

Hysteretische Dämpfung in metallischen Legierungen infolge innerer Reibung

Alkountar, E.; Lohrengel, A.

Die Untersuchung der Dämpfungseigenschaften neu entwickelter metallischer Legierungen wurde im Rahmen eines Forschungsprojekts am IMW mittels eines Rapid-Tests auf einem neu konzipierten Prüfstand im Akustiklabor des Instituts durchgeführt. Zur Validierung der Ergebnisse und zur Erweiterung der experimentellen Grundlagen wurde eine ergänzende Messmethode benötigt, die die Bestimmung der Dämpfung infolge innerer Reibung an genormten metallischen Flachzugproben ermöglicht. Hierzu wurde ein statischer Hysteresestest durchgeführt, bei dem der pro Lastwechsel dissipierte Energieverlust ermittelt wurde. Dieser Energieverlust diente als Grundlage zur Berechnung eines äquivalenten logarithmischen Dekrements, einer dimensionslosen Kennzahl zur Charakterisierung des Dämpfungsverhaltens, die in diesem Zusammenhang aus dem quasistatischen Hystereseverhalten des Materials abgeleitet wird. In diesem Artikel werden die verwendete Mess- und Auswertemethode detailliert vorgestellt und erste experimentelle Ergebnisse präsentiert.



The investigation of the damping properties of newly developed metallic alloys was carried out within the framework of a research project at the IMW using a rapid test on a newly designed test rig in the institute's acoustics laboratory. To validate the results and to expand the experimental basis, an additional measurement method was required that enables the determination of damping due to internal friction in standardized metallic flat tensile specimens. For this purpose, a static hysteresis test was conducted, in which the energy dissipated per loading cycle was determined. This energy loss served as the basis for calculating an equivalent logarithmic decrement, a dimensionless parameter characterizing the material's damping behavior, which in this context is derived from the quasistatic hysteresis response of the material. This article presents the applied measurement and evaluation methodology in detail and provides initial experimental results.

Einleitung

Frühere Untersuchungen am IMW der TU Clausthal zur CuAlMn-Legierung nutzten frei ausklingende Schwingungen, um die Dämpfungseigenschaften über das logarithmische Dekrement zu bestimmen. Die Auslenkungs- und Geschwindigkeitssignale wurden dabei mithilfe eines Laservibrometers erfasst, sodass die Abnahme aufeinanderfolgender Amplituden bzw.

Geschwindigkeitsmaxima ausgewertet werden konnte. Dieses Rapid-Test-Verfahren ermöglichte eine schnelle Charakterisierung großer Probenmengen und lieferte erste aussagekräftige Ergebnisse zu den dämpfungstechnischen Eigenschaften der Legierung /1/.

Für weiterführende und erweiterte Untersuchungen ist es sinnvoll, Versuche an genormten Proben derselben Legierung durchzuführen. Bei zyklischer Wechselbeanspruchung kann die Energiedissipation eines Materials direkt aus der Fläche der entstehenden Hystereseschleife bestimmt werden. Diese dissipierte Energie stellt ein Maß für die innere Reibung dar und beschreibt damit die Dämpfungseigenschaften des Werkstoffs. Aus der dissipierten Energie W_{diss} und der im Zyklus gespeicherten Energie W_{stored} lässt sich der Verlustfaktor η bestimmen, der über folgende Beziehung definiert ist /2/:

$$\eta = \frac{W_{diss}}{2\pi W_{stored}} \quad (1)$$

In der vorliegenden Arbeit werden quasistatische Hysteresenversuche durchgeführt, um die Energiedissipation der CuAlMn-Legierung unter weitgehend frequenzfreien Bedingungen zu untersuchen. Die Versuche erfolgen dehnungsgeregelt mit einer sehr niedrigen Verformungsgeschwindigkeit von bis zu 0,015 %/s. Durch diese deutlich reduzierte Belastungsgeschwindigkeit im Vergleich zu üblichen dynamischen Versuchen ist zu erwarten, dass die gemessene Energiedissipation ausschließlich auf die innere Reibung des Materials zurückzuführen ist und nicht durch Frequenz- oder andere dynamische Einflüsse überlagert wird.

Ein wesentliches Ziel dieser Untersuchungen besteht darin, zu analysieren, ob und in welchem Ausmaß die Dämpfungseigenschaften der CuAlMn-Legierung durch die spannungsinduzierte martensitische Phasenumwandlung gesteigert werden können. Diese Umwandlung ist charakteristisch für Legierungen mit Formgedächtniseffekt und führt aufgrund der damit verbundenen mikrostrukturellen Mechanismen potenziell zu einer erhöhten Energiedissipation. Daher ermöglichen die quasistatischen Hysteresenversuche eine gezielte Betrachtung dieses Effekts und dessen Beitrag zur Gesamtdämpfung der Legierung /3/.

Die Ergebnisse dieser quasistatischen Untersuchungen werden anschließend mit den zuvor ermittelten Rapid-Test-Daten vergleichbar gemacht, indem aus dem Verlustfaktor η das entsprechende logarithmische Dekrement δ berechnet wird. Hierzu wird die Beziehung verwendet /4/:

$$\delta = \pi \eta \quad (2)$$

Dadurch können die energetische Betrachtung und das schwingungsbasierte Verfahren miteinander verknüpft und hinsichtlich ihrer Aussagekraft bewertet werden. Der vorliegende Artikel stellt diese Methodik vor und diskutiert erste

Ergebnisse im Hinblick auf eine geeignete Bestimmung der Dämpfung durch innere Reibung.

Abbildung 1 zeigt die im Belastungszyklus gespeicherte Energie im Vergleich zur dissipierten Energie, die durch die Fläche der jeweiligen Hystereseschleife dargestellt wird.

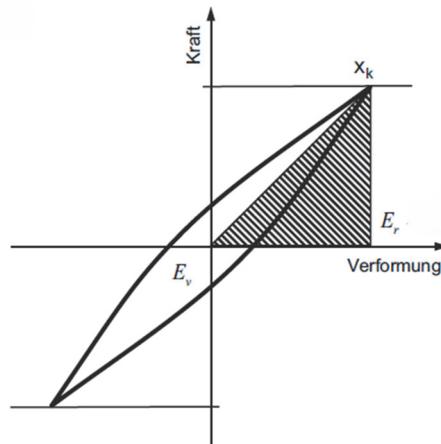


Abbildung 1: Schematische Darstellung einer Hystereseschleife mit der dissipierten Energie E_v und der gespeicherten Energie E_r /4/

Experimenteller Aufbau

Der in dieser Arbeit verwendete Versuchsaufbau basiert auf einem quasistatischen Hysteresenversuch, welcher auf der Resonanzprüfmaschine SWINGLY der Firma Sincotec durchgeführt wurde. Die Untersuchungen erfolgen an genormten Flachzugproben der CuAlMn-Legierung, wie in Abbildung 2 dargestellt. Die Proben werden mittels einer eigens konstruierten Aufnahme befestigt, die es ermöglicht, sowohl Zug- als auch Druckkräfte kontrolliert auf die Probe aufzubringen.

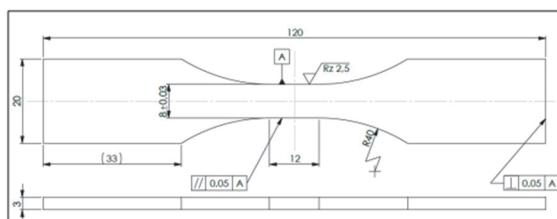


Abbildung 2: Probengeometrie

Zur Erfassung der Dehnung wird ein Clip-On-Extensometer eingesetzt, das während des Versuchs kontinuierlich die Dehnungswerte misst und über den integrierten Messverstärker der SWINGLY-Maschine verarbeitet. Die auf die Probe wirkenden Kräfte werden gleichzeitig über eine Kraftmessdose aufgenommen, die an der oberen Seite der Prüfkörperaufnahme montiert ist. Beide Signale – Dehnung und Kraft – stehen dem Prüfstand damit in Echtzeit zur Verfügung, sodass sowohl kraftgeregelte dynamische Versuche als auch dehnungsgeregelte Versuche durchgeführt werden können.

Im Rahmen dieser Arbeit wird ausschließlich der dehnungsgeregelte quasistatische Hysteresenversuch genutzt, um frequenzabhängige Einflüsse auszuschließen und die reine Energiedissipation infolge innerer Reibung zu untersuchen. Abbildung 3 zeigt die eingespannt Probengeometrie während des Versuchs.

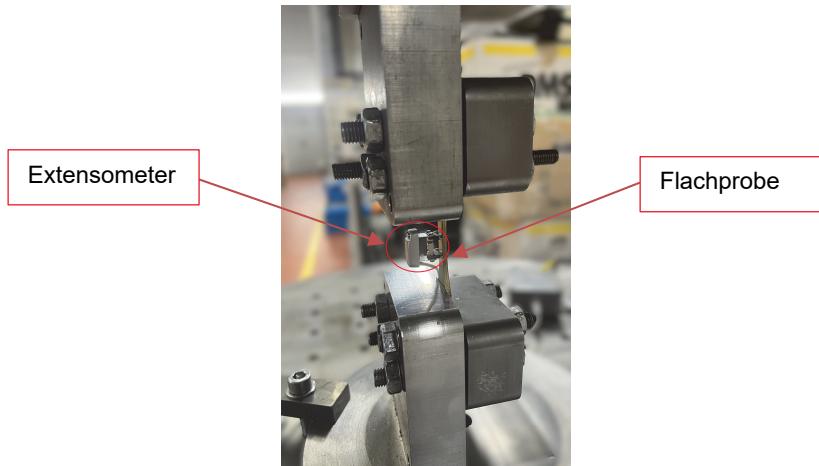


Abbildung 3: Eingespannte Probe im Prüfstand

Das Messsystem der SWINGLY-Maschine stellt die während der Versuche aufgezeichneten Daten als CSV-Dateien bereit. Diese Messdaten werden anschließend mit einem selbst entwickelten Python-Auswerteskript verarbeitet, aus dem die relevanten energetischen Kenngrößen und die entsprechenden logarithmischen Dekrement-Werte berechnet werden.

Versuchsdurchführung

In dieser Arbeit steht die Energiedissipation im Bereich kleiner elastischer Verformungen im Fokus, die bei konventionellen metallischen Werkstoffen üblicherweise nur einen vernachlässigbaren Beitrag liefert. Da jedoch die CuAlMn-Gedächtnislegierung untersucht wird, ist aufgrund spannungsinduzierter martensitischer Phasenumwandlungen bereits bei geringen Dehnungen eine

erhöhte Dissipation zu erwarten. Zum Vergleich wurden sowohl Proben einer Referenzkupferlegierung ohne Gedächtniseffekte als auch Proben der CuAlMn-Legierung geprüft. Die Belastung erfolgte dabei zyklisch ausschließlich in Zugrichtung, eine Druckbelastung wurde nicht aufgebracht.

Die Versuche wurden mit einer konstanten Verformungsgeschwindigkeit von 0,01 %/s durchgeführt, wobei verschiedene Dehnungsamplituden bis zu einer maximalen Gesamtdehnung von 0,21 % angefahren wurden. Dieser Bereich umfasst laut Literatur (vgl. Abbildung 4) den Dehnungsbereich, in dem die Dämpfungseigenschaften der CuAlMn-Legierung einen deutlichen Anstieg zeigen.

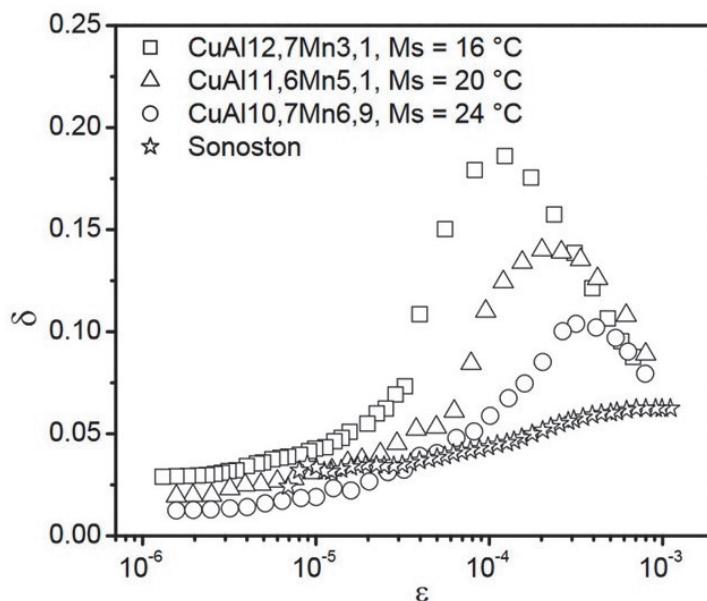


Abbildung 4: Vergleich des Dämpfungsverhaltens von Sonoston mit dem verschiedener CuAlMn-Legierungen in Abhängigkeit von der Dehnung /3/

Für jede Dehnungsamplitude wurden insgesamt zwölf Zyklen durchlaufen. Die Wahl dieser Zyklusanzahl basiert auf praktischer Erfahrung und gewährleistet eine ausreichende Stabilisierung der Messwerte, da typischerweise drei bis vier Zyklen benötigt werden, um stationäre Verhältnisse zu erreichen. Der erste und der letzte Zyklus werden nicht ausgewertet, da in diesen aufgrund der Maschinenregelung beim Auf- bzw. Ablösen regelmäßig deutliche Abweichungen auftreten. Die gewählte Verformungsgeschwindigkeit von 0,01 %/s stellt einen optimalen Kompromiss zwischen Regelgüte und Versuchszeit dar: Sie ermöglicht eine zuverlässige Ansteuerung der kleinen Dehnungsamplituden und verhindert gleichzeitig die Ungenauigkeiten, die bei höheren Geschwindigkeiten insbesondere

im niedrigen Dehnungsbereich auftreten. Daher wird in dieser Arbeit ausschließlich diese Geschwindigkeit verwendet, da sie im gesamten untersuchten Bereich reproduzierbare und belastbare Messergebnisse liefert.

Auswertung

Für die Auswertung wurden drei Proben untersucht: eine Referenzkupferlegierung ohne Gedächtniseffekte sowie zwei Varianten der CuAlMn-Legierung (V075 und V091). Alle Proben wurden bei einer konstanten Verformungsgeschwindigkeit von 0,01 %/s zyklisch belastet. Für jede Dehnungsamplitude wurden zwölf vollständige Zyklen durchgeführt.

In Tabelle 1 sind die Ergebnisse in Form des logarithmischen Dekrements zusammengefasst. Die angegebenen Werte stellen Mittelwerte der Zyklen 5 bis 11 dar, da die Hystereseschleifen der Proben nach den ersten Zyklen ein stabiles Verhalten erreichen. Durch diese Auswahl werden zudem Abweichungen in den ersten und letzten Zyklen, die typischerweise durch die Maschinenregelung entstehen, ausgeschlossen.

Tabelle 1: Gemitteltes logarithmisches Dekrement für verschiedene Dehnungsamplituden

Dehnungsamplitude ϵ_a	Logarithmisches Dekrement δ		
	Referenzkupferlegierung	V075	V091
0,06%	0,0006	0,0307	0,0360
0,09%	0,0004	0,0330	0,0527
0,12%	0,0006	0,0338	0,0650
0,15%	0,0006	0,0347	0,0760
0,18%	0,0009	0,0373	0,0863
0,21%	0,0029	0,0387	0,0936

Die Ergebnisse zeigen einen deutlichen Unterschied im Energieverlust bzw. in der inneren Reibung während der elastischen Verformung zwischen der Referenzkupferlegierung und der CuAlMn-Gedächtnislegierung. Eine mögliche Ursache für diesen erhöhten Energieverlust in der CuAlMn-Legierung ist die spannungsinduzierte martensitische Phasenumwandlung, die bereits bei geringen Dehnungen auftreten kann. Die Werte des logarithmischen Dekrements der

Gedächtnislegierung liegen dabei um mehr als eine Größenordnung über denen der Referenzlegierung. Abbildung 5 veranschaulicht diesen Effekt.

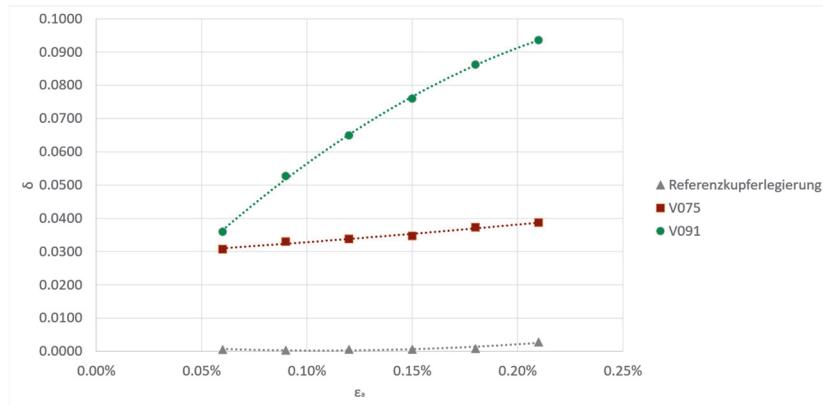


Abbildung 5: Gemitteltes logarithmisches Dekrement für verschiedene Dehnungsamplituden

Die Streuung der Messwerte sowie die Reproduzierbarkeit während der zyklischen Belastung wurden anhand der Standardabweichungen bewertet (Tabelle 2). Dabei wird sichtbar, in welchem Umfang die Messwerte innerhalb eines Versuchs und bei den verschiedenen Dehnungsamplituden variieren. Diese Analyse liefert Hinweise darauf, ob für zukünftige Untersuchungen Anpassungen erforderlich sind – etwa zur Reduzierung des Messfehlers oder zur Minimierung einzelner Ausreißer.

Tabelle 2: Standardabweichungen der einzelnen Versuche

Dehnungsamplitude ϵ_a	Standardabweichung		
	Referenzkupferlegierung	V075	V091
0,06%	0,0005	0,0020	0,0027
0,09%	0,0003	0,0017	0,0022
0,12%	0,0009	0,0024	0,0032
0,15%	0,0006	0,0028	0,0040
0,18%	0,0004	0,0017	0,0036
0,21%	0,0009	0,0024	0,0019

Es ist auffällig, dass die Standardabweichungen der Referenzkupferlegierung vergleichsweise hoch ausfallen. Dies weist darauf hin, dass die logarithmischen Dekremente auch im stabilisierten Bereich der Hystereseschleife einzelne Ausreißer aufweisen und somit eine geringere Wiederholbarkeit zeigen. Für zukünftige Untersuchungen sollte daher geprüft werden, inwiefern eine Anpassung des Verformungsgradienten oder des untersuchten Dehnungsbereichs zu einer Verbesserung der Reproduzierbarkeit und Messstabilität beitragen kann.

Fazit

Die ersten Ergebnisse der vorgestellten Messmethode zeigen Konsistenz und stimmen qualitativ mit den in der Literatur berichteten Beobachtungen überein. Für eine belastbare Bewertung der Methode ist jedoch die Wiederholbarkeit weiter zu untersuchen und zu verbessern. Dies betrifft sowohl die Reproduzierbarkeit der Messergebnisse innerhalb eines Versuchs – insbesondere über verschiedene Hystereseschleifen hinweg – als auch zwischen unterschiedlichen Proben derselben Materials unter identischen Prüfbedingungen.

Die Untersuchung der CuAlMn-Gedächtnislegierung bleibt aufgrund ihres ausgeprägten Formgedächtniseffekts bei definierten Prüftemperaturen von besonderem Interesse. Dadurch kann der Temperatureinfluss auf die Dämpfungseigenschaften sowie auf die Phasenumwandlung detaillierter analysiert werden. Hierfür erscheint die Konstruktion und Integration einer temperierten Prüfkammer für die SWINGLY-Maschine sinnvoll. Zudem sollten Proben unterschiedlicher Zusammensetzung nach der Fertigung einer zusätzlichen Materialcharakterisierung unterzogen werden, um insbesondere die Martensitstarttemperatur zu bestimmen. Diese Aspekte müssen in zukünftigen Untersuchungen berücksichtigt werden, um eine verbesserte Vergleichbarkeit mit vorhandener Literatur sowie eine fundierte Bewertung im Kontext der Legierungsentwicklung zu ermöglichen.

Literatur

- /1/ E. Alkountar und A. Lohrengel, „Analyse der Dämpfungseigenschaften von metallischen Legierungen: Abhängigkeit von elastischer Dehnung und Frequenz,“ IMW Institutsmitsellung, 2024.
- /2/ F. Jian, Z. Ding, Y. Wu, H. Bai, Y. Shao und B. Zi, „Energy Dissipation Characteristics and Parameter Identification of Symmetrically Coated Damping Structure of Pipelines under Different Temperature Environment,“ Symmetry, 2020.
- /3/ S. Vogelgesang, Martensitisch umwandelnde Cu-Al-Mn-Legierungen mit gezielt eingestellter, hoher Dämpfung für isotherme Anwendungen, 2007.
- /4/ T. Kuttner und A. Rohnen, Praxis der Schwingungsmessung, Springer Vieweg, 2019.