

Titel

Kennwertbasierte Auslegungssystematik für Formgedächtnis-Federn

IGF-Nr.: 01IF21843N

Forschungseinrichtungen

Forschungseinrichtung 1: Institut für Werkzeugforschung und Werkstoffe (IFW)

Forschungseinrichtung 2: Fraunhofer-Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik (IWU)



Ansprechpartner beim IFW:

Fabian Hoffmann, M. Eng.
02191/5921-143
hoffmann@fgw.de

Ansprechpartner beim WZL:

Alexander Hiekel, M. Sc.
0351/4772-2068
alexander.hiekel@iwu.fraunhofer.de

Danksagungen

Das IGF-Vorhaben 21843 BG „Kennwertbasierte Auslegungssystematik für Formgedächtnis-Federn“ 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

Formgedächtnislegierungen (FGL) sind thermosensitive Werkstoffe, die ihre Geometrie in Abhängigkeit vom Erreichen definierter Temperaturen verändern und in bestimmten Temperaturbereichen ausgeprägte elastische Eigenschaften aufweisen. Aufgrund dieser Eigenschaften sind Federn aus FGL von besonderer Bedeutung, da große Kräfte und Hübe bei präzisen Schalttemperaturen sowie große reversible Dehnungen realisiert werden können. Insbesondere die energieautarke Arbeitsweise, also die Aktivierung durch das Umgebungsmedium, prädestiniert FG-Federn für selbstregulierende Anwendungen. Die Anwendungsbandbreite solcher Federn ist vielfältig und reicht von Thermomanagement-Systemen in Luftfahrt-, Gebäude- [2], [3], oder KFZ-Technik-Anwendungen [4], [5], [6], bis hin zu Aktoranwendungen in Haushaltsgeräten [7] oder Consumer-Produkten [8]. Die Entwicklung von Aktorlösungen auf Basis von FG-Federn stellt jedoch einen aufwändigen, iterativen Prozess dar, da weder eine geeignete Auslegungssystematik noch standardisierte Methoden zur Erfassung der dafür benötigten Werkstoffkennwerte existieren. Daraus resultierende Kosten und Entwicklungszeiten behindern den breiten Einsatz in geeigneten industriellen Anwendungen. Bisherige Auslegungsansätze basieren entweder auf der Anwendung von Normen für herkömmliche Metallfedern, wodurch das formgedächtnisspezifische Spannungs-Dehnungs-Verhalten stark vereinfacht wird oder auf analytischen Methoden, die ein tiefgreifendes mathematisches Verständnis voraussetzen [9], [10]. Ein weiterer Ansatz sind FE-Methoden, die zwar genauere Ergebnisse liefern, deren Anwendung allerdings ein fundiertes Fachwissen erfordert und die dadurch besonders für KMU nur schwer einsetzbar sind.

Forschungsziel

Das Ziel des Projektvorhabens war die Entwicklung einer *kennwertbasierten Auslegungssystematik für verschiedene FG-Federgeometrien*. Entwicklungsgrundlage hierfür bietet die statistische Versuchsplanung, die es ermöglicht, auf Grundlage empirischer Daten Wirkzusammenhänge zwischen Materialparametern, Federgeometrie und Stellverhalten des Federelementes zu identifizieren. Die zur Erstellung eines solchen statistischen Modells notwendigen Daten können mittels FEM-Simulationen generiert werden. Grundlage für realitätsnahe Simulationen ist die Kenntnis von exakten Materialparametern. Hierfür wurden geeignete Methoden weiterentwickelt und eingesetzt. Für kleine- und mittelständische Unternehmen bringt die Auslegungssystematik einen Mehrwert in Form einer effizienteren Entwicklung zukünftiger Produkte und einer schnelleren Markteinführung.

Vorgehensweise und Forschungsergebnisse

Zu Beginn des Vorhabens wurden mögliche Einsatzgebiete von FG-Federn und -Federbauformen unter Berücksichtigung industrierelevanter Kriterien mit dem PA diskutiert und relevante Parameter wie Aktorkraft, Federsteifigkeit und Bauraum erfasst. Die Auswahl der zu betrachtenden Federbauformen fiel auf Schraubenzug- und Schraubendruckfedern sowie Schenkel- und Wellenfedern. Zur Festlegung der Anzahl und der Parameter der Versuchskomponenten erfolgte die Absprache mit den Federherstellern des PA unter Einbezug von Erkenntnissen aus Vorversuchen. Des Weiteren konnte anhand der Parameter eine Vorauswahl von FG-Drahthalbzeugen getroffen werden. Neben den Materialeigenschaften ist hier die kommerzielle Verfügbarkeit im Hinblick auf eine spätere industrielle Nutzung von hoher Wichtigkeit. Für die FG-Materialien des Herstellers *Fort Wayne Metals* sind ausführliche Angaben zu den Materialparametern verfügbar, ebenso ist dieses Material im cold worked Zustand verfügbar, was es ermöglicht, die Eigenschaften nach Notwendigkeit im Labor selbst einzustellen. Zusätzlich stellte sich die Verfügbarkeit als sehr gut heraus, so dass das Material dieses Herstellers für den Großteil der Untersuchungen verwendet wurde.

Im Rahmen der Ermittlung der Werkstoff- bzw. Halbzeugkennwerte wurden zunächst geeignete Messmethoden identifiziert, entsprechende Versuchseinrichtungen ausgewählt sowie vorhandene Versuchseinrichtungen angepasst. Die Ermittlung der Phasenumwandlungstemperaturen (PUT) im spannungsfreien Zustand erfolgte im DSC-Verfahren. Zur Ermittlung des E-Moduls wurden Zugversuche mithilfe einer Zug-Druck-Prüfmaschine (TIRAtest 2820) durchgeführt. Im Rahmen von Zugversuchen wurde zusätzlich die Querkontraktionszahl ermittelt. Hierzu erfolgte die Anbindung eines Lasermesssystems an die Zug-Druck-Prüfmaschine, das über einen Linearschlitten bewegt wird, um den Drahtdurchmesser im ungedehnten und gedehnten Drahtzustand präzise zu messen.

- Ermittlung der PUT

Ein wichtiger Faktor zur Bestimmung des Einsatzbereiches von FG-Komponenten ist die Kenntnis der PUT der fokussierten Materialien. Die Wärmebehandlung zur Einstellung des FG-Effekts und Festlegung der Hochtemperaturform der Komponente hat einen starken Einfluss auf die Höhe der PUT. Diese können mit Hilfe des DSC-Verfahrens (Differential Scanning Calorimetry) detektiert werden.

Der Einfluss verschiedener Glühtemperaturen auf die PUT der Legierung NiTi#6 des Herstellers Fort Wayne Metals wird exemplarisch in den nachfolgenden Diagrammen gezeigt (Abbildung 1).

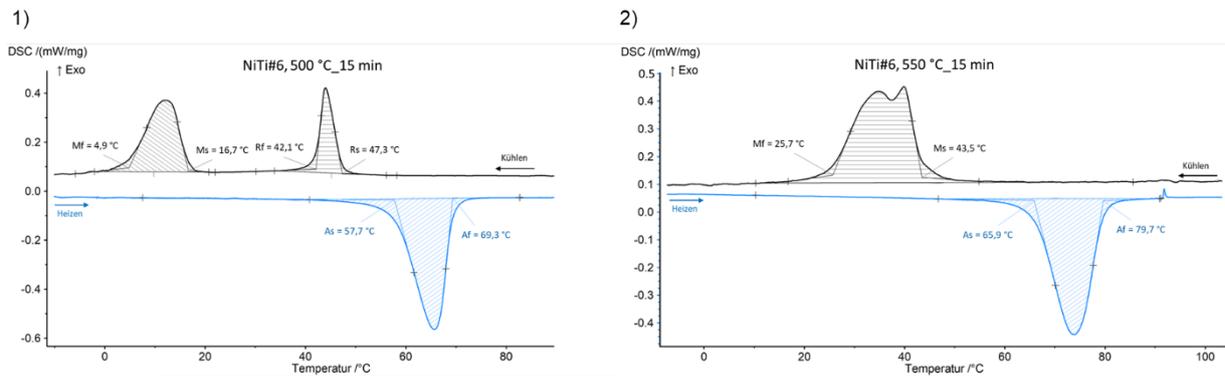


Abbildung 1: DSC-Messkurven NiTi#6, Einfluss der Glüh­temperatur auf die PUT exemplarisch für eine Glüh­dauer von 15 min, Glüh­temperaturen: 1) 500 °C, 2) 550 °C

Während der Aufheizphase erfolgt die Umwandlung in die Materialphase Austenit, gekennzeichnet durch die Austenit-Start- und Austenit-Finish-Temperatur (As und Af). Es ist zu erkennen, dass sich sowohl As als auch Af infolge der höheren Glüh­temperatur zu höheren Werten verschieben. Während der Abkühlphase zeigt sich in beiden Diagrammen, außer des zunächst auftretenden Martensitpeaks, ein zweiter Umwandlungspeak. Es bildet sich eine martensitische Zwischenphase, die sog. R-Phase, gekennzeichnet durch die R-Phasen-Start- und R-Phasen-Finish-Temperatur (Rs und Rf). Bei der Glüh­temperatur von 550 °C ist eine Überlagerung der Stabilitätsbereiche beider Materialphasen in Form eines Doppelpeaks zu erkennen.

In folgender Tabelle 1 wird eine Übersicht der ausgewählten Wärmebehandlungsparameter und der resultierenden PUT für Kombinationen gezeigt, in denen die Materialphasen eindeutig zuzuordnen waren.

Tabelle 1: DSC-Analyse, Parameter und resultierende PUT

Material	Glüh­temperatur [°C]	Glüh­dauer [min]	As [°C]	Af [°C]	Rs [°C]	Rf [°C]	Ms [°C]	Mf [°C]
NiTi#6	400	15	23,4	63,5	58,5	44,6	-6,0	-74,9
		450	15	53,8	65,7	53,6	46,3	2,7
	500	5	58,4	68,2	48,1	43,1	15,0	3,3
		10	58,3	69,4	48,1	42,1	15,2	2,9
		15	57,7	69,3	47,3	42,1	16,7	4,9
		20	59,3	69,7	47,2	42,4	18,8	7,6
		30	61,4	70,6	46,3	40,2	23,6	11,7
	550	15	65,9	79,7			43,5	25,7
		5	69,4	82,5			51,2	39,8
		10	70,0	83,9			48,4	37,5
		15	69,9	85,3			47,1	35,1
		30	68,5	83,4			47,9	35,3

- Ermittlung des E-Moduls

Der E-Modul ist ein Materialkennwert, der den Zusammenhang zwischen mechanischer Spannung und Dehnung im linear-elastischen Bereich beschreibt und im Projekt anhand von Zugversuchen ermittelt wurde. Zur Detektion von Unterschieden im Materialverhalten in Bezug auf den Verlauf der Martensitentzwilligung, die Höhe des martensitischen Spannungsplateaus und die bleibende Restdehnung erfolgte die Dehnung der Versuchsdrähte bis zu einem Wert von 6 %. Für die Durchführung der Zugversuche wurde KAFE – IGF 01IF21843N

die Zug-Druck-Prüfmaschine *TIRAtest 2820* des Herstellers *Tira* mit einer optional zuschaltbaren Wärmekammer für Messungen bei erhöhten Temperaturen verwendet. Die Einspannung der FG-Drähte erfolgte mittels Parallelschraubstöcken mit diamantbeschichteten Backenflächen. In Abbildung 2 ist die Zug-Druck-Prüfmaschine sowie die Einspannsituation wiedergegeben.



Abbildung 2: Zug-Druck-Prüfmaschine (links), zuschaltbare Wärmekammer (mitte), Einspannsituation (rechts)

Zur Veranschaulichung der resultierenden Spannungs-Dehnungs-Kurven sowie der Auswertung des E-Moduls und weiterer Parameter wird in Abbildung 3 zunächst ein Beispieldiagramm gezeigt.

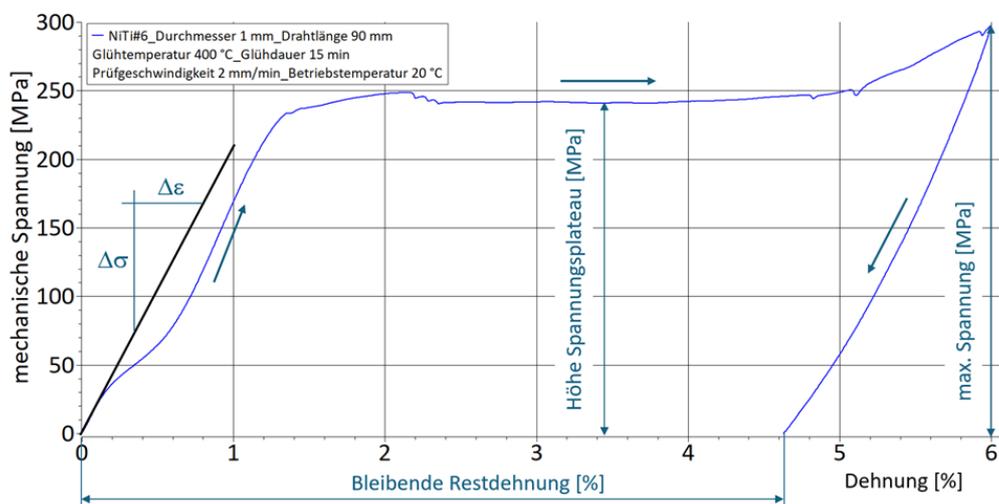


Abbildung 3: Beispieldiagramm zum Spannungs-Dehnungs-Verhalten am Drahthalbzeug und weiteren Parametern

Nach einem zunächst annähernd linear-elastischen Anstieg (hier mit R-Phasen-Transformation im Bereich der flacheren Steigung zwischen 0,2 und 0,6 % Dehnung) schließt sich ein Bereich annähernd konstanter Spannung an, das sog. martensitische Spannungsplateau. Anschließend erfolgt die Rücknahme der Zugkraft einhergehend mit der

Abnahme der mech. Spannung und dem Rückgang des linear-elastischen Dehnungsanteils. Fällt die Spannung bis auf 0 MPa bleibt eine Restdehnung bestehen, die sog. pseudoplastische Dehnung.

Exemplarisch werden Spannungs-Dehnungs-Kurven der Zugversuche für Glühtemperaturen von 400 und 500 °C sowie Betriebstemperaturen von 20 und 100 °C in Abbildung 4 gezeigt.

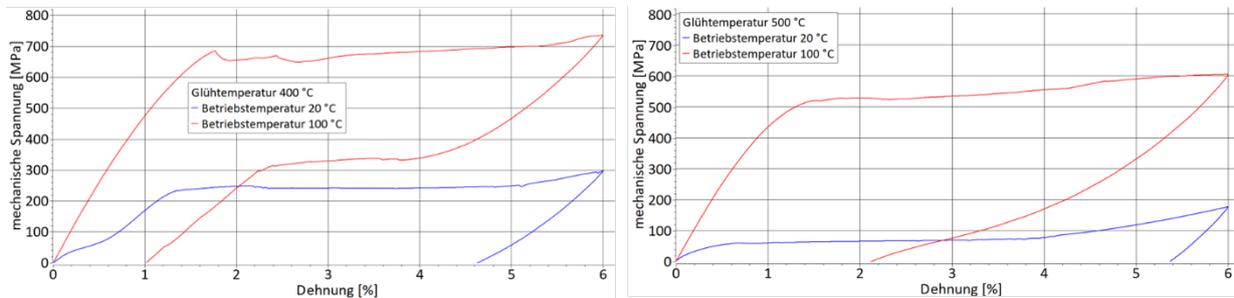


Abbildung 4: Zugversuche, NiTi#6, Draht $\varnothing = 1$ mm, Glühdauer 15 min, links: Glühtemperatur 400 °C, rechts: Glühtemperatur 500 °C

Im initialen linear-elastischen Anstieg im Bereich zwischen 0 und 1 % Dehnung ist bei der Glühtemperatur von 400 °C und der Betriebstemperatur von 20 °C ein Sattelpunkt ersichtlich. Dieses Verhalten lässt auf das Vorliegen einer R-Phasen-Transformation schließen. Nach Behandlung mit einer Glühtemperatur von 500 °C ist dieses Verhalten nicht erkennbar. In Bezug auf die Höhe der martensitischen Spannungsplateaus und der max. Spannungen lassen sich bei beiden Betriebstemperaturen Trends zu geringeren Werten in Abhängigkeit höherer Glühtemperaturen beobachten. Im Gegensatz dazu erhöhen sich die bleibenden Restdehnungen mit höheren Glühtemperaturen. Die höhere Betriebstemperatur führt insgesamt zu signifikant höheren mech. Spannungen. Die korrespondierenden Werte für die E-Moduln liegen zwischen 20 und 23 GPa (Betriebstemperatur 20 °C) und zwischen 50 und 55 GPa (Betriebstemperatur 100 °C).

Abbildung 5 stellt der simulierten die gemessene Spannungs-Dehnungskennlinie im Martensit für die Drahtprobe mit einer Glühtemperatur von 500 °C gegenüber. Aufgrund der linearen Approximation des Modells liegen die Abschnitte mit der größten Übereinstimmung im Spannungsplateau sowie in den Bereichen zu Beginn (verzwillingtes Martensit) und Ende (entzwillingtes Martensit) bevor die Phasenumwandlung einsetzt bzw. nachdem diese abgeschlossen ist. Die größten Abweichungen treten an den Übergängen zum Plateau auf, die dieses Materialmodell nicht abbilden kann. Der Vergleich der Experimental- und Simulationsergebnisse der Austenitphase ergibt ein ähnliches Bild. Die Experimentalergebnisse zeigen zusätzlich eine auf Basis der Simulationsergebnisse nicht erwartete bleibende Restdehnung des Materials. Diese ist auf das charakteristische Degradationsverhalten des Werkstoffes zurückzuführen, das insbesondere in den ersten Belastungszyklen auftritt.

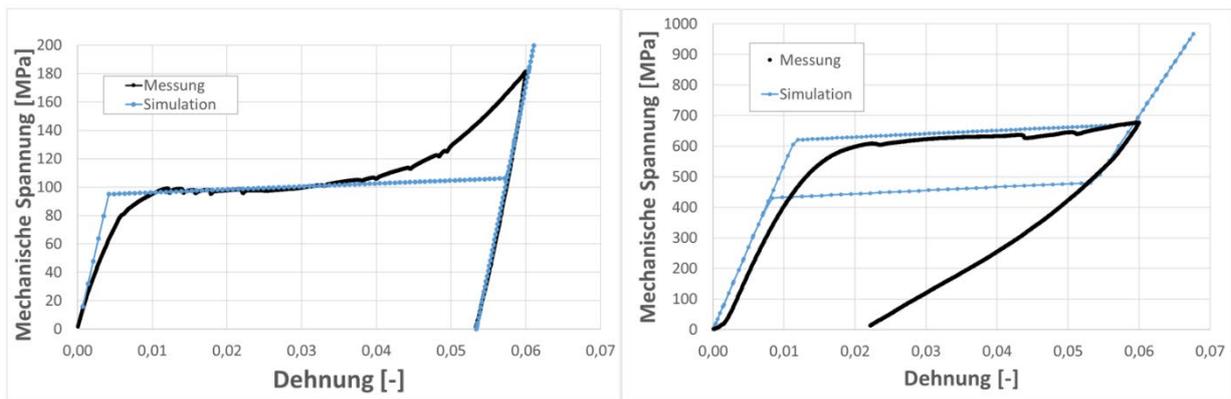


Abbildung 5: Vergleich zwischen Simulation und Messung der Spannungs-Dehnungs-Kennlinie des Drahtes (Glühtemperatur 500 °C); links: Martensit, rechts: Austenit

- Ermittlung der Querkontraktionszahl

Die Querkontraktionszahl beschreibt das Verhältnis der relativen Änderung des Durchmessers zur relativen Änderung der Länge unter Zug- oder Druckbelastung. Im vorliegenden Fall wurde die Querkontraktionszahl anhand der Drahtlänge und des Drahtdurchmessers im unverformten Zustand und deren Veränderung unter Belastung im Zugversuch bestimmt. Zu diesem Zweck wurde die Zug-Druck-Prüfmaschine um ein Lasermesssystem erweitert, das über einen Linearschlitten verfahren wird, um den Drahtdurchmesser entlang der Drahtlängsachse präzise messen zu können (Abbildung 6).

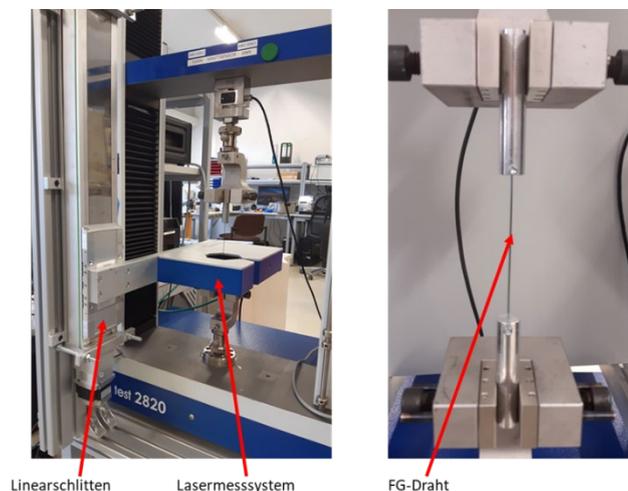


Abbildung 6: Versuchsaufbau zur Messung des Drahtdurchmesser im unverformten und belasteten Zustand

In Abbildung 7 sind exemplarisch die Messkurven zur Bestimmung der Querkontraktionszahlen an Drahthalbzeugen aus dem Material NiTi#6 in verschiedenen Wärmebehandlungszuständen dargestellt.

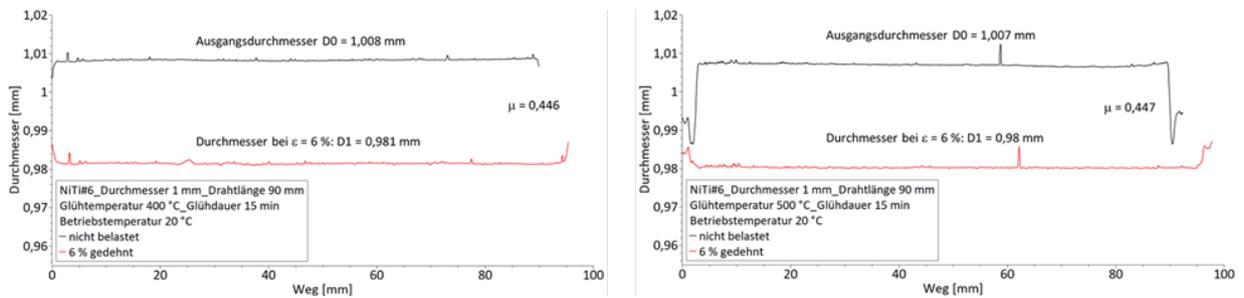


Abbildung 7: Bestimmung der Querkontraktionszahl, Versuchskurven und resultierende Querkontraktionszahlen, links: Glühtemperatur 400 °C, rechts: Glühtemperatur 500 °C

Die Durchmesser der FG-Drähte ändern sich für beide betrachteten Wärmebehandlungskonfigurationen von ca. 1,008 mm im unbelasteten Zustand auf ca. 0,981 mm im belasteten Zustand bei einer Dehnung von 6 %. Daraus ergeben sich nahezu identische Werte für die Querkontraktionszahlen. Die ungleichmäßigen Kurvenverläufe und vereinzelt Spitzen sind bei der Bestimmung der Querkontraktionszahl zu vernachlässigen, da sie auf Defekte in der Oberfläche des Drahtes oder Fremdkörper auf dem Draht beruhen.

- Experimentelle Untersuchung und simulative Abbildung von FG-Schraubzug- und -druckfedern

Um reproduzierbare Versuchsbedingungen und Einstellmöglichkeiten zu schaffen, wurden für beide Federvarianten Aufnahmen zur Einspannung in die Zug-Druck-Prüfmaschine erstellt (Abbildung 8).

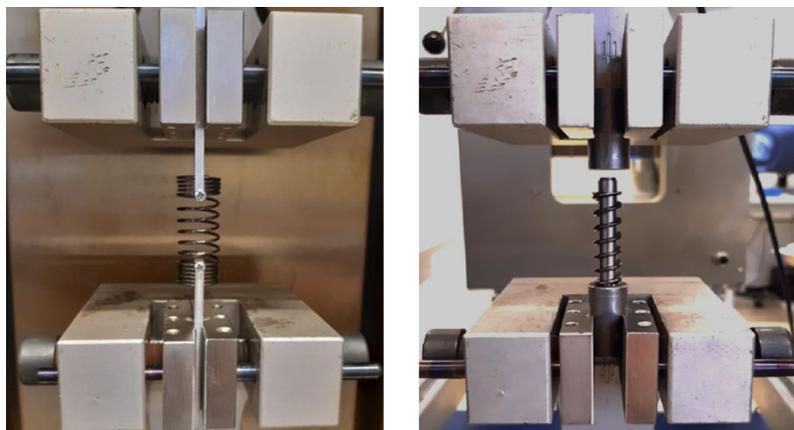


Abbildung 8: Aufnahmen zur Einspannung der Federn in die Zug-Druck-Prüfmaschine, links: Zugfeder, rechts: Druckfeder

Zur Aufstellung des Probenumfangs durch die Forschungseinrichtungen erfolgte die Festlegung der Spezifikationen der Versuchsproben unter Berücksichtigung der Parameterangaben zu beispielhaften Anwendungen der Unternehmen des PA. Hierbei wurden sämtliche Einflussparameter miteinbezogen und ein sinnvoller Parameterrahmen durch Abbildung von Grenzwerten, insbesondere in Bezug auf die Federabmessungen, erarbeitet. Die Fertigung unterschiedlich konfigurierter Zug- und Druckfedervarianten erfolgte durch Unternehmen des PA.

In den folgenden Diagrammen (Abbildung 9 und Abbildung 10) werden exemplarisch resultierende Kraft-Weg-Kurven zu den verschiedenen Federvarianten unter dem Einfluss variierender Betriebstemperaturen gezeigt. Insgesamt erfolgte im Projekt die Beschreibung der Einflüsse verschiedener Faktoren auf das Verhalten der Federkomponenten, ohne eine genaue quantitative Auswertung vorzunehmen. Die Kurven dienen in erster Linie zum Vergleich mit den Simulationsdaten.

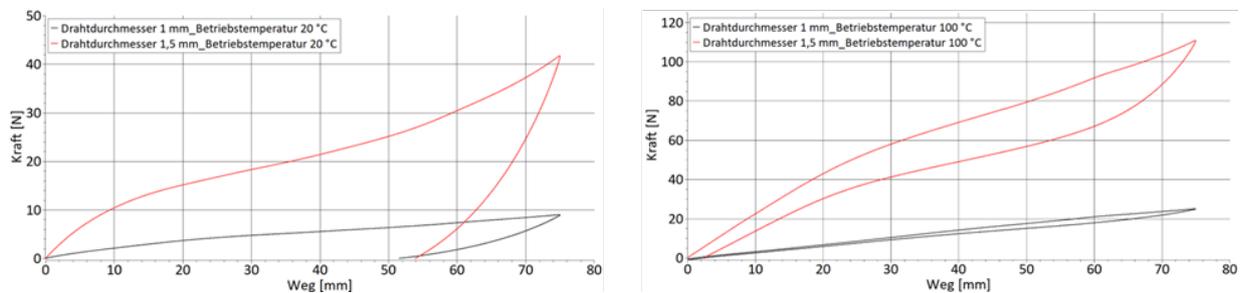


Abbildung 9: Zugversuche FG-Schraubenzugfedern, Vergleich Draht \varnothing , NiTi#6, Glüh Temperatur 400 °C, Glühdauer 15 min, Federaußen \varnothing 15 mm, 3 Windungen

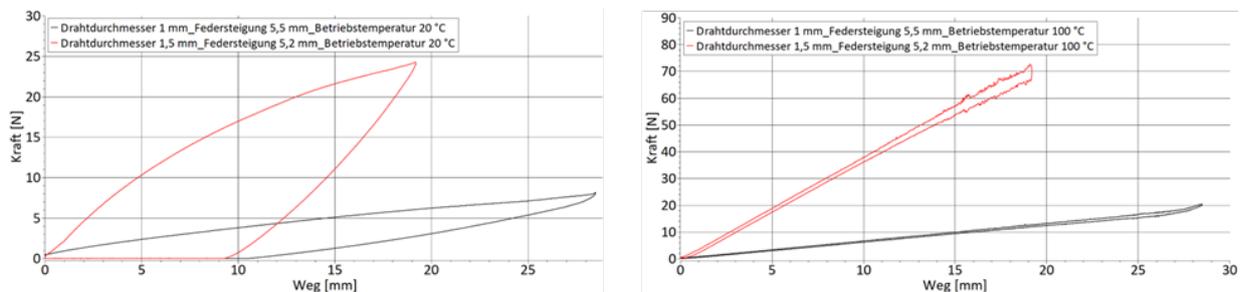


Abbildung 10: Druckversuche FG-Schraubendruckfedern, Vergleich Draht \varnothing , NiTi#6, Glüh Temperatur 400 °C, Glühdauer 15 min, Federaußen \varnothing 10 mm

Erwartungsgemäß führen der größere Drahtdurchmesser und die höhere Betriebstemperatur zu stärkeren Kraftanstiegen und zu höheren Maximalkräften in beiden Federvarianten. In Bezug auf die bleibende Restdehnung bzw. Reststauchung sind nur geringe Unterschiede infolge des größeren Drahtdurchmessers zu verzeichnen.

Eine Übersicht des qualitativen Einflusses der betrachteten Parameter auf den Kraftanstieg, die max. Kraft und die bleibende Reststauchung im Rahmen der Versuchsdurchführung wird in Tabelle 2 gezeigt.

Tabelle 2: Übersicht qualitativer Einfluss der betrachteten Parameter, links: Zugfedern, rechts: Druckfedern

Parameter	Kraftanstieg und max. Kraft		Bleibende Restdehnung	
	20	100	20	100
Betriebstemperatur [° C]	20	100	20	100
Größerer Draht \varnothing	↑	↑	→	→
Höhere Glüh Temperatur	↓	→	↑	→
Größerer Federaußen \varnothing	↓	↓	↑	→
Größere Anzahl Windungen	↓	↓	↑	→

Parameter	Kraftanstieg und max. Kraft		Bleibende Reststauchung	
	20	100	20	100
Betriebstemperatur [° C]	20	100	20	100
Größerer Draht \varnothing	↑	↑	→	→
Höhere Glüh Temperatur	↓	→	↑	→
Größerer Federaußen \varnothing	↓	↓	↓	→
Größere Federsteigung	↓	↓	↑	→

In Abbildung 11 wird ein exemplarischer Vergleich der simulativ und experimentell ermittelten Kraft-Stellweg-Kennlinien an Zugfedern im Martensit und Austenit gezeigt.

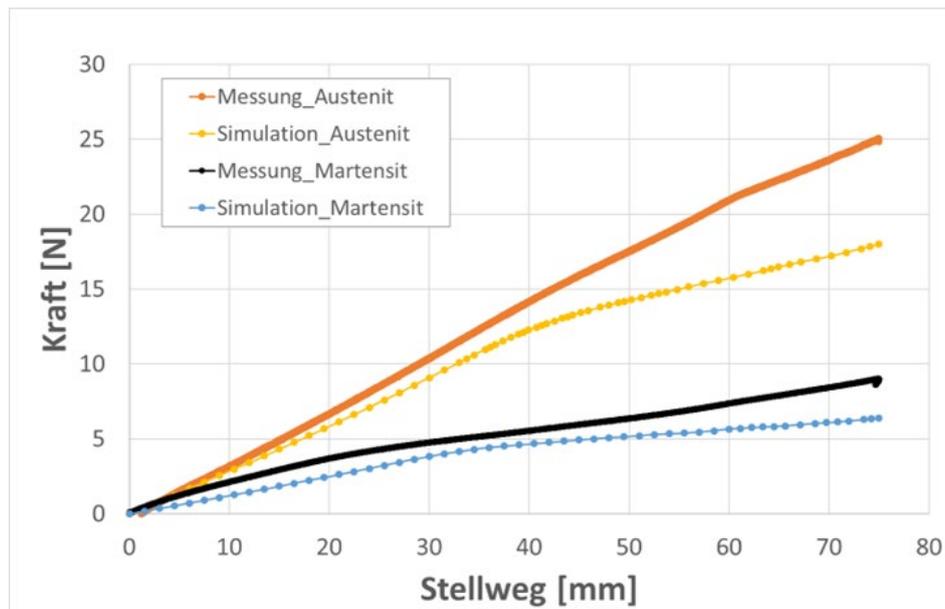


Abbildung 11: Vergleich der simulativ und experimentell ermittelten Kraft-Stellweg-Kennlinie im Martensit und Austenit (Zugfeder mit Federaußen \varnothing von 15 mm bei einer Glüh­temperatur von 400 °C)

Durch das Simulationsmodell ist das generelle Verhalten abbildbar, jedoch ist der Anstieg der Kraft-Stellweg-Kennlinie in der Simulation vor und nach Erreichen des Spannungsplateaus geringer als in der Messung. Dies deutet auf eine Diskrepanz zwischen den in der Simulation verwendeten und den tatsächlichen Materialkennwerten hin. Eine Ursache ist in der Modellannahme des isotropen Materialverhaltens zu vermuten. Im Fall der Isotropie kann das für die Federsteifigkeit einer Schraubenfeder relevante Schubmodul anhand des messtechnisch ermittelten Elastizitätsmoduls und der Querkontraktionszahl des Drahtes berechnet werden. Der Unterschied in den Kraftanstiegen lässt vermuten, dass dieser Zusammenhang jedoch nicht gilt und sich das Drahthalbzeug nicht isotrop verhält. Die Annahme der Isotropie wird üblicherweise in FGL-Modellen getroffen und mit der zufälligen Verteilung der Körner in der Kristallstruktur begründet. Jedoch können sich im Rahmen des Fertigungsprozesses während des Drahtziehens mechanische Vorzugsrichtungen bilden.

- Experimentelle Untersuchung und simulative Abbildung von FG-Schenkelfedern und -Wellenfedern

Im Rahmen der Charakterisierung der Eigenschaften von erstellten FG-Schenkelfedern erfolgte zunächst die Modifizierung einer vorhandenen Versuchsvorrichtung gemäß der geplanten Versuchsszenarien (Abbildung 12).

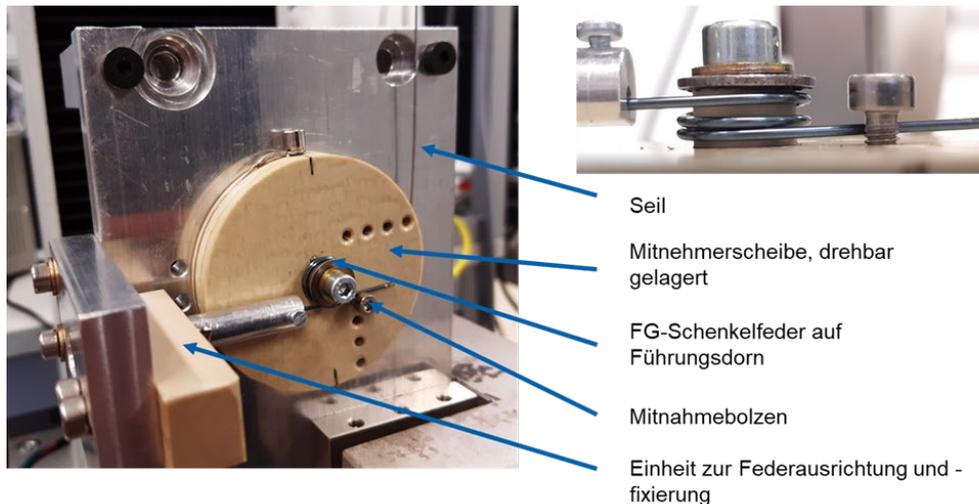


Abbildung 12: Versuchsvorrichtung für FG-Schenkelfedern

In den Versuchsreihen wurde deutlich, dass der Einfluss verschiedener Parameter auf die Federeigenschaften sich als deutlich komplexer darstellt als ursprünglich angenommen. Hierdurch zeigte sich eine nicht reproduzierbare Messwerterzeugung, die keine zielführende Untersuchung sämtlicher Einflussparameter ermöglichte. Nach Rücksprache mit dem PA wurde entschieden, im Rahmen des Projektes die Untersuchung von FG-Wellenfedern zu präferieren.

Zu Beginn der Untersuchungen von FG-Wellenfedern erfolgte zunächst die Erarbeitung einer geeigneten Fertigungsstrategie. Da diese Art von Federn im FG-Bereich bisher kaum Gegenstand von Forschungstätigkeiten war, liegen nur wenig Literaturquellen und Vorerfahrungen vor. Der Ablauf der Fertigung ist in Abbildung 13 dargestellt.



Abbildung 13: Fertigung Wellenfedern

Es wurden zwei Werkzeugvarianten zur Formeinprägung während der Wärmebehandlung gefertigt und ebenfalls zwei Möglichkeiten zur Verbindung der Federenden nach dem Herstellvorgang untersucht. Im Rahmen des Projektes stellten sich die Wicklung des FG-Drahtes um einen mit Zylinderstiften versehenen Dorn sowie die Crimpverbindung mithilfe einer Aluminiumhülse als die vielversprechendsten Varianten für das Vorhaben und den gegebenen Zeitrahmen heraus.

Für die Durchführung der Versuche zum Kraft-Weg-Verhalten der Wellenfedern wurden Druckstempel mit plangeschliffenen Flächen und einer Aussparung für die Verbindungsstelle auf der Zug-Druck-Prüfmaschine eingesetzt.

In den folgenden Diagrammen sind exemplarisch resultierende Kraft-Stellweg-Kurven für eine Auswahl von Druckversuchen an den FG-Wellenfedern jeweils für die Betriebstemperaturen 20 und 100 °C zu sehen (Abbildung 14).

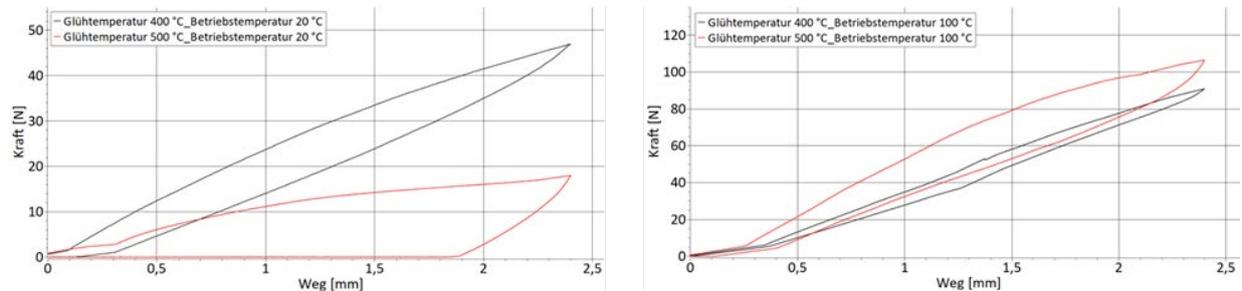


Abbildung 14: Druckversuche FG-Wellenfedern, Vergleich Glüh- und Betriebstemperatur, NiTi#6, Glühdauer 15 min, Draht \varnothing 1 mm, Federhöhe 3,8 mm, Federaußen \varnothing 25 mm, 3 Wellen

Die geringere Glüh- und Betriebstemperatur führt zu flacheren Kraftanstiegen und höheren Maximalkräften. Allerdings ist hier ein signifikanter Unterschied in der Ausprägung der bleibenden Reststauchung zu erkennen. Die geringere Glüh- und Betriebstemperatur führt zu einer fast vollständigen Rückstellung in die eingeprägte Form. Eine Angleichung der Kraftanstiege ist unter Einfluss der höheren Betriebstemperatur zu erkennen. Im Bereich bis 0,5 mm zeigt sich ein abrupter Anstieg der Steigung der Kraftkurve. Dieses Verhalten ist auf die ungleichmäßige Auflage der Feder infolge der geringen Höhenunterschiede in den Wellen zurückzuführen.

In Abbildung 15 wird ein exemplarischer Vergleich der simulativ und experimentell ermittelten Kraft-Stellweg-Kennlinien einer Wellenfeder im Martensitzustand gezeigt.

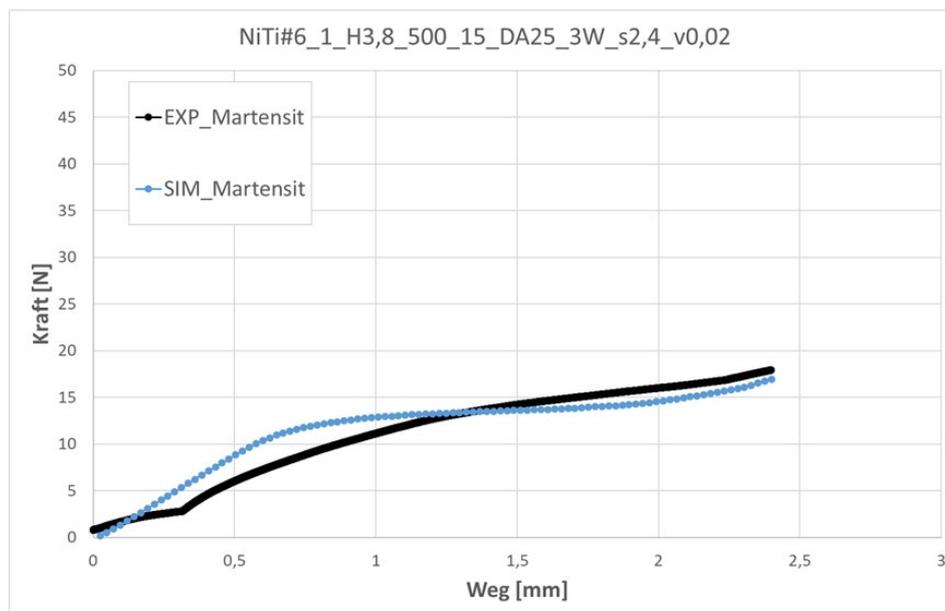


Abbildung 15: Wellenfeder, Vergleich der simulativ und experimentell ermittelten Kraft-Stellweg-Kennlinie im Martensit (NiTi#6, Federaußen \varnothing 15 mm, Glüh- und Betriebstemperatur 500 °C, Federhöhe 3,8 mm, 3 Wellen)

Am Verlauf der Simulationskurve der Belastungsphase lässt sich erkennen, dass insbesondere im vorderen Stellwegbereich (bis ca. 1,25 mm) Abweichungen im Vergleich zur Versuchskurve vorliegen. Ein Grund hierfür kann in der fertigungsbedingten leicht ungleichmäßigen Auflage der Feder auf der Druckfläche gesehen werden. Des Weiteren ist in der Simulationskurve ein ausgeprägter Übergang vom elastischen Bereich zum Martensitplateau zu verzeichnen. Hier besteht noch Optimierungsbedarf in Form von einer reproduzierbareren Federfertigung und der Anpassung des Modells.

- Statistische Versuchsplanung und anwenderorientiertes Auslegungswerkzeug

Die validierten Simulationsmodelle sind die Grundlage für die Durchführung einer statistischen Versuchsplanung (DoE) zur Ermittlung der Ursache-Wirkungs-Beziehungen. Konkret werden mit dieser statistischen Methode die Werte der Zielgröße, in diesem Fall Antriebsparameter wie Hub und Kraft, für eine Variation der Eingangswerte, insbesondere der Federgeometrie und der Materialeigenschaften mithilfe der validierten FEM-Modelle der Federn, berechnet. Nach der Berechnung leitet die DoE-Software mathematische Gleichungen ab, um den Einfluss der Eingangsgrößen auf die Zielwerte zu beschreiben. In Abbildung 16 ist der schematische Ablauf der DoE dargestellt.

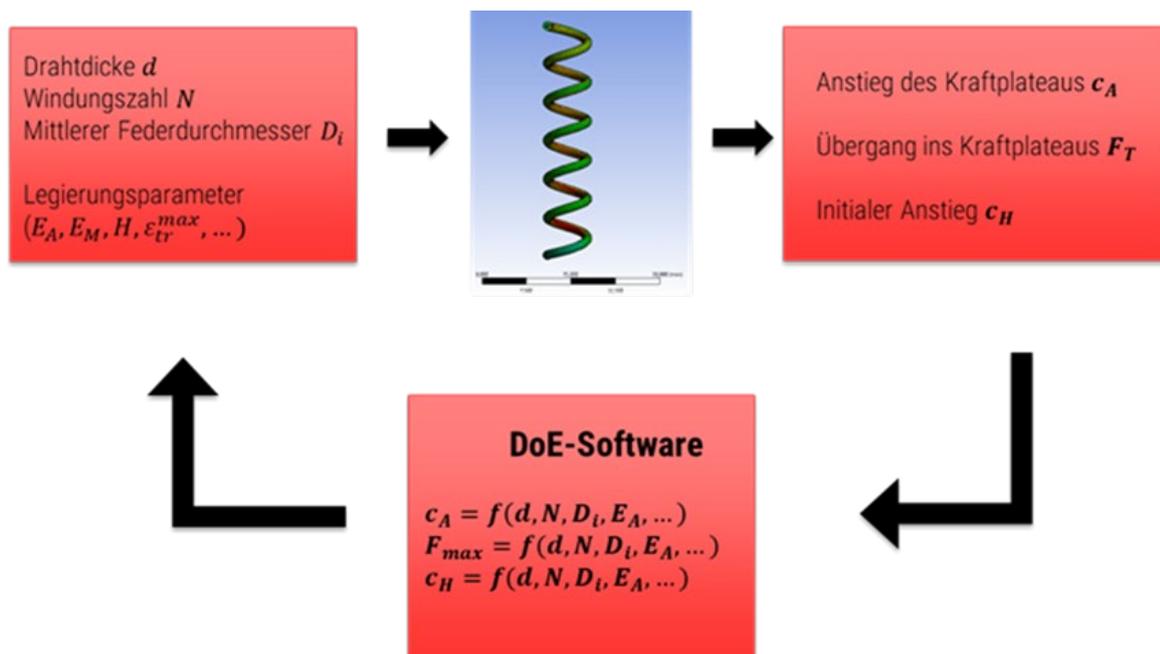


Abbildung 16: Ablauf der DoE am Beispiel der FG-Schraubenfeder

Als Zielgrößen der DoE wurden die Federsteifigkeiten im elastischen Bereich und im Plateau sowie die max. Kraft des elastischen Bereichs ausgewählt.

In Form der Ergebnisse der DoE konnte die Grundlage zur Programmierung des anwenderorientierten Auslegungswerkzeuges geschaffen werden. Exemplarisch wurde hierfür die Bauform Zugfeder ausgewählt. Die grafische Benutzeroberfläche (GUI) des erstellten Auslegungswerkzeuges ist in Abbildung 17 zu sehen.

Geometrieparameter		Materialparameter	
Drahtdicke	<input type="text" value="1"/> mm	Martensitmodul	<input type="text" value="22800"/> MPa
Windungszahl	<input type="text" value="4"/> -	Querkontraktionszahl	<input type="text" value="0.44"/> -
Mittlerer Durchmesser	<input type="text" value="7"/> mm	Verfestigungsparameter	<input type="text" value="300"/> MPa
		Elastische Grenze	<input type="text" value="250"/> MPa
x-Achse: Max	<input type="text" value="10"/> -	Maximale Transformationsdehnung	<input type="text" value="0.07"/> -
y-Achse: Max	<input type="text" value="50"/> mm	Austenitmodul	<input type="text" value="70000"/> MPa
<input type="button" value="Plot"/>			

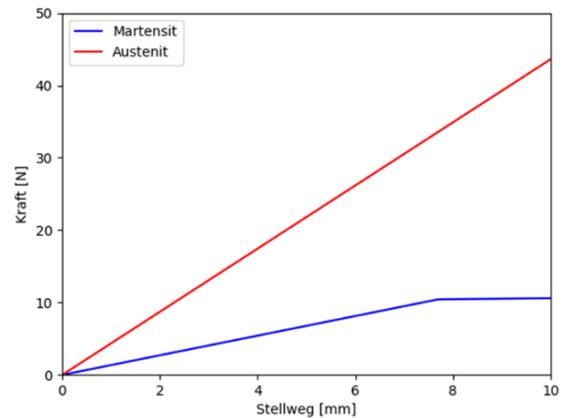


Abbildung 17: GUI des programmierten Auslegungswerkzeugs

In der GUI werden die Eingaben in Bezug auf die Geometrie- und Materialparameter angegeben. Als Ergebnis erhält man die Kraft-Stellweg-Kurven für den martensitischen und austenitischen Zustand der Zugfeder.

Zusammenfassung

Es wurden mögliche Einsatzgebiete von FG-Federn und Federbauformen unter Berücksichtigung industrierelevanter Kriterien mit dem PA diskutiert und relevante Parameter wie Aktorkraft, Federsteifigkeit und Bauraum erfasst. Des Weiteren konnte anhand der Parameter eine Vorauswahl von FG-Drahthalbzeugen getroffen werden. Neben den Materialeigenschaften ist hier die kommerzielle Verfügbarkeit im Hinblick auf eine spätere industrielle Nutzung und die Bereitstellung von Materialparametern von hoher Wichtigkeit.

Im Rahmen der Ermittlung der Werkstoff- bzw. Halbzeugkennwerte am Drahthalbzeug wurden zunächst geeignete Messmethoden identifiziert, entsprechende Versuchseinrichtungen ausgewählt sowie vorhandene Versuchseinrichtungen angepasst. Die Kennwerte umfassen die PUT, das E-Modul sowie die Querkontraktionszahl und dienen u. a. zum Abgleich mit den erstellten Simulationsmodellen.

Die Herstellung der Versuchsfedern, ausgeführt als Zug- und Druckfedervariante sowie in Wellen- und Schenkelfederform erfolgte mit Unterstützung von Federherstellern des PA. Nach Ermittlung des Kraft-Weg-Verhaltens der Federn unter verschiedenen Einflussfaktoren konnten hier ebenfalls Vergleiche mit den Simulationskurven vorgenommen werden.

In Form der validierten Simulationsmodelle wurde die Grundlage für die Durchführung einer statistischen Versuchsplanung (DoE) zur Ermittlung der Ursache Wirkungs-Beziehungen geschaffen. Mithilfe der validierten FEM-Modelle werden hiermit die Werte der Zielgrößen (Hub und Kraft) für eine Variation der Eingangswerte (Federgeometrie und Materialeigenschaften) berechnet.

Auf Basis der DoE wurde exemplarisch ein anwenderorientiertes Auslegungswerkzeug für FG-Zugfedern programmiert. Nach Eingabe der Geometrie und Materialparameter erhält man die Kraft-Stellweg-Kurven für den martensitischen und austenitischen Zustand der Zugfeder.

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 Alexander Hiekel (IWU) unter 0351/4772-2068

Literatur:

- [1] S. Langbein, A. Czechowicz: Konstruktionspraxis Formgedächtnistechnik, Springer Vieweg Verlag, Wiesbaden, S. 85 ff., ISBN 978-3-8348-1957-4, 2013
- [2] OTTO EGELHOF GmbH & Co. KG: Thermostatregler (RTL), Fellbach. <https://www.egelhof.com/de/entwicklung-innovation/formgedachtnis-technik/thermostatregler-rtl/>, abgerufen am: 24.01.2023
- [3] TROX GmbH: Weitwurfdüsen für hohe Volumina. <https://www.trox.de/bueros/weitwurfduesen-fuer-hohe-volumina-78ab436f1b26de92>, abgerufen am: 24.01.2023
- [4] Humburg, M., Eggeler, G. u. Wagner, M.: Thermo-Kombiventil: Thermomanagement im Standheizbetrieb. Automobiltechnische Zeitschrift (ATZ) 108 (206) 03/06
- [5] Automobili Lamborghini S.p.A.: Lamborghini Sián's Smart Material System: How it Works. <https://www.lamborghini.com/de-en/nachrichten/lamborghini-sians-smart-material-system-how-it-works>, abgerufen am: 20.09.2022
- [6] Lopez, J.: Chevy Equinox Gets Cold Air Grille Shutter. gmauthority.com/blog/2020/09/2021-chevy-equinox-gets-cold-air-grille-shutter/, abgerufen am: 20.09.2022
- [7] Tsuchiya, K.: Mechanisms and properties of shape memory effect and superelasticity in alloys and other materials. A practical Guide. Shape Memory and Superelastic Alloys 2011
- [8] Sascha Glistau: Rolex neue Yachtmaster 2015, 2015. <https://100percentpassion.net/2015/07/12/rolex-neue-yachtmaster-2015/>, abgerufen am: 03.02.2023
- [9] L. C. Brinson: One-dimensional constitutive behavior of shape memory alloys: thermos-mechanical derivation with non-constant material functions and redefined martensite internal variable. Journal of Intelligent Material Systems and Structures 4, 1993, p. 229-242.

- [10] S.-M. An et al: Engineering design framework for a shape memory alloy coil spring actuator using a static two state mode, Smart Material Structures 21, no. 5, 2012.