	+10 %

Für die KHP-Steckverbindungskonfigurationen A, B und C mit einer Überlapplänge von 20 mm zeigt sich für alle untersuchten Klebschichtdicken eine Zunahme des normierten Verlustfaktors mit steigender Prüffrequenz (Abbildung 7.27, links). Ein kausaler Zusammenhang zwischen der Klebschichtdicke und dem Einfluss der Prüffrequenz kann nicht beobachtet werden. Dies kann durch den geringen Einfluss der Prüffrequenz in Verbindung mit versuchsbedingten Schwankungen der Versuchsergebnisse erklärt werden. Die größte prozentuale Zunahme des Verlustfaktors infolge einem Anstieg der Prüffrequenz zeigt sich für Konfiguration B und beträgt im Maximum 17 %. Die absolute Zunahme des Verlustfaktors beträgt 0,05.

Die Auswertung des Einflusses der Prüffrequenz auf den normierten Verlustfaktor der KHP-Steckverbindung mit einer Überlapplänge von 60 mm ist rechts in Abbildung 7.27 dargestellt. Für alle untersuchten Probekörperkonfigurationen zeigt sich ein annähernd identischer linearer Anstieg des normierten Verlustfaktors mit steigender Prüffrequenz um bis zu 11 %. Die zugehörige absolute Zunahme des Verlustfaktors beträgt 0,02. Ein Vergleich des Einflusses der Prüffrequenz auf die Dämpfungseigenschaften der untersuchten KHP-Steckverbindungskonfigurationen A, B und C mit Überlappplängen von 20 mm und 60 mm lässt in Prüfniveau P.2 einen abnehmenden Frequenzeinfluss mit steigender Überlapplänge erkennen.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass auch für die KHP-Steckverbindung ein Zusammenhang zwischen der maximalen Gleitung der Klebschicht

und dem Einfluss der Prüffrequenz auf den Verlustfaktor festgestellt werden kann. In Prüfniveau P.1 ($\gamma \leq 2\%$) kann für alle Klebschichtdicken und Überlapp-längen eine annähernd lineare Abnahme des Verlustfaktors mit steigender Prüffrequenz festgestellt werden. Demgegenüber zeigt sich in Prüfniveau P.2 ($\gamma \leq 8\%$) ein entgegengesetzter Prüffrequenzeinfluss, der analog zur Überlapp-verbindung in Abschnitt 7.6.2 durch eine ermüdungsbedingte Schädigungen der Klebschicht begründet werden kann (Khoshmanesh et al. 2020).

Ein Vergleich der Ergebnisse der KHP-Steckverbindung mit denen der Überlappverbindung zeigt einen vergleichbaren, quantitativen Einfluss der Prüffre-quenz. Zudem ist keine Abhängigkeit von der Klebschichtdicke oder der Überlapplänge erkennbar. Hieraus folgt, dass es sich bei den detektierten, frequenzabhängigen Dämpfungseigenschaften um eine von der Klebfugengeo-metrie weitestgehend unabhängige Eigenschaft des Klebstoffs EPH handelt. Diese Erkenntnis kann durch die in Abschnitt 3.4.2 dokumentierten Ergebnisse der DMA von Substanzproben des Klebstoffs EPH bestätigt werden. Der detek-tierte Prüffrequenzeinfluss auf die Dämpfungseigenschaften der KHP-Steckver-bindung ist somit ebenfalls von baupraktisch untergeordneter Bedeutung. Die Erkenntnis, dass der Verlustfaktor ab einem gewissen Wert der Gleitung mit steigender Prüffrequenz zunimmt, kann jedoch aus baupraktischer Sicht als positiv bewertet werden. Es kann auf Grundlage der Ergebnisse der numeri-schen Untersuchungen in Kapitel 4 begründet davon ausgegangen werden, dass die Klebschichtverformungen im Verlauf baupraktisch relevanter Schwingungs-szenarien oberhalb einer Gleitung von 8 % liegen.

Im Folgenden finden die Untersuchung und Diskussion des Einflusses der Überlapplänge, der Klebschichtdicke sowie des Klebstoffs analog zur Diskussion der Ergebnisse der Überlappverbindung, exemplarisch für die baupraktisch relevante Prüffrequenz von 1 Hz statt. Der Einfluss ermüdungsbedingter Schä-digungen der Klebschicht auf die Ergebnisse in Prüfniveau P.2 kann so mini-miert werden. Die Auswertung der Ergebnisse für die Prüffrequenzen 3 Hz und 5 Hz kann dem Anhang entnommen werden.

7.7.3 Einfluss der Überlapplänge

Für eine qualitative Diskussion des Einflusses der Überlapplänge auf die Dämpfungseigenschaften einer KHP-Steckverbindung sind in Abbildung 7.28 exemplarische Schubspannung-Gleitung-Hysteresen der Probekörperkonfiguration C mit Überlapplängen 20 mm und 60 mm in Prüfniveau P.2 für die Prüffrequenz 1 Hz dargestellt.

Analog zu den Ergebnissen der Überlappverbindung (s. Abschnitt 7.6.3) kann auch für die KHP-Steckverbindung bis zu einer Gleitung von 8 % kein Einfluss des nichtlinearen Verhaltens des Klebstoffs EPH auf die dargestellten Hysteresen festgestellt werden. Darüber hinaus zeigt sich, dass die Schubspannungen für eine aufgebrauchte maximale Gleitung von 8 % für die beiden Überlapplängen nahezu identisch sind. Nach (Albiez et al. 2019b) kann dies im betrachteten Bereich geringer Gleitungen durch den näherungsweise linearen Zusammenhang zwischen der Überlapplänge und der dokumentierten Maschinenkraft erklärt werden (vgl. Abbildung 7.28). Darüber hinaus kann eine relative Abnahme des Flächeninhalts der Hysterese mit steigender Überlapplänge beobachtet werden. Eine Änderung der Überlapplänge wirkt sich somit insbesondere auf die dissipativen Eigenschaften der KHP-Steckverbindung aus.

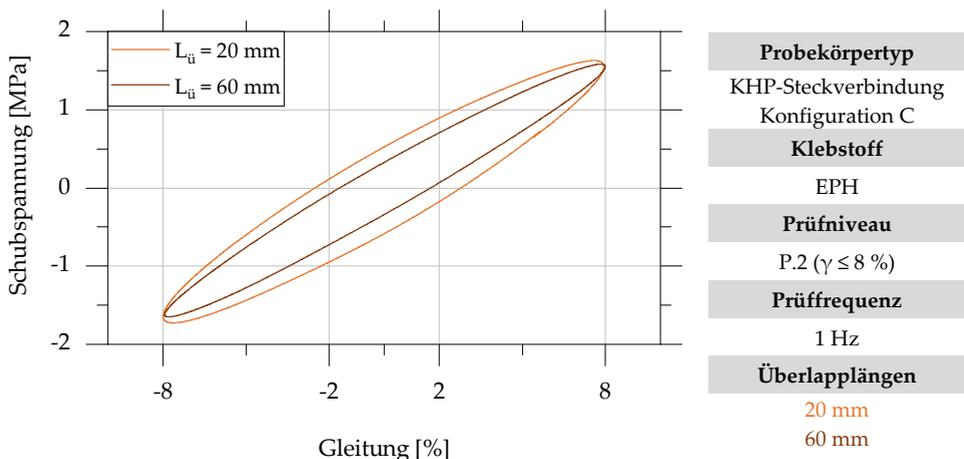


Abbildung 7.28: Analyse des Einflusses der Überlapplänge auf die Schubspannung-Gleitung-Hysteresen in Prüfniveau P.2; Exemplarische Darstellung für KHP-Steckverbindungskonfiguration C mit Überlapplängen 20 mm und 60 mm für die Prüffrequenz 1 Hz (Damm et al. 2021b)

Aufbauend auf die zuvor dokumentierte, qualitative Analyse der Versuchsergebnisse wird der Überlapplängeinfluss im Folgenden für die KHP-Steckverbindungskonfigurationen A, B und C in beiden Prüfniveaus für die Prüffrequenz 1 Hz quantifiziert. Hierzu werden die Ergebnisse der Probekörper mit der Überlappungslänge 60 mm auf die Ergebnisse der gleichen Konfiguration mit der Überlappungslänge 20 mm normiert. Die normierte Auswertung der Versuchsergebnisse ist in Abbildung 7.29 dargestellt. Die Auswertungen des Einflusses der Überlapplänge für die Prüffrequenzen 3 Hz und 5 Hz zeigen, dass die Abhängigkeit des Überlapplängeinflusses von der Prüffrequenz vernachlässigt werden kann (vgl. Abbildung A.16 und Abbildung A.17 im Anhang).

Vor dem Hintergrund der Ergebnisse der Auswertung der in Abbildung 7.28 dargestellten Hysteresen zeigt eine Betrachtung von Abbildung 7.29 erwartungsgemäß für alle untersuchten Probekörperkonfigurationen eine Abnahme des Verlustfaktors mit steigender Überlapplänge. Der normierte Verlustfaktor der Probekörper mit einer Überlapplänge von 60 mm liegt zwischen 58 % (Konfiguration A, $t_{KS} = 2,5$ mm) und 63 % (Konfiguration C, $t_{KS} = 8,0$ mm) und beträgt im Mittel 60 %.

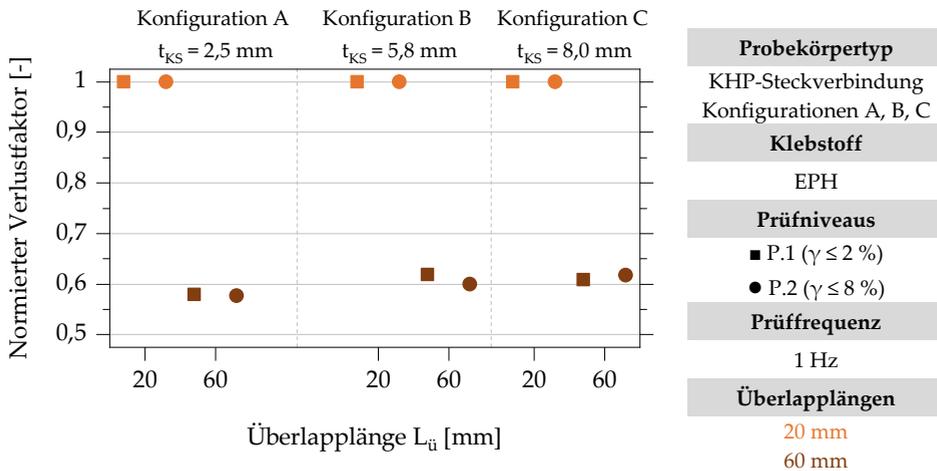


Abbildung 7.29: Auswertung des Einflusses der Überlapplänge auf den Verlustfaktor der KHP-Steckverbindungskonfiguration A, B und C mit Überlappungen 20 mm und 60 mm in den Prüfniveaus P.1 und P.2 für die Prüffrequenz 1 Hz; auf den Verlustfaktor der Probekörper mit Überlappungslänge 20 mm normierte Darstellung (Damm et al. 2021b)

Die Ergebnisse zeigen für beide Prüfniveaus keinen Zusammenhang zwischen der Klebschichtdicke und der Überlapplänge in Bezug auf die Dämpfungseigenschaften der KHP-Steckverbindungen. Die geringfügigen Abweichungen des normierten Verlustfaktors der Probekörper mit einer Überlapplänge von 60 mm vom Mittelwert können durch versuchsbedingte Schwankungen der Ergebnisse begründet werden. Darüber zeigt sich kein kausaler Zusammenhang zwischen dem Gleitungsniveau und der Überlapplänge. Die Abweichung der ermittelten Verlustfaktoren infolge einer Variation der Überlapplänge in Prüfniveau P.1 und P.2 liegt für alle untersuchten Klebschichtdicken bei unter 2 %.

Vor dem Hintergrund der Erkenntnisse der Untersuchung des Einflusses der Überlapplänge auf die Dämpfungseigenschaften ebener Überlappverbindungen (vgl. Abschnitt 7.6.3) kann die Hypothese aufgestellt werden, dass die Abnahme des Verlustfaktors infolge einer steigenden Überlapplänge ebenfalls durch den Verzerrungszustand innerhalb der Klebschicht begründet werden kann. Zur Ermittlung der Gleitung der Klebschicht in Richtung der Überlapplänge werden numerische Berechnungen durchgeführt. Das in Abschnitt 7.6.3 beschriebene numerische Berechnungsmodell der Überlappverbindung wird hierzu analog für die KHP-Steckverbindung erstellt. Aufgrund der Rotationssymmetrie der KHP-Steckverbindung finden die Berechnungen an einem Achtelmodell der Probekörper statt. Die Schnittflächen werden mit Symmetrierandbedingungen versehen. Die Klebschicht wird mit einer maximalen Elementkantenlänge von 0,5 mm vernetzt. Die Netzkonvergenz konnte für diese Elementkantenlänge in hier nicht dokumentierten Untersuchungen nachgewiesen werden. Die Gleitung wird erneut anhand von zwei Pfadergebnissen in Klebschichtmitte ermittelt.

In Abbildung 7.30 sind die numerisch bestimmten Verläufe der Gleitung in Richtung der Überlappung für die beiden Überlapplängen 20 mm und 60 mm exemplarisch für Konfiguration C in Prüfniveau P.2 dargestellt. Es zeigt sich, dass sowohl die durch Fügeteildehnungen induzierten Gleitungsmaxima im Randbereich als auch die Gleitung in Klebschichtmitte für die Überlapplänge 20 mm deutlich größer sind. Die Gleitung der Klebschicht nimmt für beide Überlapplängen zur Mitte hin ab. Die Differenz aus maximaler und minimaler Gleitung der Klebschicht axial beanspruchter Steckverbindungen hängt nach (Vaziri und Nayeb-Hashemi 2002) vom Schubmodul des Klebstoffs ab und nimmt mit steigender Klebstoffsteifigkeit zu.

Für die Überlapplänge 20 mm liegt die Gleitung der Klebschicht nahezu vollständig oberhalb des nominell aufgebrauchten Werts von 8 %. Demgegenüber liegen bei einer Überlapplänge von 60 mm lediglich die Randbereiche oberhalb einer Gleitung von 8 %. Eine Auswertung des Mittelwerts der Gleitung über die gesamte Überlapplänge zeigt für die Überlapplänge 20 mm eine mittlere Gleitung von 8,1 % sowie 7,8 % für die Überlapplänge 60 mm. Das Auftreten einer mittleren Gleitung unterhalb der nominell aufgebrauchten Gleitung von 8 % für die Überlapplänge 60 mm kann durch eine Zunahme des Anteils der Fügeteil-
dehnungen an der Gesamtverformung mit steigender Überlapplänge erklärt werden.

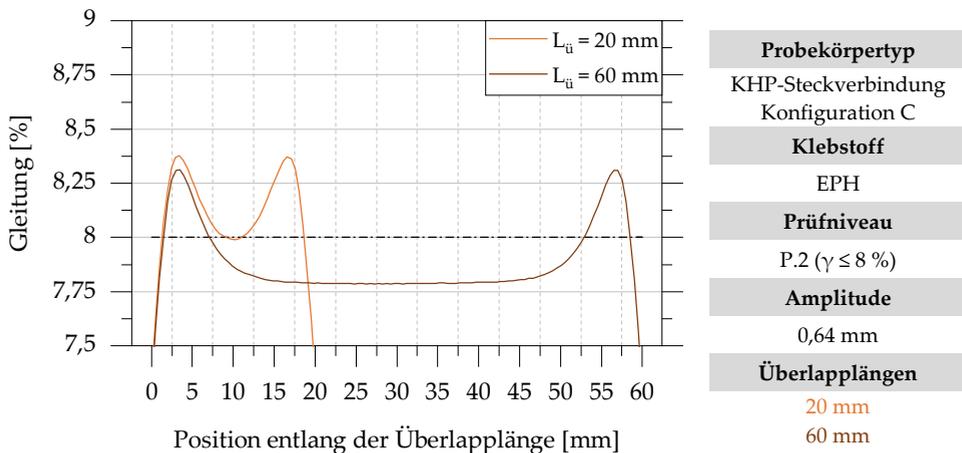


Abbildung 7.30: Numerisch berechnete Verläufe der Gleitung in Klebschichtmitte in Richtung der Überlappung; Probekörperkonfiguration C mit den Überlapplängen 20 mm und 60 mm

Die mit steigender Überlapplänge abnehmenden Dämpfungseigenschaften der KHP-Steckverbindung können somit anteilig durch den von der Überlapplänge abhängigen Verzerrungszustand begründet werden. Die Abnahme der mittleren Gleitung mit steigender Überlapplänge führt bei konstanter elastischer Energie zu einer Reduktion der pro Lastzyklus dissipierten Energie (vgl. Abbildung 7.28). Darüber hinaus wird die in Lastrichtung auftretende Verzerrung der Klebschicht mit an den Rändern auftretenden Dehnungen in radialer Richtung überlagert. Diese Querdehnungen resultieren aus einem von der Klebschicht-

dicke abhängigen Exzentrizitätsmoment, welches zu einer Aufweitung der Kreishohlprofilenden führt. Der Verlauf der auftretenden Querdehnungen ist für Konfiguration C für die beiden untersuchten Überlappplängen in Abbildung 7.31 dargestellt.

Im Maximum betragen die Querdehnungen 1,5 % und tragen somit signifikant zur Energiedissipation bei. Durch die Beschränkung der Querdehnungen auf den Randbereich der Klebschicht nimmt der prozentuale Anteil der hierdurch dissipierten Energie an der Gesamtenergiedissipation mit zunehmender Überlapplänge ab. Weiterführende Erläuterungen zum Auftreten klebschichtdickenabhängiger Exzentrizitätsmomente können den Untersuchungen zum Einfluss der Klebschichtdicke in Abschnitt 7.7.4 entnommen werden.

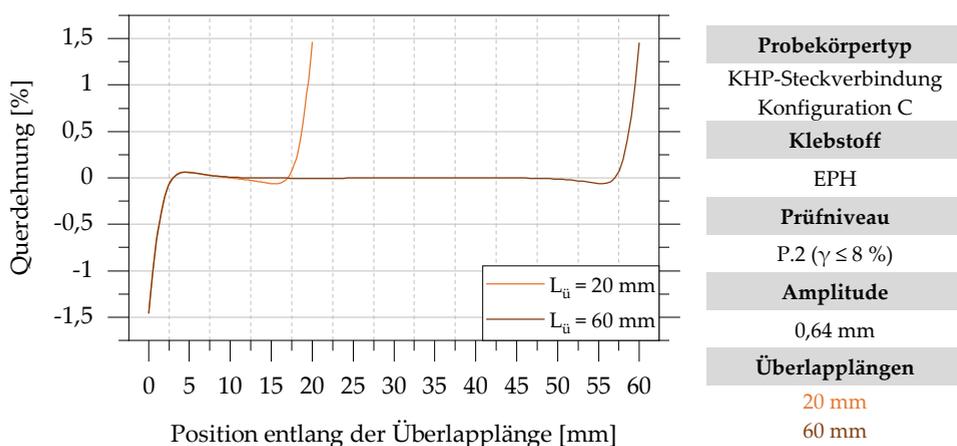


Abbildung 7.31: Numerisch berechnete Verläufe der radial verlaufenden Dehnungen in Klebschichtmitte in Richtung der Überlappung; Probekörperkonfiguration C mit den Überlappplängen 20 mm und 60 mm

7.7.4 Einfluss der Klebschichtdicke

Die Analyse des Einflusses der Klebschichtdicke findet anhand der KHP-Steckverbindungskonfigurationen A, B und C statt. Aufgrund eines von der Klebschichtdicke unabhängigen Einflusses der Überlapplänge (vgl. Abschnitt 7.7.3) werden im Folgenden exemplarisch die Ergebnisse der Probekörper mit Überlappplängen von 60 mm diskutiert.

Zunächst wird der Einfluss der Klebschichtdicke auf das mechanische Verhalten der geklebten KHP-Steckverbindungen analysiert. In Abbildung 7.32 sind hierzu die Schubspannung-Gleitung-Hysteresen der Probekörperkonfigurationen A, B und C mit der Überlapplänge 60 mm in Prüfniveau P.2 für die Prüffrequenz 1 Hz aufgetragen.

Ein Vergleich der Hysteresen zeigt eine Zunahme des Neigungswinkels der Hysteresen gegenüber der x-Achse und der damit assoziierten, relativen Steifigkeit des Klebverbunds mit steigender Klebschichtdicke. Hieraus kann eine überproportionale Zunahme der elastisch gespeicherten Energie mit steigender Klebschichtdicke abgeleitet werden. Zudem kann eine Zunahme des relativen Flächeninhalts der Hysterese mit steigender Klebschichtdicke beobachtet werden. Hieraus folgt ein überproportionaler Anstieg der dissipierten Energie.

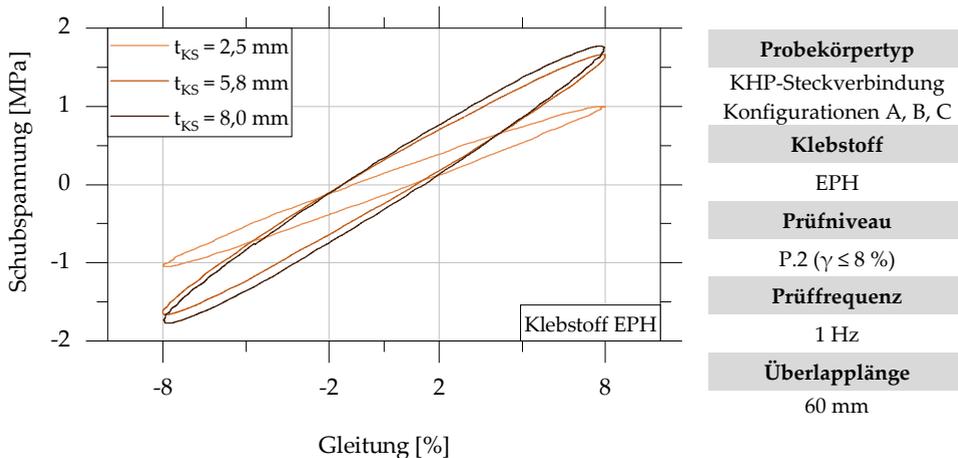


Abbildung 7.32: Schubspannung-Gleitung-Diagramm der Hysteresen der KHP-Steckverbindungskonfigurationen A, B und C mit Überlapplänge 60 mm in Prüfniveau P.2 für die Prüffrequenz 1 Hz

Für eine weiterführende Diskussion und Quantifizierung des Einflusses der Klebschichtdicke auf die Dämpfungseigenschaften der KHP-Steckverbindung werden die Verlustfaktoren der Konfigurationen A, B und C in eine auf die Klebschichtdicke von 2,5 mm normierte Darstellung überführt. Die Ergebnisse sind in Abbildung 7.33 dargestellt.

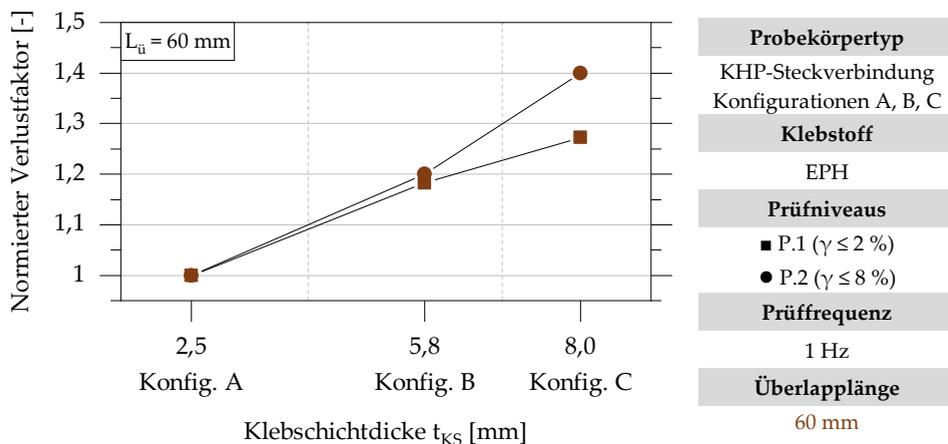


Abbildung 7.33: Auswertung des Einflusses der Klebschichtdicke auf den Verlustfaktor der KHP-Steckverbindungskonfigurationen A, B und C mit Überlapplänge 60 mm in den Prüfniveaus P.1 und P.2 für die Prüffrequenz 1 Hz; auf den Verlustfaktor von Konfiguration A mit Klebschichtdicke 2,5 mm normierte Darstellung

Die Auswertung zeigt für beide Prüfniveaus eine Zunahme des normierten Verlustfaktors mit steigender Klebschichtdicke, die als annähernd linear charakterisiert werden kann. Für Konfiguration B steigt der normierte Verlustfaktor in Abhängigkeit der maximalen Gleitung der Klebschicht um 18 % bis 20 %. Die Zunahme des normierten Verlustfaktors beträgt für Konfiguration C 27 % in Prüfniveau P.1 und 40 % in Prüfniveau P.2. Der maximale Anstieg des Verlustfaktors infolge der Erhöhung der Klebschichtdicke von 2,5 mm auf 8,0 mm beträgt 0,06. Im Vergleich zur Überlappverbindung kann für die KHP-Steckverbindungskonfiguration B kein signifikanter Einfluss der maximalen Gleitung auf die klebschichtdickenabhängigen Dämpfungseigenschaften festgestellt werden. Auf Grundlage von Abbildung 7.33 kann von einem Zusammenhang zwischen der Dicke und der Beanspruchung der Klebschicht ausgegangen werden. Der positive Effekt einer Erhöhung der Klebschichtdicke auf den Verlustfaktor nimmt mit zunehmender Gleitung der Klebschicht ebenfalls zu. Dies gilt analog für die Probekörper mit kürzerer Überlapplänge sowie für die Prüffrequenzen 3 Hz und 5 Hz (vgl. Abbildung A.18 bis Abbildung A.22 im Anhang).

Auf Grundlage der bisherigen Beobachtungen zum Einfluss der Klebschichtdicke kann davon ausgegangen werden, dass ein überproportionaler Anstieg sowohl der elastisch gespeicherten als auch der dissipierten Energie ursächlich für die Zunahme des Verlustfaktors mit steigender Klebschichtdicke ist. Im Folgenden soll diese Hypothese mit Hilfe einer energiebasierten Auswertung der Abbildung 7.32 zugrundeliegenden Kraft-Weg-Hysteresen untersucht werden. In Abbildung 7.34 ist die pro Lastzyklus dissipierte und elastisch gespeicherte Energie der KHP-Steckverbindungskonfigurationen A, B und C in Prüfniveau P.2 für die Prüffrequenz 1 Hz dargestellt.

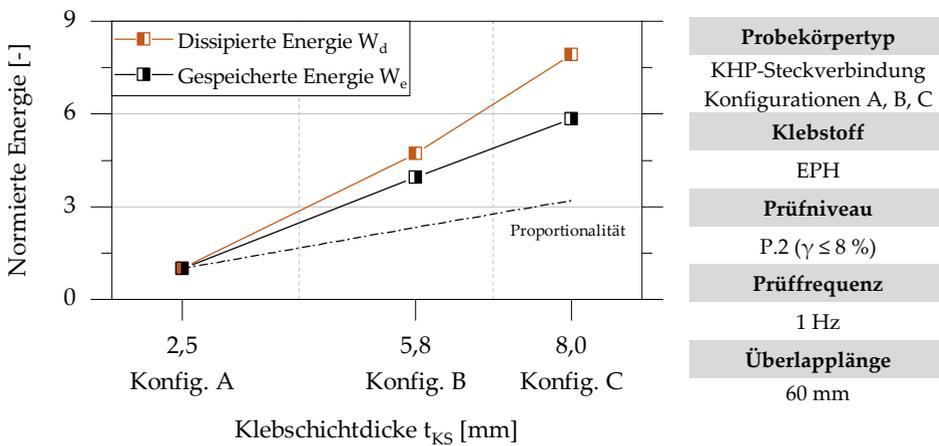


Abbildung 7.34: Auswertung des Einflusses der Klebschichtdicke auf die pro Lastzyklus dissipierte und elastisch gespeicherte Energie der KHP-Steckverbindungskonfigurationen A, B und C in Prüfniveau P.2 für die Prüffrequenz 1 Hz; auf die dissipierte bzw. elastisch gespeicherte Energie von Konfiguration A mit Klebschichtdicke 2,5 mm normierte Darstellung

Die gezeigten Kurvenverläufe nehmen mit steigender Klebschichtdicke näherungsweise linear zu und verlaufen zudem oberhalb der dargestellten Proportionalitätsgerade. Diese charakterisiert den proportionalen Zusammenhang zwischen einem Anstieg der Klebschichtdicke sowie einer damit assoziierten Zunahme von elastisch gespeicherter und dissipierter Energie. Die zuvor beschriebene Beobachtung, dass der Verlustfaktor mit steigender Klebschichtdicke zunimmt, kann auf Grundlage von Abbildung 7.34 durch den größeren Einfluss

der Klebschichtdicke auf die dissipativen Klebschichteigenschaften erklärt werden.

Die mit steigender Klebschichtdicke überproportionale Zunahme der Steifigkeit sowie der dissipativen Eigenschaften des Klebverbunds können durch die bei einer KHP-Steckverbindung auftretenden Aufweitungen der Hohlprofile infolge einer Verformung in axialer Richtung erklärt werden. Diese treten nach (Albiez 2016) sowohl am inneren als auch am äußeren Hohlprofil an den an die Klebschicht angrenzenden Enden auf und werden durch ein rotationssymmetrisches Exzentrizitätsmoment hervorgerufen. Das Exzentrizitätsmoment entsteht durch die zwischen den Wandungen der Hohlprofile vorhandene Exzentrizität und nimmt demzufolge mit steigender Klebschichtdicke zu. Wie in Abbildung 7.35 dargestellt ist, resultieren die Aufweitungen in an den Enden der Klebschicht auftretendem Querkzug bzw. Querdruck. Eine mit steigender Klebschichtdicke zunehmende relative Steifigkeit der KHP-Steckverbindung konnte bereits anhand der Ergebnisse der statischen Zugversuche in Abschnitt 6.4 beobachtet werden.

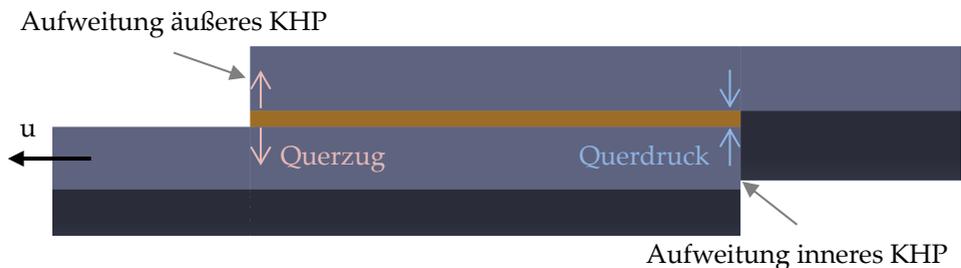


Abbildung 7.35: Schematische Darstellung der radialen Verformung einer Kreishohlprofilsteckverbindung infolge einer Verformung in axialer Richtung

Die Auswirkung eines auftretenden Exzentrizitätsmoments auf die Verformung einer Klebschicht in Abhängigkeit der Klebschichtdicke wird im Folgenden anhand numerischer Untersuchungen am in Abschnitt 7.7.3 beschriebenen Achtel-Modell der KHP-Steckverbindung analysiert. In Abbildung 7.36 ist der Verlauf der Gleitung in Klebschichtmitte für die Konfigurationen A und C dargestellt.

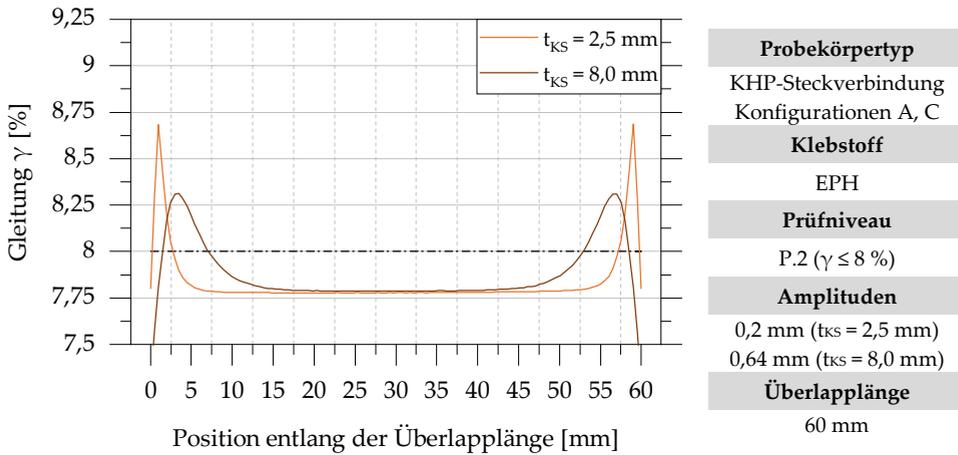


Abbildung 7.36: Numerisch berechnete Verläufe der Gleitung in Klebschichtmitte in Richtung der Überlappung; Probekörperkonfiguration A und C mit der Überlapplänge 60 mm

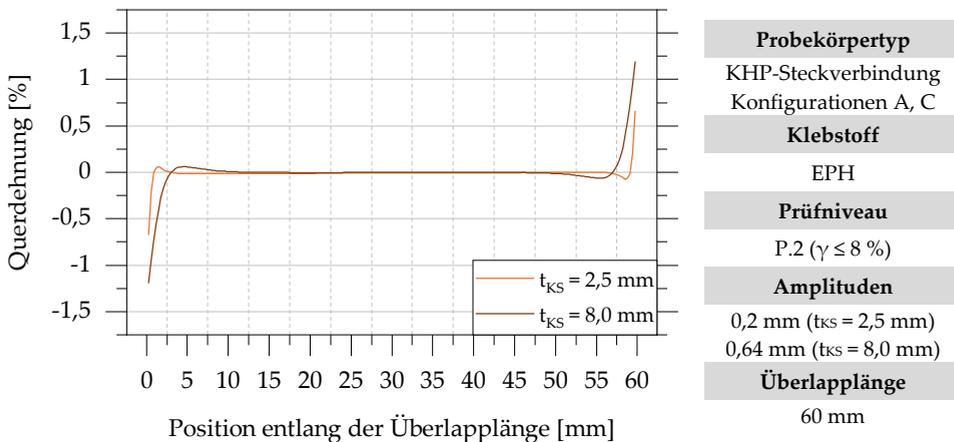


Abbildung 7.37: Numerisch berechnete Verläufe der radial verlaufenden Dehnungen in Klebschichtmitte in Richtung der Überlappung; Probekörperkonfiguration A und C mit der Überlapplänge 60 mm

Für eine Klebschichtdicke von 2,5 mm zeigen sich aufgrund einer höheren Querdehnungsbehinderung erwartungsgemäß höhere Maxima der Gleitung an den Überlappungsenden. Die mittlere Gleitung beträgt für beide Klebschichtdicken 7,8 %. In Abbildung 7.37 sind zusätzlich die Verläufe der radialen Dehnungen

der Klebschicht entlang des Auswertepfades in Klebschichtmitte für die Klebschichtdicken 2,5 und 8,0 mm dargestellt.

Es zeigt sich, dass die Höhe sowie die Ausdehnung der Querdehnungen entlang des Auswertepfades mit steigender Klebschichtdicke deutlich zunehmen. Bei gleicher nomineller Gleitung der Klebschicht zeigt sich für die dickere Klebschicht eine um den Faktor 1,8 höhere, maximale Querdehnung an den Überlappungsenden. Dies kann nach (Albiez 2016) auf den mit steigender Klebschichtdicke größer werdenden Abstand der Wandungen der beiden Hohlprofile und den damit verbundenen Anstieg des entstehenden Exzentrizitätsmoments begründet werden.

7.7.5 Einfluss des Klebstoffs

Die Diskussion des Einflusses des verwendeten Klebstoffs auf die Dämpfungseigenschaften der geklebten KHP-Steckverbindung findet exemplarisch für die Versuchsserien in Prüfniveau P.1 für die Prüffrequenz 1 Hz statt.

Zunächst werden die aufgezeichneten Messdaten von Maschinenkraft und –weg der Probekörperkonfiguration B mit Überlapplänge 20 mm für die beiden Klebstoffe EPH und PUR in die zugehörige Schubspannung sowie Gleitung überführt und im in Abbildung 7.38 dargestellten Schubspannung-Gleitungs-Diagramm aufgetragen.

Ein Vergleich der beiden dargestellten Hysteresen zeigt, dass sich die qualitativen Unterschiede im Dämpfungs- und Kraft-Verformungsverhalten der Klebstoffe EPH und PUR, die bereits anhand der Analyse der Überlappverbindung in Abschnitt 7.6.5 beobachtet werden konnten, analog auch für die geklebte KHP-Steckverbindung feststellen lassen.

Die Hysterese der mit dem Klebstoff PUR gefertigten KHP-Steckverbindung ist im Vergleich zum Klebstoff EPH insbesondere durch einen um Faktor 3,8 größeren Flächeninhalt charakterisiert. Demgegenüber wirkt sich der verwendete Klebstoff auf die Schubspannung bei Erreichen der maximalen Gleitungen deutlich geringer aus (Faktor 1,6). Gegenüber den Ergebnissen der Überlappverbindung zeigt sich für die KHP-Steckverbindung ein deutlich größerer Einfluss des Klebstoffs auf den Verlauf der Schubspannung-Gleitungs-Hysteresen. Den vorher-

rigen Ausführungen folgend, lässt sich dies durch die bei KHP-Steckverbindungen an den Überlappungsenden auftretenden Querdehnungen begründen, deren Einfluss darüber hinaus mit zunehmender Klebstoffsteifigkeit ansteigt.

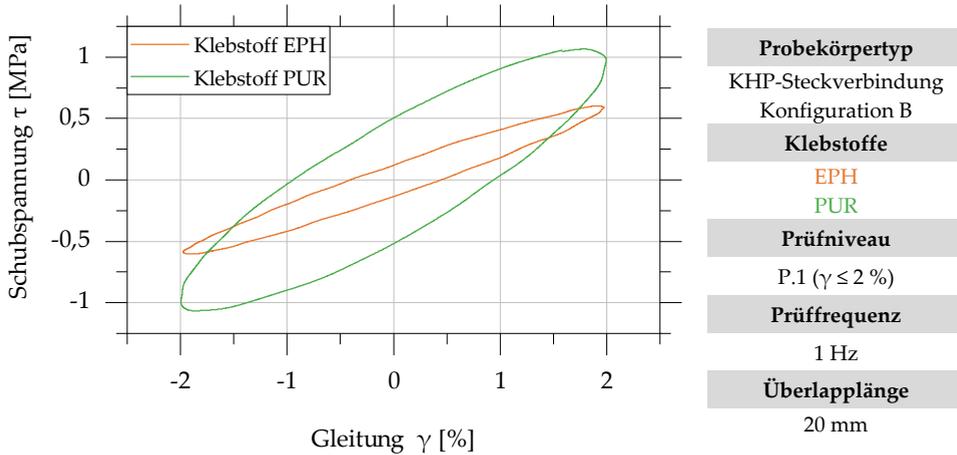


Abbildung 7.38: Analyse des Einflusses des Klebstoffs auf die Schubspannung-Gleitung-Hysteresen in Prüfniveau P.1; Exemplarische Darstellung für Probekörperkonfiguration B mit Überlapplänge 20 mm für die Prüffrequenz 1 Hz für die Klebstoffe EPH und PUR

Aus den in Abbildung 7.38 dargestellten Hysteresen können die Verlustfaktoren der geklebten KHP-Steckverbindungen zu 0,21 (EPH) sowie 0,51 (PUR) bestimmt werden. Ein Vergleich der beiden Verlustfaktoren zeigt, dass die Dämpfungseigenschaften der mit dem Klebstoff PUR gefertigten KHP-Steckverbindung im Vergleich zu den mit Klebstoff EPH geklebten Probekörpern um Faktor 2,4 größer sind. Somit zeigen sich die bereits anhand einer DMA von Substanzproben ermittelten Unterschiede im Dämpfungsverhalten auch für mit den Klebstoffen EPH und PUR geklebten KHP-Steckverbindungen. Der vom Klebstoff abhängige prozentuale Unterschied des Verlustfaktors der mit den untersuchten Klebstoffen gefertigten KHP-Steckverbindungen ist vergleichbar mit dem der in Abschnitt 7.6.5 analysierten Überlappverbindungen.

In Abbildung 7.39 ist der Verlustfaktor der KHP-Steckverbindungskonfigurationen A, B und C mit Überlappängen 20 mm und 60 mm für die Klebstoffe EPH und PUR auf die Überlapplänge von 20 mm normiert dargestellt. Anhand dieser Darstellung kann der Einfluss der Überlapplänge analysiert

werden. Der Verlustfaktor nimmt mit zunehmender Überlapplänge in Abhängigkeit der Klebschichtdicke und des Klebstoffs zwischen 34 % bis 42 % ab. Es kann ein geringfügig größerer Einfluss der Überlapplänge für den Klebstoff EPH beobachtet werden. Ein Zusammenhang zwischen der Klebschichtdicke und der Überlapplänge in Bezug auf die Dämpfungseigenschaften kann für keinen der beiden Klebstoffe festgestellt werden.

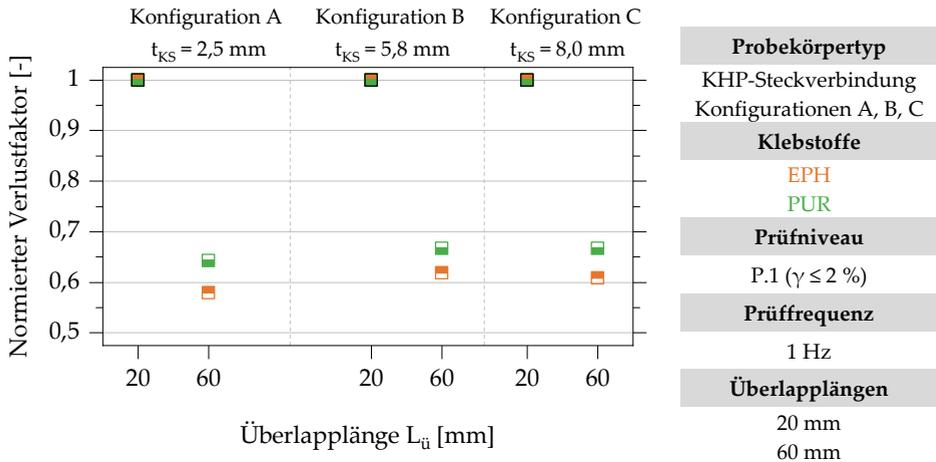


Abbildung 7.39: Auswertung des Einflusses der Überlapplänge auf den Verlustfaktor der KHP-Steckverbindungskonfigurationen A, B und C mit Überlappungen 20 mm und 60 mm in Abhängigkeit des verwendeten Klebstoffs; auf den Verlustfaktor der Probekörper mit Überlapplänge 20 mm normierte Darstellung für die Klebstoffe EPH und PUR

7.8 Zusammenfassung

Die in diesem Abschnitt dokumentierten Ergebnisse experimenteller Untersuchungen an geklebten Überlapp- und Kreishohlprofilsteckverbindungen sowie ergänzender numerischer Untersuchungen können wie folgt zusammengefasst werden:

- Die Dämpfungseigenschaften geklebter Überlapp- und Kreishohlprofilsteckverbindungen können mit dem in diesem Abschnitt beschriebenen Vorgehen hinsichtlich der Fertigung, der Prüfung und der Auswertung für unterschiedliche Geometrie- und Beanspruchungsrandbedingungen bestimmt werden.
- Die Verlustfaktoren aller untersuchten Probekörper liegen zwischen 0,09 und 0,41 (Klebstoff EPH). Mehr als 95 % der Versuchsergebnisse liegt deutlich oberhalb von 0,10 und erfüllt somit die in Abschnitt 3 dokumentierten Anforderungen an die dynamischen-mechanischen Eigenschaften an Klebverbindungen im Stahlbau ($\eta > 0,1$).
- Die Verlustfaktoren geklebter Überlappverbindungen liegen bei gleicher Klebschichtdicke und Überlapplänge stets über denen geklebter Kreishohlprofilsteckverbindungen.
- Für beide Probekörpertypen kann bei gleicher Probekörperkonfiguration ein Anstieg der Dämpfungseigenschaften mit steigender Gleitung der Klebschicht festgestellt werden.
- Die mit steigender Gleitung abnehmende Steifigkeit von Klebstoff EPH wirkt sich bis zu einer maximalen Gleitung von 8 % nur vernachlässigbar auf die Form der ermittelten Hysteresen aus. Durch Anschauung können diese stets als elliptisch charakterisiert werden.
- Der Einfluss der Prüffrequenz ist abhängig von der maximalen Gleitung der Klebschicht. Dies kann auf eine von der Höhe der Beanspruchung abhängige, ermüdungsbedingte Schädigung der Klebschicht zurückgeführt werden. Im betrachteten Frequenzspektrum (1 Hz bis 5 Hz) liegt der prozentuale Einfluss der Frequenz auf den Verlustfaktor deutlich unter 20 % und ist aus praktischer Sicht von untergeordneter Bedeutung. Die absolute Änderung des Verlustfaktors beträgt im Maximum $\pm 0,03$.

- Untersuchungen zum Einfluss der Überlapplänge zeigen eine Abnahme des Verlustfaktors bei einer Verdreifachung der Überlapplänge. Die Abnahme des Verlustfaktors beträgt für die untersuchten Überlappverbindungen im Mittel 15 %. Diese Erkenntnis kann durch eine abnehmende, mittlere Gleitung der Klebschicht infolge einer Erhöhung der Überlapplänge sowie eine Zunahme auftretender Fügeteildehnungen begründet werden.
- Für die Kreishohlprofilsteckverbindung kann mit einer mittleren Abnahme des Verlustfaktors um 40 % ein um mehr als Faktor zwei größerer Überlapplängeinfluss festgestellt werden. Dieser erklärt sich vorrangig durch den mit steigender Überlapplänge abnehmenden Einfluss eines positiv wirkenden Exzentrizitätsmoments.
- Der für den Klebstoff EPH festgestellte, qualitative Einfluss der Überlapplänge auf die Dämpfungseigenschaften der Überlappverbindung kann auch für den Klebstoff PUR beobachtet werden. Dass der Einfluss Überlapplänge für den Klebstoff PUR weniger stark ausgeprägt ist, kann auf die höhere Klebstoffsteifigkeit zurückgeführt werden.
- Für die untersuchten Kreishohlprofilsteckverbindungen zeigt sich, dass der Einfluss der Überlapplänge auf den Verlustfaktor der Probekörper für den Klebstoff PUR gegenüber Klebstoff EPH geringfügig geringer ist. Die Unterschiede zwischen den beiden Klebstoffen liegen bei weniger als 10 %.
- Eine Erhöhung der Klebschichtdicke von 2,5 mm auf 8,0 mm führt für beide Probekörpertypen zu einem Anstieg des Verlustfaktors um bis zu 40 %. Für die Überlappverbindung erklärt sich dies primär durch den mit steigender Klebschichtdicke abnehmenden Einfluss fügeteilnaher Schubdeformations- und Querkontraktionsbehinderungen der Klebschicht.
- Exemplarische Analysen zum Einfluss des Klebstoffs zeigen, dass die Dämpfungseigenschaften der mit PUR geklebten Probekörper um mehr als Faktor zwei über denen liegen, die mit dem Klebstoff EPH gefertigt wurden. Diese Beobachtung gilt für beide Probekörpertypen.

8 Prognose der Dämpfungseigenschaften geklebter Verbindungen

8.1 Ansatz und Vorgehensweise

Für die Dimensionierung und Auslegung dynamisch beanspruchter Stahlbaustrukturen ist die zuverlässige Abschätzung der vorhandenen Dämpfung von hoher Relevanz. In der Praxis werden hierfür häufig ingenieurmäßige Ansätze genutzt, die die Dämpfungseigenschaften von Strukturen durch die Annahme einer global wirkenden Dämpfung approximieren. Dieser Ansatz kann für reine Stahlbaustrukturen mit ausreichender Genauigkeit Anwendung finden. Allerdings kann dieser Ansatz nicht auf geklebte Strukturen übertragen werden, deren Dämpfung primär lokal im Bereich der geklebten Anschlüsse auftritt.

Die rechnerische Bestimmung der Dämpfungseigenschaften von Klebverbindungen kann bislang ausschließlich anhand komplexer Werkstoffmodelle der Klebstoffe erfolgen. Bisher existieren jedoch keine einfach anzuwendenden Ansätze zur effizienten Prognose einer lokalen Knotendämpfung, die im Rahmen einer praktischen Auslegung von Stahlbaustrukturen verwendet werden können.

In diesem Kapitel wird das Ziel der Entwicklung einer Methode zur Analyse funktionaler Zusammenhänge der in Kapitel 7 dokumentierten Ergebnisse experimenteller Untersuchungen an bauteilähnlichen Überlapp- und KHP-Steckverbindungen verfolgt. Hierzu werden Dimensionsanalysen durchgeführt. Dabei werden dimensionslose Kennzahlen gebildet und untereinander kombiniert, wodurch ein angenommener, funktionaler Zusammenhang der Versuchsergebnisse entsteht. Dabei werden alle identifizierten Parameter, die einen Einfluss auf die Dämpfungseigenschaften der untersuchten Klebverbindungen haben, berücksichtigt. Der identifizierte, funktionale Zusammenhang kann anschließend durch eine Regressionsfunktion approximiert werden. Die so ermittelte Regressionsfunktion kann die Grundlage zur analytischen Ermittlung der Dämpfungseigenschaften geklebter Verbindungen im Rahmen definierter

Gültigkeitsgrenzen für beliebige Probekörpergeometrien und Beanspruchungsrandbedingungen im Rahmen der praktischen Auslegung von Strukturen bilden.

Die funktionalen Zusammenhänge zwischen den Dämpfungseigenschaften der beiden Probekörpertypen und den zuvor diskutierten Einflussfaktoren können mit Hilfe einer Dimensionsanalyse identifiziert werden, deren Grundlagen in Abschnitt 8.2 erläutert werden. Die Dimensionsanalyse wird getrennt für die beiden untersuchten Probekörpertypen in den Abschnitten 8.3 und 8.4 durchgeführt.

8.1.1 Anmerkungen zur Übertragbarkeit

Die im Folgenden durchgeführten Dimensionsanalysen basieren auf den in Kapitel 7 dokumentierten experimentellen Untersuchungen an Überlapp- und KHP-Steckverbindung. Die Übertragbarkeits- bzw. Gültigkeitsgrenzen ergeben sich aus der zugrundeliegenden experimentellen Datengrundlage. Aussagen zu den Dämpfungseigenschaften geklebter Verbindungen, deren Klebfugengeometrie außerhalb des Untersuchungsbereich liegen, können auf Grundlage der in diesem Abschnitt dokumentierten Ergebnisse nicht abgeleitet werden. Dies gilt analog für die untersuchten Beanspruchungsrandbedingungen (Gleitungs-niveau, Frequenz). Darüber hinaus muss beachtet werden, dass der Einfluss ermüdungsbedingter Schädigungen der Klebschicht auf die Dämpfungseigenschaften einer geklebten Verbindung getrennt für jeden Anwendungsfall bewertet werden muss. In diesem Zusammenhang ist insbesondere der mit zunehmender Schwingenspielzahl ansteigende Grad der Schädigung und die damit verbundene Änderung der Dämpfungseigenschaften zu beachten.

8.2 Grundlagen einer Dimensionsanalyse

Zur Beschreibung physikalischer Zusammenhänge ist es häufig sinnvoll, den Zusammenhang der zugehörigen Einflussgrößen möglichst vereinfacht darzustellen. Eine entsprechende Darstellung kann über eine Dimensionsanalyse erarbeitet werden. Hierbei werden physikalische Zusammenhänge dimensionslos formuliert. Alle relevanten Einflussgrößen werden dabei auf charakteristische Größen des vorliegenden Problems bezogen, wodurch eine dimensionslose

Formulierung entsteht. Die wesentlichen Vorteile einer Dimensionsanalyse bestehen zum einen in der Möglichkeit einer kompakteren Darstellung des physikalischen Zusammenhangs. Die Anzahl der entstehenden, dimensionslosen Kennzahlen ist stets kleiner als die Anzahl der identifizieren, dimensionsbehafteten Einflussgrößen. Zum anderen bietet eine dimensionslose Darstellung die Möglichkeit einer allgemeingültigen Darstellung der erzielten Ergebnisse (Herwig 2016).

Zu Beginn einer Dimensionsanalyse muss beurteilt werden, ob die Funktionsgleichung bekannt ist, die dem zu beschreibenden physikalischen Problem zugrunde liegt. Falls die entsprechende Funktionsgleichung unbekannt ist, müssen zunächst alle relevanten Einflussgrößen identifiziert werden. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit besteht die Aufgabe in der Identifikation und Beschreibung des physikalischen Zusammenhangs zwischen den Dämpfungseigenschaften geklebter Verbindungen sowie den untersuchten Geometrie- und Beanspruchungsrandbedingungen. Die zugrundeliegende Funktionsgleichung zur Bestimmung des Verlustfaktors in Abhängigkeit identifizierter Einflussgrößen ist unbekannt. Die zur Durchführung einer Dimensionsanalyse notwendigen Einflussgrößen können anhand der Parameterstudien in Kapitel 7 abgeleitet werden. Hierfür sollen zunächst einige relevante Begriffe eingeführt und voneinander abgegrenzt werden.

8.2.1 Begrifflichkeiten

Für die Durchführung einer Dimensionsanalyse ist es wichtig, zunächst zwischen einer *physikalischen Größe*, ihrer *Dimension* sowie der entsprechenden *Einheit* zu differenzieren. Eine physikalische Größe j setzt sich dabei aus

- einem Zahlenwert, ausgedrückt als $\{j\}$,
- einer Dimension, ausgedrückt als $[j]$
- und einer Einheit, ausgedrückt als (j)

zusammen. Eine physikalische Größe ist eine eindeutig bestimmte, messbare Eigenschaft eines Objekts oder einer Erscheinung, anhand derer physikalische Vorgänge beschrieben werden können. Als Beispiel einer physikalischen Größe j kann $l = 10 \text{ m}$ dienen. Es gilt $\{j\} = 10$, $[j] = L$ und $(j) = \text{m}$, wobei L die Abkürzung

für die Dimension einer Länge ist. Es existieren sowohl Basisdimensionen als auch abgeleitete Dimensionen. Als Basisdimensionen bezeichnet man in der Mechanik bspw. die Dimensionen LÄNGE [L], ZEIT [T] oder MASSE [M]. Daraus abgeleitete Größen wie bspw. die Geschwindigkeit besitzen die abgeleitete Dimension $[LT^{-1}]$ (Herwig 2016).

8.2.2 Das Pi-Theorem der Dimensionsanalyse

Die Methode der Dimensionsanalyse basiert auf dem 1914 von Egard Buckingham publizierten Buckingham Pi-Theorem (Buckingham 1914). Die Voraussetzung für die Anwendung des Pi-Theorems nach Buckingham ist die Kenntnis des Modells zur Beschreibung eines physikalischen Problems sowie die zugehörigen Größen, die dieses Problem beeinflussen (*Einflussgrößen*). Ist diese Voraussetzungen erfüllt, kann das Pi-Theorem angewendet werden (Herwig 2016).

Zur Erläuterung des Pi-Theorem nach Buckingham soll davon ausgegangen werden, dass sich die Lösung eines physikalischen Problems über n voneinander unabhängige Einflussgrößen a_1, a_2, \dots, a_n mit insgesamt k Basisdimensionen über Gl. 8.1 darstellen lässt.

$$f(a_1, a_2, \dots, a_n) = 0 \quad (8.1)$$

Es gilt, dass Gl. 8.1 durch $n - k$ dimensionslose und voneinander unabhängige, dimensionslose Kennzahlen $\Pi_1, \Pi_2, \dots, \Pi_{n-k}$ in der Form

$$F(\Pi_1, \Pi_2, \dots, \Pi_{n-k}) = 0 \quad (8.2)$$

ausgedrückt werden kann. Hierfür gelten die folgenden Voraussetzungen:

- Neben Gl. 8.1 besteht kein funktionaler Zusammenhang zwischen den Einflussgrößen a_1, a_2, \dots, a_n anhand dessen die Anzahl n reduziert werden könnte.
- Gl. 8.1 ist unabhängig von den Einheiten, in denen a_1, a_2, \dots, a_n angegeben werden. Gl. 8.1 kann somit als dimensionshomogen bezeichnet werden, da alle Terme dieselbe Dimension besitzen.

Die dimensionslosen Kennzahlen Π_i lassen sich durch eine iterative Kombination der identifizierten Einflussgrößen bilden, indem aus diesen Potenzprodukte gebildet werden. Das Pi-Theorem sagt lediglich etwas über die Anzahl der dimensionslosen Kennzahlen aus und nicht darüber, wie sich diese zusammensetzen oder welcher Zusammenhang zwischen ihnen existiert (Herwig 2016).

8.2.3 Modellbildung und Ermittlung dimensionsloser Kennzahlen

Die Identifikation und Definition aller relevanten Einflussgrößen, die zur Beschreibung eines vorliegenden, physikalischen Problems benötigt werden, stellt den zentralen Schritt der Dimensionsanalyse dar. Das betrachtete Problem muss daher in ausreichender Weise bekannt sein, damit der Einfluss einer physikalischen Größe bewertet werden kann. Es ist in diesem Zusammenhang zweckmäßig, möglichst nur die Einflussgrößen auszuwählen, die einen relevanten Einfluss auf das Ergebnis haben. Alle relevanten Einflussgrößen können in einer dimensionsanalytischen Relevanztafel zusammengefasst werden. Hierzu zählen neben der zu beschreibenden Größe alle relevanten Geometrie- und Stoffkonstanten sowie alle sonstigen Konstanten, die einen signifikanten Einfluss auf das Ergebnis haben. Auf Grundlage der erarbeiteten Relevanztafel können die dimensionslosen Kennzahlen Π_i entwickelt werden. Die Zusammensetzung der dimensionslosen Kennzahlen ist frei wählbar, weshalb sich verschiedene Lösungen einer Dimensionsanalyse erzeugen lassen. Die einzelnen dimensionslosen Kennzahlen dürfen sich allerdings nicht ineinander überführen lassen.

Für die Ermittlung komplexerer Zusammenhänge bietet sich das Aufstellen einer Dimensionsmatrix an. Hierbei findet eine formale Ermittlung der Potenzen statt, mit denen die Einflussgrößen a_i in einer dimensionslosen Kennzahl Π_i enthalten ist. Diese Form der Bestimmung der dimensionslosen Kennzahlen ist jedoch häufig sehr aufwendig. Alternativ können die Kennzahlen über ein iteratives Kombinieren verschiedener Einflussgrößen bestimmt werden. Dieses Verfahren eignet sich insbesondere dann, wenn lediglich Einflussgrößen vorliegen, die sich ausschließlich aus einer der drei Basisdimensionen zusammensetzen. Konkret beginnt man mit einer Einflussgröße und kombiniert diese so lange mit weiteren Einflussgrößen, bis eine dimensionslose Kennzahl entsteht. Dieses Vorgehen

wird wiederholt, bis $n-k$ Kennzahlen vorliegen. Die konkrete Form der zu ermittelnden Kennzahlen ist dabei je nach Anwender der Dimensionsanalyse verschieden. Es ist zweckmäßig, bei der Ermittlung der Kennzahlen auf bereits bestehende Kennzahlen zurückzugreifen, die bspw. in der Physik (Mach-Zahl, Ma) oder der Strömungsmechanik (Reynolds-Zahl, Re) existieren (Herwig 2016). Eine Interpretation von Kennzahlen wird zudem erleichtert, wenn diese vor dem Hintergrund physikalischer Zusammenhänge entwickelt werden (Müller 1964).

Der funktionale Zusammenhang der dimensionslosen Kennzahlen kann anhand von Versuchen ermittelt werden. Die erforderliche Versuchsanzahl ist dabei abhängig von den identifizierten Einflussgrößen und kann je nach Komplexität des zu ermittelnden Zusammenhangs sehr groß werden. Aus diesem Grund kann ein funktionaler Zusammenhang von Versuchsergebnissen alternativ durch iteratives Kombinieren der Einflussgrößen und Kennzahlen angenähert werden. Dieses Vorgehen ist insbesondere für einfachere Zusammenhänge praktikabel, für die bereits Erkenntnisse zum Einfluss der identifizierten Einflussgrößen bestehen. Für die Identifikation des funktionalen Zusammenhangs können die Kennzahlen beliebig kombiniert und potenziert werden. Es ist zweckmäßig die Kombination der Kennzahlen auf Grundlage bekannter Zusammenhänge aufzubauen. Ist bereits ein linearer oder quadratischer Einfluss einer Einflussgröße in Bezug auf die Zielgröße bekannt, kann dieser direkt in der Dimensionsanalyse berücksichtigt werden. Zudem sollte darauf geachtet werden, dass der funktionale Zusammenhang soweit wie möglich vereinfacht wird.

8.3 Dimensionsanalyse experimenteller Untersuchungen an geklebten Überlappverbindungen

8.3.1 Definition dimensionsbehafteter Einflussgrößen

Die Grundlage einer Dimensionsanalyse bildet die Definition der zur Beschreibung eines Vorgangs relevanten physikalischen Einflussgrößen. Die Analyse der Ergebnisse der experimentellen Untersuchung in Abschnitt 7.5.1 hat gezeigt, dass die Dämpfungseigenschaften geklebter Überlappverbindungen von der generellen Probekörperform, den sich daraus ergebenden, geometrischen Ab-

messungen der Klebschicht sowie den Randbedingungen der Beanspruchung abhängen. Die korrespondierenden physikalischen Größen der genannten Einflussfaktoren sind in Tabelle 8.1 zusammengefasst.

Tabelle 8.1: Physikalische Einflussgrößen zur Charakterisierung der Dämpfungseigenschaften geklebter Überlappverbindungen

Identifizierte Einflussgröße	Symbol	Dimension
Verlustfaktor	η	[1]
Klebschichtdicke	t_{KS}	[L]
Überlapplänge	$L_{\ddot{u}}$	[L]
Klebschichtbreite	B	[L]
Maximale Schubverformung der Klebschicht	u	[L]
Frequenz	f	$[T^{-1}]$
Zeit	t	[T]

Der Verlustfaktor hängt somit nur von den physikalischen Basisdimensionen Länge [L] und Zeit [T] ab und ist als zu beschreibende Zielgröße ebenfalls in der Relevanzliste enthalten. Eine Auswertung der Relevanzliste zeigt, dass der Verlustfaktor einer geklebten Überlappverbindung von insgesamt sechs weiteren Einflussgrößen abhängt. Hieraus folgt, dass die Funktion

$$f(t_{KS}, L_{\ddot{u}}, B, u, f, t, \eta) = 0 \tag{8.3}$$

zu bestimmen ist. Durch Anwendung des Pi-Theorems ergeben sich aus den insgesamt sieben Einflussgrößen sowie den zwei Basisdimensionen $7-2 = 5$ dimensionslose Kennzahlen. Durch Anschauung lassen sich die nachfolgend dargestellten dimensionslosen Kennzahlen Π_1 bis Π_5 ermitteln.

$$\Pi_1 = \eta \quad \Pi_2 = \frac{t_{KS}}{L_{\ddot{u}}} \quad \Pi_3 = \frac{u}{B} \quad \Pi_4 = \frac{u}{t_{KS}} = \gamma \quad \Pi_5 = f \times t$$

Der Verlustfaktor ist dimensionslos und kann demnach als eigenständige, dimensionslose Kennzahl Π_1 verwendet werden. Kennzahl Π_2 setzt sich aus der Klebschichtdicke t_{KS} der Überlapplänge $L_{\ddot{u}}$ zusammen und bildet somit einen in der Klebtechnik üblichen Verhältniswert zur Charakterisierung der maßgeben-

den Abmessungen der Klebschicht. Die bisher nicht berücksichtigte Klebschichtbreite B wird in Kennzahl Π_3 ins Verhältnis zur maximalen Schubverformung gesetzt. Die Geometrien der Klebschicht werden somit durch die Kennzahlen Π_2 und Π_3 berücksichtigt. Für die Ableitung von Kennzahl Π_4 wird eine in der Klebtechnik ebenfalls bekannte Kenngröße verwendet. Der Quotient aus der maximalen Schubverformung sowie der Klebschichtdicke ist bereits als dimensionslose Gleitung γ eingeführt und kann demnach im Rahmen der Dimensionsanalyse übernommen werden. Kennzahl Π_5 berücksichtigt abschließend die Prüffrequenz f sowie die jeweilige Versuchsdauer in Form der Zeit t . Das zu lösende Problem kann somit anhand von Gleichung 8.4 beschrieben werden.

$$F\left(\eta, \frac{t_{KS}}{L_{Ü}}, \frac{u}{B}, \gamma, f \times t\right) = 0 \quad (8.4)$$

Die explizite funktionale Abhängigkeit der definierten Kennzahlen ist nicht bekannt und muss über die Auswertung der Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen identifiziert werden.

8.3.2 Identifikation des funktionalen Zusammenhangs

Die Identifikation des funktionalen Zusammenhangs der abgeleiteten Kennzahlen Π_1 bis Π_5 erfolgt schrittweise. Zum einen kann so anschaulich dargestellt werden, welchen Einfluss die schrittweise Berücksichtigung der identifizierten Kennzahlen sowie die damit assoziierten Einflussgrößen auf die definierte Zielgröße haben. Zum anderen wird die Identifikation des funktionalen Zusammenhangs aller Kennzahlen durch ein schrittweises Vorgehen erleichtert.

Im ersten Schritt werden die Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen an mit dem Klebstoff EPH gefertigten Überlappverbindungen aus Abschnitt 7.5.1 in Abbildung 8.1 über dem Produkt der Kennzahlen Π_2 und Π_3 aufgetragen. Diese werden für eine übersichtlichere Darstellung mit dem Faktor 10^4 multipliziert. Es wird der in Gl. 8.5 dargestellte funktionale Zusammenhang unterstellt.

$$F\left(\eta, \frac{t_{KS}}{L_{Ü}} \times \frac{u}{B}\right) = F\left(\eta, \frac{t_{KS} \times u}{L_{Ü} \times B}\right) = 0 \quad (8.5)$$

Die dimensionslose Kennzahl, über der die Versuchsergebnisse aufgetragen werden, soll im Folgenden als Eingangsparameter bezeichnet werden. Diese Bezeichnung leitet sich daraus ab, dass der dimensionslose Kennwert als Grundlage für eine analytische Ermittlung der Dämpfungseigenschaften einer geklebten Verbindung für beliebige Geometrie- und Beanspruchungsrandbedingungen bestimmt werden muss.

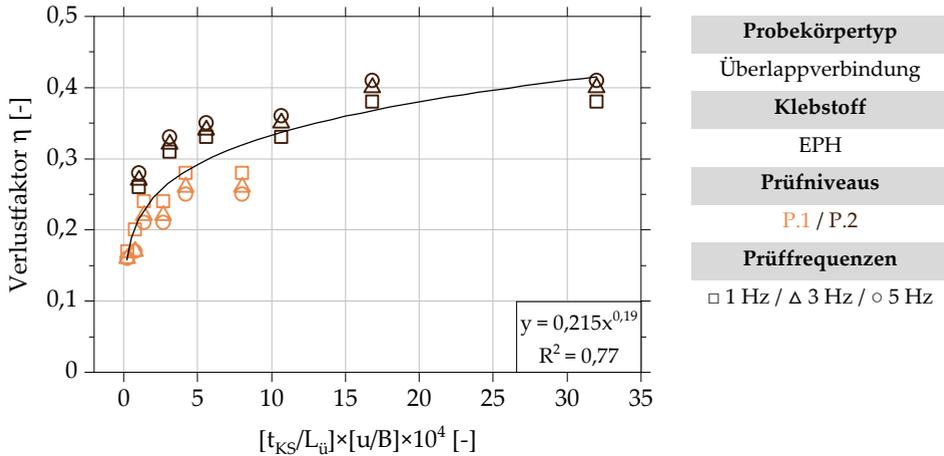


Abbildung 8.1: Dimensionslose Darstellung der Ergebnisse der experimentellen Untersuchung an mit dem Klebstoff EPH gefertigten Überlappverbindungen unter Berücksichtigung der dimensionslosen Kennzahlen Π_2 und Π_3

Die Auswertung in Abbildung 8.1 zeigt, dass sich identische Verlustfaktoren für verschiedene Eingangsparameter und vice versa ermitteln lassen, was auf eine nicht ausreichende Berücksichtigung aller relevanten Einflussgrößen zurückgeführt werden kann. Abbildung 8.1 zeigt darüber hinaus eine klare Abgrenzung der Versuchsergebnisse für die Prüfniveaus P.1 und P.2. Die Versuchsergebnisse in Prüfniveau P.2 liegen bei gleichem Eingangsparameter deutlich oberhalb derer in Prüfniveau P.1. Eine getrennte Betrachtung der Ergebnisse der einzelnen Prüfniveaus lässt jeweils einen exponentiellen Zusammenhang der Versuchsergebnisse erkennen. Es kann daher davon ausgegangen werden, dass der Einfluss der Klebschichtabmessungen durch den funktionalen Zusammenhang in Gl. 8.5 ausreichend genau beschrieben wird. Die angegebene Regression aller Versuchsergebnisse in Form einer Exponentialfunktion hat ein Bestimmtheitsmaß von

$R^2 = 0,77$. Die Güte der Regression soll im Folgenden durch eine Berücksichtigung der maximalen Gleitung der Klebschicht, der Prüffrequenz sowie deren wechselseitige Beeinflussung untereinander erhöht werden.

Auf Grundlage der bisherigen Erkenntnisse wird der funktionale Zusammenhang in Gl. 8.5 im nächsten Schritt um den Einfluss der Gleitung der Klebschicht erweitert. Hierfür wird Π_4 in den dimensionslosen Eingangsparemeter integriert. Der Verlauf des Einflusses der Gleitung im Bereich zwischen 2 % und 8 % kann auf Grundlage der vorliegenden Versuchsergebnisse nicht zweifelsfrei bestimmt werden. Es zeigt sich jedoch, dass der Verlustfaktor mit steigender Gleitung der Klebschicht zunimmt. Aus diesem Grund wird als erste Näherung ein linearer Einfluss der Gleitung angenommen. Hierdurch wird zudem das Ziel der Entwicklung eines einfachen, ingenieurmäßigen Zusammenhangs verfolgt.

Der dimensionslose Eingangsparemeter wird unter der Annahme eines linearen Zusammenhangs zwischen der maximalen Gleitung der Klebschicht und dem Verlustfaktor entsprechend Gl. 8.6 erweitert.

$$F\left(\eta, \frac{t_{KS}}{L_{\bar{u}}} \times \frac{u}{B} \times \gamma\right) = F\left(\eta, \frac{t_{KS} \times u}{L_{\bar{u}} \times B} \times \gamma\right) = 0 \quad (8.6)$$

Wird die dimensionslose Gleitung γ durch die identifizierten Einflussgrößen ausgedrückt, kann Gl. 8.6 wie folgt vereinfacht werden:

$$F\left(\eta, \frac{t_{KS}}{L_{\bar{u}}} \times \frac{u}{B} \times \frac{u}{t_{KS}}\right) = F\left(\eta, \frac{u^2}{L_{\bar{u}} \times B}\right) = 0 \quad (8.7)$$

Die Einflussgröße der Klebschichtdicke ist somit nicht mehr direkt im funktionalen Zusammenhang enthalten. Allerdings ist das Klebschichtdickenverhältnis indirekt in der aufgetragenen Schubverformung enthalten. Es gilt:

$$u = \gamma \times t_{KS} \quad (8.8)$$

Aus Gründen der Nachvollziehbarkeit soll auf eine Vereinfachung des funktionalen Zusammenhangs verzichtet werden. In Abbildung 8.2 werden die Versuchsergebnisse über dem in Gl. 8.6 dargestellten dimensionslosen Eingangsparemeter aufgetragen. Der dimensionslose Eingangsparemeter wird hierbei erneut mit dem Faktor 10^4 multipliziert. Durch die Berücksichtigung der maximalen Gleitung zeigt sich ein optimierter funktionaler Zusammenhang der Versuchser-

gebnisse. Die Ergebnisse in Prüfniveau P.1 liegen erwartungsgemäß in der linken Hälfte des Diagramms. Demgegenüber orientieren sich die Ergebnisse mit steigender Gleitung zunehmend entlang der x-Achse nach rechts. Zur Auswertung der Güte des in Gl. 8.6 unterstellten funktionalen Zusammenhangs ist in Abbildung 8.2 zusätzlich eine Regressionskurve als Exponentialfunktion dargestellt. Das Bestimmtheitsmaß der angegebenen Exponentialfunktion liegt bei $R^2 = 0,94$ und bestätigt somit die Beobachtung, dass der funktionale Zusammenhang der Versuchsergebnisse durch die lineare Berücksichtigung der maximalen Gleitung deutlich besser approximiert werden kann. Nicht dokumentierte Untersuchungen zeigen, dass die Annäherung des funktionalen Zusammenhangs durch eine Variation des Exponenten von Kennzahl Π_4 zwischen 0,75 und 2 nicht verbessert werden kann.

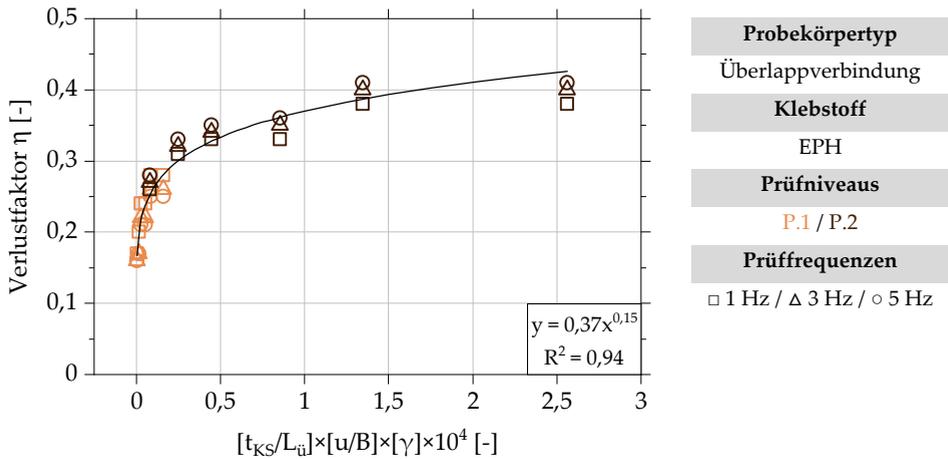


Abbildung 8.2: Dimensionslose Darstellung der Ergebnisse der experimentellen Untersuchung an mit dem Klebstoff EPH gefertigten Überlappverbindungen unter Berücksichtigung der dimensionslosen Kennzahlen Π_2 , Π_3 und Π_4

Die Approximation des funktionalen Zusammenhangs der Versuchsergebnisse soll abschließend durch die Berücksichtigung der zeitbehafteten Einflussgrößen, die in Kennzahl Π_5 enthalten sind, weiter verbessert werden. Die Untersuchungen in Abschnitt 7.6.2 zeigen einen von der Klebschichtdicke unabhängigen Zusammenhang zwischen der maximalen Gleitung der Klebschicht und dem Einfluss der Prüffrequenz auf den Verlustfaktor. Der Einfluss der Prüffrequenz

ist bisher nur für die Gleitungen 2 % und 8 % bekannt. Die Erkenntnisse zum Einfluss der Prüffrequenz in Abhängigkeit des Gleitungs niveaus werden daher durch exemplarische Untersuchungen an Überlappverbindungskonfiguration C erweitert. Der Zusammenhang zwischen der Prüffrequenz und der maximalen Gleitung der Klebschicht im Bereich zwischen 2 % und 8 % wird anhand des in Abschnitt 7.2.3 beschriebenen Aufbaus dynamischer Versuche an Überlappverbindungen ermittelt. Das Gleitungs niveau wird dabei in 1 %-Schritten gesteigert. Die auf die Frequenz 1 Hz normierten Ergebnisse sind in Abbildung 8.3 für die beiden Überlappplängen 20 mm und 60 mm dargestellt.

Abbildung 8.3 zeigt für die beiden Überlappplängen einen annähernd identischen, linearen Einfluss der Prüffrequenz für alle untersuchten Gleitungen. Die Steigung gedachter Regressionsgeraden ist zunächst negativ. Mit steigendem Gleitungs niveau wird der Einfluss der Prüffrequenz zunehmend positiv. Die Steigung gedachter Regressionsgeraden wird positiv und nimmt mit zunehmender Gleitung zu. Aufgrund dieser Erkenntnisse wird der Ansatz verfolgt, die funktionale Abhängigkeit des Verlustfaktors von der Prüffrequenz über die von der Gleitung abhängige Steigung der Regressionsgeraden in der Dimensionsanalyse zu berücksichtigen.

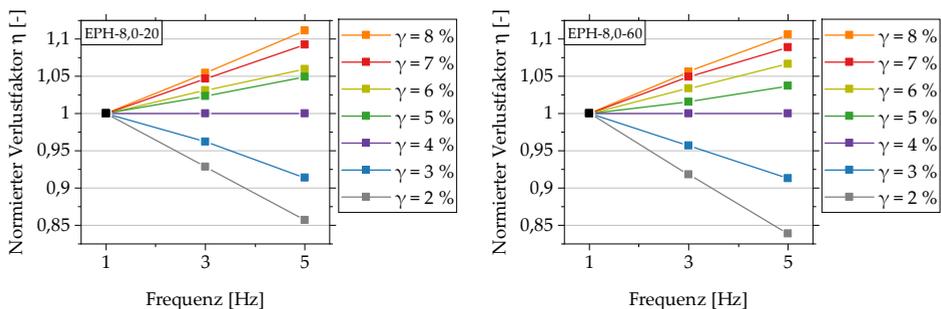


Abbildung 8.3: Analyse des funktionalen Zusammenhangs zwischen dem Gleitungs niveau und dem Einfluss der Prüffrequenz auf den Verlustfaktor im Bereich der Gleitung der Klebschicht von 2 % bis 8 % für Überlappverbindungskonfiguration C mit Überlappplänge 20 mm (links) und 60 mm (rechts); auf die Frequenz 1 Hz normierte Darstellung

Hierzu werden zunächst die Steigungen der linearen Regressionsgeraden der in Abbildung 8.3 dargestellten Versuchsergebnisse getrennt für jedes Gleitungsni-

veau ermittelt und in Abbildung 8.4 getrennt für die beiden untersuchten Überlappplängen über dem jeweiligen Wert der Gleitung aufgetragen. Die Mittelwertkurve kann durch die in Abbildung 8.4 dargestellte logarithmische Regressionskurve mit der angegebenen Funktionsgleichung angenähert werden.

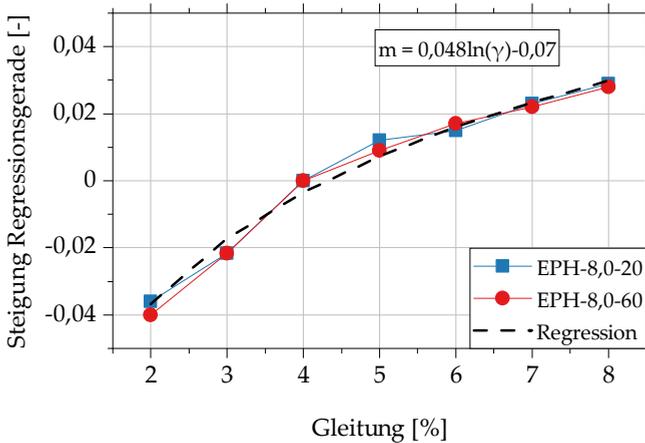


Abbildung 8.4: Steigung der Regressionsgeraden zur Beschreibung des Einflusses der Prüffrequenz auf die Dämpfungseigenschaften der mit dem Klebstoff EPH geklebten Überlappverbindungen in Abhängigkeit des Gleitungs-niveaus; Annäherung der experimentellen Daten durch eine logarithmische Regressionsfunktion

Mit Hilfe dieser Funktionsgleichung kann die Steigung der linearen Regressionsgeraden in Abhängigkeit der Gleitung ermittelt werden. Der dimensionslose Eingangsparameter in Gl. 8.6 kann unter Berücksichtigung der in Abbildung 8.4 dargestellten logarithmischen Regressionskurve um den Einfluss der zeit- bzw. frequenzabhängigen Klebstoffeigenschaften im Frequenzspektrum von 1 Hz bis 5 Hz erweitert werden. Der funktionale Zusammenhang zwischen der Prüffrequenz und dem Verlustfaktor wird ausgehend von der Frequenz 1 Hz formuliert. An dieser Stelle sei angemerkt, dass der in Abbildung 8.3 dargestellte Zusammenhang zwischen dem Gleitungs-niveau und dem Einfluss der Prüffrequenz auf den Verlustfaktor durch eine ermüdungsbedingte Schädigung der Klebschicht infolge zyklischer Beanspruchung zurückgeführt werden kann. Der Grad der Schädigung ist dabei abhängig von der Schwingspielzahl und muss daher auf Grundlage einer praktischen Anwendung ermittelt werden. Die in Abbildung 8.4 dargestellte Funktionsgleichung zur Beschreibung des Einflusses

der Prüffrequenz auf die Dämpfungseigenschaften der mit dem Klebstoff EPH geklebten Überlappverbindungen besitzt demnach keine Allgemeingültigkeit. Eine Übertragbarkeit ist durch experimentelle Untersuchungen nachzuweisen.

Die Änderung des Verlustfaktors $\Delta\eta$ infolge einer Erhöhung der Prüffrequenz kann basierend auf Abbildung 8.4 über Gl. 8.9 berechnet werden. Sie ergibt sich aus der vom Gleitniveau abhängigen Steigung der Regressionsgeraden m und der Zunahme der Frequenz. Im vorliegenden Fall wird die Referenzfrequenz auf Grundlage von Abbildung 8.3 konstant zu $f_{ref} = 1$ Hz festgelegt.

$$m = \frac{\Delta\eta}{(f-f_{ref})t} = \frac{\Delta\eta}{\Delta f \times t} \rightarrow \Delta\eta = m \times \Delta f \times t \quad (8.9)$$

Der funktionale Zusammenhang der Kennzahlen Π_2 bis Π_5 kann unter Berücksichtigung von Gl. 8.9 wie folgt erweitert werden:

$$F\left(\eta, \frac{t_{KS} \times u}{L_{Ü} \times B} \times \gamma \times (1 + m \times \Delta f \times t)\right) = 0 \quad (8.10)$$

In Abbildung 8.5 sind die Versuchsergebnisse über dem in Gl. 8.10 dokumentierten, funktionalen Zusammenhang aufgetragen.

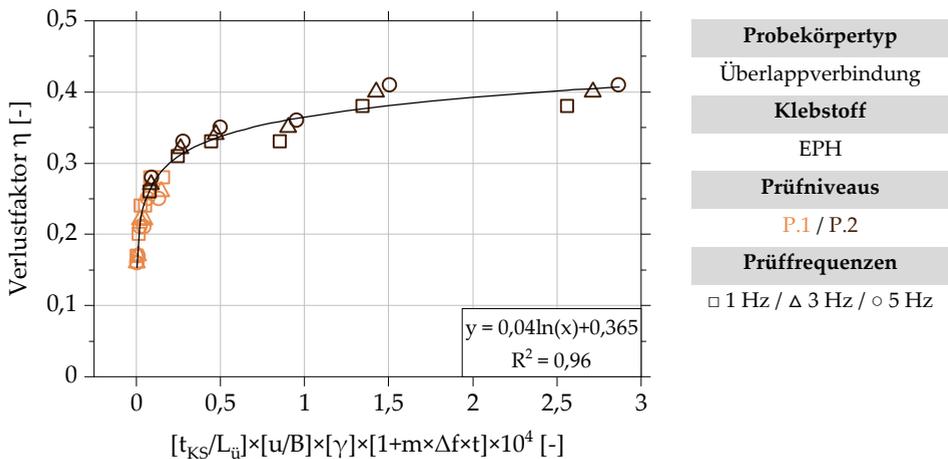


Abbildung 8.5: Dimensionslose Darstellung der Ergebnisse der experimentellen Untersuchung an mit dem Klebstoff EPH gefertigten Überlappverbindungen unter Berücksichtigung der dimensionslosen Kennzahlen Π_2 , Π_3 , Π_4 und Π_5

Der funktionale Zusammenhang aller Versuchsergebnisse kann durch die Berücksichtigung aller identifizierten Einflussgrößen optimiert und durch die in Abbildung 8.5 dokumentierte logarithmische Regressionsfunktion mit einem Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 0,96$ mit sehr guter Genauigkeit angenähert werden. Dabei muss beachtet werden, dass der Verlustfaktor im Bereich des Eingangsparameters zwischen 0 und 0,25 sehr sensitiv auf eine Änderung des Eingangsparameters reagiert. Aus diesem Grund sollte im Rahmen einer praktischen Anwendung stets die Möglichkeit einer abschnittsweisen Formulierung des funktionalen Zusammenhangs geprüft werden. Dadurch können Bereiche, in denen der Verlustfaktor sehr sensitiv auf eine Änderung des Eingangsparameters reagiert, feiner aufgelöst dargestellt werden, wodurch die Genauigkeit der analytischen Auswertung verbessert wird.

Eine Darstellung der nach Prüffrequenz getrennten Versuchsergebnisse für den in Gl. 8.10 dokumentierten, funktionalen Zusammenhang kann dem Anhang (Abbildung A.23 bis Abbildung A.25) entnommen werden.

8.4 Dimensionsanalyse experimenteller Untersuchungen an geklebten Kreishohlprofilsteckverbindungen

8.4.1 Definition dimensionsbehafteter Einflussgrößen

Die Definition der dimensionslosen Einflussgrößen findet für die KHP-Steckverbindung analog zur Überlappverbindung auf Grundlage der in Abschnitt 7.5.2 dokumentierten Versuchsergebnisse statt. Die identifizierten Größen, die die Dämpfungseigenschaften der KHP-Steckverbindung beeinflussen, sind in Tabelle 8.2 zusammengefasst. Studien zum Einfluss der untersuchten Parameter haben gezeigt, dass die Dämpfungseigenschaften der geklebten KHP-Steckverbindung ebenfalls von den geometrischen Abmessungen der Klebschicht sowie den Beanspruchungsrandbedingungen abhängen. Es können daher nahezu identische Einflussgrößen identifiziert werden. Lediglich die Breite der Überlappverbindung wird durch den mittleren Umfang der zylindrischen Klebschicht U_m ersetzt, durch die der Einfluss der Klebschichtbreite berücksichtigt wird.

Tabelle 8.2: Physikalische Einflussgrößen zur Charakterisierung der Dämpfungseigenschaften geklebter KHP-Steckverbindungen

Identifizierte Einflussgröße	Symbol	Dimension
Verlustfaktor	η	[1]
Klebschichtdicke	t_{KS}	[L]
Überlapplänge	$L_{\ddot{u}}$	[L]
Mittlerer Umfang der Klebschicht	U_m	[L]
Maximale Schubverformung der Klebschicht	u	[L]
Frequenz	f	$[T^{-1}]$
Zeit	t	[T]

Der Verlustfaktor einer geklebten KHP-Steckverbindung hängt im vorliegenden Fall von insgesamt sechs Einflussgrößen ab, weshalb sich das zu lösende Problem über folgende Gleichung ausdrücken lässt:

$$f(t_{KS}, L_{\ddot{u}}, U_m, u, f, t, \eta) = 0 \quad (8.11)$$

Aus den insgesamt sieben Einflussgrößen sowie den zwei Basisdimensionen lassen sich auf Grundlage des Pi-Theorems $(7-2) = 5$ dimensionslose Kennzahlen ableiten. Durch Anschauung ergeben sich die nachfolgend dargestellten Kennzahlen Π_1 bis Π_5 .

$$\Pi_1 = \eta \quad \Pi_2 = \frac{t_{KS}}{L_{\ddot{u}}} \quad \Pi_3 = \frac{U_m}{L_{\ddot{u}}} \quad \Pi_4 = \frac{u}{t_{KS}} = \gamma \quad \Pi_5 = f \times t$$

Die Kennzahlen Π_1 , Π_2 sowie Π_4 und Π_5 werden der Dimensionsanalyse der geklebten Überlappverbindung entnommen. Kennzahl Π_3 wird neu definiert und ist der Quotient aus dem Umfang der Klebschicht in Klebschichtmitte U_m und der Überlapplänge $L_{\ddot{u}}$. Das zu lösende Problem wird somit durch Gl. 8.12 beschrieben.

$$F\left(\eta, \frac{t_{KS}}{L_{\ddot{u}}}, \frac{U_m}{L_{\ddot{u}}}, \gamma, f \times t\right) = 0 \quad (8.12)$$

Die explizite funktionale Abhängigkeit der definierten Kennzahlen ist erneut unklar und wird analog zu Abschnitt 8.3.2 anhand der Auswertung der Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen identifiziert.

8.4.2 Identifikation des funktionalen Zusammenhangs

Zur Identifikation des funktionalen Zusammenhangs zwischen dem Verlustfaktor der KHP-Steckverbindungen sowie den dimensionslosen Kennzahlen wird analog zur Überlappverbindung ein schrittweises Vorgehen verfolgt. Im ersten Schritt wird der funktionale Zusammenhang der Versuchsergebnisse entsprechend Gl. 8.13 durch die Kennzahlen Π_2 und Π_3 zur Charakterisierung der Klebschichtgeometrie beschrieben.

$$F\left(\eta, \frac{t_{KS}}{L_{\ddot{u}}} \times \frac{U_m}{L_{\ddot{u}}}\right) = F\left(\eta, \frac{t_{KS} \times U_m}{L_{\ddot{u}}^2}\right) = 0 \tag{8.13}$$

Die Überlapplänge ist in Gl. 8.13 im Nenner in zweiter Potenz enthalten. Vor dem Hintergrund des großen Einflusses der Überlapplänge auf die Dämpfungseigenschaften der KHP-Steckverbindung erscheint dies plausibel. Die Versuchsergebnisse sind in Abbildung 8.6 über den in Gl. 8.13 angegebenen dimensionslosen Eingangsparemeter aufgetragen.

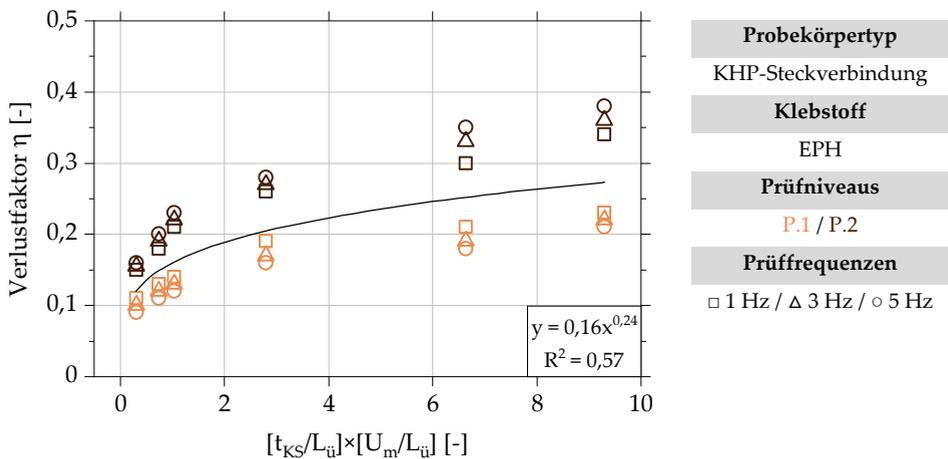


Abbildung 8.6: Dimensionslose Darstellung der Ergebnisse der experimentellen Untersuchung an mit dem Klebstoff EPH gefertigten KHP-Steckverbindungen unter Berücksichtigung der dimensionslosen Kennzahlen Π_2 und Π_3

Es zeigt sich, dass sich die Versuchsergebnisse in den einzelnen Prüfniveaus aufgrund des bisher nicht berücksichtigten Einflusses des Gleitniveaus

erwartungsgemäß übereinander anordnen. Darüber hinaus kann für die Ergebnisse getrennt nach Prüfniveau ein funktionaler Zusammenhang beobachtet werden, der durch eine Exponentialfunktion angenähert werden kann. Eine Regression aller Versuchsergebnisse durch die im Diagramm angegebene Exponentialfunktion besitzt ein Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 0,57$ und stellt daher im ersten Schritt lediglich eine grobe Näherung dar. Im Folgenden wird der funktionale Zusammenhang um den Einfluss des Gleitungslevels durch die Berücksichtigung von Kennzahl Π_4 erweitert.

Analog zur Überlappverbindung wird für die KHP-Steckverbindung ebenfalls zunächst ein linearer Zusammenhang zwischen dem Gleitungslevel und dem Verlustfaktor angenommen. Zudem werden erneut verschiedene Exponenten zur Optimierung des funktionalen Zusammenhangs untersucht. Hierbei zeigt sich, dass der funktionale Zusammenhang mit einer Gleitung mit einer Potenz von 1,5 sehr gut angenähert werden kann. Der funktionale Zusammenhang, der sich für eine lineare Berücksichtigung der Gleitung ergibt, ist in Abbildung A.26 sowie Abbildung A.27 im Anhang dokumentiert. Der funktionale Zusammenhang wird im Folgenden durch die Berücksichtigung von Kennzahl Π_4 entsprechend Gl. 8.14 erweitert.

$$F\left(\eta, \frac{t_{KS}}{L_{\bar{u}}} \times \frac{U_m}{L_{\bar{u}}} \times \gamma^{1,5}\right) = F\left(\eta, \frac{t_{KS} \times U_m}{L_{\bar{u}}^2} \times \gamma^{1,5}\right) = 0 \quad (8.14)$$

Der sich ergebende funktionale Zusammenhang zwischen dem Verlustfaktor und den Kennzahlen Π_2 bis Π_4 ist in Abbildung 8.7 dargestellt. Dieser kann gegenüber der Darstellung in Abbildung 8.6 deutlich optimiert werden. Die als Exponentialfunktion angegebene Regressionskurve weist ein hohes Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 0,97$ auf.

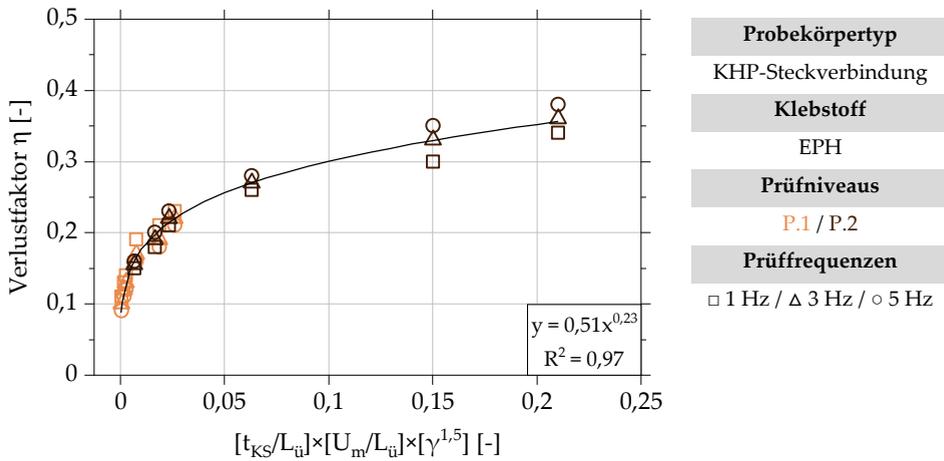


Abbildung 8.7: Dimensionslose Darstellung der Ergebnisse der experimentellen Untersuchung an mit dem Klebstoff EPH gefertigten KHP-Steckverbindungen unter Berücksichtigung der dimensionslosen Kennzahlen Π_2 , Π_3 und Π_4

Abschließend soll der Einfluss der Prüffrequenz in den funktionalen Zusammenhang integriert werden. Der Einfluss der Prüffrequenz auf die Dämpfungseigenschaften von Klebstoff EPH wurde bereits anhand der Ergebnisse der Überlappverbindung in Abschnitt 8.3.2 analysiert. Es wird zunächst davon ausgegangen, dass die identifizierte Funktionsgleichung zur Beschreibung des Einflusses der Prüffrequenz auf die Dämpfungseigenschaften der mit dem Klebstoff EPH geklebten Überlappverbindungen in Abhängigkeit des Gleitungsni- veaus auf die KHP-Steckverbindung übertragen werden kann. Die frequenzabhängigen Klebstoffeigenschaften werden daher im Folgenden analog für die Dimensionsanalyse der KHP-Steckverbindung übernommen. Dabei gelten die in Abschnitt 8.1.1 dokumentierten Hinweise zur Übertragbarkeit der Ergebnisse sowie die Ausführungen in Abschnitt 8.3.2 zum Einfluss einer ermüdungsbedingte Schädigung der Klebschicht.

Der funktionale Zusammenhang kann wie folgt geschrieben werden:

$$F \left(\eta, \frac{t_{KS} \times U_m}{L_{\ddot{u}}^2} \times \gamma^{1,5} \times (1 + m \times \Delta f \times t) \right) = 0 \quad (8.15)$$

In Abbildung 8.8 sind die Versuchsergebnisse über dem in Gl. 8.15 angegebenen, funktionalen Zusammenhang aufgetragen. Es zeigt sich, dass das Bestimm-

heitsmaß der Regressionsfunktion durch die Annahme einer Übertragbarkeit der in Abschnitt 8.3.2 identifizierten, frequenzabhängigen Klebstoffeigenschaften gegenüber der in Abbildung 8.7 dargestellten Regression nochmals optimiert werden kann ($R^2 = 0,98$). Der funktionale Zusammenhang der Versuchsergebnisse kann demnach durch den identifizierten, dimensionslosen Eingangparameter in sehr guter Näherung beschrieben werden. Aufgrund der Sensitivität des Verlustfaktors im Bereich kleiner Werte des Eingangsparmeters ist die Möglichkeit einer abschnittswisen Formulierung des funktionalen Zusammenhangs zu prüfen, um die Genauigkeit der analytischen Auswertung zu verbessern (vgl. Abschnitt 8.3.2).

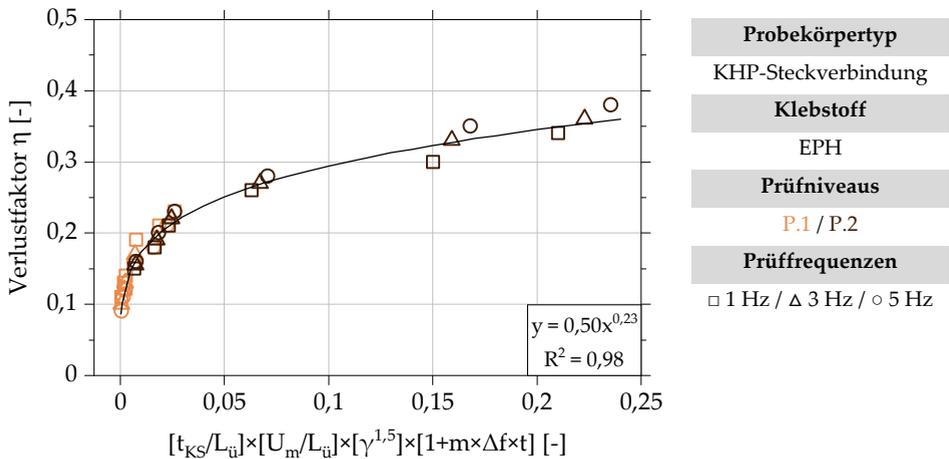


Abbildung 8.8: Dimensionslose Darstellung der Ergebnisse der experimentellen Untersuchung an mit dem Klebstoff EPH gefertigten KHP-Steckverbindungen unter Berücksichtigung der dimensionslosen Kennzahlen Π_2 , Π_3 , Π_4 und Π_5

Eine Darstellung der nach Prüffrequenz getrennten Versuchsergebnisse für den in Gl. 8.15 dokumentierten, funktionalen Zusammenhang kann dem Anhang entnommen werden.

8.5 Zusammenfassung

Die in diesem Kapitel dokumentierten Arbeiten zur Prognose der Dämpfungseigenschaften geklebter Verbindungen können wie folgt zusammengefasst werden:

- Die Ergebnisse experimenteller Hystereseversuche lassen sich für die beiden untersuchten Probekörpertypen anhand einer Dimensionsanalyse unter Verwendung aller relevanten Einflussgrößen in einem funktionalen Zusammenhang darstellen.
- Im Rahmen einer Regressionsanalyse können die funktionalen Zusammenhänge durch Regressionsfunktionen mit exponentiellem oder logarithmischem Ansatz in sehr guter Näherung beschrieben werden. Im Allgemeinen ist die Güte der Regressionsfunktionen abhängig von der Anzahl der im Eingangsparameter enthaltenen Einflussgrößen sowie deren Kombination untereinander.
- Die Kombination der Einflussgrößen kann auf Basis der Ergebnisse experimenteller Untersuchungen erfolgen. Anhand derer wird der Zusammenhang zwischen den Einflussgrößen und den daraus abgeleiteten, dimensionslosen Kennzahlen und dem Verlustfaktor identifiziert.
- Der funktionale Zusammenhang kann für beide Probekörpertypen durch die Berücksichtigung der Klebschichtgeometrie sowie des Beanspruchungsniveaus in guter Näherung beschrieben werden.
- Die Berücksichtigung des Einflusses der frequenzabhängigen Klebstoffeigenschaften ist für die Güte der abgeleiteten Regressionsfunktionen von untergeordneter Relevanz.
- Die funktionalen Zusammenhänge der Versuchsergebnisse können bei Berücksichtigung aller relevanten Einflussgrößen mit einem hohen Bestimmtheitsmaß größer 0,95 durch logarithmische bzw. exponentielle Regressionsfunktionen approximiert werden.
- Die entwickelte Methode zur Identifikation und Beschreibung funktionaler Zusammenhänge einer experimentellen Datenbasis kann die Grundlage zur analytischen Bestimmung der Dämpfungseigenschaften geklebter Verbindungen im Rahmen der Planung und rechnerischen Auslegung von Strukturen bilden.

9 Zusammenfassung und Ausblick

9.1 Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit umfasst numerische und experimentelle Untersuchungen zum Dämpfungsverhalten viskoelastischer Klebverbindungen. Einen wesentlichen Teil des originären Beitrags dieser Arbeit stellt die experimentelle Untersuchung der Dämpfungseigenschaften geklebter Überlapp- und Kreishohlprofilsteckverbindungen (KHP-Steckverbindungen) unter Variation von Geometrie- und Beanspruchungsrandbedingungen dar. Der Fokus der experimentellen Untersuchungen liegt auf Klebverbindungen mit schubbeanspruchten Klebschichten. Hierfür werden zunächst geeignete Klebstoffe ausgewählt, deren mechanische und dissipative Eigenschaften die spezifischen Anforderungen des Bauwesens erfüllen.

Die Entwicklung einer Methode zur Analyse und Identifikation funktionaler Zusammenhänge der Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen stellt einen weiteren wesentlichen originären Beitrag dieser Arbeit dar. Mit Hilfe der entwickelten Methode können die Dämpfungseigenschaften geklebter Verbindungen im Rahmen definierter Anwendungsgrenzen analytisch bestimmt werden. Das bildet die Grundlage für die Entwicklung weiterführender, analytischer Ansätze zur Berücksichtigung der Dämpfungseigenschaften geklebter Anschlüsse im Rahmen der praktischen Auslegung dynamisch beanspruchter, geklebter Stahlbaustrukturen.

Die wesentlichen Ergebnisse der vorliegenden Arbeit werden im Folgenden zusammengefasst:

Zu Beginn wird der für die vorliegende Arbeit relevante Stand der Technik zusammengefasst. Nach der Erarbeitung der Grundlagen der Kinematik von Ein- und Mehrfreiheitsgradschwingern sowie der Möglichkeiten zur Berücksichtigung von Dämpfung in der Modellbildung, wird auf das Fügeverfahren Kleben eingegangen. Auch wenn geklebte Anschlüsse im Stahlbau bisher selten realisiert wurden, existiert eine Vielzahl grundlegender Arbeiten insbesondere zur Bemessung der statischen Tragfähigkeit geklebter Verbindungen. Die Möglich-

keit zur Berücksichtigung der dissipativen Klebstoffeigenschaften im Rahmen der Auslegung von Strukturen wird in bisherigen Forschungsarbeiten nicht ausreichend untersucht.

Ein Überblick über veröffentlichte Forschungsarbeiten zu den dissipativen Eigenschaften von Klebstoffen und geklebten Verbindungen zeigt, dass sich diese primär auf die Entwicklung und Validierung analytischer Modelle zur Beschreibung der Dämpfungseigenschaften einfacher Probekörper im Kleinbauteilmaßstab beschränken. Die Erweiterung der Erkenntnisse auf realitätsnahe Probekörper sowie Strukturen mit einer beliebigen Anzahl geklebter Anschlüsse steht noch aus. Die Möglichkeit zur Optimierung dynamisch beanspruchter Strukturen durch die vorteilhaften Dämpfungseigenschaften viskoelastischer Klebverbindungen ist bisher weitestgehend ungeklärt. Diese Fragestellung umfasst sowohl die konstruktive Auslegung der geklebten Anschlüsse als auch die Auswirkungen lokaler Knotendämpfung auf das statische sowie das dynamische Strukturverhalten.

Die Erarbeitung und Analyse baupraktischer Randbedingungen sowie Anforderungen aus mechanischen und thermischen Beanspruchungen bilden die Voraussetzung zur Auswahl geeigneter Klebstoffe. Darüber hinaus werden Anforderungen an geklebte Verbindungen im Stahlbau berücksichtigt. Aufgrund der im Bauwesen üblichen und normativ zulässigen Maßtoleranzen sind Klebstoffe zu priorisieren, mit denen Dickschichtklebungen von mehreren Millimetern ausgeführt werden können.

Die Festlegung der Anforderungen an die statisch-mechanischen Klebstoffeigenschaften (Mindestklebstofffestigkeit, E-Modul) muss vor dem Hintergrund einer spezifischen Anwendung unter Beachtung sowohl statischer als auch dynamischer Erfordernisse erfolgen. Der Verlustfaktor der Klebstoffe sollte dabei oberhalb von 0,1 liegen. Sowohl für die Anforderungen an die Festigkeit als auch an die dissipativen Eigenschaften gilt der in Deutschland in (DIN EN 1991-1-5) sowie dem zugehörigen nationalen Anhang (DIN EN 1991-1-5/NA) vorgegebene Temperatureinsatzbereich der Klebstoffe von -24 °C bis $+67\text{ °C}$. Härtungsschrumpfungen sowie Kriechverformungen sollten sowohl konstruktiv als auch durch die Auswahl geeigneter Klebstoffe minimiert werden.

Auf Grundlage des erarbeiteten Anforderungsprofils können Klebstoffe für die Durchführung experimenteller Untersuchungen ausgewählt werden. Die Auswahl findet auf Basis der Analyse technischer Daten sowie einer umfassenden Charakterisierung der statischen und dynamischen Eigenschaften an Substanzproben statt. Im Anschluss werden die 2K-Klebstoffe EPH und PUR für die weiteren Untersuchungen ausgewählt. Die Klebstoffe EPH und PUR weisen aus baupraktischer Sicht eine hohe Steifigkeit und Festigkeit auf. Die definierten Anforderungen an die dissipativen Eigenschaften werden durch beide Klebstoffe erfüllt. Allerdings liegt die Glasübergangstemperatur des Klebstoffs PUR im normativ vorgegebenen Temperatureinsatzbereich. Aus diesem Grund steht der Klebstoff EPH im Fokus der Untersuchungen, die durch ausgewählte Ergebnisse mit dem Klebstoff PUR ergänzt werden.

Im Rahmen numerischer Untersuchungen wird das Potential geklebter Anschlüsse zur Optimierung des dynamischen Verhaltens von Stahlbaustrukturen mit einem oder mehreren geklebten Anschlüssen untersucht. Neben der Untersuchung verschiedener Schwingungsszenarien steht die Analyse des Einflusses von Geometrie- und Werkstoffparametern im Fokus der Untersuchungen. Im Vergleich zu einem geschweißten Referenzsystem können die Schwingungsamplituden in den betrachteten Szenarien der Anregung signifikant reduziert werden. Es besteht zudem eine große Abhängigkeit von der Steifigkeit und den dissipativen Eigenschaften des Klebstoffs sowie der Geometrie der Klebfuge. Die Eigenfrequenzen und -moden werden durch die Implementierung geklebter Anschlüsse vernachlässigbar beeinflusst.

In statischen Zugversuchen wird das Last-Verformungsverhalten geklebter Überlapp- und KHP-Steckverbindungen unter Variation der Klebfugenabmessungen ermittelt. Die Ergebnisse der statischen Zugversuche werden in eine Darstellung im Schubspannung-Gleitungs-Diagramm überführt. Anhand derer können zwei gleitungsbasierte Prüfniveaus zur Durchführung der dynamischen Versuche abgeleitet werden. In Prüfniveau P.1, in dem eine maximale Gleitung von 2 % festgelegt wird, liegt der Fokus der Untersuchungen auf einem Bereich mit geringen Deformationen der Klebschicht im annähernd linear-viskoelastischen Bereich. In Prüfniveau P.2 wird eine maximale Gleitung von 8 % vorgegeben. Hierdurch kann neben dem Einfluss einer generell höheren Gleit-

tung insbesondere für den Klebstoff EPH der zunehmende Einfluss von nichtlinear-viskoelastischem Klebstoffverhalten analysiert werden.

Umfangreiche experimentelle Untersuchungen liefern Erkenntnisse über die Dämpfungseigenschaften geklebter Überlapp- und KHP-Steckverbindungen für Anwendungen im Stahlbau. Im Fokus steht der Klebstoff EPH. Die Dämpfungseigenschaften werden anhand des Verlustfaktors quantifiziert. Es werden sowohl Geometrie- als auch Beanspruchungsrandbedingungen variiert und deren Einfluss diskutiert. Die für die beiden untersuchten Probekörpertypen ermittelten Verlustfaktoren liegen zwischen 0,09 und 0,41. Dabei liegen 95 % der Verlustfaktoren deutlich über 0,10. Die Dämpfungseigenschaften werden stark durch die Klebfugegeometrie beeinflusst. Eine Erhöhung der Überlapplänge von 20 mm auf 60 mm führt in Abhängigkeit des Probekörpertyps sowie dessen Geometrie zu einer mittleren Abnahme des Verlustfaktors von 16 % (Überlappverbindung) bzw. 40 % (KHP-Steckverbindung). Demgegenüber resultiert eine Erhöhung der Klebschichtdicke von 2,5 mm auf 8,0 mm für beide Probekörpertypen in einem Anstieg des Verlustfaktors um ca. 40 %. Der Einfluss der Prüffrequenz ist abhängig von der maximalen Gleitung und von eher untergeordneter Relevanz. Demgegenüber zeigt sich ein deutlicher Anstieg des Verlustfaktors mit steigender maximaler Gleitung der Klebschicht. Exemplarische Analysen zum Einfluss des Klebstoffs zeigen, dass der Verlustfaktor der mit dem Klebstoff PUR geklebten Probekörper um mehr als den Faktor zwei über denen liegt, die mit dem Klebstoff EPH gefertigt werden. Die für den Klebstoff EPH ermittelten Zusammenhänge zwischen der Klebfugegeometrie sowie den klebstoffinhärenten Dämpfungseigenschaften werden für den Klebstoff PUR ebenfalls festgestellt.

Auf Grundlage der an bauteilähnlichen Probekörpern durchgeführten experimentellen Untersuchungen zu deren Dämpfungseigenschaften wird eine Methode zur Identifikation funktionaler Zusammenhänge der Versuchsergebnisse entwickelt. Hierzu werden Dimensionsanalysen durchgeführt. Zuvor identifizierte Einflussgrößen werden dabei in dimensionslosen Kennzahlen kombiniert, die anschließend auf Grundlage der Versuchsergebnisse zu einem dimensionslosen Eingangsparameter zusammengefasst werden. Durch ein Auftragen aller Versuchsergebnisse je Probekörpertyp über dem dimensionslosen Eingangsparameter lassen sich funktionale Zusammenhänge identifizieren, die durch Re-

gressionsfunktionen mit einem Bestimmtheitsmaß $R^2 > 0,95$ approximiert werden können.

Die entwickelte Methode ermöglicht es, die Dämpfungseigenschaften geklebter Verbindungen im Rahmen definierter Anwendungs- und Gültigkeitsgrenzen für verschiedene Klebfugegeometrien und Beanspruchungsrandbedingungen anhand der ermittelten Regressionsfunktionen analytisch zu bestimmen. Das bildet die Grundlage für die Entwicklung weiterführender, analytischer Ansätze zur Berücksichtigung der Dämpfungseigenschaften geklebter Anschlüsse im Rahmen der praktischen Auslegung von Strukturen.

9.2 Ausblick

In der vorliegenden Arbeit werden die Ergebnisse der experimentellen Ermittlung der Dämpfungseigenschaften geklebter, schubbeanspruchter Überlapp- und Kreishohlprofilsteckverbindungen im Bauteilmaßstab vorgestellt. Darüber hinaus wird eine Methode zur Identifikation der funktionalen Zusammenhänge der Versuchsergebnisse entwickelt. Diese stellt die Grundlage einer analytischen Prognose der Dämpfungseigenschaften geklebter Verbindungen dar.

Auf Basis bestehender Erkenntnisse sollten die Ergebnisse dieser Arbeit um folgende Untersuchungen erweitert werden:

Anhand numerischer Untersuchungen zum Potential der Dämpfung dynamisch beanspruchter Strukturen durch geklebte Anschlüsse kann festgestellt werden, dass sich der Spannungszustand der Klebschichten realitätsnaher Anschlüsse mehrheitlich aus einer Kombination aus Normal- und Schubspannungen zusammensetzt. Dynamisch-Mechanische-Analysen von Substanzproben in (Damm et al. 2022a) zeigen jedoch, dass die klebstoffinhärenten Dämpfungseigenschaften vom Anteil der Normal- und Schubspannungen in einer Klebschicht abhängen.

Die Deformationen einer Klebschicht, die während typischer Schwingungsszenarien auftreten, liegen häufig nicht mehr im linear-viskoelastischen Bereich. Bestehende Modelle zur Abschätzung der Dämpfung geklebter Verbindungen verlieren im Bereich der nichtlinearen Viskoelastizität ihre Gültigkeit (Damm et

al. 2022a). Darüber hinaus zeigen Untersuchungen zum Dämpfungsverhalten geklebter Verbindungen für größere Werte der Gleitung eine nichtlineare Veränderung der Dämpfungseigenschaften mit zunehmender Schwingungszahl (Khoshmanesh et al. 2020).

In Deutschland erfolgt die Bemessung realer Bauwerke unter Annahme einer hellen Bauwerksoberfläche auf Grundlage des in (DIN EN 1991-1-5; DIN EN 1991-1-5/NA) angegebenen Temperaturbereichs von -24 °C bis $+67\text{ °C}$. Die in der vorliegenden Arbeit dokumentierten, experimentellen Untersuchungen erfolgen ausschließlich bei Raumtemperatur. Dynamisch-Mechanische Analysen von Substanzproben zeigen allerdings eine große Abhängigkeit der Dämpfungseigenschaften der betrachteten Klebstoffe von der Umgebungstemperatur.

Demzufolge muss die experimentelle Datenbasis um die Ergebnisse der Untersuchung der Dämpfungseigenschaften von Klebschichten unter komplexen Beanspruchungszuständen sowie unter Variation der Temperatur erweitert werden. Darüber hinaus müssen bestehende Materialmodelle um den Bereich der nichtlinearen Viskoelastizität erweitert werden. Erarbeitete Untersuchungs- und Auswertemethoden können hierfür übernommen werden. Zudem muss geprüft werden, inwieweit weitere Umwelteinflüsse (bspw. Feuchtigkeit) einen Einfluss auf die Dämpfungseigenschaften geklebter Verbindungen haben können.

Literaturverzeichnis

Fachveröffentlichungen

Albiez, M. (2016): Zur statischen Tragfähigkeit geklebter Kreishohlprofilverbindungen im Stahlbau (Dissertation). Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe.

Albiez, M.; Damm, J.; Ummenhofer, T.; Ehard, H.; Schuler, C.; Kaufmann, M. et al. (2022a): Hybrid joining of jacket structures for offshore wind turbines – Validation under static and dynamic loading at medium and large scale. In: Engineering Structures 252, S. 113595.

Albiez, M.; Damm, J.; Ummenhofer, T.; Kaufmann, M.; Vallée, T.; Myslicki, S. (2022b): Hybrid joining of jacket structures for offshore wind turbines – Determination of requirements and adhesive characterisation. In: Engineering Structures 259, S. 114186.

Albiez, M.; Damm, J.; Ummenhofer, T.; Myslicki, S.; Vallée, T.; Ehard, H.; Schuler, C. (2021): Hohlprofilfachwerkstrukturen mit geklebten Strebenanschlüssen – Klebstreb (FOSTA P 1123, IGF Nr. 18969 N/1) Forschungsvereinigung Stahlanwendung e. V. (FOSTA), Düsseldorf (Abschlussbericht).

Albiez, M.; Vallée, T.; Fricke, H.; Ummenhofer, T. (2019a): Adhesively bonded steel tubes – Part I: Experimental investigations. In: International Journal of Adhesion and Adhesives 90, S. 199–210.

Albiez, M.; Vallée, T.; Ummenhofer, T. (2019b): Adhesively bonded steel tubes – Part II: Numerical modelling and strength prediction. In: International Journal of Adhesion and Adhesives 90, S. 211–224.

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.

ANSYS Inc. (2019): Mechanical APDL 2019 R3 – Element Reference. Online verfügbar unter www.ansyshelp.ansys.com.

Bachmann, H. (2004): "Lebendige" Fußgängerbrücken– eine Herausforderung. In: Bautechnik 81 (4), S. 227–236.

Bathe, K.-J.; Baig, M. M. I. (2005): On a composite implicit time integration procedure for nonlinear dynamics. In: Computers & Structures 83 (31-32), S. 2513–2524.

Blaß, H. J.; Sandhaas, C. (2016): Ingenieurholzbau – Grundlagen der Bemessung, Karlsruhe, Baden: KIT Scientific Publishing.

Bucak, Ö.; Hagl, A. (2006): Kleben im Bauwesen – gestern, heute, morgen – Allgemeine Übersicht und Ausblick auf die Forschung im Konstruktiven Glasbau an der Fachhochschule München (FHM). In: Stahlbau 75 (6), S. 499–507.

Buckingham, E. (1914): On Physically Similar Systems; Illustrations of the Use of Dimensional Equations. In: Phys. Rev. 4 (4), S. 345–376.

Castellaro, S.; Perricone, L.; Bartolomei, M.; Isani, S. (2016): Dynamic characterization of the Eiffel tower. In: Engineering Structures 126, S. 628–640.

Ciupack, Y.; Ledecy, L.; Pasternak, H.; Fischer, V.; Stammen, E.; Dilger, K. (2019a): Lebensdauer von zyklisch beanspruchten Klebverbindungen im Stahlbau – Teil 2: Untersuchungen zur Betriebsfestigkeitsprüfung einer Klebverbindung. In: Bauingenieur (94), 56-62.

Ciupack, Y.; Ledecy, L.; Pasternak, H.; Fischer, V.; Stammen, E.; Dilger, K. (2019b): Lebensdauer von zyklisch beanspruchten Klebverbindungen im Stahlbau – Teil 1: Einflüsse auf das Tragverhalten. In: Bauingenieur (94), S. 29–35.

da Silva, L.; das Neves, P. J.; Adams, R. D.; Spelt, J. K. (2009a): Analytical models of adhesively bonded joints—Part I – Literature survey. In: International Journal of Adhesion and Adhesives 29 (3), S. 319–330.

da Silva, L.; das Neves, P. J.; Adams, R. D.; Wang, A.; Spelt, J. K. (2009b): Analytical models of adhesively bonded joints—Part II – Comparative study. In: International Journal of Adhesion and Adhesives 29 (3), S. 331–341.

da Silva, L.; Öchsner, A.; Adams, R. D. (Hg.) (2018): Handbook of adhesion technology. Second edition, Cham, Switzerland: Springer.

- Damm, J.; Albiez, M. (2023): Damping Properties of Large-Scale Overlap Joints Bonded with Epoxy Hybrid Resin or Polyurethanes: Experimental Characterisation and Analytical Description. In: *Polymers* 15 (5), S. 1102.
- Damm, J.; Albiez, M.; Göddecke, J.; Meschut, G.; Ummenhofer, T. (2021a): Dämpfungseigenschaften geklebter Verbindungen - Potenzialanalyse und Klebstoffcharakterisierung – Potenzialanalyse und Klebstoffcharakterisierung. In: *Adhaes Kleb Dicht* 65 (9), S. 14–23.
- Damm, J.; Albiez, M.; Ummenhofer, T.; Göddecke, J.; Meschut, G.; Kötz, F.; Matzenmiller, A. (2022a): 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, Deutschland (Abschlussbericht).
- Damm, J.; Albiez, M.; Ummenhofer, T.; Kötz, F.; Matzenmiller, A. (2021b): Dämpfungseigenschaften geklebter Verbindungen – Simulation und Validierung an Bauteilversuchen. In: *Adhaes Kleb Dicht* 65 (10), S. 32–45.
- Damm, J.; Ummenhofer, T.; Albiez, M. (2022b): Influence of damping properties of adhesively bonded joints on the dynamic behaviour of steel structures: numerical investigations. In: *The Journal of Adhesion* 98 (7), S. 934–962.
- Damm, J.; Ummenhofer, T.; Albiez, M.; Göddecke, J.; Meschut, G.; Kötz, F.; Matzenmiller, A. (2023a): Experimental and numerical investigation of the damping properties of adhesively bonded tubular steel joints. In: *The Journal of Adhesion*.
- Damm, J.; Ummenhofer, T.; Göddecke, J.; Meschut, G.; Mergheim, J.; Steinmann, P. (2023b): Nichtlineares Dämpfungsverhalten geklebter Konstruktionen in Abhängigkeit der Schwingenspielzahl – Nichtlineare Dämpfung (Projektskizze zur Vorlage im „Gemeinschaftsausschuss Klebtechnik“).
- Dieterle, R. (1981): Modelle für das Dämpfungsverhalten von schwingenden Stahlbetonträgern im ungerissenen und gerissenen Zustand, Basel: Birkhäuser Basel.

Domininghaus, H.; Elsner, P.; Eyerer, P.; Hirth, T. (2012): *Kunststoffe*, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.

Fließbach, T. (2009): *Mechanik – Lehrbuch zur Theoretischen Physik I*. 6. Aufl., Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag.

Fojtík, R.; Novotný, T.; Skotnicova, I.; Stolárik, M.; Zdražilová, N.; Pinka, M. (2014): Dynamic Experimental Analysis of a Steel Bridge. In: AMR 1020, S. 215–220.

Frick, A.; Stern, C. (2017): *Einführung in die Kunststoffprüfung – Prüfmethoden und Anwendungen*, München: Hanser (Hanser-eLibrary).

Friedl, R.; Mangerig, R. (2020): Schwingungsverhalten ausgewählter Baukonstruktionen. In: *Stahlbau Kalender 2020: Neue Normung im Hochbau - Leichtbau* (22), S. 385–453.

Geisler, J. (2010): *Numerische und experimentelle Untersuchungen zum dynamischen Verhalten von Strukturen mit Fügestellen* (Dissertation). Technischen Fakultät der Universität Erlangen-Nürnberg, Erlangen.

Geiß, P. L.; Fritzsche, C.; Kleiner, F.; Peschka, M.; Rauscher, M.; Schmale, H. C.; Vogt, D. (2012): Kleben von Stahl und Edelstahl Rostfrei – Merkblatt 382. In: *Stahl-Informations-Zentrum*.

Göddecke, J.; Meschut, G.; Kötz, F.; Matzenmiller, A.; Damm, J.; Albiez, M. (2023): Experimental investigation and numerical modelling of the damping properties of technological bonded joints. In: *The Journal of Adhesion* (In submission).

Goland, M.; Reissner, E. (1944): The Stresses in Cemented Joints. In: *Journal of Applied* 1944, A17-A27.

Gunes, R.; Apalak, M. K.; Yildirim, M. (2011): Free Vibration Analysis of an Adhesively Bonded Functionally Graded Tubular Single Lap Joint. In: *The Journal of Adhesion* 87 (9), S. 902–925.

Gutierrez-Lemini, D. (2014): *Engineering viscoelasticity*, New York: Springer.

Habenicht, G. (2009): *Kleben – Grundlagen, Technologien, Anwendungen*. 6., aktualisierte Auflage, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg (VDI-Buch).

- He, S.; Rao, M. D. (1992a): Vibration analysis of adhesively bonded lap joint, part I – Theory. In: *Journal of Sound and Vibration* 152 (3), S. 405–416.
- He, S.; Rao, M. D. (1992b): Longitudinal Vibration and Damping Analysis of Adhesively Bonded Double-Strap Joints. In: *Journal of Vibration and Acoustics* 114 (3), S. 330–337.
- He, S.; Rao, M. D. (1992c): Vibration analysis of adhesively bonded lap joint, part II: Numerical solution. In: *Journal of Sound and Vibration* 152 (3), S. 417–425.
- He, X. (2012): Numerical and experimental investigations of the dynamic response of bonded beams with a single-lap joint. In: *International Journal of Adhesion and Adhesives* 37, S. 79–85.
- Herwig, H. (2016): *Strömungsmechanik*. 2. Auflage, Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden.
- Ingole, S. B.; Chatterjee, A. (2016): Vibration analysis of single lap adhesive joint – Experimental and analytical investigation. In: *Journal of Vibration and Control* 17 (10), S. 1547–1556.
- Jia, J. (2017): *Modern Earthquake Engineering*, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Jones, D. I. G. (2001): *Handbook of viscoelastic vibration damping*, Chichester: Wiley.
- Jung, S. S.; Lee, Y. B.; Jeon, B. S.; Shin, S. H. (2014): Measurement of the loss factor and the Young's modulus in structural steel by using a laser beam reflection method. In: *Journal of the Korean Physical Society* 65 (7), S. 1024–1027.
- Kasper, Y.; Albiez, M.; Ciupack, Y.; Geßler, A.; Ummenhofer, T.; Pasternak, H.; Feldmann, M. (2019): Einsatz von geklebten Kohlestoff-Faserverbundwerkstoffen zur Sanierung ermüdungsgeschädigter Stahlkonstruktionen (FASS) – Abschlussbericht zum IGF-Forschungsprojekts Nr. 19.032 B (DVS Nr. 09.072). Hg. v. DVS Media GmbH, Düsseldorf.
- Kasper, Y.; Albiez, M.; Ummenhofer, T.; Mayer, C.; Meier, T.; Choffat, F. et al. (2021): Application of toughened epoxy-adhesives for strengthening of fatigue-damaged steel structures. In: *Construction and Building Materials* 275, S. 121579.

Kaya, A.; Tekelioğlu, M. S.; Findik, F. (2004): Effects of various parameters on dynamic characteristics in adhesively bonded joints. In: *Materials Letters* 58 (27-28), S. 3451–3456.

Khoshmanesh, S.; Watson, S. J.; Zarouchas, D. (2020): Characterisation of fatigue damage in a thick adhesive joint based on changes in material damping. In: *J. Phys.: Conf. Ser.* 1618 (2), S. 22058.

Kollmann, F. G.; Schösser, T. F.; Angert, R. (2006): *Praktische Maschinenakustik*, Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag.

Lazan, B. J. (1953): Effect of Damping Constants and Stress Distribution on the Resonance Response of Members. In: *Journal of Applied Mechanics* 20 (2), S. 201–209.

Lazan, B. J. (1968): *Damping of materials and members in structural mechanics*, Oxford: Pergamon Press.

Li, Q. S.; Zhi, L.-H.; Tuan, A. Y.; Kao, C.-S.; Su, S.-C.; Wu, C.-F. (2011): Dynamic Behavior of Taipei 101 Tower: Field Measurement and Numerical Analysis. In: *J. Struct. Eng.* 137 (1), S. 143–155.

McAllister, T. P.; Sadek, F.; Gross, J. L.; Averill, J. D.; Gann, R. G. (2013): Overview of the Structural Design of World Trade Center 1, 2, and 7 Buildings. In: *Fire Technol* 49 (3), S. 587–613.

Möser, M.; Kropp, W. (2009): *Körperschall – Physikalische Grundlagen und technische Anwendungen*. 3. aktualisierte Auflage 2010, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.

Müller, L. (1964): *Praktische Anwendungsanleitungen zur Dimensionsanalyse*. In: *Forsch Ing-Wes* 30 (6), S. 189–192.

Nagel, S.; Zieger, T.; Luhmann, B.; Knödel, P.; Ritter, J.; Ummenhofer, T. (2019): Erschütterungsemissionen von Windenergieanlagen. In: *Stahlbau* 88 (6), S. 559–573.

Niehues, K. K. (2015): *Identifikation linearer Dämpfungsmodelle für Werkzeugmaschinenstrukturen (Dissertation)*. Technische Universität München, München.

- Pall, A.; Shao, D.; Soli, B. (2006): Friction Dampers for Seismic Upgrade of A 14-Story Patient Tower With A 36-Foot Tall Soft-Story, San Francisco. Online verfügbar unter <http://www.palldynamics.com/pdf/Paper00901.pdf>, zuletzt geprüft am 12.08.2021.
- Paz, M.; Kim, Y. H. (2019): Structural Dynamics, Cham: Springer International Publishing.
- Petersen, C. (2013): Stahlbau: Grundlagen der Berechnung und baulichen Ausbildung von Stahlbauten. 4., vollst. überarb. Aufl., s.l.: Springer Fachmedien Wiesbaden.
- Petersen, C.; Werkle, H. (2017): Dynamik der Baukonstruktionen. 2. Auflage, Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden.
- Poon, D.; Shieh, S.-S.; Joseph, L.; Chang, C.-C. (2004): Structural Design of Taipei 101, the World's Tallest Building. Online verfügbar unter <https://global.ctbuh.org/resources/papers/download/1650-structural-design-of-taipei-101-the-worlds-tallest-building.pdf>, zuletzt geprüft am 10.08.2021.
- Rao, M. D. (2003): Recent applications of viscoelastic damping for noise control in automobiles and commercial airplanes. In: Journal of Sound and Vibration 262 (3), S. 457–474.
- Rao, M. D.; Zhou, H. (1994): Vibration And Damping Of A Bonded Tubular Lap Joint. In: Journal of Sound and Vibration 178 (5), S. 577–590.
- Samali, B.; Kwok, K. (1995): Use of viscoelastic dampers in reducing wind- and earthquake-induced motion of building structures. In: Engineering Structures 17 (9), S. 639–654.
- Sauer, B. (Hg.) (2016): Konstruktionselemente des Maschinenbaus 1 – Grundlagen der Berechnung und Gestaltung von Maschinenelementen. 9. Auflage, Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg (Springer-Lehrbuch).
- Skolaut, W. (2018): Maschinenbau, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.

Strogatz, S. H.; Abrams, D. M.; McRobie, A.; Eckhardt, B.; Ott, E. (2005): Theoretical mechanics – Crowd synchrony on the Millennium Bridge. In: *Nature* 438 (7064), S. 43–44.

Strømmen, E. N. (2014): *Structural Dynamics*, Cham: Springer International Publishing (2).

Sunder, S. S.; Gann, R. G.; Grosshandler, W. L.; Lew, H. S.; Bukowski, R. W.; Sadek, F. et al. (2005): Final report on the collapse of the World Trade Center towers, Gaithersburg, MD.

TD PUR (2020): Technisches Datenblatt – Körapur 842 Kömmerling Chemische Fabrik GmbH.

ThyssenKrupp Elevator (CENE) GmbH (2015): Testturm Rottweil – Neue Horizonte. Made by ThyssenKrupp. Hg. v. ThyssenKrupp Elevator (CENE) GmbH, Stuttgart. Online verfügbar unter https://www.nrwz.de/download/THYSS-15-015_Flyer_Testturm_8-Seiter_PRINT.pdf, zuletzt geprüft am 12.08.2021.

Ummenhofer, T.; Albiez, M.; Bucak, Ö.; Ehard, H.; Mayer, B.; Fricke, H. (2015): Geklebte Stahl-Stahlgussverbindungen am Beispiel von Fachwerkknoten von Rundhohlprofil-Konstruktionen – (FOSTA P 884, IGF Nr. 17199 N / 1) Forschungsvereinigung Stahlanwendung e. V. (FOSTA), Düsseldorf (Abschlussbericht).

Ummenhofer, T.; Boretzki, J.; Albiez, M. (2022): Hybrid connection technologies for hollow sections in steel construction. In: *Steel Construction* 15 (S1), S. 37–50.

Vallée, T.; Tannert, T.; Fecht, S. (2017): Adhesively bonded connections in the context of timber engineering – A Review. In: *The Journal of Adhesion* 93 (4), S. 257–287.

Vaziri, A.; Hamidzadeh, H. R.; Nayeb-Hashemi, H. (2005): Dynamic response of adhesively bonded single-lap joints with a void subjected to harmonic peeling loads. In: *Proceedings of the IMechE* 215 (4), S. 199–206.

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.

- 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.
- Vaziri, A.; Nayeb-Hashemi, H. (2006): Dynamic response of a repaired composite beam with an adhesively bonded patch under a harmonic peeling load. In: International Journal of Adhesion and Adhesives 26 (5), S. 314–324.
- Vaziri, A.; Nayeb-Hashemi, H.; Hamidzadeh, H. R. (2004): Experimental and Analytical Investigations of the Dynamic Response of Adhesively Bonded Single Lap Joints. In: J. Vib. Acoust. 126 (1), S. 84–91.
- Vervaeke, R.; Debruyne, S.; Vandepitte, D. (2019): Numerical and experimental analysis of vibration damping performance of polyurethane adhesive in machine operations. In: International Journal of Adhesion and Adhesives 90, S. 47–54.
- Volkersen, O. (1938): Die Nietkraftverteilung in zugbeanspruchten Nietverbindungen mit konstanten Laschenquerschnitten Luftfahrtforschung (15), S. 41–47.
- Wang, J.; Sun, D.; Liu, S.; Zhang, X. (2017): Damping Characteristics of Viscoelastic Damping Structure under Coupled Condition. In: MCA 22 (1), S. 27.
- Yaman, M.; Şansveren, M. F. (2021): Numerical and experimental vibration analysis of different types of adhesively bonded joints. In: Structures 34, S. 368–380.
- Yi, X.-S. (1988): Beitrag zum strukturabhängigen mechanischen Verhalten von Klebstoffschichten (Zugl.: Paderborn, Univ., Diss., 1986. Als Ms. gedr, Düsseldorf: DVS-Verl. (Schweißtechnische Forschungsberichte, 19).
- Zhou, H.; Rao, M. D. (1993): Viscoelastic analysis of bonded tubular joints under torsion. In: International Journal of Solids and Structures 30 (16), S. 2199–2211.

Technische Regelwerke

DIN 67544, November 1985: Zylindrische Maste für Lichtsignalanlagen – Maße: Beuth Verlag GmbH, Berlin.

DIN 8593-8, September 2003: Fertigungsverfahren Fügen – Teil 8: Kleben - Einordnung, Unterteilung, Begriffe: Beuth Verlag GmbH, Berlin.

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.

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.

DIN EN 1991-1-5, Dezember 2010: Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 1-5: Allgemeine Einwirkungen –Temperatureinwirkungen: Beuth Verlag GmbH, Berlin.

DIN EN 1991-1-5/NA, Dezember 2010: Nationaler Anhang - National festgelegte Parameter - Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 1-5: Allgemeine Einwirkungen –Temperatureinwirkungen: Beuth Verlag GmbH, Berlin.

DIN EN 1991-1-4, Dezember 2010: Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 1-4: Allgemeine Einwirkungen –Windlasten: Beuth Verlag GmbH, Berlin.

DIN EN 1993-1-1, Dezember 2010: Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten – Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau: Beuth Verlag GmbH, Berlin.

DIN EN 1991-1-4/NA, Dezember 2010: Nationaler Anhang - National festgelegte Parameter - Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 1-4: Allgemeine Einwirkungen –Windlasten: Beuth Verlag GmbH, Berlin.

DIN EN ISO 527-2, Juni 2012: Kunststoffe - Bestimmung der Zugeigenschaften – Teil 2: Prüfbedingungen für Form- und Extrusionsmassen: Beuth Verlag GmbH, Berlin.

DIN EN ISO 9513, Mai 2013: Metallische Werkstoffe – Kalibrierung von Längenänderungs -Messeinrichtungen für die Prüfung mit einachsiger Beanspruchung: Beuth Verlag GmbH, Berlin.

DIN EN 923, März 2016: Klebstoffe – Benennungen und Definitionen: Beuth Verlag GmbH, Berlin.

DIN EN ISO 7500-1, Juni 2018: Metallische Werkstoffe – Kalibrierung und Überprüfung von statischen einachsigen Prüfmaschinen – Teil 1: Zug- und Druckprüfmaschinen – Kalibrierung und Überprüfung der Kraftmesseinrichtung: Beuth Verlag GmbH, Berlin.

DIN EN 10058, Februar 2019: Warmgewalzte Flachstäbe aus Stahl und Breitflachstahl für allgemeine Verwendung – Maße, Formtoleranzen und Grenzabmaße: Beuth Verlag GmbH, Berlin.

DIN EN 10219-2, Juli 2019: Kaltgeformte geschweißte Hohlprofile für den Stahlbau – Teil 2: Grenzabmaße, Maße und statische Werte: Beuth Verlag GmbH, Berlin.

DIN EN 10210-2, Juli 2019: Warmgefertigte Hohlprofile für den Stahlbau – Teil 2: Grenzabmaße, Maße und statische Werte: Beuth Verlag GmbH, Berlin.

VDI 3830 Blatt 1, August 2004: Werkstoff- und Bauteildämpfung – Einteilung und Übersicht: Beuth Verlag GmbH, Berlin.

Anhang

Ergebnisse der Klebstoffcharakterisierung: Wahre Spannung-Wahre Dehnung-Diagramm des uniaxialen Zugversuchs an Substanzproben der Klebstoffe EPH und PUR

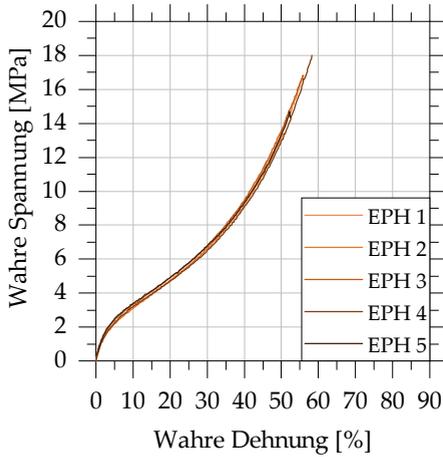


Abbildung A.1: Wahre Spannung-Wahre Dehnung-Diagramm des uniaxialen Zugversuchs an Substanzproben des Klebstoffs EPH

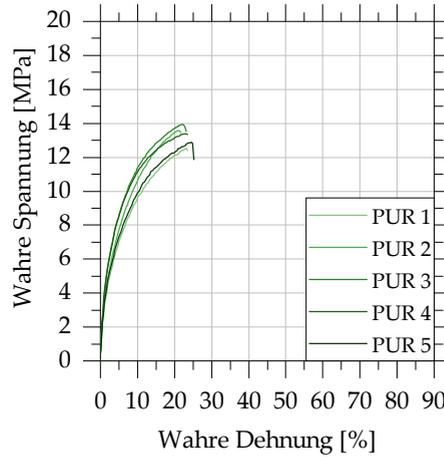


Abbildung A.2: Wahre Spannung-Wahre Dehnung-Diagramm des uniaxialen Zugversuchs an Substanzproben des Klebstoffs PUR

Klebtechnische Fertigung der KHP-Steckverbindungen

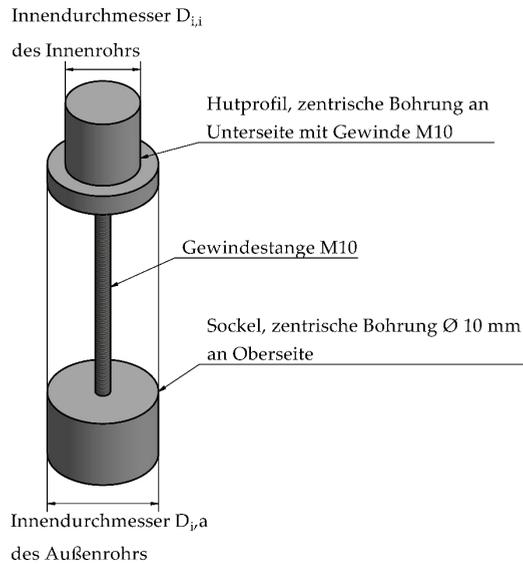


Abbildung A.3: Positionierungshilfe aus Sockel und Hutprofil mit dazwischenliegender Gewindestange zur Ausrichtung und Fixierung der Füge­teile während der klebtechnischen Fertigung der KHP-Steckverbindung

Exemplarische Versagens- und Bruchbilder der uniaxialen Zugversuche an geklebten Überlappverbindungen

Klebstoff EPH

EPH-2,5-20-1 und -2



EPH-8,0-20-1 und -2



Abbildung A.4: Zugversuche an geklebten Überlappverbindungen: Exemplarische Bruchbilder für die Konfigurationen A (oben) und C (unten) mit einer Überlapplänge von 20 mm; Klebstoff EPH

Klebstoff PUR**PUR-2,5-20-1 und -2****PUR-8,0-20-1 und -2**

Abbildung A.5: Zugversuche an geklebten Überlappverbindungen: Exemplarische Bruchbilder für die Konfigurationen A (oben) und C (unten) mit einer Überlapplänge von 20 mm; Klebstoff PUR

Exemplarische Versagens- und Bruchbilder der uniaxialen Zugversuche an geklebten KHP-Steckverbindungen

Klebstoff EPH

EPH-2,5-60



EPH-8,0-60



Abbildung A.6: Zugversuche an geklebten KHP-Steckverbindungen: Exemplarische Versagens- und Bruchbilder für die Konfiguration A (oben) und C (unten) mit einer Überlapp-länge von 60 mm; Klebstoff EPH

Klebstoff PUR**PUR-2,5-60****PUR-8,0-60**

Abbildung A.7: Zugversuche an geklebten KHP-Steckverbindungen: Exemplarische Versagens- und Bruchbilder für die Konfiguration A (oben) und C (unten) mit einer Überlapp-länge von 60 mm; Klebstoff PUR

Werkstoffgesetz des Klebstoffs EPH im numerischen Modell

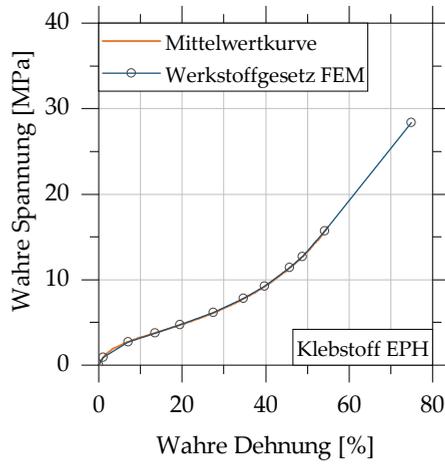


Abbildung A.8: Werkstoffgesetz des Klebstoffs EPH im numerischen Modell; Approximation der Mittelwertkurve der Ergebnisse von Zugversuchen an Substanzproben im Wahre Spannung-Wahre Dehnung-Diagramm durch einen mehrteiligen Polygonzug

Ergebnisse der Untersuchung des Einflusses der Überlapplänge auf die Dämpfungseigenschaften einer Überlappverbindung

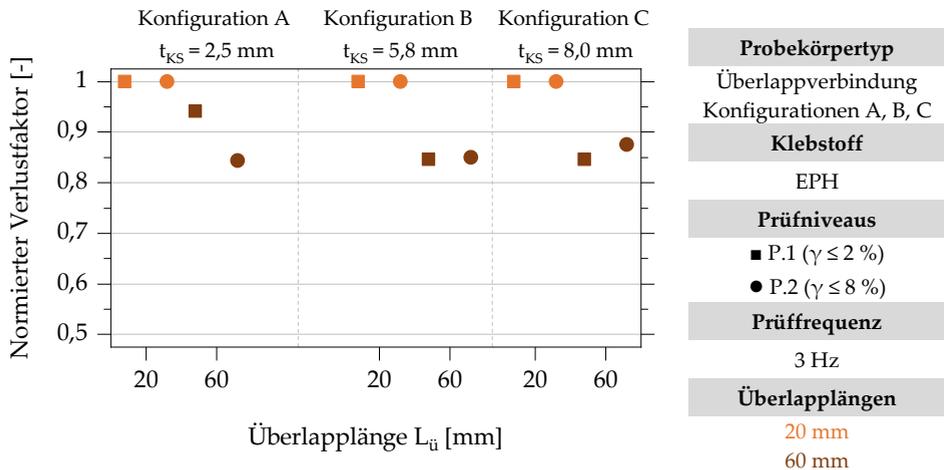


Abbildung A.9: Auswertung des Einflusses der Überlapplänge auf den Verlustfaktor der Überlappverbindungskonfigurationen A, B und C mit Überlapplängen 20 mm und 60 mm in den Prüfniveaus P.1 und P.2 für die Prüffrequenz 3 Hz; auf den Verlustfaktor der Probekörper mit Überlapplänge 20 mm normierte Darstellung

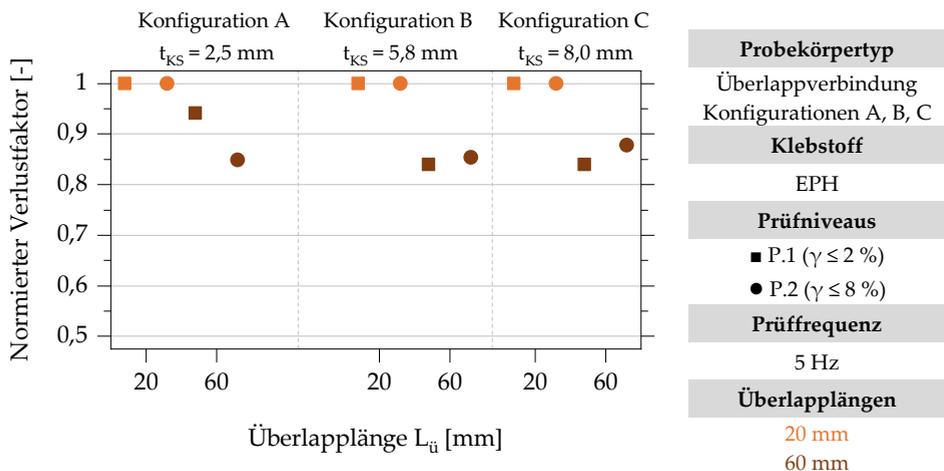


Abbildung A.10: Auswertung des Einflusses der Überlapplänge auf den Verlustfaktor der Überlappverbindungskonfigurationen A, B und C mit Überlapplängen 20 mm und 60 mm in den Prüfniveaus P.1 und P.2 für die Prüffrequenz 5 Hz; auf den Verlustfaktor der Probekörper mit Überlapplänge 20 mm normierte Darstellung

Ergebnisse der Untersuchung des Einflusses der Klebschichtdicke auf die Dämpfungseigenschaften einer Überlappverbindung

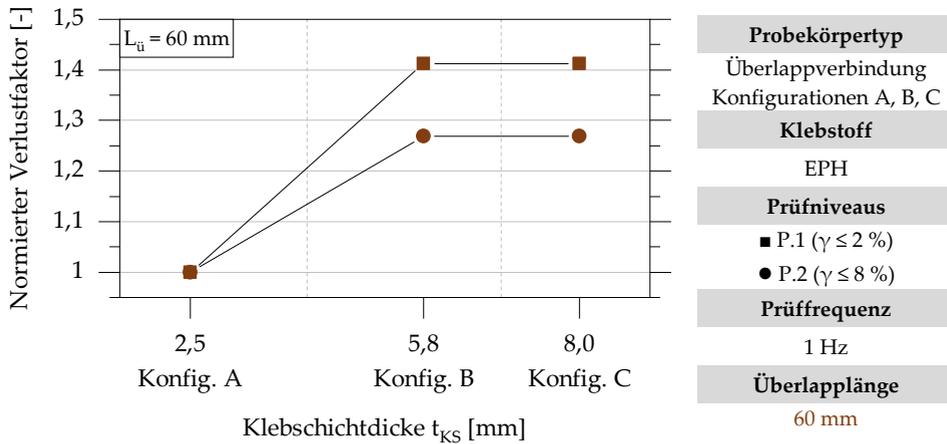


Abbildung A.11: Auswertung des Einflusses der Klebschichtdicke auf den Verlustfaktor der Überlappverbindungskonfigurationen A, B und C mit Überlapplänge 60 mm in den Prüfniveaus P.1 und P.2 für die Prüffrequenz 1 Hz; auf den Verlustfaktor von Konfiguration A mit Klebschichtdicke 2,5 mm normierte Darstellung

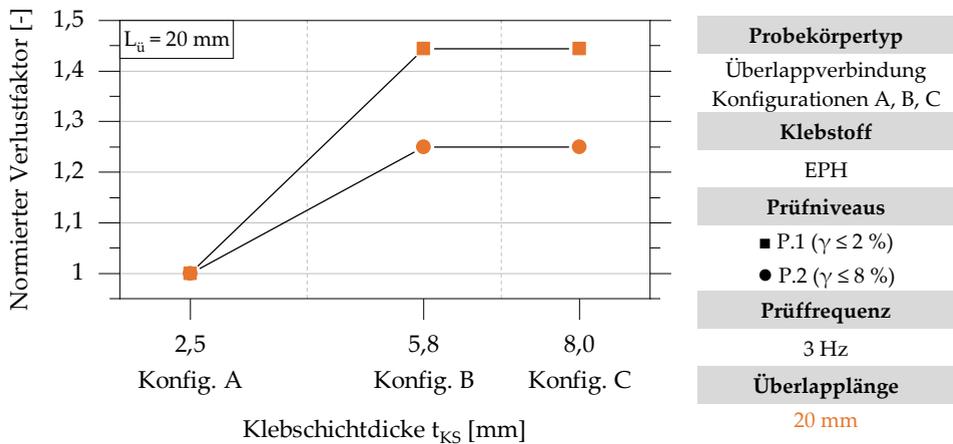


Abbildung A.12: Auswertung des Einflusses der Klebschichtdicke auf den Verlustfaktor der Überlappverbindungskonfigurationen A, B und C mit Überlapplänge 20 mm in den Prüfniveaus P.1 und P.2 für die Prüffrequenz 3 Hz; auf den Verlustfaktor von Konfiguration A mit Klebschichtdicke 2,5 mm normierte Darstellung

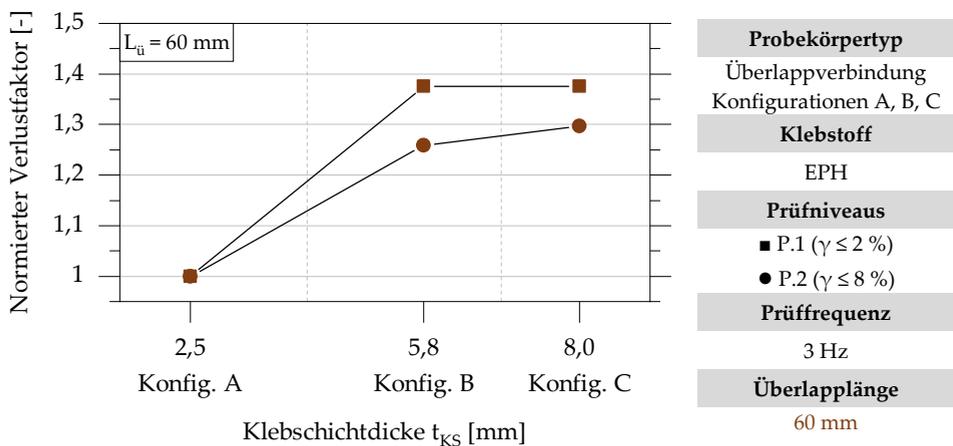


Abbildung A.13: Auswertung des Einflusses der Klebschichtdicke auf den Verlustfaktor der Überlappverbindungskonfigurationen A, B und C mit Überlapplänge 60 mm in den Prüfniveaus P.1 und P.2 für die Prüffrequenz 3 Hz; auf den Verlustfaktor von Konfiguration A mit Klebschichtdicke 2,5 mm normierte Darstellung

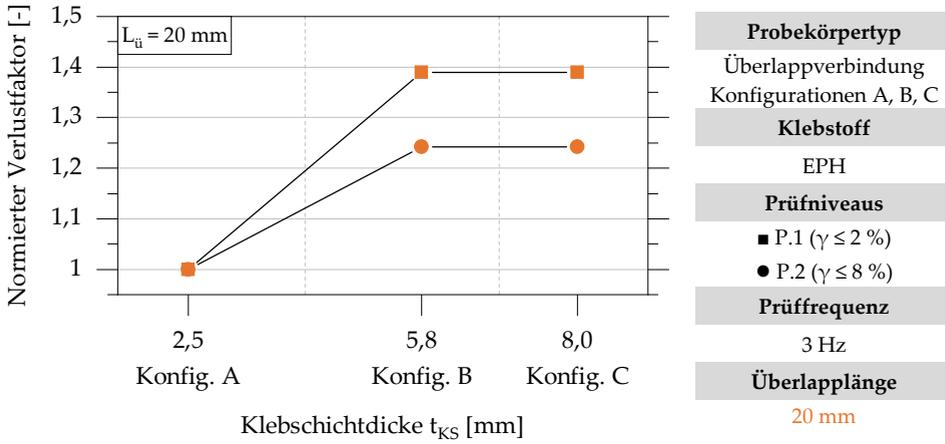


Abbildung A.14: Auswertung des Einflusses der Klebschichtdicke auf den Verlustfaktor der Überlappverbindungskonfigurationen A, B und C mit Überlapplänge 20 mm in den Prüfniveaus P.1 und P.2 für die Prüffrequenz 5 Hz; auf den Verlustfaktor von Konfiguration A mit Klebschichtdicke 2,5 mm normierte Darstellung

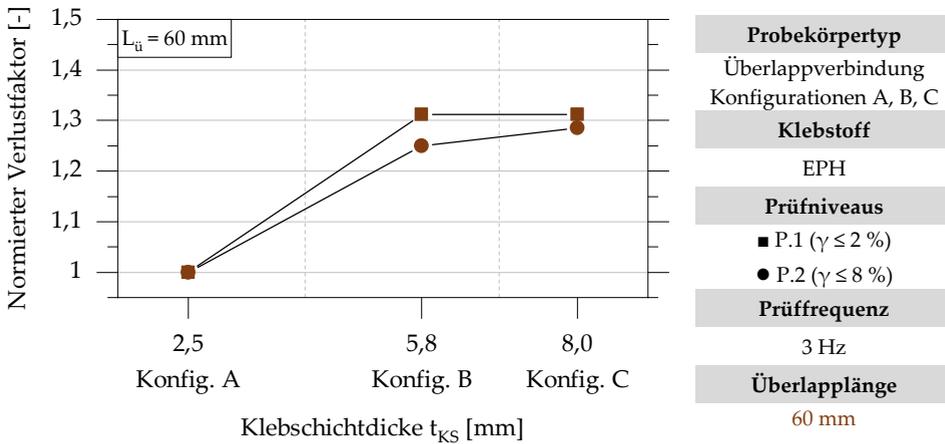


Abbildung A.15: Auswertung des Einflusses der Klebschichtdicke auf den Verlustfaktor der Überlappverbindungskonfigurationen A, B und C mit Überlapplänge 60 mm in den Prüfniveaus P.1 und P.2 für die Prüffrequenz 5 Hz; auf den Verlustfaktor von Konfiguration A mit Klebschichtdicke 2,5 mm normierte Darstellung

Ergebnisse der Untersuchung des Einflusses der Überlapplänge auf die Dämpfungseigenschaften einer KHP-Steckverbindung

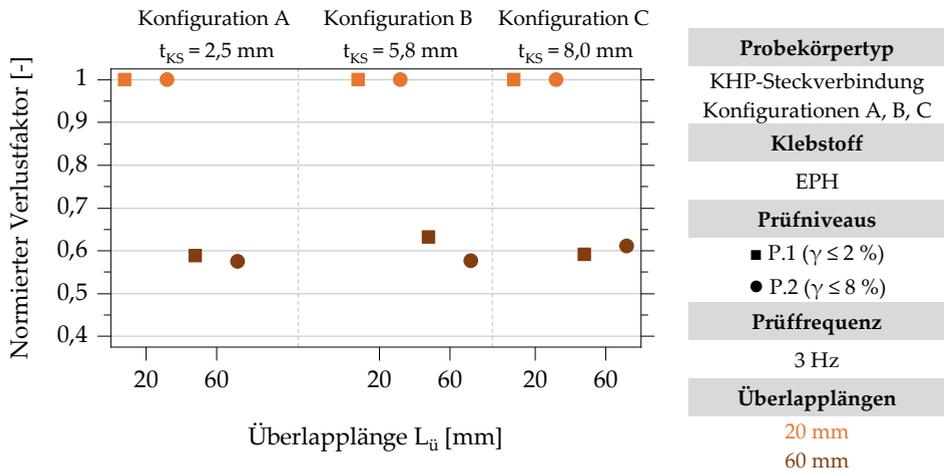


Abbildung A.16: Auswertung des Einflusses der Überlapplänge auf den Verlustfaktor der KHP-Steckverbindungskonfigurationen A, B und C mit Überlapplängen 20 mm und 60 mm in den Prüfniveaus P.1 und P.2 für die Prüffrequenz 3 Hz; auf den Verlustfaktor der Probekörper mit Überlapplänge 20 mm normierte Darstellung

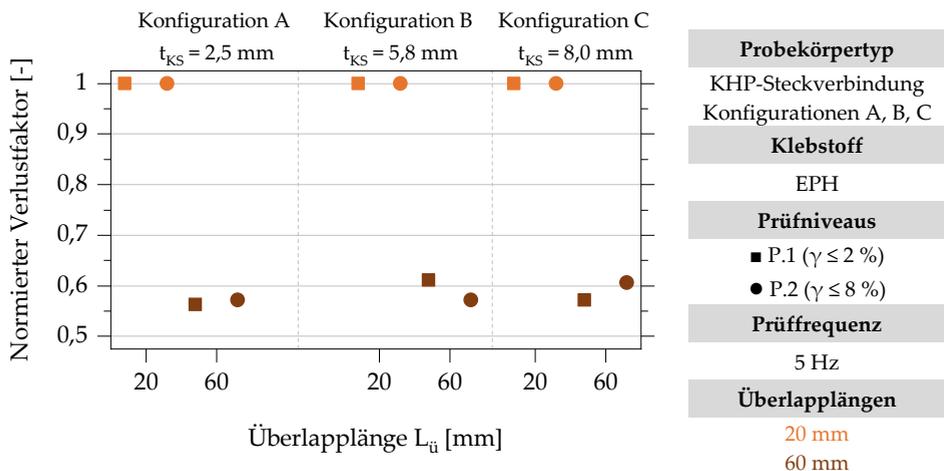


Abbildung A.17: Auswertung des Einflusses der Überlapplänge auf den Verlustfaktor der KHP-Steckverbindungskonfigurationen A, B und C mit Überlapplängen 20 mm und 60 mm in den Prüfniveaus P.1 und P.2 für die Prüffrequenz 5 Hz; auf den Verlustfaktor der Probekörper mit Überlapplänge 20 mm normierte Darstellung

Ergebnisse der Untersuchung des Einflusses der Klebschichtdicke auf die Dämpfungseigenschaften einer KHP-Steckverbindung

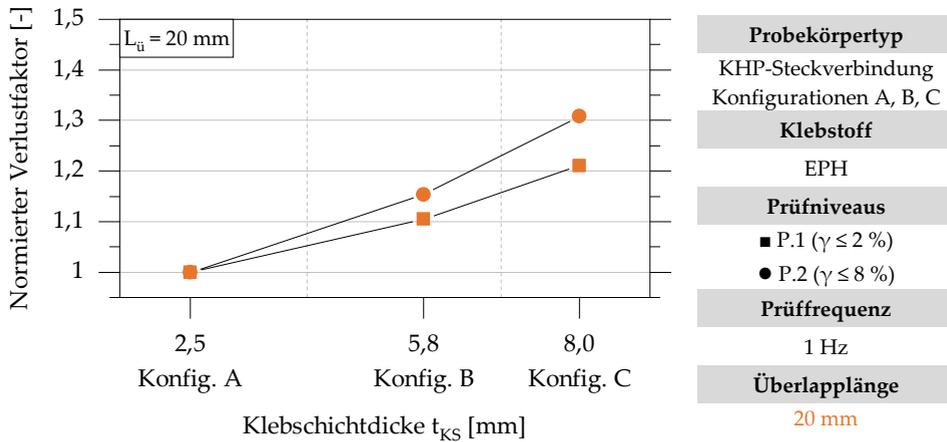


Abbildung A.18: Auswertung des Einflusses der Klebschichtdicke auf den Verlustfaktor der KHP-Steckverbindungskonfigurationen A, B und C mit Überlapplänge 20 mm in den Prüfniveaus P.1 und P.2 für die Prüffrequenz 1 Hz; auf den Verlustfaktor von Konfiguration A mit Klebschichtdicke 2,5 mm normierte Darstellung

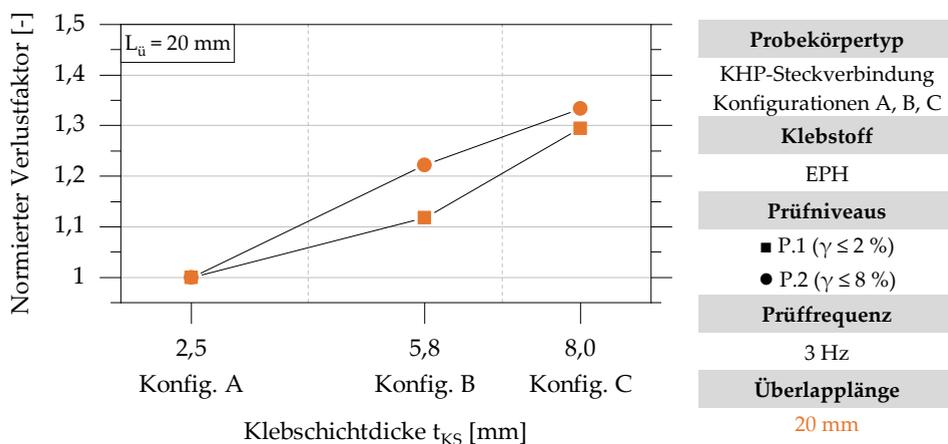


Abbildung A.19: Auswertung des Einflusses der Klebschichtdicke auf den Verlustfaktor der KHP-Steckverbindungskonfigurationen A, B und C mit Überlapplänge 20 mm in den Prüfniveaus P.1 und P.2 für die Prüffrequenz 3 Hz; auf den Verlustfaktor von Konfiguration A mit Klebschichtdicke 2,5 mm normierte Darstellung

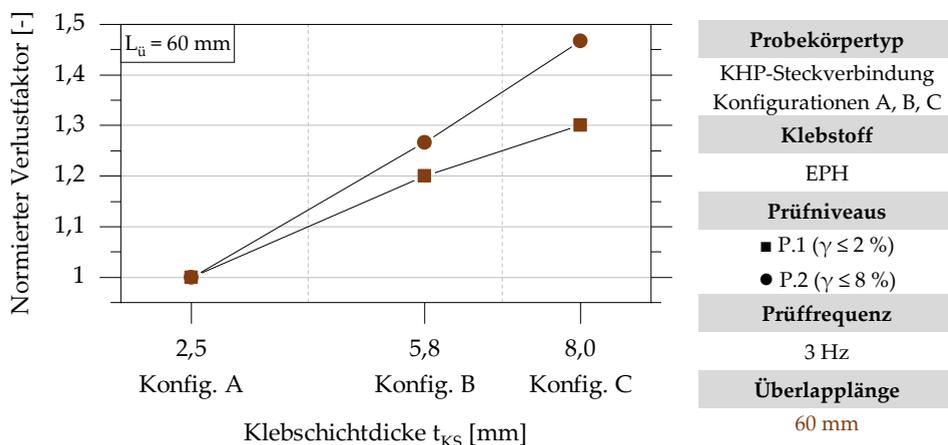


Abbildung A.20: Auswertung des Einflusses der Klebschichtdicke auf den Verlustfaktor der KHP-Steckverbindungskonfigurationen A, B und C mit Überlapplänge 60 mm in den Prüfniveaus P.1 und P.2 für die Prüffrequenz 3 Hz; auf den Verlustfaktor von Konfiguration A mit Klebschichtdicke 2,5 mm normierte Darstellung

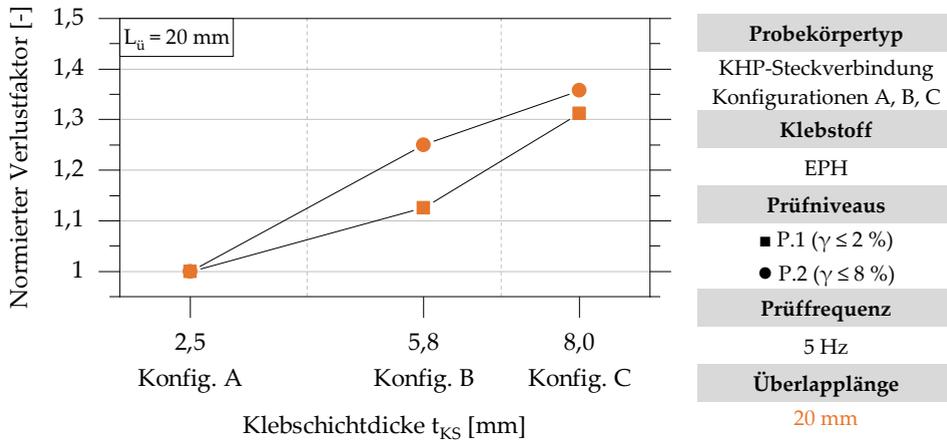


Abbildung A.21: Auswertung des Einflusses der Klebschichtdicke auf den Verlustfaktor der KHP-Steckverbindungskonfigurationen A, B und C mit Überlapplänge 20 mm in den Prüfniveaus P.1 und P.2 für die Prüffrequenz 5 Hz; auf den Verlustfaktor von Konfiguration A mit Klebschichtdicke 2,5 mm normierte Darstellung

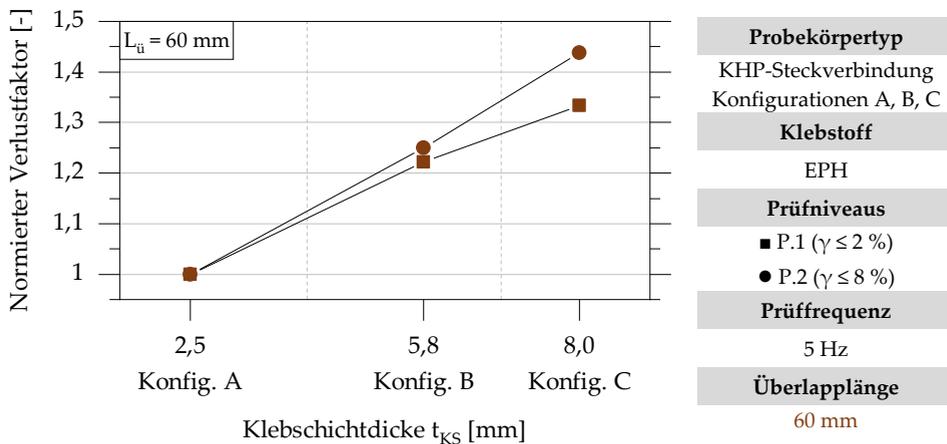


Abbildung A.22: Auswertung des Einflusses der Klebschichtdicke auf den Verlustfaktor der KHP-Steckverbindungskonfigurationen A, B und C mit Überlapplänge 60 mm in den Prüfniveaus P.1 und P.2 für die Prüffrequenz 5 Hz; auf den Verlustfaktor von Konfiguration A mit Klebschichtdicke 2,5 mm normierte Darstellung

Ergebnisse der Dimensionsanalyse der geklebten Überlappverbindungen getrennt für die untersuchten Prüffrequenzen 1 Hz, 3 Hz und 5 Hz

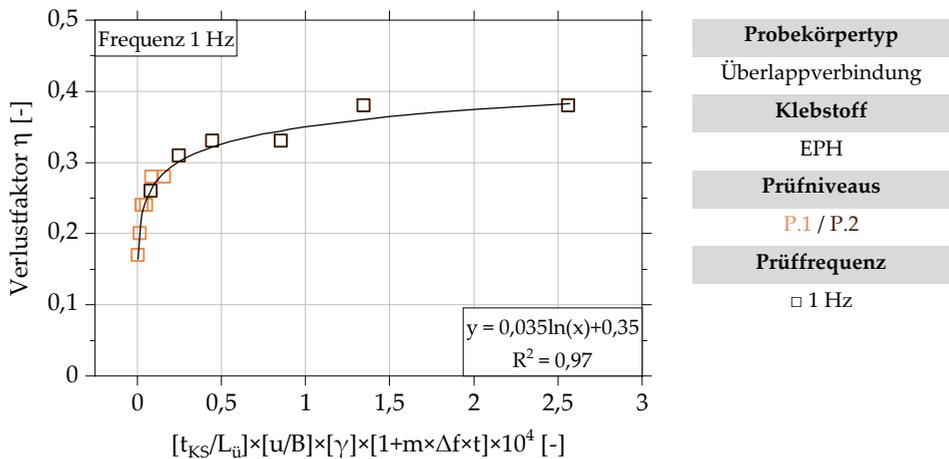


Abbildung A.23: Dimensionslose Darstellung der Ergebnisse der experimentellen Untersuchung an mit dem Klebstoff EPH gefertigten Überlappverbindungen für die Prüffrequenz 1 Hz unter Berücksichtigung der dimensionslosen Kennzahlen Π_2 , Π_3 , Π_4 und Π_5

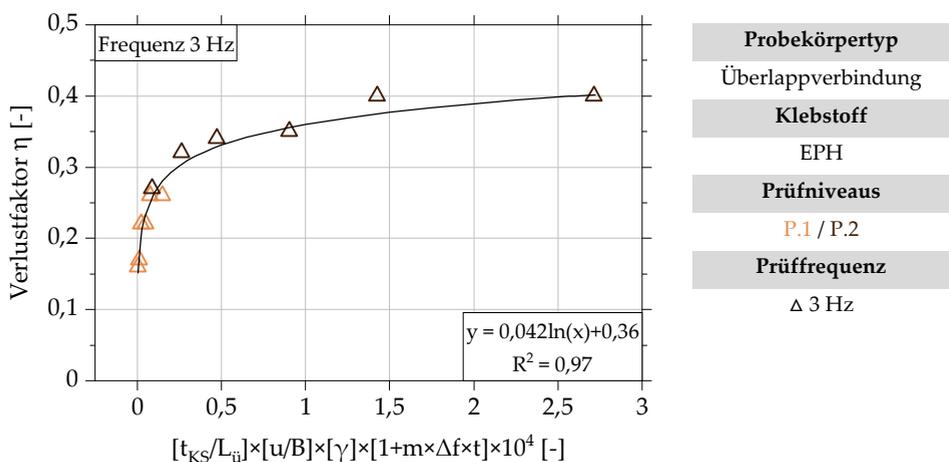


Abbildung A.24: Dimensionslose Darstellung der Ergebnisse der experimentellen Untersuchung an mit dem Klebstoff EPH gefertigten Überlappverbindungen für die Prüffrequenz 3 Hz unter Berücksichtigung der dimensionslosen Kennzahlen Π_2 , Π_3 , Π_4 und Π_5

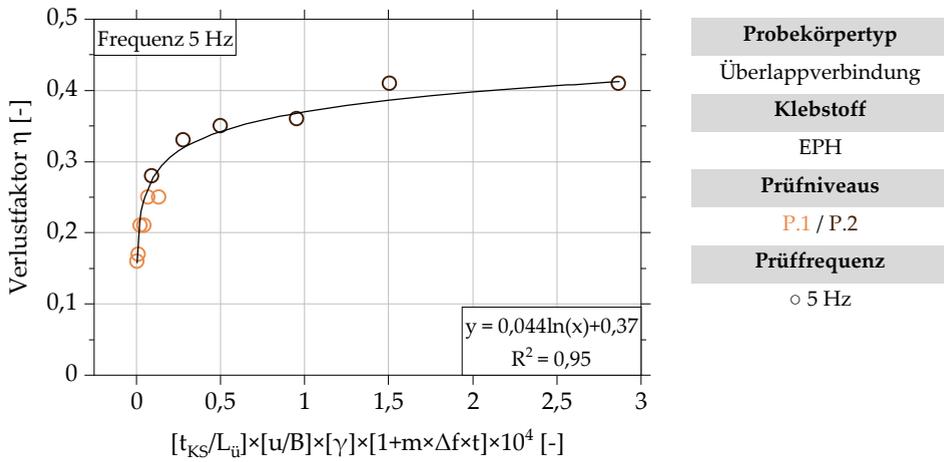


Abbildung A.25: Dimensionslose Darstellung der Ergebnisse der experimentellen Untersuchung an mit dem Klebstoff EPH gefertigten Überlappverbindungen für die Prüffrequenz 5 Hz unter Berücksichtigung der dimensionslosen Kennzahlen Π_2 , Π_3 , Π_4 und Π_5

Ergebnisse der Dimensionsanalyse der geklebten KHP-Steckverbindungen unter Annahme eines linearen Zusammenhangs zwischen der Gleitung und dem Verlustfaktor

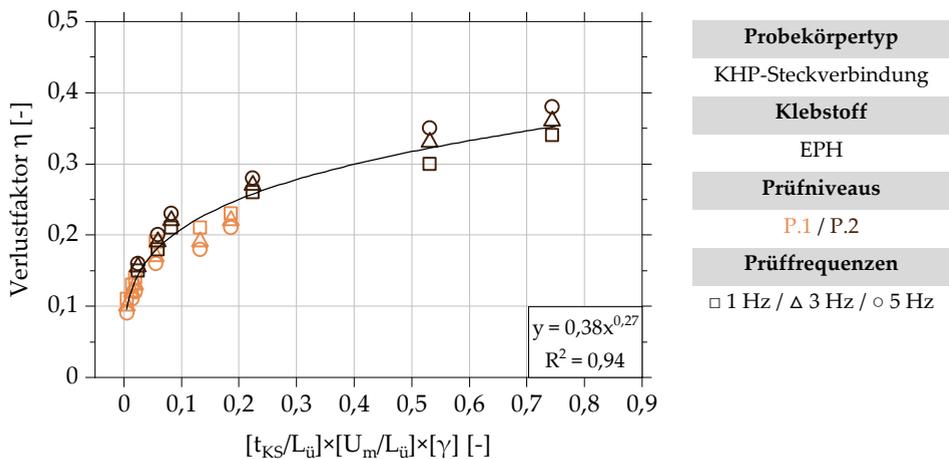


Abbildung A.26: Dimensionslose Darstellung der Ergebnisse der experimentellen Untersuchung an mit dem Klebstoff EPH gefertigten KHP-Steckverbindungen unter Berücksichtigung der dimensionslosen Kennzahlen Π_2 , Π_3 und Π_4 ; Annahme eines linearen Zusammenhangs zwischen der Gleitung und dem Verlustfaktor

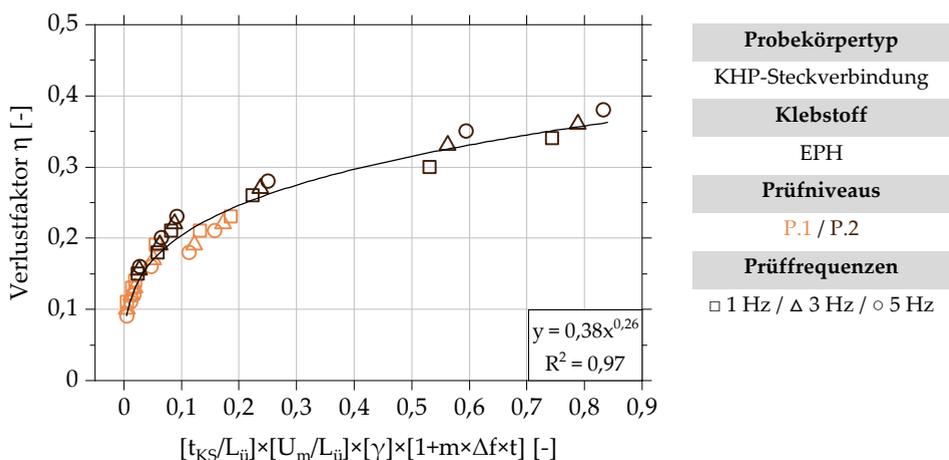


Abbildung A.27: Dimensionslose Darstellung der Ergebnisse der experimentellen Untersuchung an mit dem Klebstoff EPH gefertigten KHP-Steckverbindungen unter Berücksichtigung der dimensionslosen Kennzahlen Π_2 , Π_3 , Π_4 und Π_5 ; Annahme eines linearen Zusammenhangs zwischen der Gleitung und dem Verlustfaktor

**Ergebnisse der Dimensionsanalyse der geklebten KHP-Steckverbindungen
getrennt für die untersuchten Prüffrequenzen 1 Hz, 3 Hz und 5 Hz**

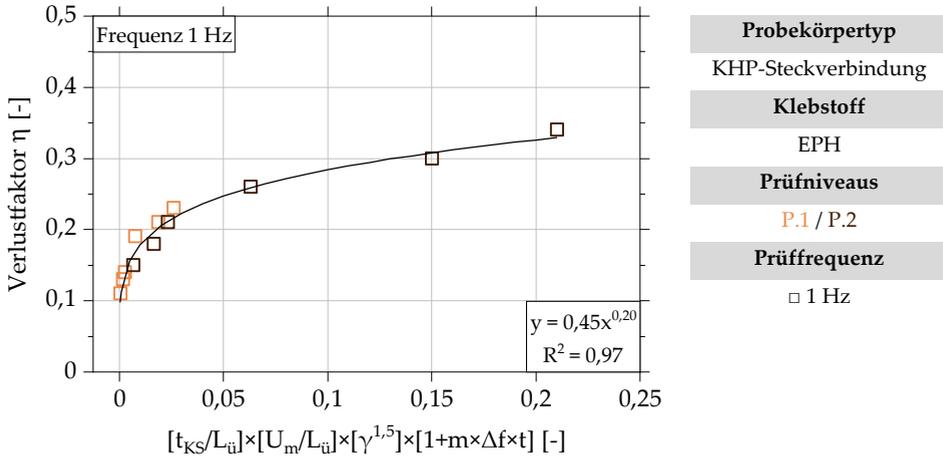


Abbildung A.28: Dimensionslose Darstellung der Ergebnisse der experimentellen Untersuchung an mit dem Klebstoff EPH gefertigten KHP-Steckverbindungen für die Prüffrequenz 1 Hz unter Berücksichtigung der dimensionslosen Kennzahlen Π_2 , Π_3 , Π_4 und Π_5

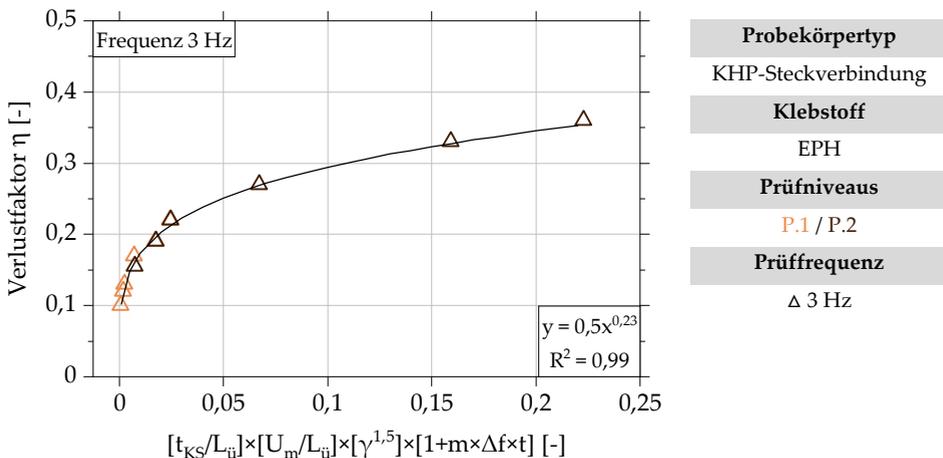


Abbildung A.29: Dimensionslose Darstellung der Ergebnisse der experimentellen Untersuchung an mit dem Klebstoff EPH gefertigten KHP-Steckverbindungen für die Prüffrequenz 3 Hz unter Berücksichtigung der dimensionslosen Kennzahlen Π_2 , Π_3 , Π_4 und Π_5

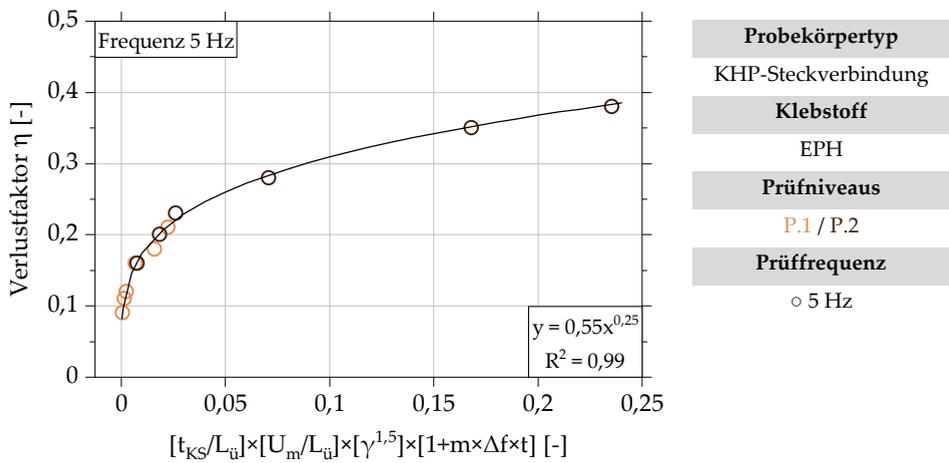


Abbildung A.30: Dimensionslose Darstellung der Ergebnisse der experimentellen Untersuchung an mit dem Klebstoff EPH gefertigten KHP-Steckverbindungen für die Prüffrequenz 5 Hz unter Berücksichtigung der dimensionslosen Kennzahlen Π_2 , Π_3 , Π_4 und Π_5