

Analyse der Dämpfungseigenschaften von metallischen Legierungen: Abhängigkeit von elastischer Dehnung und Frequenz

Alkountar, E.; Lohrengel, A.

Die Untersuchung des Dämpfungsverhaltens von metallischen Legierungen unter Schwingungen bei variierenden Frequenzen, Dehnungsamplituden und Temperaturen ist erforderlich, um eine fundierte Bewertung der Dämpfungseigenschaften der Materialien zu ermöglichen /1/. Dabei ist es von entscheidender Bedeutung, die Wechselwirkungen zwischen diesen Einflussparametern zu verstehen, um das mechanische Verhalten der Metalle unter realen Betriebsbedingungen präziser vorherzusagen. Am Institut für Maschinenwesen (IMW) der Technischen Universität Clausthal wurde ein neuer Prüfaufbau entwickelt, der es ermöglicht, die Dämpfungseigenschaften von Metallen und Legierungen bereits in frühen Entwicklungsstadien zu untersuchen. Durch die Analyse der logarithmischen Dekremente freischwingender Systeme wird das Dämpfungsverhalten bestimmt, was zu einer verbesserten Bewertung der Materialeigenschaften führt.



The investigation of the damping behavior of metallic alloys under vibrations of different frequencies, strain amplitudes, and temperatures is essential for a thorough evaluation of the materials' damping properties /1/. Understanding the interactions between these parameters is crucial for more accurate predictions of the mechanical behavior of metals under real operating conditions. At the Institute of Mechanical Engineering (IMW) at Clausthal University of Technology, a new test apparatus has been developed to enable the analysis of the damping properties of metals and alloys at early stages of development. By analyzing the logarithmic decrements of freely oscillating systems, the damping behavior is determined, leading to an improved assessment of the material properties.

Einleitung

Durch die Vibration eines Materials tritt aufgrund innerer Reibung ein Energieverlust auf, bei dem Energie in Form von Wärme dissipiert wird. Die Dämpfungseigenschaften können durch das Verhältnis der dissipierten Energie ΔW zur während eines Schwingungszyklus gespeicherten Energie W beschrieben werden. Der Ausdruck $100 \cdot \Delta W / W$ stellt einen prozentualen Kennwert dar, der die innere Reibung des Materials quantifiziert /1/. Zur Bestimmung der Dämpfung wird dieser Ansatz häufig experimentell durch Verfahren wie den statischen Hystereseversuch umgesetzt, bei dem genormte Proben und spezielle Prüfstände zum Einsatz

kommen. In frühen Entwicklungsphasen ist es oft erforderlich, eine erste approximative Einschätzung der Dämpfungseigenschaften einer Legierung zu erhalten, insbesondere um verschiedene Legierungszusammensetzungen oder Materialien miteinander zu vergleichen und schnelle Entscheidungen für die Weiterentwicklung auf Basis vorhandener Vorkenntnisse zu treffen. Ein vereinfachter Prüfaufbau mit weniger komplexen Prüfbedingungen ist hierbei von Nutzen.

Aus diesem Grund wurde am IMW der TU Clausthal ein Prüfaufbau entwickelt, der die Auslenkungs- und Geschwindigkeitssignale frei schwingender Systeme erfasst und eine Abschätzung der Dämpfungseigenschaften der Materialien durch die Berechnung des logarithmischen Dekrements δ ermöglicht. Dieses ist als der natürliche Logarithmus zweier aufeinanderfolgender Schwingungsmaxima definiert /2/:

$$\delta = \ln\left(\frac{A_n}{A_{n+1}}\right) \quad (1)$$

Wobei A_n und A_{n+1} die Amplituden zwei aufeinanderfolgender Zyklen darstellen.

Die Untersuchung der Materialdämpfung durch die Berechnung des logarithmischen Dekrements und dessen Zusammenhang mit der inneren Reibung wurde in der Fachliteratur durch verschiedene experimentelle Methoden analysiert. Chicharro et al. bestimmten das logarithmische Dekrement δ als Maß für die Dämpfung elastischer Wellen, indem sie das Verhältnis aufeinanderfolgender Amplituden freier Schwingungen betrachteten /3/. In einem alternativen Ansatz berechneten De Morton et al. das logarithmische Dekrement auf Grundlage des Abfalls der Schwingungsgeschwindigkeit, um die Dämpfung zu quantifizieren /4/. Dabei gilt:

$$\delta = \frac{1}{n} \ln\left(\frac{v_0}{v_n}\right) \quad (2)$$

Wobei v_0 und v_n die Geschwindigkeitsmaxima der ersten und der n-ten betrachteten Schwingung darstellen.

Experimenteller Aufbau

In der vorliegenden Arbeit wurden die Vibrationssignale mit einem Laservibrometer erfasst, das sowohl die Auslenkungs- als auch die Geschwindigkeitssignale aufzeichnet. Ziel dieser Untersuchung ist es, die Ergebnisse beider Signalarten zu analysieren und zu vergleichen, um die Genauigkeit sowie die Grenzen des Prüfaufbaus genauer zu evaluieren.

Der experimentelle Aufbau ist in Abbildung 1 dargestellt. Auf einem stabilen Betonfundament ist ein elektromagnetischer Shaker installiert, der die Proben durch eine fest eingespannt Halterung fixiert. Die Proben bestehen aus Metalldrähten mit

einem Durchmesser von 2 mm und einer Länge von 15 cm und sind an einem Ende in der Halterung befestigt. Das andere Ende bleibt frei schwingend, wobei in definiertem Abstand eine bekannte Masse angebracht ist.

Das Messsystem des Prüfaufbaus umfasst ein Laservibrometer, einen Messverstärker und ein auf Python basierendes Auswertungssystem. Die vom Laservibrometer erfassten Daten werden in ein lesbare Format umgewandelt, das vom Auswertungsprogramm verarbeitet und visualisiert werden kann.

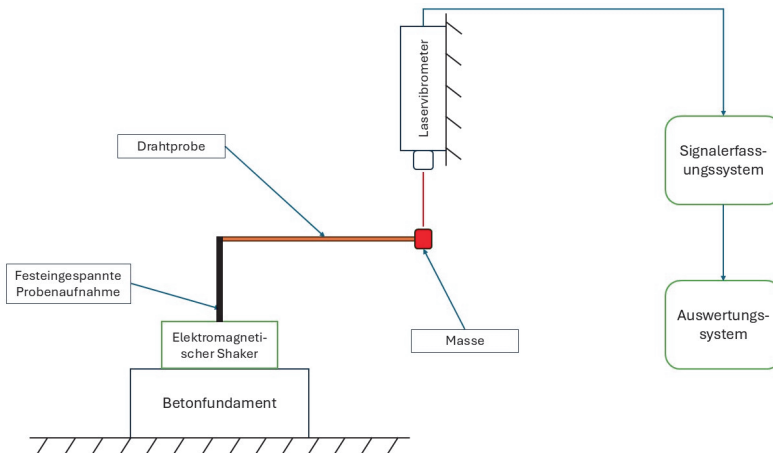


Abbildung 1: Schematische Darstellung des Prüfaufbaus

Versuchsdurchführung

Die Probe wird an der fest eingespannten Seite durch den Shaker angeregt, der von einem Signalgenerator mit einem Sinussignal einer festgelegten Frequenz und Amplitude gespeist wird. Dies führt zu Schwingungen der gesamten Probe, wobei die angebrachte Masse ebenfalls in Schwingung versetzt wird, jedoch mit einer abweichenden Amplitude.

Mit dem präzise auf die Oberfläche der Masse ausgerichteten Laservibrometer werden die Geschwindigkeit sowie die Auslenkung des freien Endes der Probe erfasst. Sobald sich die Schwingungen stabilisiert haben und ein harmonischer Schwingungszustand erreicht ist, wird die Signalgenerierung gestoppt. Der Shaker bremst sofort, wodurch sowohl die Aufnahme als auch die fest eingespannte Seite der Probe in ihre Ausgangsposition (Nullposition) zurückkehren. Das freie Ende der Probe sowie die daran befestigte Masse schwingen jedoch in einem gedämpften freien Schwingungszustand weiter, bis sie schließlich zur Ruhe kommen.

Da für diese Arbeit ausschließlich die gedämpfte freie Schwingung von Interesse ist, wurde die Zeitspanne, die zum vollständigen Stoppen des Shakers und der Aufnahme benötigt wird, präzise gemessen. Diese beträgt 0,10 s. Auf dieser Grundlage beginnt die Erfassung der gedämpften freien Schwingung des freien Endes der Probe erst 0,10 s nach dem Abschalten der Signalgenerierung. Dadurch wird sichergestellt, dass die Dämpfung des Shakers sowie die Schwingungsamplitude des fest eingespannten Endes die Messung nicht beeinflussen.

Mehrere Experimente wurden unter Variation der Materialien und Versuchsbedingungen durchgeführt, um die Dämpfungseigenschaften systematisch zu analysieren. Die modifizierten Parameter umfassen:

- Materialeigenschaften, beeinflusst durch die Auswahl unterschiedlicher Drahtmaterialien
- Maximale Auslenkung (δ) des schwingenden Drahtes am freien Ende
- Resultierende maximale Dehnung (ε_{max}) am Festeinspannungspunkt, berechnet für Drähte mit kreisförmigem Querschnitt nach (3):

$$\varepsilon_{max} = \frac{3 \cdot \delta \cdot y_{max}}{L^2} \quad (3)$$

Dabei gilt:

- δ : Maximale Auslenkung am freien Ende des Drahtes.
- y_{max} : Abstand von der neutralen Faser zur äußersten Faser des Querschnitts (entspricht dem Radius bei einem runden Draht).
- L : Effektive Länge des Drahtes, wobei die ersten 3 cm festeingespannt sind. In diesem Fall ergibt sich $L = 15 \text{ cm} - 3 \text{ cm} = 12 \text{ cm}$.

Zusätzlich wurden verschiedene Schwingungsfrequenzen getestet, um deren Einfluss auf die Dämpfungseigenschaften zu untersuchen. Alle Experimente wurden bei Raumtemperatur durchgeführt, wodurch temperatureinflussbedingte Effekte im Rahmen dieser Arbeit vernachlässigt werden können.

Tabelle 1 zeigt die durchgeführten Versuche und die verschiedenen Variationen der Versuchsparameter.

Tabelle 1: Variationen der Versuchsparameter

Drahtmaterial	Frequenz in Hz	Max. Auslenkung in μm	Dehnung an Lagerungsstelle in %
Stahllegierung (13CrMo4-5)	30	1400	0.029
Stahllegierung (13CrMo4-5)	30	700	0.015
Stahllegierung (13CrMo4-5)	20	1400	0.029
Stahllegierung (13CrMo4-5)	20	700	0.015
Aluminiumlegierung (EN AW-5083)	30	1400	0.029
Aluminiumlegierung (EN AW-5083)	30	700	0.015
Aluminiumlegierung (EN AW-5083)	20	1400	0.029
Aluminiumlegierung (EN AW-5083)	20	700	0.015

Auswertung

Erste Messreihe aus 13CrMo4-5

Für die erste Messreihe wurden Versuchsdaten erhoben, die unter variierenden Dehnungswerten beziehungsweise Schwingungsamplituden sowie bei unterschiedlichen Frequenzen aufgezeichnet wurden. Ziel dieser Experimente war es, den Einfluss der Dehnung auf die Dämpfungseigenschaften des Materials zu

analysieren. Zusätzlich wurde der Einfluss geringfügiger Frequenzänderungen auf die Dämpfungseigenschaften untersucht.

Die initiale Versuchsreihe wurde an Stahllegierungsdrähten bei zwei unterschiedlichen Anregungsfrequenzen von 20 Hz und 30 Hz durchgeführt. Die in den nachfolgenden Abbildungen dargestellten Diagramme illustrieren das Schwingungsverhalten des Prüflings unter freien Schwingungsbedingungen für die jeweiligen Versuchsparameter. Dabei wird die Schwingungsgeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Zeit abgebildet. Die Entscheidung, die Schwingungsgeschwindigkeit statt der Auslenkungsamplitude darzustellen, beruht auf der eingesetzten optischen Messtechnik, die eine präzisere und störungsfreie Erfassung der Geschwindigkeit ermöglicht.

Abbildung 2 bis Abbildung 5 illustrieren die abklingende Schwingungsgeschwindigkeit desselben Systems unter verschiedenen Bedingungen (variierte Anregungsfrequenzen und maximale Auslenkungen). Zur quantitativen Analyse des Abklingverhaltens wurde eine exponentielle Regression auf die Maximalwerte der Geschwindigkeit angewendet, um entsprechende Anpassungskurven zu erzeugen.

Die zugrunde liegende Funktion der exponentiellen Regression lautet $v(t) = ae^{x \cdot b}$, wobei b als Abklingkoeffizient bezeichnet wird. Dieser Koeffizient beschreibt die Geschwindigkeit des exponentiellen Abfalls der Schwingungsgeschwindigkeit und charakterisiert somit das Dämpfungsverhalten des Systems. Tabelle 2 zeigt die unterschiedlichen Werte des Abklingkoeffizienten, die durch die Regression aus den Versuchsdaten berechnet wurden.

Tabelle 2: Abklingkoeffizienten der Schwingungsgeschwindigkeit (13CrMo4-5)

Versuch	Abklingkoeffizient b
13CrMo4-5 bei 30 Hz, 1400 μm	-1,02
13CrMo4-5 bei 30 Hz, 700 μm	-0,92
13CrMo4-5 bei 20 Hz, 1400 μm	-0,98
13CrMo4-5 bei 20 Hz, 700 μm	-0,83

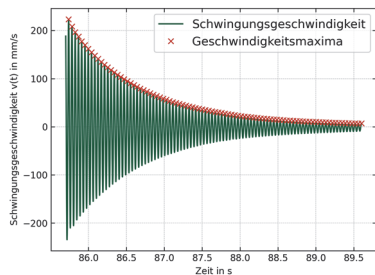


Abbildung 2: Schwingungsgeschwindigkeit der angebrachten Masse bei 30 Hz und 1400 μm maximale Auslenkung

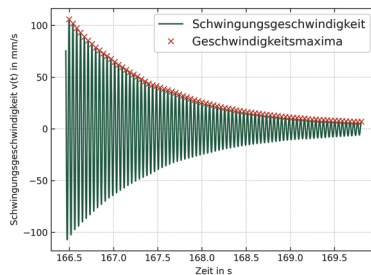


Abbildung 3: Schwingungsgeschwindigkeit der angebrachten Masse bei 30 Hz und 700 μm maximale Auslenkung

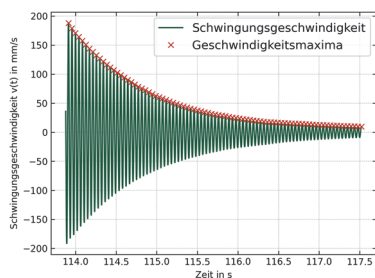


Abbildung 4: Schwingungsgeschwindigkeit der angebrachten Masse bei 20 Hz und 1400 μm maximale Auslenkung

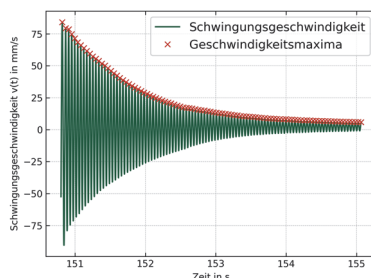


Abbildung 5: Schwingungsgeschwindigkeit der angebrachten Masse bei 20 Hz und 700 μm maximale Auslenkung

Ein weiteres Diagramm (Abbildung 6) vergleicht die resultierenden Regressionskurven, um die Unterschiede im Dämpfungsverhalten unter den jeweiligen Versuchsbedingungen zu verdeutlichen.

Geschwindigkeitsmaxima der Schwingungsgeschwindigkeit mit Kurvenanpassung

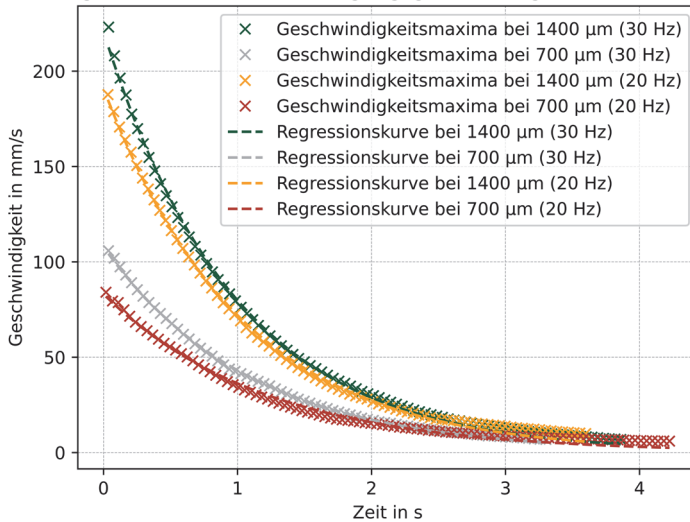


Abbildung 6: Regressionskurven der unterschiedlichen Versuche

Die Ergebnisse der Untersuchungen an den Stahllegierungen zeigen, dass bei erhöhter Dehnung eine geringere Zunahme der Dämpfung auftritt als bei niedrigeren Dehnungen. Ebenso wurde eine leichte Steigerung des Dämpfungsverhaltens bei höheren Frequenzen beobachtet. Beide Effekte bleiben jedoch gering, da die Dehnungen eindeutig im elastischen Bereich liegen, wodurch keine zusätzliche Energie durch plastische Verformung dissipiert wird. Darüber hinaus wirken sich die niedrigen Frequenzen (20–30 Hz) nur moderat auf die viskoelastische Dämpfung aus, da die Dehnrates bei diesen Frequenzen im Vergleich zu höheren Frequenzen relativ gering ist. Folglich konnte nur eine geringe Steigerung der Dämpfungseigenschaften bei 30 Hz festgestellt werden.

Die Berechnung des logarithmischen Dekrements für jedes Schwingungsgeschwindigkeitssignal gemäß Formel (2) ist in Tabelle 3 dargestellt. Die Werte wurden nach 50 Schwingungszyklen für alle Proben ermittelt.

Table 3: Das logarithmische Dekrement der Schwingungsgeschwindigkeitssignale für die erste Versuchsreihe

Versuch	V_0 in mm/s	V_{50} in mm/s	Logarithmisches Dekrement δ
13CrMo4-5 bei 30 Hz, 1400 μm	223,10	25,39	0,044
13CrMo4-5 bei 30 Hz, 700 μm	105,83	14,85	0,039
13CrMo4-5 bei 20 Hz, 1400 μm	187,72	22,75	0,042
13CrMo4-5 bei 20 Hz, 700 μm	84,07	13,71	0,036

Die Ergebnisse der Berechnung des logarithmischen Dekrements stimmen mit den Aussagen der exponentiellen Regression überein und entsprechen den erwarteten Ergebnissen.

Zweite Messreihe aus EN AW-5083

Für die zweite Messreihe wurden die gleichen Versuchsbedingungen wie in der ersten Messreihe angewendet, jedoch mit einer anderen Legierung. Hierbei kamen Aluminiumlegierungsdrähte zum Einsatz, die bei Anregungsfrequenzen von 20 Hz und 30 Hz sowie maximalen Auslenkungen von 1400 μm und 700 μm untersucht wurden.

Auch für die zweite Messreihe wurde zur Analyse des Abklingverhaltens eine exponentielle Regression auf die Maximalwerte der Schwingungsgeschwindigkeit angewendet, um die Abklingkoeffizienten zu bestimmen. Die Versuchsergebnisse sind analog zur ersten Messreihe in den folgenden Diagrammen als Schwingungsgeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Zeit dargestellt. Die ermittelten Werte der Abklingkoeffizienten b sind in Tabelle 4 zusammengefasst.

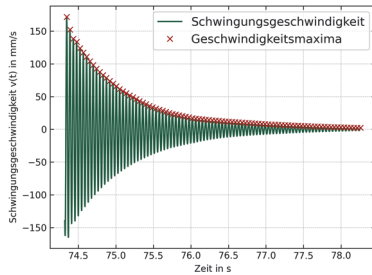


Abbildung 7: Schwingungsgeschwindigkeit der angebrachten Masse bei 30 Hz und 1400 μm maximale Auslenkung

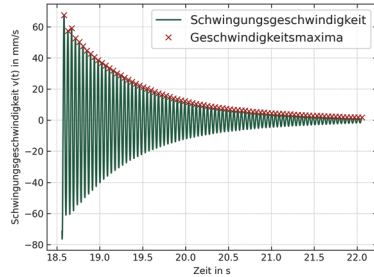


Abbildung 8: Schwingungsgeschwindigkeit der angebrachten Masse bei 30 Hz und 700 μm maximale Auslenkung

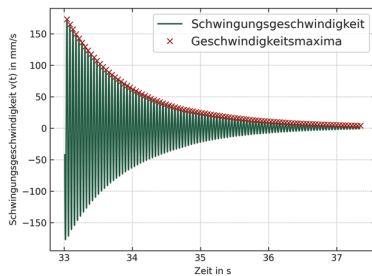


Abbildung 9: Schwingungsgeschwindigkeit der angebrachten Masse bei 20 Hz und 1400 μm maximale Auslenkung

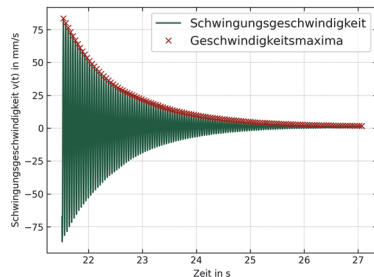


Abbildung 10: Schwingungsgeschwindigkeit der angebrachten Masse bei 20 Hz und 700 μm maximale Auslenkung

Tabelle 4: Abklingkoeffizienten der Schwingungsgeschwindigkeit (EN AW-5083)

Versuch	Abklingkoeffizient b
EN AW-5083 bei 30 Hz, 1400 μm	-1,32
EN AW-5083 bei 30 Hz, 700 μm	-1,15
EN AW-5083 bei 20 Hz, 1400 μm	-1,00
EN AW-5083 bei 20 Hz, 700 μm	-0,88

Obwohl EN AW-5083 als mittel- bis hochfeste Aluminiumlegierung eingestuft wird und typischerweise eine moderate Dämpfung aufweist, zeigen die experimentellen Ergebnisse, dass sie im Vergleich zur Stahllegierung leicht bessere Dämpfungseigenschaften aufweist. Dies ist auf Unterschiede in der Mikrostruktur, potenzielle plastische Mikroverformungen sowie die geringere Steifigkeit der Aluminiumlegierung zurückzuführen. Insgesamt zeigen die Ergebnisse jedoch eine weitgehende Übereinstimmung mit den bei der Stahllegierung beobachteten Tendenzen, da die Dämpfungseigenschaften bei höheren Auslenkungen und Frequenzen größer sind als bei niedrigeren.

Tabelle 5 zeigt die berechneten Werte des logarithmischen Dekrements für jeden Versuch nach 50 Schwingungen. Diese stimmen mit den Ergebnissen der exponentiellen Regression überein.

Tabelle 5: Das logarithmische Dekrement der Schwingungsgeschwindigkeitssignale für die zweite Messreihe

Versuch	V_0 in mm/s	V_{50} in mm/s	Logarithmisches Dekrement δ
EN AW-5083 bei 30 Hz, 1400 μm	171,57	11,40	0,054
EN AW-5083 bei 30 Hz, 700 μm	67,46	5,49	0,050
EN AW-5083 bei 20 Hz, 1400 μm	173,09	20,34	0,043
EN AW-5083 bei 20 Hz, 700 μm	83,50	12,19	0,039

Fazit und Ausblick

Die durchgeführten Experimente haben gezeigt, dass eine Abhängigkeit zwischen der inneren Reibung bzw. den Dämpfungseigenschaften metallischer Legierungen und der Dehnung besteht, auch im elastischen Bereich. Der Einfluss der elastischen Dehnung ist jedoch begrenzt und wird maßgeblich durch die Zusammensetzung der Legierung sowie ihrer mikrostrukturellen Eigenschaften bestimmt. Zudem konnte nachgewiesen werden, dass die Frequenz das Dämpfungsverhalten beeinflusst, wobei die Mikrostruktur und die Steifigkeit des Materials eine entscheidende Rolle für die genaue Wirkung der Frequenz spielen.

Trotz der erzielten Erkenntnisse bleiben noch offene Fragestellungen, die in zukünftigen Studien adressiert werden sollten. Insbesondere der Einfluss der Temperatur auf die Dämpfungseigenschaften metallischer Legierungen bietet Raum für weitere Untersuchungen. Hierfür könnten am IMW Experimente unter

kontrollierten Bedingungen in einer Klimakammer mit Temperaturen bis 80 °C durchgeführt werden, um thermische Effekte besser zu verstehen.

Ein weiterer vielversprechender Ansatz für künftige Arbeiten ist die Untersuchung des Dämpfungsverhaltens im Vakuum, um mögliche Störeinflüsse zu minimieren und deren Auswirkungen zu quantifizieren. Zudem sollten sowohl die Effekte plastischer Verformungen als auch das Verhalten bei hohen Frequenzen systematisch analysiert werden, um ihre Wechselwirkung mit den mikrostrukturellen Eigenschaften und deren Einfluss auf die Dämpfungseigenschaften besser zu verstehen. Abschließend wäre die Entwicklung eines einheitlichen Kennwertes, der Drahtversuche und genormte Testverfahren miteinander vergleichbar macht, von großem Interesse.

Diese Ansätze könnten wesentlich dazu beitragen, das Verständnis der Dämpfungseigenschaften metallischer Legierungen aus der frühen Entwicklungsphase heraus zu vertiefen und deren Anwendungspotenzial in technischen Systemen gezielt zu optimieren.

Literatur

- /1/ Chicharro, J. M.; Bayon, A.; Salazar, F.: Measurement of damping in magnetic materials by optical heterodyne interferometry. In: Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2003.
- /2/ de morton, M. A.; Lott, S. A.; Stainsby, D. F.: Measurement of internal friction by velocity. In: Journal of Scientific Instruments, 1963.
- /3/ Kuttner, T.; Rohnen, A.: Praxis der Schwingungsmessung. Springer Vieweg, 2019.
- /4/ Ritchie, I. G.; Pan, Z. -L.: High-damping metals and alloys. In: Metallurgical Transactions A, 1991.