

Temperaturabhängige hochdynamische Untersuchungen des Systems Dehnungsmessstreifen/Klebstoff

Dipl.-Ing. Tabea Wilk, Klaus-Dieter Werner, Michael Kammermeier, Dr.-Ing. Matthias Bartholmai

BAM Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, Fachbereich 8.1 „Sensorik, mess- und prüftechnische Verfahren“
Unter den Eichen 87, 12205 Berlin
Telefon: +49 30 8104 4476 , Email: tabea.wilk@bam.de

1 Einleitung

Dehnungsmessstreifen (DMS) gehören zu den Standardsensoren beim Messen mechanischer Größen. Sie finden Ihre Anwendung auf unterschiedlichen Gebieten, als sensorische Komponente in Messaufnehmern (z.B. Wägezelle, Kraftaufnehmer) oder für Dehnungsmessungen im Bereich der Strukturüberwachung unter anderem an Brücken oder Bauwerken. Sie werden in verschiedenen Größen geliefert und mit entsprechenden Klebstoffen auf der Objektoberfläche des Messobjekts an der jeweiligen Messstelle angebracht und an das Messsystem angeschlossen. Dieser Aufbau wird bei den verschiedenen Anwendungen unterschiedlichen Temperaturen und Umwelteinflüssen ausgesetzt. Dabei wird das System DMS/Klebstoff in seinen Eigenschaften verändert und das Ergebnis der Dehnungsmessung beeinflusst. Beispielsweise kann es zu einer Verfälschung der Messergebnisse kommen, wenn der Klebstoff die Dehnung des Messobjekts nicht vollständig auf den DMS überträgt, oder es kann eine Nullpunktverschiebung der Dehnungsmessung auftreten.

An der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung werden Fallversuche von Lager- und Transportbehältern durchgeführt. Für diese werden Dehnungsmessstreifen auf den Behälter angebracht um die Dehnung bzw. Verformung zu messen. Bei den Versuchen werden verschiedene Parameter berücksichtigt: Neben unterschiedlichen Fallhöhen (u.a. 9 m und 1 m) wird auch der Temperatureinfluss auf den Fallversuch z.B. bei -40 °C oder +100 °C untersucht. Zur Applizierung von DMS auf Objektoberflächen gibt es für verschiedene Anwendungsbedingungen (DMS-Typ, Objektoberflächenbeschaffenheit, Einsatztemperatur) von den DMS-Herstellern jeweils empfohlene Klebstoffe. Insbesondere für Anwendungsfälle mit hochdynamischer Belastung (Fallversuche, Crash-Tests) und großem Temperaturbereich ist es erforderlich, dass die Dehnungsmessstreifen zuverlässige Werte ausgeben. Dies ist nur gegeben, wenn der Klebstoff eine gute Verbindung zwischen Messobjekt und Dehnungsmessstreifen herstellt.

2 Problemstellung

Die Zuverlässigkeitsuntersuchung des Klebstoffes ist ein wichtiger Punkt um Aussagen über die Qualität des Messsignales zu treffen. Für die Versuche wird ein mit einer Temperaturkammer kombinierter Hopkinson-Stab genutzt, der zur Simulation hochdynamischer Vorgänge (z.B. Falltests) im Labormaßstab

zum Einsatz kommt. Anhand unterschiedlicher Kombinationen von DMS-Typen und Klebstoffen kann das Beschleunigungsverhalten systematisch untersucht sowie qualitativ und quantitativ bewertet werden. Dabei sind die Eigenschaften des Klebstoffs (Viskosität, Versprödung) und der Phasengrenzflächen zwischen Messobjekt, Klebstoff und DMS (Haftungseigenschaften) relevant. Ein weiterer Einflussfaktor, der berücksichtigt wird ist das Temperaturverhalten des Gesamtsystems (Eigenschaften von Messobjekt und DMS). Dabei sind unter anderem die verschiedenen Wärmeausdehnungskoeffizienten von Stabmaterial, Probenmaterial und Schraubenmaterial zu berücksichtigen.

3 Materialien

3.1 Dehnungsmessstreifen

In den oben beschriebenen Versuchen wurden DMS des Typs 1-LY61-6/350 (Hottinger Baldwin Messtechnik) verwendet. Der Dehnungsmessstreifen ist in Abbildung 1 dargestellt und die Kennzeichnung im folgenden in Ihrer Bedeutung aufgeschlüsselt:

- 1 – steht für Standard-Dehnungsmessstreifen
- L – bedeutet, dass ein Messgitter verwendet wird, ein so genannter Linear-DMS
- Y – kennzeichnet die Serie Y, bei der Träger und Abdeckung aus Polyimid sind und die Messgitterfolie aus Konstantan
- 6 – steht für die Anordnung der Gitter, Art und Lage der Anschlüsse
- 1 – ist das Material auf das der DMS-Temperaturgang angepasst ist. In diesem Fall ferritischer Stahl mit einem Wärmeausdehnungskoeffizient von $10,8 \cdot 10^{-6}/K$.
- 6 – ist die Messgitterlänge in mm
- 350 – steht für den Messgitterwiderstand in Ohm.

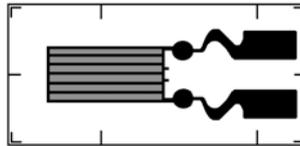


Abbildung 1: Dehnungsmessstreifen des Typs 1-LY61-6/350.

3.2 Spezifikation der Klebstoffe

Für die Untersuchungen wurden vier Klebstoffe ausgewählt. Zwei der Klebstoffe (2 und 4) werden bei den Fallversuchen der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung zur Anbringung der Dehnungsmessstreifen üblicherweise verwendet. Die zwei zusätzlichen Klebstoffe wurden so gewählt, dass sie die Anforderungen an die minimale und maximale zu untersuchende Temperatur erfüllen.

Der **Klebstoff 1** ist ein Zweikomponenten-Klebstoff. Die Temperaturbeständigkeit für DMS-Anwendungen wird für nullpunktsbezogene Messungen von -200 bis +200 °C angegeben. Für nicht nullpunktsbezogene Messungen liegt dieser Temperaturbereich von -200 bis +280 °C. Dieser Klebstoff ist von seinen Spezifikationen im angedachten Messbereich.

Bei **Klebstoff 2** handelt es sich um einen flüssigen Klebstoff. Seine Temperaturbeständigkeit wird für Kurzzeitversuche von -70 °C (ca. 15 min) bzw. -40 °C (ca. 1 h) bis +120 °C angegeben. Bei

Langzeitversuchen minimiert sich der Bereich auf -30 °C bis $+100\text{ °C}$. Der Erweichungspunkt wird bei 165 °C angegeben. Die Obergrenze für die Dehnungsmessung ist bei nullpunktsbezogenen Messungen $+100\text{ °C}$ und bei nicht nullpunktsbezogenen Messungen $+120\text{ °C}$.

Der **Klebstoff 3** ist ebenfalls ein flüssiger Klebstoff. Die Temperaturbeständigkeit wird für einen Bereich von -196 °C bis 120 °C angegeben.

Klebstoff 4 ist auch ein Zweikomponenten-Klebstoff. Die Temperaturgrenze für Dehnungsmessungen bei nullpunktsbezogenen Messungen wird von -200 bis $+60\text{ °C}$ angegeben, bei nicht nullpunktsbezogenen Messungen von -200 bis $+80\text{ °C}$.

4 Untersuchungsmethode

4.1 Hopkinsonstab mit kombinierter Temperaturkammer

Der Aufbau eines Hopkinson-Stabs, dessen Bezeichnung auf seinen Erfinder Bertram Hopkinson (1914) zurück geht, ist in Abbildung 2 dargestellt. Am einen Ende des frei gelagerten Metallstabes ist ein Kugelpendel angebracht. Auf der Sensorseite wurde der Versuchsaufbau so modifiziert, dass der Hopkinson-Stab mit einer Temperaturkammer (WEISS WTL 34) verwendet werden kann. Dabei befindet sich das eine Stabende in der Kammer. Mit Hilfe einer geeigneten Isolation wird der Wärmeaustrag durch die Durchführung und den Stab minimiert, so dass die Temperatur in der Kammer nur minimal beeinflusst wird.



Abbildung 2: Der Hopkinsonstab kombiniert mit einer Temperaturkammer.

Das Funktionsprinzip des Hopkinson-Stabes beruht physikalisch auf der Ausbreitung einer Welle in einem unendlich dünnen Medium. Bei dem Versuch wird das Kugelpendel aus einem definierten Winkel auf den Stab fallen gelassen. Durch den Aufprall wird ein glockenförmiger Kompressionspuls erzeugt, der sich als elastische Welle entlang des Stabes ausbreitet und als Dehnung gemessen werden kann. Die

Messdatenerfassung erfolgt mit einem DEWE 5000 (Dewetron GmbH, Österreich) bei einer Messrate von 200 kHz.

Üblicherweise werden an diesem Messaufbau Beschleunigungsaufnehmer, die bei Fallprüfungen zum Einsatz kommen nach ISO 16063-13:2001 geprüft [NORM, BARTHOLMAI].

4.2 Versuchsaufbau

In diesem Experiment werden vier verschiedene relevante Klebstoffe untersucht. Diese wurden im vorhergehenden Kapitel „Materialien“ detailliert beschrieben (Eigenschaften, Einsatztemperaturen, etc.). Pro Klebstoff werden drei Dehnungsmessstreifen des Types 1-LY61-6/350 auf einem Rundstab angebracht. Der Rundstab hat denselben Durchmesser wie der Hopkinson-Stab und ist aus Stahl. Er wird an der in der Temperaturkammer befindlichen Stirnseite des Hopkinson-Stabes mit Hilfe einer Schraubverbindung angebracht. Anschließend startet ein auf den jeweiligen Anwendungsbedingungen basierend definierter Temperaturzyklus (max. Temperaturbereich -70°C bis $+180^{\circ}\text{C}$). Bei ausgewählten Temperaturen werden durch einen Pendelschlag Dehnungen erzeugt und gemessen.

Bevor die Stäbe miteinander verbunden werden und die Messung erfolgen kann, werden die Dehnungsmessstreifen auf den Rundstab appliziert. In Abbildung 3 wird der Versuchsaufbau schematisch gezeigt. Dabei steht DMS für Dehnmessstreifen und K für Klebstoff. Die Nummerierungen beschreiben beispielhaft den jeweiligen Klebstoff (1, 2, 3, 4). In der Abbildung sind nur die DMS, die mit Klebstoff 1 und 2 angebracht wurden zu sehen. Auf der Rückseite befinden sich die DMS mit den Klebstoffen 3 und 4. Um aussagekräftige Werte zu erhalten, wurden jeweils drei DMS pro Klebstoff verwendet.

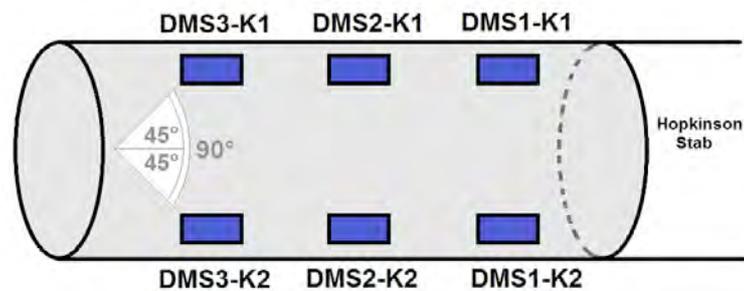


Abbildung 3: Skizze des Versuchsaufbaus – Rundstab verbunden mit dem Hopkinson Stab

In Abbildung 4 ist der verwendete Rundstab, verbunden mit dem Hopkinsonstab (rechte Bildseite), gezeigt. Die Anschlusskabel der DMS und der Thermoelemente sind mit Kabelbinder an der Stange befestigt.

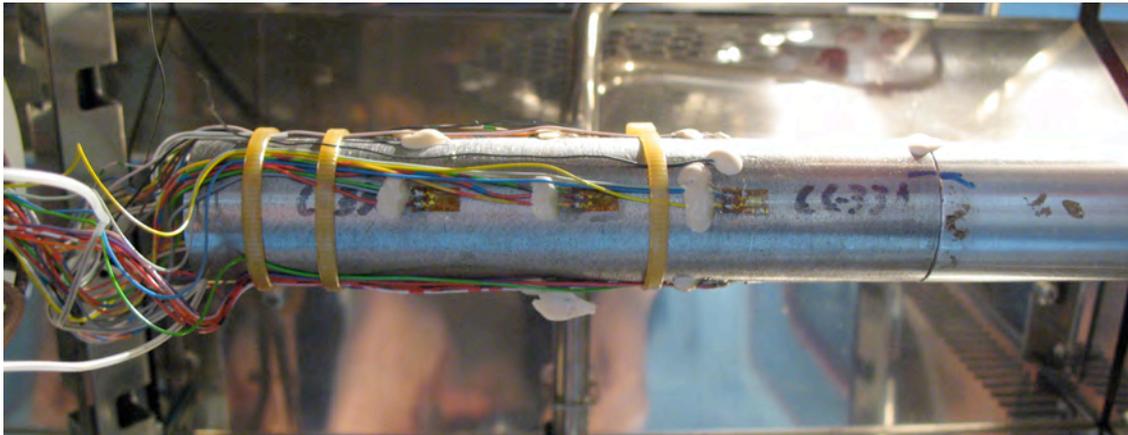


Abbildung 4: Mit Dehnungsmessstreifen applizierter Rundstab angebracht an das in der Temperaturkammer befindliche Ende des Hopkinson-Stabes.

4.3 Versuchsablauf

Mit Hilfe der Temperaturkammer kann ein Temperaturbereich von -70 °C bis $+180\text{ °C}$ realisiert werden. Aufgrund der Rahmenbedingungen und Spezifikationen der hier vorliegenden Klebstoffe wurde ein Temperaturbereich von -66 °C bis 120 °C gewählt. Um eine vollständige Temperaturdurchdringung des Stabes zu erreichen, wurden insbesondere bei den Temperaturextrema lange Verweildauern vorgesehen. Maximal- (120 °C) und Minimaltemperatur (-66 °C) wurden jeweils fast 72 h gehalten. In Abbildung 5 ist der Versuchsablauf schematisch gezeigt.

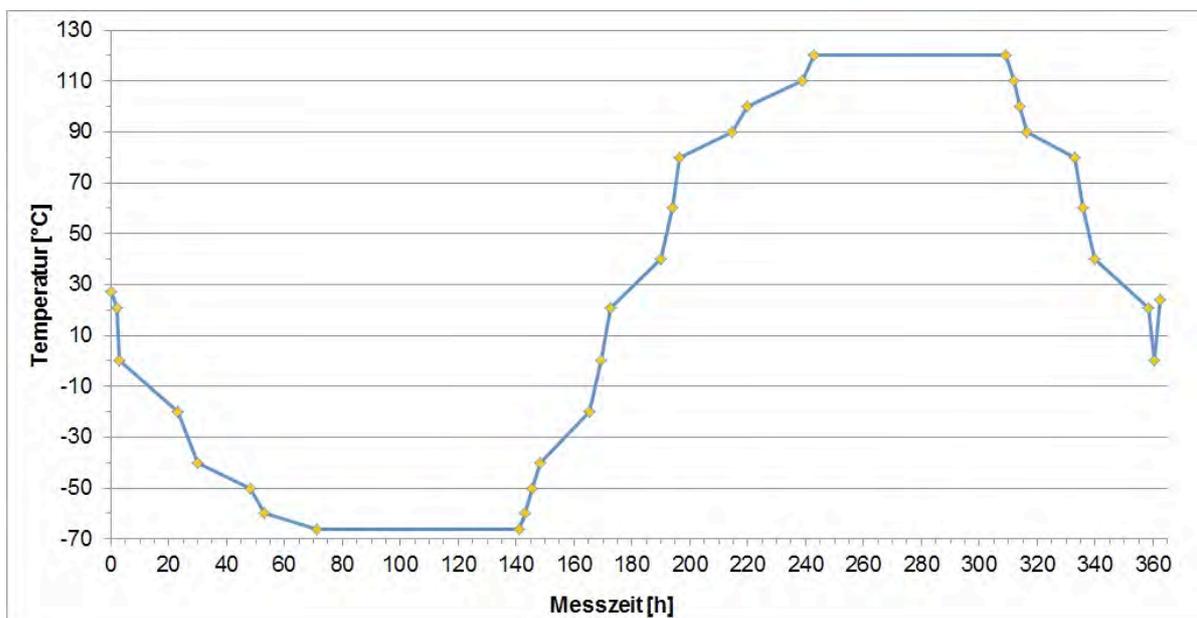


Abbildung 5: Temperaturzyklus und Messpunkte des Versuches

An jedem Messpunkt wurde mit dem Kugelpendel der gleiche Dehnungsimpuls im Stab angeregt und von allen DMS zeitgleich gemessen. Die erste Messung wurde bei Raumtemperatur durchgeführt. Anschließend wurde die Temperatur schrittweise reduziert und bei 0 °C , -20 °C , -40 °C , -50 °C , -60 °C und -66 °C Messungen durchgeführt. Danach erfolgte eine schrittweise Temperaturerhöhung und Dehnungsmessung bei denselben Temperaturen, sowie bei 40 °C , 60 °C , 80 °C , 90 °C , 100 °C , 110 °C und 120 °C . Nachfolgend wurde das System wieder bis auf 0 °C abgekühlt und bei denselben

Temperaturen die Dehnung gemessen. Eine abschließende Dehnungsmessung erfolgte bei Raumtemperatur.

5 Ergebnisse und Diskussion

Bei den in Abschnitt 4.3 angegebenen Temperaturen wurden jeweils drei Dehnungsmessung ausgeführt. Die Dehnungssignale aller DMS wurden zeitgleich mit einem DEWE 5000 (Dewetron GmbH, Österreich) erfasst. Die aus den jeweils drei Messungen gemittelten Maxima des erzeugten negativen Dehnungsimpulses (Mittlere Stauchungsmaxima) an den drei verschiedenen DMS Positionen sind in Abbildung 6 a) - c) gezeigt.

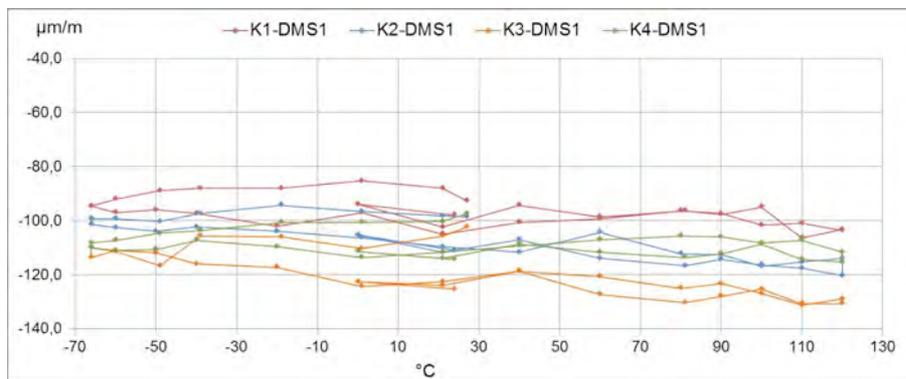


Abbildung 6 a): Mittlere Stauchungsmaxima an Position 1.

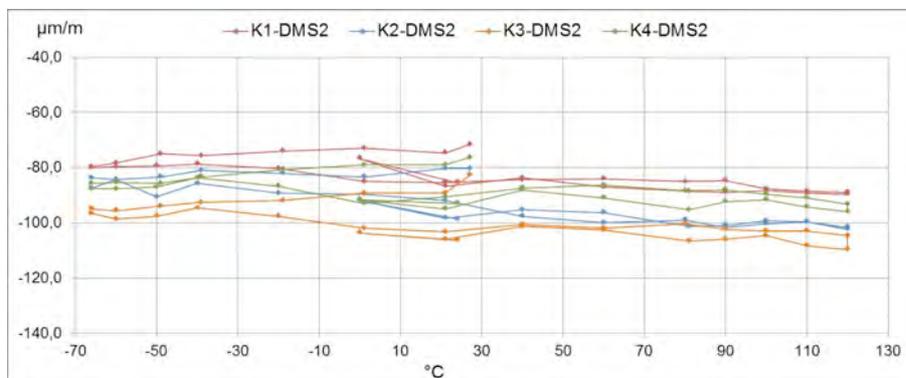


Abbildung 6 b): Mittlere Stauchungsmaxima an Position 2.

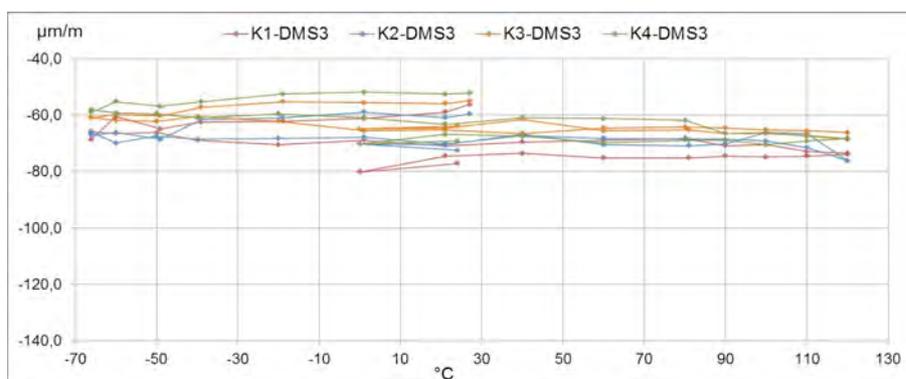


Abbildung 6 c): Mittlere Stauchungsmaxima an Position 3.

Es ist keine signifikante Temperaturbeeinflussung auf die Dehnungsimpulse erkennbar. Die im Zeitverlauf auftretende, leichte Drift in den Messreihen in Richtung niedrigerer Dehnungswerte wurde durch eine mechanische Abweichung verursacht, die zu einer leicht steigenden Auslenkung des Kugelpendels und somit geringfügig höheren Dehnungsimpulsen geführt hat. Die Unterschiede in den Stauchungsmaxima bei unterschiedlichen verwendeten Klebstoffen sind entweder auf die unterschiedliche tangentielle Position am Rundstab oder die Materialeigenschaften zurückzuführen. Des Weiteren ist ein Einfluss der axialen Position am Rundstab auf die Messergebnisse deutlich. Je näher die Messposition dem offenen Stabende ist (Position 3), desto geringer sind die Maximalwerte. Mögliche Ursachen hierfür sind Dispersion und die Überlagerung mit dem am Stabende reflektierten Impuls.

Die inneren Dehnungsmessstreifen am nächsten zum Hopkinson-Stab (Position 1) zeigen größere Messwertschwankungen innerhalb des gemessenen Temperaturzyklus. Dies kann mit Signalstreuungen, die durch die Schraubverbindung verursacht werden, erklärt werden. Weitere Abweichungen können sich durch die verschiedenen Materialien der Stäbe und der Schraube ergeben. Die unterschiedlichen Wärmeausdehnungskoeffizienten führen zu verschiedenen internen Spannungen im Material, die ersichtlich werden durch eine Lockerung der Befestigung von Hopkinsonstab und Rundstab. Durch nachziehen dieser Schraubverbindung ändert sich die Position der DMS ein wenig, wodurch eventuell ebenfalls Abweichungen im Signal entstehen können.

Bei jeder gewählten Temperatur wurde vor dem Pendelschlag der Wert des Nullpunktes erfasst. Die Messwerte sind in Abbildung 7 graphisch dargestellt und zeigen die für Dehnungsmessstreifen typische S-Form. Außerdem ist die Eigenschaft von Dehnungsmessstreifen in dem Temperaturbereich von ca. 20 °C bis 70 °C die Temperatur zu kompensieren ersichtlich. Bei Klebstoff 4 ist oberhalb von 80 °C eine deutliche Abweichung der Nullpunktmessung zu beobachten. In der Spezifikation des Klebstoffes ist für den Anwendungsbereich eine obere Temperaturgrenze von 80°C angegeben. Aufgrund der Erwärmung ändert sich die Viskosität des Klebstoffes. Durch sogenanntes Kriechen kommt es zu den gemessenen Abweichungen.

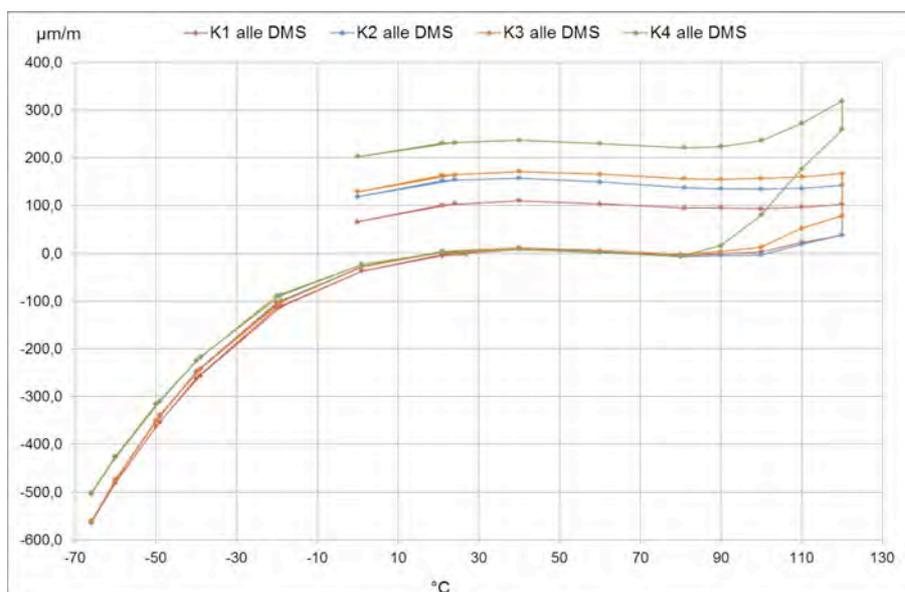


Abbildung 7: Mittelwert der Nullpunktverschiebung der jeweiligen DMS der verschiedenen Klebstoffe .

6 Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Versuch wurde der Einfluss der Temperatur über einen definierten Zeitraum untersucht um Aussagen über die Zuverlässigkeit des Klebstoffes zu treffen. Bei der Auswertung und Analyse wurde nur auf einige Eigenschaften näher eingegangen. Eine Versprödung des Klebstoffes und die damit verbundene nachlassende Haftung wäre durch Ablösung des betreffenden DMS sichtbar geworden. Dies war aber bei keinem der applizierten DMS der Fall.

Ein wichtiges Ergebnis dieser Untersuchungen ist, in Bezug auf die Zuverlässigkeit der Klebstoffe, dass die Temperatur keinen signifikanten Einfluss auf die Stauchungsmaxima bei hochdynamischer Beanspruchung hat. Dies gilt auch außerhalb der spezifischen Anwendungstemperaturbereiche. Das bedeutet, dass die Klebstoffe trotz der Temperaturbelastung außerhalb Ihres Anwendungsbereiches zuverlässige Messwerte bei hochdynamischer Beanspruchung liefern. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass der Versuch nur über einen Zeitraum von 15 Tagen durchgeführt wurde. Der Temperaturzyklus wurde auch nur einmal durchlaufen. Deshalb kann in Bezug auf längere Zeiträume (> 15 Tage) keine Aussage zur Zuverlässigkeit der Klebstoffe getroffen werden.

Im Vergleich zu dem hochdynamischen Verhalten widerspiegelt das Nullpunktverhalten den statischen Einfluss. Bei der Auswertung der Nullpunktlinien ist offensichtlich, dass es zu Abweichungen außerhalb des spezifizierten Messbereiches kommt. Daraus kann die Schlußfolgerung getroffen werden, dass der Temperatureinfluss auf die Dehnungsmessung von der Dynamik der Anregung abhängig ist. Es ist geplant, weitere Versuche mit geringerer Dynamik der Dehnungsbeanspruchung unter Verwendung eines Biegebalkens durchzuführen. Im Vergleich mit dem bereits durchgeführten Versuch können Aussagen über den Temperatureinfluss bei Dehnungen mit unterschiedlich großem Maximalwert getroffen werden. Zusätzlich zielen Überlegungen auf die Kombination von hochdynamischen und geringer dynamischen Versuchen ab. Das bedeutet das System DMS/Klebstoff ist einer Doppelbelastung ausgesetzt. Zunächst soll die geringer dynamische Durchbiegung erfolgen und anschließend der hochdynamische Beschuss.

7 Literatur

- [1] ISO 16103:2005: Packaging - Transport packaging for dangerous goods - Recycled plastics material. Hrsg. International Organisation for Standardization. 1. Ausg. Genf 2005.
- [2] Bartholmai, M., Werner, K.-D., Kammermeier, M.: Temperaturabhängige Prüfung von Beschleunigungsaufnehmern für stoßartige Beanspruchungen, ITG/GMA-Fachtagung - Sensoren und Messsysteme 2010 (Proceedings) (2010); VDE-Verlag