

Titel

Einsatz von Formgedächtnislegierungen zur Bedämpfung von Werkzeugschwingungen im Fräsprozess

IGF-Nr.: 20957 N

Forschungseinrichtungen

Forschungseinrichtung 1: Institut für Werkzeugforschung und Werkstoffe (IFW)

Forschungseinrichtung 2: Werkzeugmaschinenlabor RWTH Aachen (WZL)



Ansprechpartner beim IFW:

Fabian Hoffmann, M. Eng.

02191/5921-143

hoffmann@fgw.de

Ansprechpartner beim WZL:

Niclas Klumpen, M. Sc.

0241/80-27441

N.Klumpen@wzl.rwth-aachen.de

Danksagungen

Das IGF-Vorhaben 20957 N „Einsatz von Formgedächtnislegierungen zur Bedämpfung von Werkzeugschwingungen im Fräsprozess“ der Forschungsvereinigung Forschungsgemeinschaft Werkzeuge und Werkstoffe e.V. (FGW), Papenberger Straße 49, 42859 Remscheid, wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages



Ausgangssituation

Gute Dämpfungseigenschaften spielen im Bereich von spanenden Werkzeugmaschinen eine wichtige Rolle, da sie zu einer stabilen Bearbeitung und somit zu höherer Maßhaltigkeit der zu fertigenden Bauteile beitragen. Kritische Bearbeitungssituationen können abhängig von den dahinterliegenden strukturdynamischen Eigenschaften der Maschine in nahezu allen Bearbeitungsprozessen entstehen. Dies wiederum führt oft dazu, dass Technologieparameter, deren Anwendung für eine wirtschaftliche Bearbeitung notwendig ist, nicht genutzt werden können [Wec19]. Da bisherige Ansätze zur Lösung von Stabilitätsproblemen, wie der Einsatz von Schwingungsdämpfern oder speziellen Dämpfungswerkzeugen oft kundenspezifisch und damit aufwendig und kostenintensiv sind, ist die Entwicklung einfacher schwingungsreduzierender Maßnahmen erforderlich [Sch19]. Einen innovativen Entwicklungsansatz stellt die Verwendung von Dämpfungselementen aus pseudoelastischen Formgedächtnislegierungen (PE-FGL) dar. Hierbei handelt es sich um einen multifunktionalen Werkstoff, welcher besondere elastische und sensorische Eigenschaften aufweist. Charakteristisch für PE-FGL ist die Bildung einer Hysterese während eines Be- und Entlastungszyklus, deren eingeschlossene Fläche ein Maß für das bestehende Dämpfungsvermögen des Werkstoffes ist [Cze13].

Forschungsziel

Die Dämpfung von Werkzeugschwingungen sollte unter Zuhilfenahme der pseudoelastischen Eigenschaften von FGL realisiert werden, indem geeignete Elemente entwickelt und in den Bearbeitungsprozess integriert werden.

Zur Erreichung des übergeordneten Ziels wurden verschiedene Teilziele definiert. Für die Versuchs- und Erprobungsphase mussten entsprechende Dämpfungselemente bereitgestellt werden. Hierzu sollte ein Fertigungsprozess entwickelt werden und die thermomechanische Vorbehandlung erfolgen. Während der Untersuchung der FG-Elemente unter geringen und hohen dynamischen Druckbelastungen war der Einbezug unterschiedlicher Einflussfaktoren geplant, u. a. die Ausnutzung des mechanischen Spannungszustands auf die Eigenschaften in Form von eingespannten Elementen und der Einfluss der Umgebungstemperatur. Ein weiteres Teilziel war die Ermittlung des Zusammenhangs zwischen Dämpfergeometrie und -integration auf die Dämpfungseigenschaften. Zusätzlich sollten erste Ansätze zur simulativen Abbildung erarbeitet werden.

Vorgehensweise und Forschungsergebnisse

Zu Beginn des Vorhabens wurde die konzeptionelle Ausarbeitung in enger Abstimmung mit den Unternehmen des PA vorgenommen. Das fokussierte Anwendungsszenario sah die Einbindung von zylinderförmigen FG-Elementen unterhalb der Wendeschneidplatte in einem Drehprozess vor. In dem Zusammenhang sollten die Dämpfungselemente so in die Unterlegplatte der Wendeschneidplatte integriert werden, dass sie sich im Hauptkraftfluss befinden. In Abbildung 1 wird das Anwendungsszenario verdeutlicht.

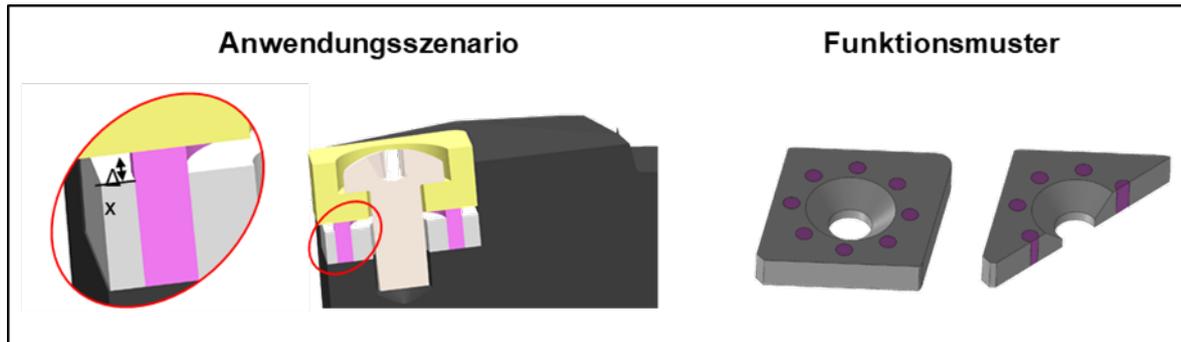


Abbildung 1: Anwendungsszenario für die Integration der Dämpfungselemente

Die grundlegende Untersuchung der Dämpfungseigenschaften unterteilte sich im Wesentlichen in Versuchsreihen zum Verhalten von FG-Probekörpern unter geringen und hohen dynamischen Druckbelastungen. Hierzu wurde zunächst eine Auswahl von potentiell in Frage kommenden und kommerziell verfügbaren FG-Legierungen getroffen. Eine engere Auswahl wurde im Projektverlauf auf Grundlage gewonnener Erkenntnisse und in Rücksprache mit dem PA vorgenommen. Präferiert wurden Materialien auf NiTi-Basis. Cu-basierte FGL waren zum Zeitpunkt der Projektbearbeitung nur sehr begrenzt kommerziell verfügbar oder befanden sich in einem frühen Entwicklungsstadium und wurden entsprechend noch nicht betrachtet.

Im Anschluss an die Materialvorauswahl wurden die Phasenumwandlungstemperaturen (PUT) mithilfe der Wärmestrom-Differentialkalorimetrie (DSC = differential scanning calorimetry) ermittelt. Für das Projekt war die Kenntnis der Umwandlungstemperaturen wichtig, um die Einsatzgrenzen, insbesondere die untere Temperaturgrenze, besser abschätzen zu können. Es musste sichergestellt werden, dass sich das Material während des Einsatzes im austenitischen Zustand befindet und damit generell die Möglichkeit zur spannungsinduzierten Phasenumwandlung besteht. Vor den Versuchen wurde das Material einer Wärmebehandlung unterzogen. Bei dem vorwiegend verwendeten Material NiTi#1 vom Hersteller Fort Wayne Metals, wärmebehandelt bei einer Glühtemperatur von 400 °C für 20 Minuten, lag die austenitische Phase im spannungsfreien Zustand ab einer Temperatur von ca. -19 °C vollständig vor. Die untere Temperaturgrenze für den Einsatz des Materials während des zu dämpfenden Bearbeitungsszenarios liegt in etwa bei 20 °C und damit auch unter Druckbelastung deutlich über der A_f -Temperatur.

Erkenntnisse zur Vorbehandlung der druckbelasteten Probekörper wurden anhand der Aufnahme von Spannungs-Dehnungs-Kurven in Zugversuchen gewonnen. Da sich die Druckversuche im Vergleich zu den Zugversuchen aufgrund der aufwendigeren Probenerstellung und Versuchsdurchführung wesentlich komplexer gestalten, wurden zunächst Zugversuche mit dem Ziel durchgeführt, den Umfang der Versuche unter Druckbelastung einzugrenzen. Zur Festlegung der Versuchsparameter wurde eine Auswahl der Vorgaben aus der *VDI 2248, Blatt 3, Produktentwicklung mit Formgedächtnislegierungen* für pseudoelastisches Materialverhalten miteinbezogen [VDI2248-3]. Durch die Versuchserkenntnisse konnten die Wärmebehandlungsparameter auf Temperaturen von 400 °C und 500 °C bei Glühdauern zwischen 10 min und 30 min eingegrenzt werden. Diese Parameter wurden aufgrund des ausgeprägten pseudoelastischen Verhaltens ausgewählt.

Für die Auswertung wurden ebenfalls die Vorgaben der VDI 2248 zu den Zugversuchen als Orientierung herangezogen, da für Versuche unter Druckbelastung bisher keine Vorgaben existieren. In Abbildung 2 sind die Auswerteparameter für die Druckversuche anhand einer schematischen Spannungs-Stauchungs-Kurve zu sehen.

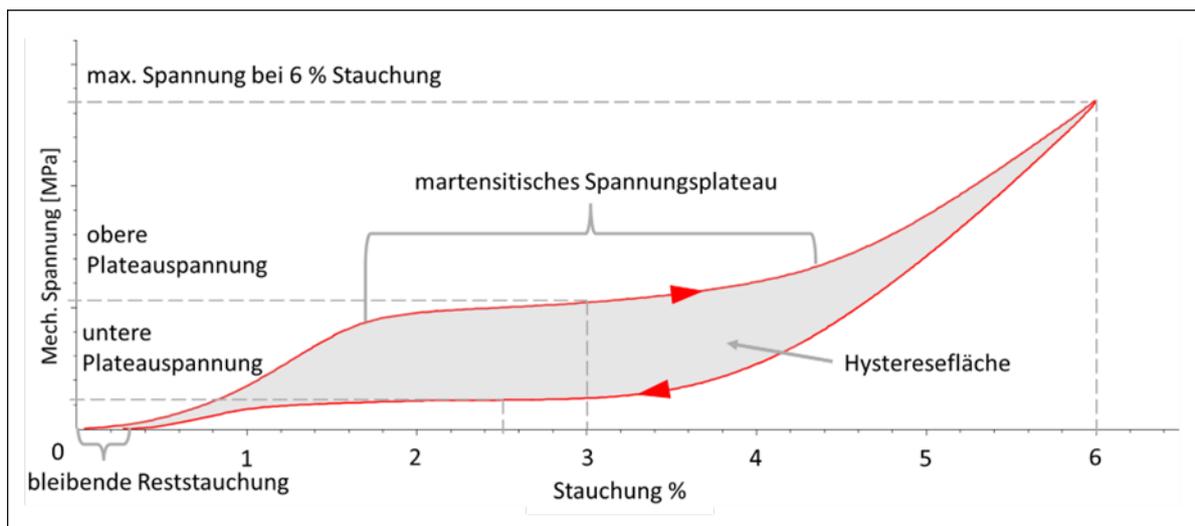


Abbildung 2: Schematische Darstellung einer Spannungs-Stauchungs-Kurve mit den festgelegten Auswerteparametern

Für die Durchführung der Druckversuche wurde analog zu den Zugversuchen die Zug-Druck-Prüfmaschine *TIRAtest 2820* des Herstellers *TIRA* eingesetzt. Die Konfiguration des Versuchsaufbaus ist in Abbildung 3 dargestellt.

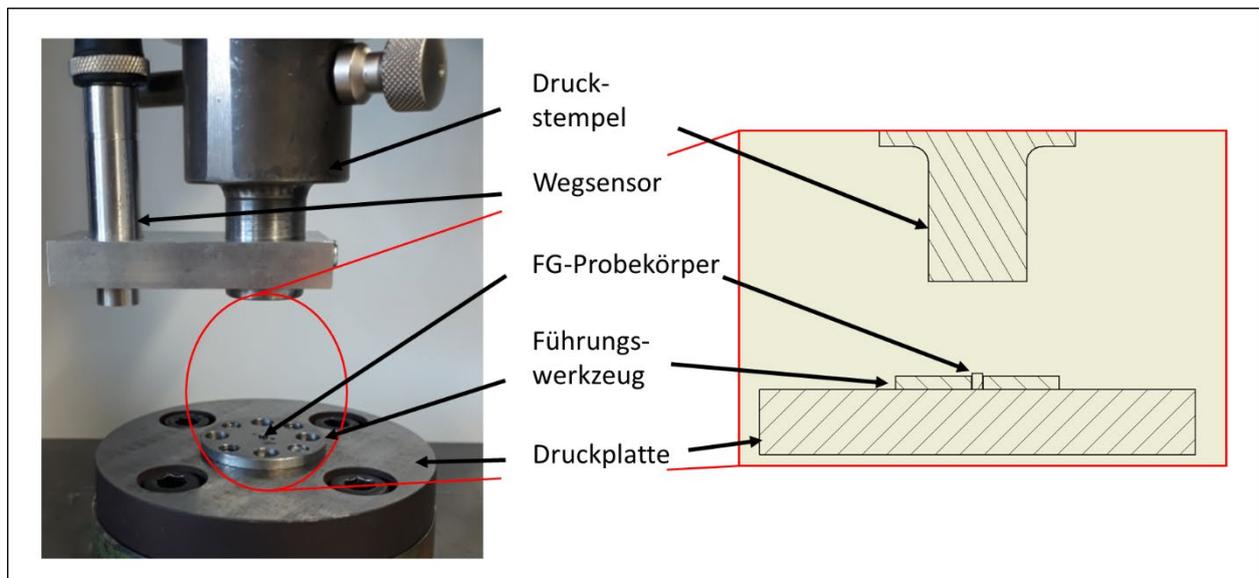


Abbildung 3: Konfiguration des Versuchsaufbaus

Zur Herstellung der benötigten Probekörper wurde ein reproduzierbar durchführbarer Fertigungsprozess erarbeitet, in welchem die Proben zunächst von der Drahtrolle vortrennt sowie wärmebehandelt und anschließend in einem Schleifprozess in die zuvor festgelegte Länge gebracht wurden.

Folgende Einflussfaktoren wurden in den Versuchsreihen unter Druckbelastung untersucht:

- Einfluss der Wärmebehandlung
- Einfluss der Legierungszusammensetzung
- Einfluss der Vorzyklisierung/des Ermüdungsverhaltens
- Einfluss der Umgebungstemperatur
- Einfluss der Einspannsituation

Hinsichtlich des Einflusses der Wärmebehandlung führt eine Erhöhung der Glühtemperatur zu einer geringeren Steifigkeit des Werkstoffs im Bereich der Phasenumwandlung und insgesamt zu geringeren mechanischen Spannungen bei gleicher Stauchung. Für beide Glühtemperaturen nimmt die bleibende Reststauchung, welche aus einer nicht vollständigen Rückumwandlung in die austenitische Phase oder einer plastischen Verformung resultiert, mit längerer Glühdauer zu. Die Hystereseenergie erhöht sich ebenfalls tendenziell mit längerer Glühdauer.

Um den Einfluss der Legierungszusammensetzung zu untersuchen, wurden drei verschiedene pseudoelastische NiTi-Legierungen des Herstellers Fort Wayne Metals mit geringen Unterschieden im Ni-Anteil (Ni-Anteil lag zwischen 55,70 und 55,97 wt.%) für die Versuche verwendet. Dabei weist das Material mit dem geringsten Ni-Anteil die höchsten PUT auf. Die Werte für die maximalen mechanischen Spannungen liegen bei dem Material mit den geringsten Phasenumwandlungstemperaturen am höchsten. Hinsichtlich der Hystereseenergie resultiert die höhere Glühtemperatur von 500 °C in höheren Werten. Im Vergleich der verschiedenen Legierungen zeigt sich bei der Legierung mit den höchsten PUT der höchste Wert für die Hystereseenergie.

Wurden die Elemente vorzykliert, zeigten sich im Bereich des mechanischen Spannungsplateaus bis ca. 4 % Stauchung noch keine nennenswerten Einlaufeffekte in Form einer Degradation der mechanischen Spannung. Wurde die Stauchung weiter erhöht trat eine deutliche Degradation auf. Hieraus lässt sich schließen, dass eine Belastung über das Martensitplateau hinaus in den nachgelagerten annähernd linear-elastischen Bereich unvorteilhaft für die Effektstabilität und damit die Auslegung der FG-Elemente ist.

Zur Untersuchung des Einflusses der Umgebungstemperatur wurde ein modifizierter Versuchsaufbau innerhalb einer Wärmekammer in Verbindung mit der Zug-Druck-Prüfmaschine eingerichtet und die Versuchstemperatur in den Versuchen stufenweise um 10 K von 20 °C auf 90 °C erhöht. Aus einer Erhöhung der Temperatur resultiert ein steilerer Anstieg der Spannungs-Stauchungs-Kurven und eine ansteigende mechanische Spannung.

Im Hinblick auf die angestrebte Integration der FG-Dämpfungselemente unterhalb der Wendeschneidplatte, wurden die Auswirkungen einer kraftschlüssigen Einpressung auf die Spannungs-Stauchungs-Eigenschaften untersucht. Bei den resultierenden Kurvenverläufen aus den Versuchsreihen ist der Bereich der spannungsinduzierten Martensitumwandlung zwar nicht mehr zu erkennen, trotzdem liegt pseudoelastisches Verhalten in Form einer ausgeprägten Hysterese zwischen Be- und Entlastungsweig vor. Im Vergleich zwischen frei-gelagerter und eingepresster Probe können deutliche Unterschiede in den Kurvenverläufen festgestellt werden. Die mechanischen Spannungen liegen bei der eingepressten Probe deutlich höher.

Als Fazit aus den Versuchen unter geringen dynamischen Druckbelastungen kann festgehalten werden, dass sämtliche untersuchte Einflussfaktoren die Spannungs-Stauchungs-Eigenschaften in unterschiedlicher Weise beeinflussen. Dadurch bestehen einerseits Möglichkeiten, die Eigenschaften an die jeweils vorliegenden Anwendungsfälle anzupassen, andererseits müssen die Probenvorbereitung und -integration sehr sorgfältig erfolgen, damit dem System keine ungewollten Eigenschaften eingeprägt werden.

Zur Untersuchung der Dämpfungseigenschaften von FGL unter hohen zyklischen Belastungen wurde ein Prüfstand durch das WZL konstruiert. Dargestellt ist dieser in Abbildung 4. Mit Hilfe dieses Prüfstands können FG-Proben unter Druck mit einer Kraftamplitude bis zu 4.500 N zyklisch belastet werden. Zur Erzeugung dieser Kraftamplitude wird ein Hydraulikerreger verwendet. Über diesen können die Kraftamplitude und die Frequenz gesteuert werden. Alternativ zum Hydraulikerreger wurde für den hochfrequenten Bereich ein Piezoaktor eingesetzt. Die zu untersuchenden Proben wurden dabei in einer Spanneinheit positioniert. Die Stauchung wurde über zwei um 180° versetzte Wegmessensoren aufgezeichnet, um eine mögliche Verkipfung zu berücksichtigen.

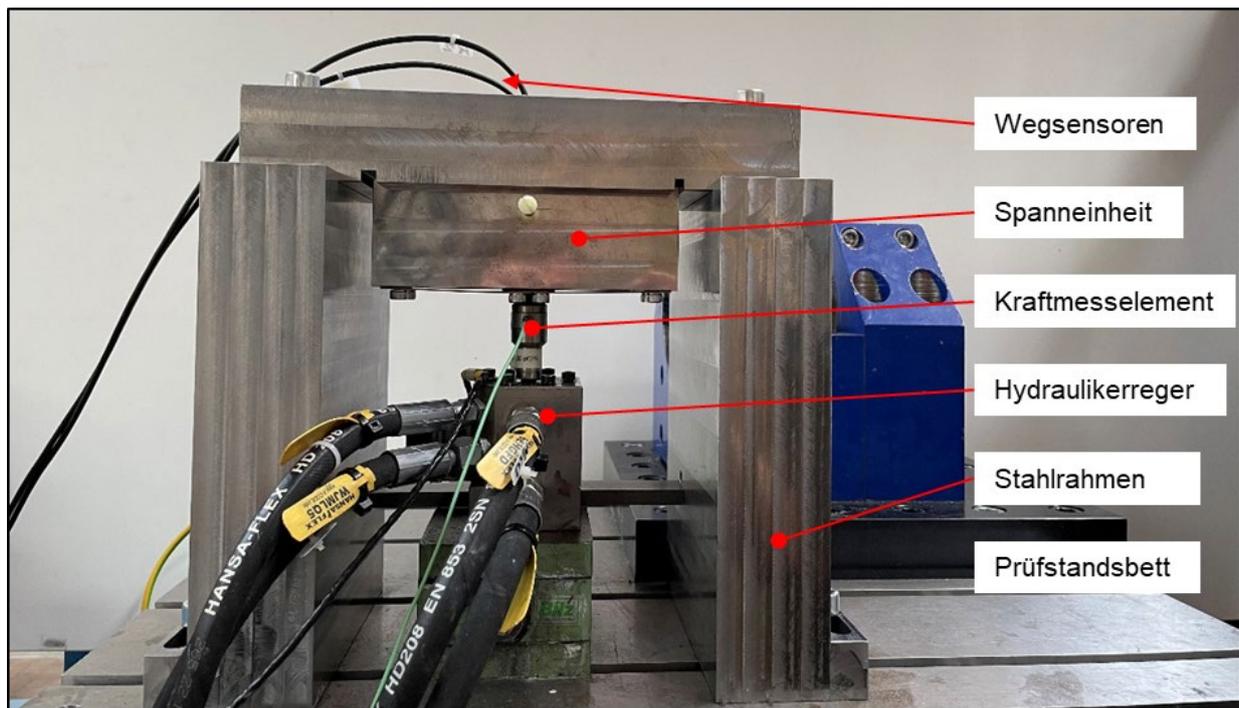


Abbildung 4: Dynamikprüfstand

Bei den Druckversuchen unter hohen dynamischen Belastungen wurden für jede Probe mehrere Versuchsdurchläufe hintereinander durchgeführt. Dabei wurde in einem Versuchsdurchlauf im ersten Zyklus zunächst die Gesamthysteresekurve (GH) aufgezeichnet. Im Anschluss wurde der Dauerversuch mit einer zuvor definierten Zyklenzahl durchgeführt, aus welchem sich die Zwischenhysteresekurven (ZH) ergaben. Dabei umfasst die ZH nicht den gesamten Kraftbereich, sondern nur einen zuvor definierten kleineren Kraftbereich.

Zur Charakterisierung der Dämpfungseigenschaften unter dynamischer Belastung im Dauerversuch wurde ein Versuchsplan aufgestellt, in welchem vier verschiedene Einflussgrößen in Bezug auf das Dämpfungsvermögen betrachtet werden sollten:

- Einfluss der Wärmebehandlungsparameter
- Einfluss der Einspannsituation
- Einfluss des Ermüdungsverhaltens
- Einfluss der Belastungsfrequenz

Im Allgemeinen wurden die FG-Elemente in der GH zwischen 0 und 3.000 N und in der ZH zwischen 500 und 1.500 N belastet.

In Bezug auf den Einfluss der Wärmebehandlungsparameter wurde festgestellt, dass bei allen Versuchsproben nur geringfügige Abweichungen der mechanischen Spannungen und Stauchungen der GH und ZH über 600.000 Lastzyklen vorliegen. Somit kann die Aussage getroffen werden, dass der Einfluss der dynamischen Belastung auf die GH und ZH sehr gering ausfällt. Lediglich in Bezug auf den Flächeninhalt der ZH und der damit verbundenen Energiemenge pro Zyklus, die dissipiert wird, ist eine signifi-

kante Abweichung unter den verschiedenen Wärmebehandlungsparametern erkennbar. So weist beispielsweise die Probe mit 400 °C und 10 min Glühdauer die flächenmäßig stabilste ZH auf, bei der verhältnismäßig größten durchschnittlichen dissipierten Energiemenge.

Zur Auswertung wurden mehrere Auswertekriterien zur Charakterisierung der Proben unter hoher dynamischer Druckbelastung definiert. Dazu gehören bei der Betrachtung der GH die Änderungen der maximalen Spannung und Stauchung über der Anzahl der Lastzyklen. In Bezug auf die ZH wurden sowohl die Änderungen der minimalen und maximalen Stauchung als auch die Änderungen der minimalen und maximalen Spannung als Auswertekriterium herangezogen.

Die Untersuchungen zu den eingespannten Proben zeigen, dass die mögliche zu dissipierende Energiemenge reduziert wird. Vergleicht man die Wärmebehandlungsparameter miteinander, tritt der Effekt der Minimierung der Stauchung der GH und ZH sowie der Reduktion der zu dissipierenden Energiemenge bei 400 °C und 10 min am geringsten auf.

Die Versuchsergebnisse zum Ermüdungsverhalten zeigen, dass sich bei allen Proben die Länge mit der Zunahme der Lastzyklen verringert. Allerdings stellt sich nur bei der Probe mit 400 °C und 10 min ein konstantes Niveau ein. Für diesen Werkstoffzustand scheint sich ein Maximum an möglichen Restmartensit unter den untersuchten Belastungsparametern gebildet zu haben. Die anderen Werkstoffzustände scheinen einen größeren maximalen Restmartensit-Gehalt zu ermöglichen. Für eine spätere Anwendung sollte ein möglichst geringer Restmartensit-Gehalt gebildet werden können. Entsprechend scheint der Werkstoffzustand nach einer Wärmebehandlung bei 400 °C für 10 Minuten, der am besten geeignete der hier untersuchten Zustände zu sein.

Hinsichtlich der Einflussgröße der Frequenz zeigt sich, dass bei allen Wärmebehandlungsparametern die Menge der möglichen Energie, die dissipiert werden kann, mit der Frequenz annähernd linear zunimmt.

Allgemein zeigen die Untersuchungen unter hohen dynamischen Belastungen, dass der Wärmebehandlungsparameter 400 °C und 10 min die stabilsten Eigenschaften in Bezug auf die unterschiedlichen Einflussgrößen aufweist. Auf dieser Grundlage der Ergebnisse wurde im Folgenden mit diesem Wärmebehandlungsparameter als bevorzugter Werkstoffzustand fortgeföhren.

Unter Verwendung der Simulationssoftware *Ansys* wurden FEM-Simulationen hinsichtlich der Spannungs-Stauchungs-Eigenschaften der FG-Elemente durchgeführt. Als Grundlage für die Simulationserstellung wurde zunächst die Belastungssituation in den Druckversuchen modelliert (Abbildung 5)

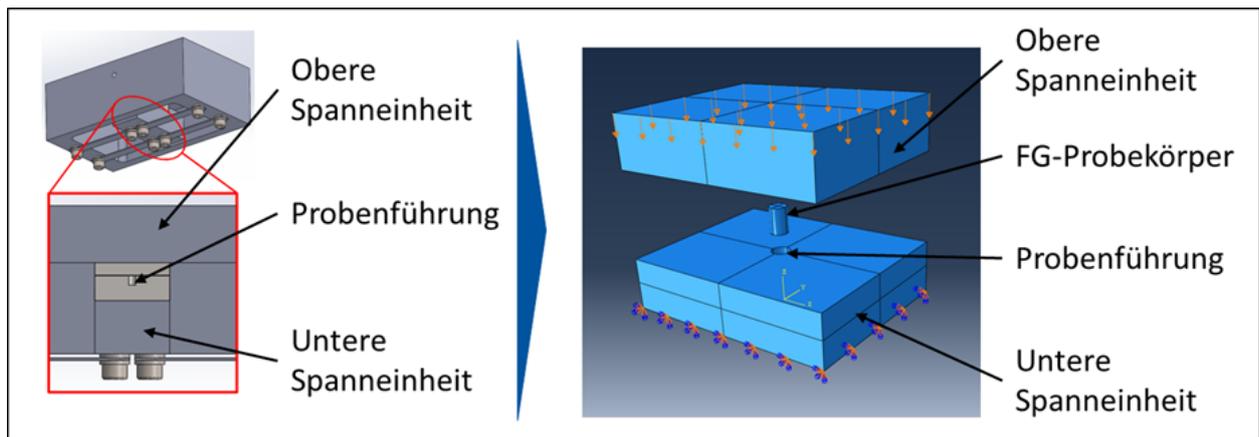


Abbildung 5: Übertragung der Belastungssituation am Prüfstand als CAD-Modell in die Simulationsumgebung

Es wurden Simulationsansätze zur möglichst genauen Abbildung ausgewählter Versuchskurven angewendet und dabei im Wesentlichen eine Variation der Eingangsparameter in Bezug auf die mechanischen Spannungen in den Bereichen der PUT vorgenommen. Im ersten Simulationsansatz konnte zwar ein charakteristischer pseudoelastischer Kurvenverlauf abgebildet werden, allerdings waren insbesondere in den Übergängen zwischen den einzelnen Materialphasen noch deutliche ausgeprägte Abweichungen im Vergleich zur Versuchskurve zu erkennen. Durch die Veränderung einiger Eingabeparameter ließ sich eine gute Übereinstimmung des Kurvenverlaufs sowie der Hystereseenergie erreichen.

Des Weiteren wurde durch den Einsatz der Simulationssoftware Abaqus ein zusätzlicher Modellvergleich miteingebracht. Ein wichtiger Parameter zur Nachbildung eines Integrationsszenarios stellt die Einspannsituation dar. Zur kraftschlüssigen Einpressung der Proben wurden daher ebenfalls Simulationen durchgeführt, in welchen das Verhalten allerdings noch nicht zufriedenstellend abgebildet werden konnte, und somit weiterer Forschungsbedarf besteht.

Zum Test der FG-Dämpfungselemente im anwendungsnahen Zustand wurde ein technischer Lösungsansatz zur Ausgestaltung der Funktionsmuster erarbeitet. Um eine einfache Handhabung und sicheren Sitz der Wendeschneidplatte zu gewährleisten, wurde die Unterlegplatte in einer zweigeteilten Version vorgesehen. Hierbei wird die untere Hälfte mit Durchgangsbohrungen versehen, in welche die FG-Dämpfungselemente positioniert werden. In Abbildung 6 ist der technische Lösungsansatz zu sehen.

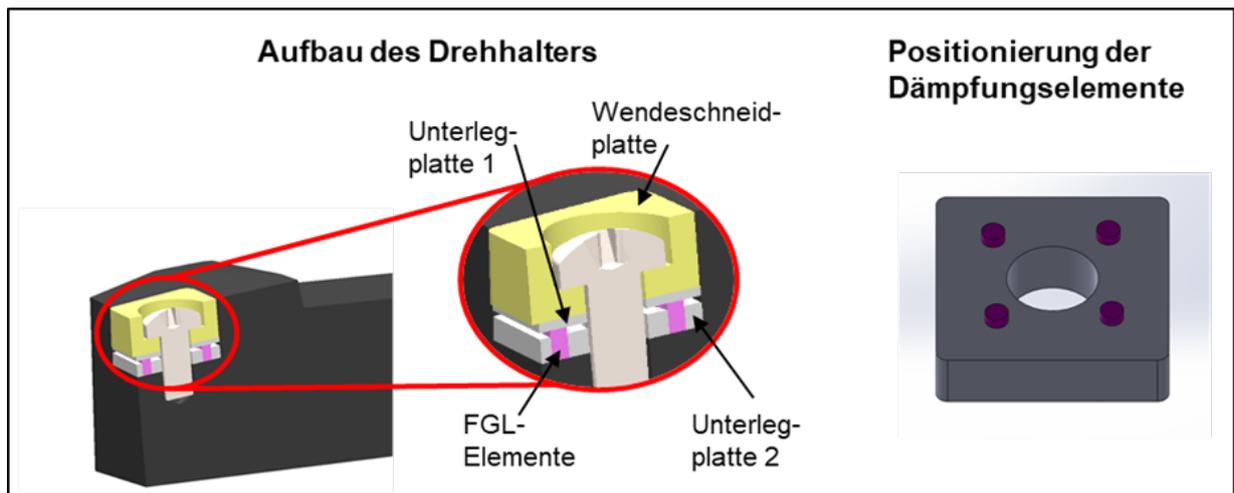


Abbildung 6: Technischer Lösungsansatz zur Ausgestaltung der Funktionsmuster

Es wurden Funktionsmustervarianten mit verschiedenen Elementdurchmessern in NiTi und Stahlausführung aufgebaut. Um eine einheitliche Probenlänge innerhalb eines Funktionsmusters zu gewährleisten, wurden die integrierten Elemente gemeinsam abgeschliffen.

Aufbauend darauf wurden die Funktionsmuster in einen konventionellen Drehmeißel integriert. Anschließend wurde der so modifizierte Drehmeißel in eine Drehmaschine eingebaut und während eines Bearbeitungsschrittes eine Betriebsschwingungsanalyse durchgeführt. Bei der Bearbeitung handelte es sich um das Außenabdrehen von Zahnflanken. Zur Aufnahme der Messdaten wurde ein triaxialer Beschleunigungssensor an den modifizierten Drehmeißel befestigt. Somit konnten die Schwingungen, die durch den Prozess in den Drehmeißel übertragen werden, aufgezeichnet werden. Dargestellt ist der Messaufbau in Abbildung 7.

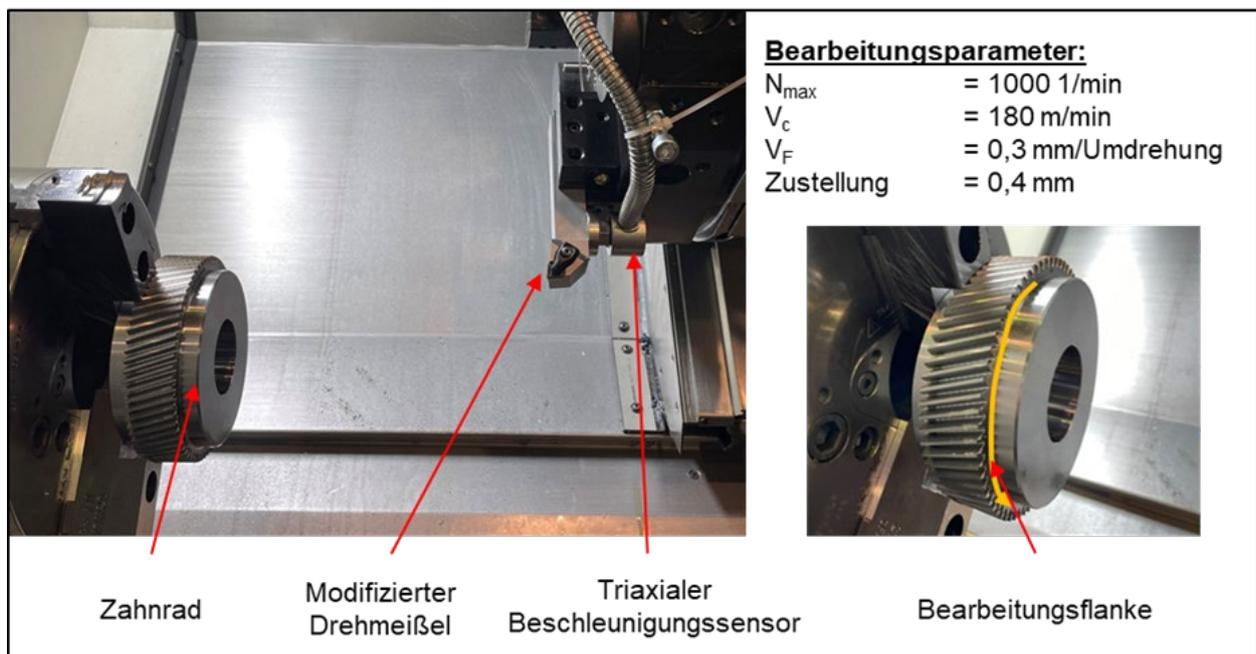


Abbildung 7: Messaufbau in der Drehmaschine

Die Ergebnisse der Betriebsschwingungsanalyse wurden in sogenannten Wasserfalldiagrammen dargestellt. In den Wasserfalldiagrammen ist bei ca. 470 Hz und bei ca. 1.410 Hz eine Amplitudenerhöhung zu erkennen. Vergleicht man diese Frequenzbereiche und die jeweiligen Amplituden bei den verschiedenen Funktionsmustern, ist zu erkennen, dass diese bei dem Funktionsmuster mit FGL deutlich reduziert werden. So senkt sich die Amplitude bei 470 Hz um ca. 10 % und bei 1.410 Hz um ca. 66 % im Vergleich zur nicht modifizierten Unterlegplatte. Jedoch kam es während der Bearbeitung zu einer Beschädigung der Funktionsmuster, in Form von Ausbrüchen am Rand. Die Beschädigung der Funktionsmuster während der spanenden Bearbeitung ist auf die nicht explizite Auslegung dieser für eine Bearbeitung zurückzuführen. Aus diesem Grund wird empfohlen, diese Funktionsmuster für einen expliziten Anwendungsfall neu auszulegen, um die Dämpfungsfunktionalität während einer spanenden Bearbeitung in Gänze nutzen zu können.

Zusammenfassung

Zur Bereitstellung der FG-Dämpfungselemente für die Versuchs- und Erprobungsphase wurde ein Prozess entwickelt, der eine reproduzierbare Fertigung in der geforderten Genauigkeit ermöglicht und dabei die sensiblen Eigenschaften der Legierungen nicht durch mechanische oder thermische Einwirkung beeinflusst. Es wurden Elemente aus unterschiedlichen FG-Drahtalbezeugen mit variierenden Legierungsanteilen hergestellt.

Die Untersuchung der Eigenschaften der FG-Elemente wurde unter geringen und hohen dynamischen Druckbelastungen durchgeführt sowie unter dem Einfluss verschiedener Einflussparameter. Zu diesen Parametern zählen die Wärmebehandlung, die Legierungszusammensetzung, die Vorzyklisierung, die Umgebungstemperatur, die Einspannsituation und die Frequenz. Hierzu wurde u. a. ein Dynamikprüfstand erstellt. Generelles Dämpfungspotential konnte in den Versuchsreihen in Form der Umwandlungshysterese nachgewiesen werden. Durch die Variation der Einflussparameter ist es möglich die Dämpfungseigenschaften zu beeinflussen und an spezifische Anwendungsszenarien anzupassen.

Es wurden FEM-Simulationen hinsichtlich der Spannungs-Stauchungs-Charakteristik der fokussierten Dämpfungselemente mithilfe der Simulationssoftware Ansys und Abaqus durchgeführt. Hierbei konnte ein charakteristischer pseudoelastischer Kurvenverlauf nachgebildet werden und in iterativen Schritten die Anpassung an ausgewählte Versuchskurven erfolgen.

Hinsichtlich des fokussierten Anwendungsfalls in Form der Dämpfung an der Wendeschneidplatte wurden entsprechende Funktionsmuster mit integrierten Dämpfungselementen erstellt und auf Dynamikprüfständen und in der Bearbeitungsmaschine mithilfe von Beschleunigungssensoren vermessen. Hierbei konnte die Dämpfungswirkung der FG-Elemente im anwendungsnahen Zustand nachgewiesen werden.

Ein besonderer Dank gilt allen Mitgliedern im projektbegleitenden Ausschuss für die gute Zusammenarbeit und für die Unterstützung bei der Durchführung der Forschungsarbeiten.

Eine Langfassung der Forschungsarbeiten kann in Form eines Schlussberichts bei der Forschungsgemeinschaft Werkzeuge und Werkstoffe e.V., Papenberger Str. 49, 42859 Remscheid, www.fgw.de, angefordert werden.

Weitere Informationen erhalten Sie bei Fabian Hoffmann (IFW) unter 02191/5921-143 oder Niclas Klumpen (WZL) unter 0241/80-27441

Literatur:

- [Cze13] Czechowicz, A., Langbein, S.: Konstruktionspraxis Formgedächtnistechnik, Springer Vieweg Verlag, Wiesbaden, 2013
- [Sch19] Schmidt, S.; Verteilte Mehrmassendämpfer für Werkzeugmaschinen, Ap-primus Verlag, Aachen, 2019
- [VDI2248-3] VDI 2248: Produktentwicklung mit Formgedächtnislegierungen, Blatt 3, Prüf- und Messmethoden, Verein Deutscher Ingenieure e.V., 2017
- [Wec19] Weck, M.; Brecher, C.: Werkzeugmaschinen Fertigungssysteme 1, Springer Verlag, Berlin, 9. Auflage, 2019