

## Berücksichtigung der Umformhistorie gezogener Drähte bei der Simulation des Federwindens

Philipp Rethmann<sup>1,a</sup>, Joshua Grodotzki<sup>1</sup> und A. Erman Tekkaya<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Institut für Umformtechnik und Leichtbau TU Dortmund, Deutschland

<sup>a</sup>[philipp.rethmann@iul.tu-dortmund.de](mailto:philipp.rethmann@iul.tu-dortmund.de)

**Keywords:** Federwinden, Bauschingereffekt, kinematische Verfestigung, Eigenspannungen

**Abstract.** Schraubendruckfedern werden in der Regel aus hochfesten Stahldrähten hergestellt. Viele der verwendeten Stahlsorten erhalten ihre hohe Festigkeit aus der Kaltverfestigung durch große plastische Umformung während des Drahtziehens. Diese kaltgezogenen Stahldrähte weisen während der Umformung ein anisotropes Verfestigungsverhalten auf, das einen erheblichen Einfluss auf die Entwicklung von Eigenspannungen beim Wickeln der Feder hat. Es wird gezeigt, dass die Rückfederungs- und Eigenspannungsvorhersage in der Prozesssimulation des Federwickelns durch die Verwendung des Chaboche Verfestigungsmodells mit einem nicht-sättigenden Rückspannungsanteil im Vergleich zu rein isotropen Verfestigungsmodellen erheblich verbessert werden kann. Untersucht werden wärmebehandelte (patentierete) kaltgezogene unlegierte Federstahldrähte sowie kaltgezogene Drähte aus austenitischen, rostfreiem Stahl. Die Materialparameter für die kinematischen Verfestigungsmodelle werden invers auf der Grundlage der Ergebnisse von Zug- und Druckversuchen an den Drähten bestimmt. Zur Validierung der Simulationsergebnisse werden Biegeversuche durchgeführt. Die Verformungsgeschichte des Werkstoffs wurde durch die Bestimmung einer initialen Fließflächenverschiebung erfolgreich berücksichtigt.

### Einführung

Schraubenfedern und Drahtbiegeteile werden häufig aus kaltgezogenen Drähten hergestellt, deren sehr hohe Festigkeit aus der Kaltverfestigung beim Drahtziehen resultiert. Dieser Massivumformprozess verursacht dabei allerdings auch anisotrope Verfestigungseffekte. Mit Anisotropie ist in diesem Kontext nicht die geometrische Anisotropie gemeint, die aus der Blechumformung bekannt ist und z.B. durch den Lankford-Parameter beschrieben werden kann. Im Bereich der Plastizität kann die Anisotropie hingegen als Verschiebung der ursprünglich isotropen Fließortkurve dargestellt werden [1]. Dies ist dann von Bedeutung, wenn während der Umformung eine Änderung des Dehnpfades auftritt. Wird die Belastungsrichtung beispielsweise umgekehrt, kann der bekannteste Effekt der anisotropen Verfestigung, der sogenannte Bauschingereffekt beobachtet werden [2]. Wird ein Werkstück beispielsweise zunächst plastisch gedehnt und im Anschluss gestaucht, zeigt sich eine geringere Fließspannung unter Druckbelastung als zuvor unter Zugbelastung [3]. Bei großen plastischen Dehnungen ist häufig ein Übergang zur isotropen Verfestigungskurve zu beobachten. Es können aber auch andere anisotrope Phänomene, wie die Verfestigungsstagnation oder eine bleibende Entfestigung, wobei die Fließspannung nach Lastumkehr nicht mehr die Werte der isotropen Verfestigung erreicht, auftreten [4]. Bei der Simulation von Blechumformprozessen, wie dem Tiefziehen, bei dem die Dehnpfadänderung aus dem Hin- und Zurückbiegen resultiert, kann die Vorhersage der Rückfederung durch die Verwendung von Materialmodellen mit anisotroper Verfestigung erheblich verbessert werden [5]. Im Themenbereich der Kaltmassivumformung hat sich gezeigt, dass die Berücksichtigung der anisotropen Verfestigung die Vorhersage von Produkteigenschaften wie Eigenspannungen und induzierte Kaltverfestigung verbessert [6]. Im Gegensatz zu den zuvor genannten Umformverfahren beinhaltet die Herstellung von Federn durch Winden oder Biegen keinen internen Wechsel des

Dehnpfads. Wird jedoch ein kaltgezogener Draht verarbeitet, ist die Verschiebung des Fließortes bereits im Ausgangszustand vorhanden, sodass am inneren Biegeradius ein Dehnpfadwechsel erfolgt. Während des Drahtziehens wird der Werkstoff hier gedehnt, beim Biegen hingegen gestaucht. Daraus resultiert eine lokal verringerte Fließspannung, was dazu führt, dass die Spannungsverteilung und damit auch die neutrale Faser verschoben werden. In der Prozesskette der Federherstellung ist daher zu erwarten, dass Eigenspannungsentwicklung, Rückfederung und der Verzug bei der Wärmebehandlung von diesem Materialverhalten beeinflusst werden (Abb. 1).

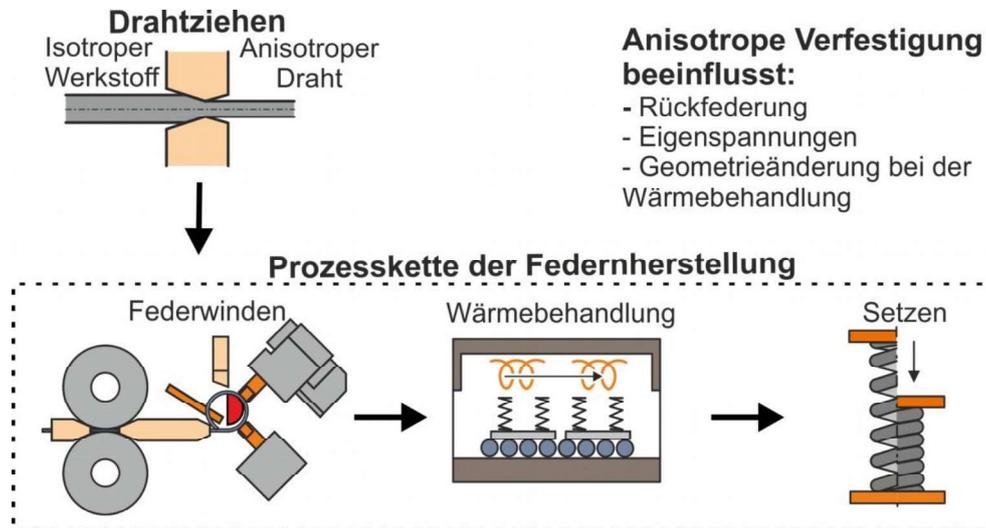


Abb. 1: Prozesskette der Federherstellung und der Einfluss der anisotropen Verfestigung während des Drahtziehens

Aus diesem Grund wird ein Materialmodell mit kombiniert isotrop-kinematischem Verfestigungsverhalten für die Prozesssimulation des Federwindens eingesetzt. Die Umformhistorie des Drahts vor dem Biegen wird dabei durch eine initiale kinematische Verfestigung abgebildet, die aus der Materialcharakterisierung ermittelt wird.

### Werkstoffe

In dieser Arbeit werden patentiert gezogene Federdrähte SH und nichtrostende Federdrähte mit einem Durchmesser von  $d = 4$  mm untersucht. Nach DIN EN 10270-1 werden die Federdrähte der Güte SH (1.1200) vor dem Drahtziehen einer Wärmebehandlung mit isothermer Umwandlung von Austenit in ein feinstreifigen Perlit, dem sogenannten patentieren, unterzogen. Dieses Gefüge eignet sich sehr gut für das Drahtziehen und ermöglicht die Herstellung hochfester Drähte. Bei dem nichtrostenden Draht handelt es sich um einen austenitischen Chromstahl der Güte X10CrNi18-8 (1.4310). Die verwendeten Drähte werden im Anschluss an das Drahtziehen keiner weiteren Wärmebehandlung unterzogen, sodass die anisotrop verfestigte Mikrostruktur erhalten bleibt. Es ist deshalb davon auszugehen, dass die vorzeichenabhängige Fließspannung Einfluss auf den Windeprozess nimmt. Um den Einfluss des vorgelagerten Umformprozesses abbilden zu können, ohne den Prozess selber simulieren zu müssen, wird zur Ermittlung des Fließverhaltens neben den üblich verwendeten Zugversuchen auch der Druckversuch eingesetzt. Aufgrund der extrem hohen Festigkeit der untersuchten Drähte müssen dabei speziell entwickelte Stauchwerkzeuge mit Hartmetalleisätzen verwendet werden. Die resultierenden Zug- und Druckfließkurven sind in Abbildung 2 dargestellt.

Bei beiden Werkstoffen ist eine schnelle Sättigung der Fließspannung zu beobachten. Unter Zugbelastung werden dabei etwa 1900 MPa für den patentiert gezogenen Draht und 1700 MPa für den nichtrostenden Draht erreicht. Aufgrund dieses Verfestigungsverhaltens liefern die Zugversuche nur Daten für geringe wahre plastische Dehnungen von 0,05, da es zur verfrühten

Einschnürung der Proben kommt. Im Vergleich zu den Daten aus dem Zugversuch sind bei Druckbelastung verringerte Anfangsfließspannungen sowie eine langsamere Sättigung der Fließspannung zu beobachten. Die maximalen Fließspannungen liegen um 9 % (patentiert gezogener Draht) und 15 % (nichtrostender Draht) unter den Zugversuchswerten. Beide Werkstoffe zeigen demnach ein ausgeprägtes anisotropes Verfestigungsverhalten sowie im Speziellen ebenfalls eine bleibende Entfestigung. Darüber hinaus weist der Draht aus nichtrostendem Stahl eine Stagnation der Kaltverfestigung auf.

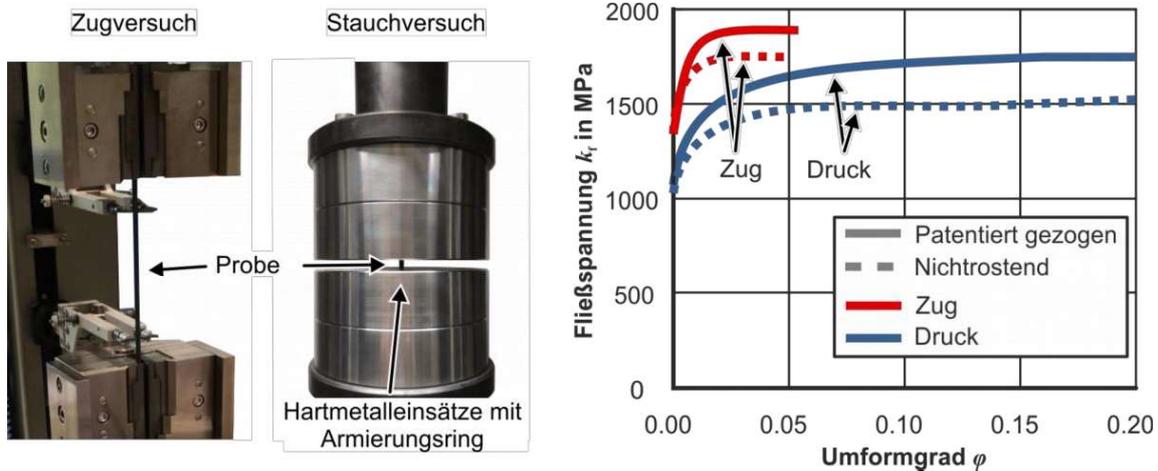


Abb. 2: Versuchsaufbau zur Ermittlung der Fließkurven von Federdrähten und Fließkurven für Drähte mit dem Durchmesser  $d = 4\text{mm}$  aus patentiert gezogenem und nichtrostendem Draht.

### Materialmodelle

Standardmäßig wird bei kommerziellen FEM-Programmen, wie dem in dieser Arbeit verwendeten Abaqus/CAE, isotrope Verfestigung für das Verfestigungsverhalten der Materialmodelle genutzt. Diese vereinfachte Herangehensweise dient deshalb als Referenz für den in dieser Arbeit verwendeten isotrop-kinematischen Ansatz. Für die Implementierung in parametrisierter Form wird die Fließkurvenfunktion nach Voce verwendet:

$$\sigma_f = \sigma_0 + R_{\text{sat}}(1 - e^{-k\varphi}) \quad (1)$$

Hier werden drei Konstanten benötigt, um die Zunahme des Fließflächenradius in Abhängigkeit des Umformgrads  $\varphi$  zu beschreiben (Abbildung 3a). Die Konstante  $\sigma_0$  beschreibt die Anfangsfließspannung,  $R_{\text{sat}}$  gibt den Grenzwert der Fließspannung für unendlich große Umformgrade an und  $k$  spezifiziert die Sättigungsrate.

Für die Beschreibung des anisotropen Verfestigungsverhaltens wird das kombinierte Verfestigungsmodell nach Lemaître und Chaboche [7] verwendet, welches im Folgenden als Chaboche-Modell bezeichnet wird. Die zusätzlich zur isotropen Aufweitung auftretende Translation der Fließfläche wird durch zwei sogenannte Rückspannungstensoren  $\alpha_i$  beschrieben (Abb. 3b). Die Entwicklung dieser Tensoren wird bestimmt durch:

$$\dot{\alpha}_i = C \dot{\varphi} \frac{1}{\sigma_{f0}} (\sigma - \alpha_i) - \gamma \alpha_i \dot{\varphi}. \quad (2)$$

Die Materialparameter  $C$  und  $\gamma$  bestimmen die Intensität und die Geschwindigkeit der kinematischen Verfestigung, und  $\sigma_{f0}$  gibt die anfängliche Größe der Fließfläche an. Bei großen plastischen Dehnungen konvergieren die Rückspannungen gegen den Wert  $C/\gamma$ , wodurch die weitere Verfestigung vollständig isotrop ist. In der vorliegenden Arbeit wird als Erweiterung des ursprünglichen Chaboche-Modells eine zweite Rückspannungskomponente  $\alpha_2$  mit  $\gamma_2 = 0$

verwendet, die eine nicht sättigende kinematische Verfestigungskomponente ergibt. Die entsprechende kinematische Verfestigungskomponente zeigt dann einen linearen Anstieg proportional zu  $C_2$ , sodass die permanente Entfestigung modelliert werden kann. Im Falle des in dieser Arbeit betrachteten Biegens und Windens von gezogenen Federdrähten kann der Werkstoffzustand zu Beginn des untersuchten Umformprozesses nicht als isotrop angesehen werden. Das Drahtziehen als vorgelagerter Prozess führt zu einer anfänglichen Verschiebung der Fließfläche. Um dies zu berücksichtigen, kann das Chaboche-Modell mit einer weiteren initialen, konstanten Rückspannung  $\alpha_{init}$  erweitert werden.

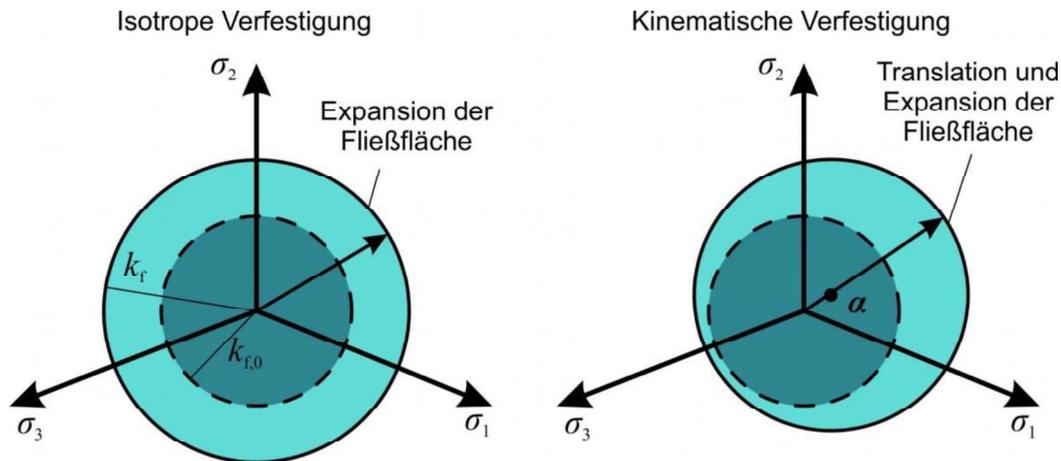


Abb. 3: Schematische Darstellung der isotropen Verfestigung (a) und der Verfestigung nach dem Chaboche Modell (b)

### Identifizierung der Modellparameter

Im Falle der isotropen Verfestigung können die Parameter der Fließkurvenfunktion durch eine einfache Optimierung aus den experimentellen Daten ermittelt werden. Mit Hilfe der Matlab-Optimierungs-Toolbox wurden die Parameter der Fließkurvenfunktion (1) so lange angepasst, bis die mittlere quadratische Abweichung zwischen Funktion und Versuchsdaten minimiert ist.

Zur Ermittlung optimaler Parametersätze des Chaboche-Modells muss hingegen eine inverse Parameteridentifikation angewendet werden. Dazu wird die Optimierungssoftware LS-Opt in Kombination mit der Finite Elemente Software Abaqus verwendet (Abbildung 4).

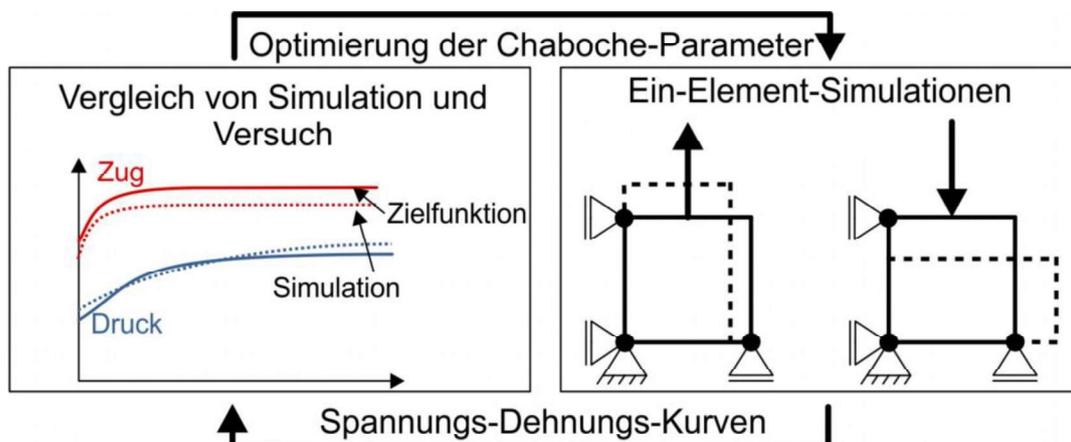


Abb. 4: Schematische Darstellung des Vorgehens zur inversen Bestimmung der Parameter des Chaboche-Modells

Zur Modellierung des Verhaltens der Federdrähte ist die parallele Optimierung von acht Parametern erforderlich. Die Berechnung wird dabei beendet, wenn sowohl die Änderung der

Parameter als auch die Differenz in der Zielfunktion zwischen zwei Iterationen kleiner als 0,5 % sind. Bei den untersuchten Werkstoffen wird dies innerhalb von 8 bis 10 Durchläufen erreicht. Die Berechnungszeit auf üblichen Desktop Computern beträgt dabei etwa 3 Stunden. In Abbildung 5 sind die resultierenden Fließkurven dargestellt, die zugehörigen Modellparameter sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

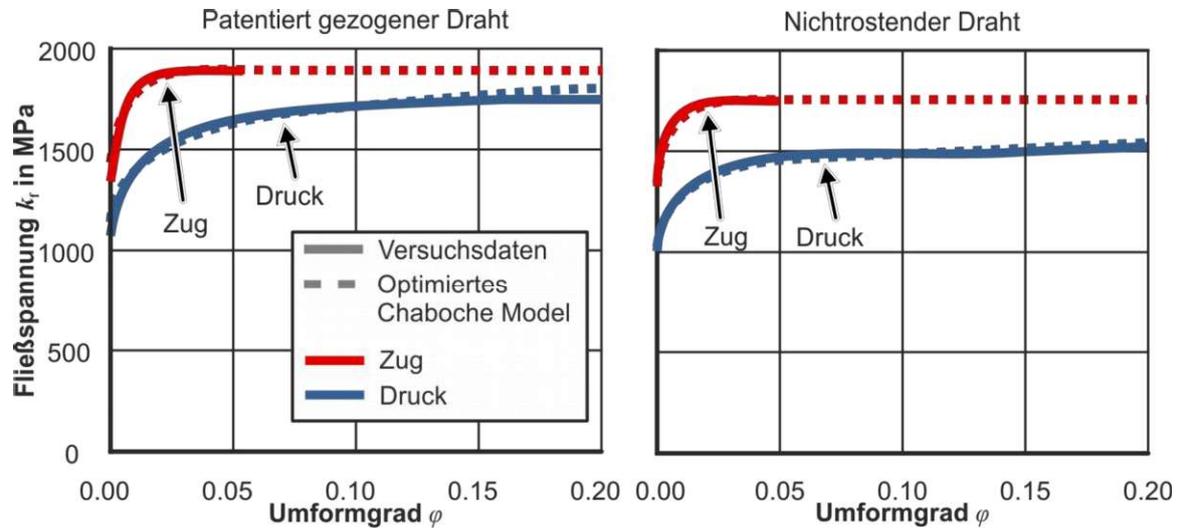


Abb. 5: Vergleich der Fließkurven aus den Zug- und Druckversuchen mit den Ergebnissen aus 1-Element-Simulationen unter Verwendung des Chaboche-Modells.

Insgesamt besteht eine gute Übereinstimmung zwischen den experimentellen Daten und den mit dem Chaboche-Modell ermittelten Daten. Beide Materialien weisen eine große initiale Rückspannung auf, die aus dem vorangegangenen Drahtziehvorgang resultiert.

Tab. 1: Materialparameter des Chaboche-Modells für patentiert gezogenen und nichtrostenden Federdraht

Material	$R_{sat}$ [MPa]	$k$	$\sigma_0$ [MPa]	$C_1$ [MPa]	$\gamma_1$	$C_2$ [MPa]	$\gamma_2$	$\alpha_{int}$ [MPa]
Patentiert gezogen	442.1	89.0	1308.8	164.7	8.50	411	0	200.8
Nichtrostend	330.9	95.9	1256.0	10.0	2.975	176.1	0	177.4

## Validierung

Die Validierung der Materialmodelle erfolgt anhand von 3-Punkt-Biegeversuchen. Der in Abbildung 6 dargestellte Aufbau wird dabei auf einer Universalprüfmaschine Zwick Roell Z250 eingesetzt.

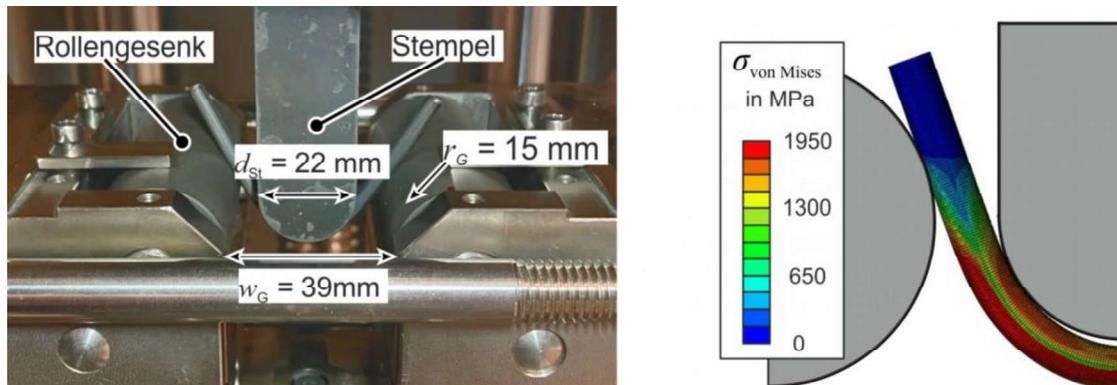


Abb. 6: Aufbau des 3-Punkt-Biegeversuchs und Modellierung des Versuchs in Abaqus (explizit)

Das Biegegesenk besteht aus kugelgelagerten Rollen, sodass der Einfluss der Reibung minimiert werden kann. Die Gesenkweite wird nach ISO 7438 eingestellt. Der Versuch wird in Abaqus (explizit) modelliert, um die Kraft-Weg-Verläufe mit den Versuchsdaten vergleichen zu können. Die Ergebnisse sind in Abbildung 7 zu sehen. Zusätzlich zu den Daten des Chaboche-Modells sind Kraft-Weg-Kurven dargestellt, die durch die Verwendung des Materialmodells mit isotroper Verfestigung erzeugt wurden. Die verwendeten Parameter des isotropen Modells wurden mittels Zugversuche ermittelt.

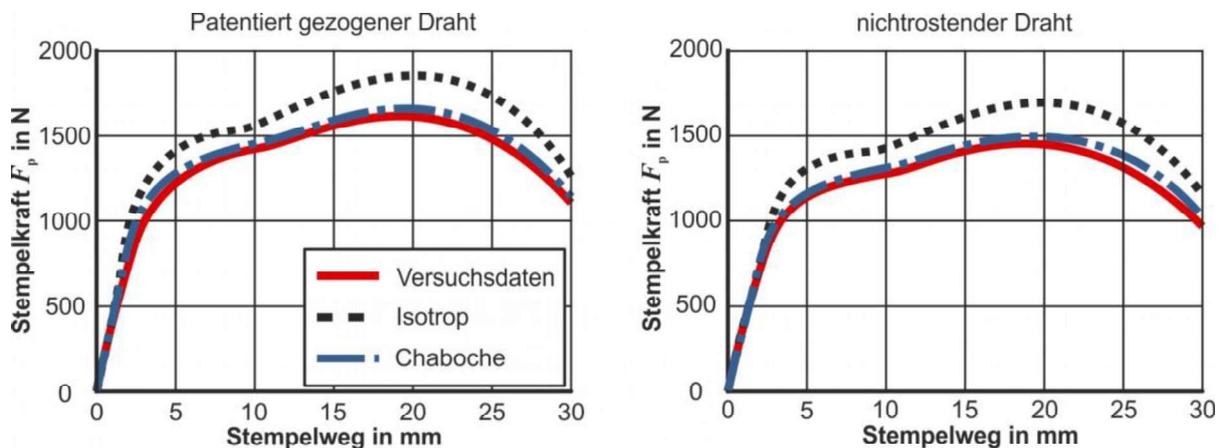


Abb. 7: Vergleich der Kraft-Weg-Kurven von Versuch und Simulation für patentiert gezogene und nichtrostende Federdrähte

Die Verwendung isotroper Verfestigungsmodelle, für die einfache Zugversuche zur Charakterisierung genutzt werden, resultiert in einer Überschätzung der maximalen Biegekraft um 14 % für den patentiert gezogenen Draht und 17 % für den nichtrostenden Draht. Darüber hinaus zeigt sich ein deutlich verzögertes Einsetzen der plastischen Umformung durch die zu hohe Anfangsfließspannung. Wird stattdessen das Materialmodell mit kombiniert isotrop-kinematischer Verfestigung genutzt, kann die Differenz zwischen Experiment und Simulation auf etwa 3 % für beide Werkstoffe verringert werden. Die mit dem Chaboche-Modell berechneten Kraft-Weg-Kurven zeigen somit eine gute Übereinstimmung, liegen allerdings noch geringfügig über den experimentellen Daten.

### Numerische Simulation des Federwindens

Das validierte Materialmodell wird für die Prozesssimulation des Federwindeprozesses verwendet. Ziel ist es, sowohl die Rückfederung als auch die Eigenspannungen vorherzusagen. Aufgrund der asymmetrischen Geometrie des Prozesses muss der Wickelvorgang in Form eines 3D-Modells simuliert werden (Abbildung 8).

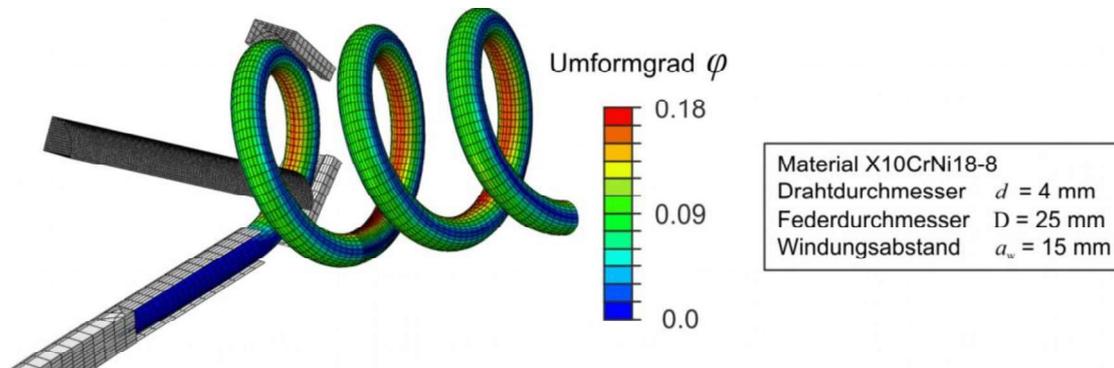


Abb. 8: Verteilung des Umformgrads während des Windeprozesses

Die Länge des Drahtmodells wird so gewählt, dass drei Windungen simuliert werden können. Zur Vernetzung werden dabei circa 120.000 hexagonale lineare 3D Elemente genutzt. Der Coulomb Reibungskoeffizient für den Kontakt zwischen Draht und den Windewerkzeugen wird auf 0,1 festgelegt, was für diese Werkstoffpaarung ein üblicher Wert ist. Die Berechnungszeit beträgt sowohl für das Isotrope-, als auch für das Chaboche-Modell etwa 12 Stunden (auf einem Desktop Computer mit 8 Kernen).

Im Vergleich zum isotropen Materialverhalten wird durch die anisotrope Verfestigung die neutrale Faser während des Windens nach außen (positive x-Werte) verschoben, da der druckbelastete innere Bereich aufgrund der geringeren Fließspannung früher plastisch umgeformt wird. Da das Kräftegleichgewicht in Drahtlängsrichtung erhalten bleiben muss, kommt es zu einer Vergrößerung des Druckspannungsbereichs. Die größten Vergleichsdehnungen sind deshalb am inneren Biegeradius zu beobachten. Nach der Rückfederung im Anschluss an den Umformprozess, zeigt auch die charakteristische Eigenspannungsverteilung eine Verschiebung der neutralen Faser in Richtung des äußeren Radius (Abb. 9).

Durch die Verwendung des validierten Verfestigungsmodells nach Chaboche werden die Berechneten maximalen Eigenspannungen im Vergleich zu dem isotropen Verhalten um 10 % bis 15 % verringert. Darüber hinaus führt die Berücksichtigung der Umformhistorie der Halbzeuge in der Simulation auch zu einer Veränderung der Rückfederung. Für den nichtrostenden Federstahl ist die berechnete Rückfederung um 8 % geringer.

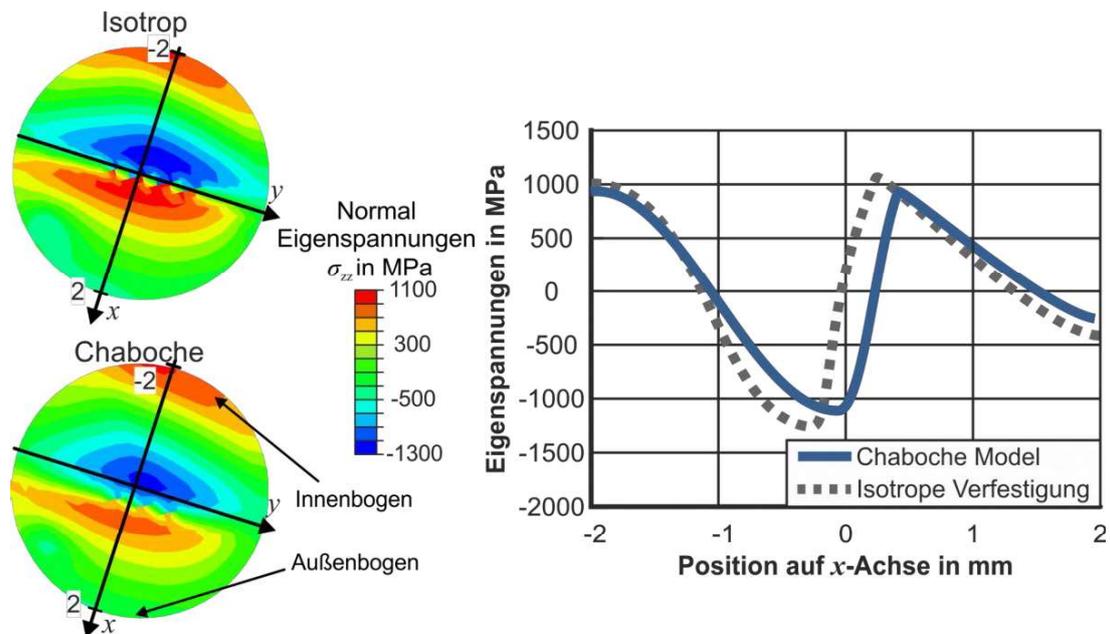


Abb. 9: Vergleich der Eigenspannungsverteilung im Drahtquerschnitt zwischen isotropen und Chaboche Verfestigungsmodell

### Zusammenfassung

Das kombinierte isotrop-kinematische Verfestigungsmodell nach Lemaître und Chaboche (1990) wird verwendet, um die Umformhistorie von kaltgezogenen Drähten in FE-Simulationen zu berücksichtigen. Durch die Implementierung einer zusätzlichen initialen Rückspannung sowie nicht saturierenden Rückspannungsanteilen ist es möglich, die kinematischen Verfestigungsphänomene, die durch das Drahtziehen eingebracht werden, abzubilden. Für die Charakterisierung werden dazu neben Zugversuchen lediglich Druckversuche benötigt. Im Vergleich zur konventionellen isotropen Verfestigung wird die Qualität der numerischen Spannungsberechnungen im 3-Punkt-Biegeversuch um bis zu 80 % verbessert. Durch numerische Simulationen des Federwindeprozesses wird gezeigt, dass die Anisotropie, die aus dem Herstellungsprozess des Drahts resultiert, einen signifikanten Einfluss auf die Rückfederung und die Eigenspannungsentwicklung nimmt. Es ist zu erwarten, dass die anisotrope Verfestigung darüber hinaus auch einen Einfluss auf den Verzug bei dem Spannungsarmglühen der Federn hat. Eine weitere Verbesserung der Modellierung des Fließverhaltens gezogener Drähte könnte in Zukunft durch die zusätzliche Verwendung von Torsionsversuchen bei der Parameteridentifikation erreicht werden.

### Danksagung

Wir bedanken uns bei der Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen (AIF), dem Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWi) und der Forschungsvereinigung Stahlverformung (FSV) für die Unterstützung des Forschungsvorhabens „Entwicklung eines Modells zur Vorhersage der Geometrieänderung bei der Federnherstellung“ (IGF 21490N).



Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

### **Literaturverzeichnis**

- [1] Baltov, A., Sawczuk, A., A rule of anisotropic hardening. *Acta Mech.* 1 (2), 81–92, 1965.
- [2] Schmitt, J.H, Aernoudt, E., Baudelet, B., Yield loci for polycrystalline metals without texture. *Mater. Sci. Eng.* 75 (1-2), pp. 13–20, 1985.
- [3] Bauschinger, J., Über die Veränderung der Elastizitätsgrenze und die Festigkeit des Eisens und Stahls durch Strecken und Quetschen, durch Erwärmen und Abkühlen und durch oftmals wiederholte Beanspruchungen. *Mittheilungen aus dem Mechanisch-Technischem Laboratorium* 13, 1886.
- [4] Yoshida, F., Uemori, T., A model of large-strain cyclic plasticity describing the Bauschinger effect and work hardening stagnation. *Int. J. Plast.* 18 (5-6), pp. 661–686, 2002.
- [5] Aboozar, T., Ghaei, A., Green, D., Altenhof, W., Finite element simulation of springback for a channel draw process with draw bead using different hardening models. *Int. J. Mech. Sci.* 51 (4), pp. 314 – 325, 2009.
- [6] Kolpak, F., Hering, O., Tekkaya, A. E., Consequences of Large Strain Anisotropic Work-hardening in Cold Forging. *Int. J. Mater. Form.* 14, pp. 1463-1481, 2021
- [7] Lemaître, J., Chaboche, J.-L., *Mechanics of solid materials*, Cambridge University Press, 1990.