

Modellbildung des Umformprozesses vom Halbzeug zum Bauteil mit LS-DYNA

Ralf Hirzel; Markus Kley*; Wolfgang Rimkus**

*Hochschule Aalen; Forschungsbereich Innovative Antriebstechnik und Abwärmenutzung;
Beethovenstraße 1; D-73430 Aalen E-Mail: Markus.Kley@htw-aalen.de

**Hochschule Aalen; Kompetenzzentrum für Simulation und Berechnung;
Beethovenstraße 1; D-73430 Aalen E-Mail: Wolfgang.Rimkus@htw-aalen.de

LS-DYNA, Elementtypen, Vollständige Prozessbetrachtung, Biegeprozess, Eigenspannung, Eigenspannungsmodellierung, Modellerstellung, Toleranzeinflüsse, Abkühlprozesse, Ziehprozesse, Rundmaterial, Sprengring

Im Rahmen immer genauerer und detaillierterer Simulationen ist es unumgänglich die Ausgangsparameter in der Simulation genau zu betrachten. Dies können werkstofftechnische Kennwerte wie Streckgrenze und Eigenspannungen, aber auch Maschinentoleranzen im Herstellungsprozess sein. Ziel dieser Veröffentlichung ist es den Zusammenhang zwischen diesen Parametern und den Spannungen, Dehnungen und der entstehenden Geometrie in einem einfachen Bauteil herzustellen. Hierzu wird der Fertigungsverfahren von Runddraht Sprengringen (**Abbildung 1**) mit Drahtdurchmesser $d_4 = 5 \text{ mm}$ und den entstehenden Durchmesser betrachtet.

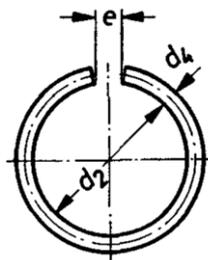


Abbildung 1: Abmessungen Runddraht – Sprengring [1]

1 Stand der Technik

Durch Abkühlprozesse und plastische Biegung entstehen Eigenspannungen in Bauteilen. Diese sind von verschiedenen Rahmenbedingungen abhängig, die hauptsächlich über die Werkstoffeigenschaften und den Herstellungsprozess definiert sind.

Herstellprozess des Drahtes

Für die Eigenspannungen im Ausgangsmaterial ist der Herstellprozess ausschlaggebend. Dabei ist vor allem die zeitliche Reihenfolge der Prozessschritte entscheidend. Ein gezogener und vergüteter Draht weist beispielsweise einen anderen Eigenspannungsverlauf auf, als ein Draht, der nur gezogen wurde. In dieser Veröffentlichung wird ein ölschlussvergüteter Federstahldraht betrachtet. Deshalb sind die Eigenspannungen aus dem Vergüteprozess entscheidend für die Simulationen. Aufgrund des Abkühlvorgangs im Vergüteprozess ergibt sich ein Eigenspannungsverlauf mit Druckspannungen an der Außenseite und

Zugspannungen im Kern. Diese Eigenspannungen entstehen aufgrund der unterschiedlichen Abkühlreihenfolge und den damit verbundenen Erstarrungen (Abbildung 2).

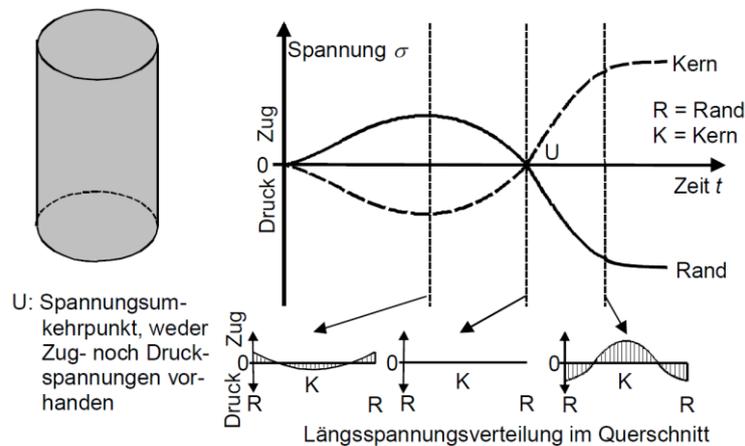


Abbildung 2: Eigenspannungen durch Vergüteprozesse [2]

1.1 Werkstofftoleranzen

Durch Toleranzen in der Drahtherstellung weisen unterschiedliche Chargen des Federstahldrahtes unterschiedliche Werkstoffkennwerte auf (Tabelle 1).

Kennwert		Einheit
Zugfestigkeit R_e	1800 – 1950	N/mm ²
Dehngrenze $R_{p0,2}$	min. 0,9 * R_e	N/mm ²
Elastizitätsmodul E	ca. 206 000	N/mm ²

Tabelle 1: Werkstofftoleranzen nach Datenblatt [3]

Hierbei sind vor allem die theoretische Dehngrenze $R_{p0,2}$ und der Elastizitätsmodul E für den betrachteten Umformprozess wichtig. Durch diese zwei Parameter wird der Übergang von elastischer zu plastischer Dehnung bestimmt, siehe Gleichung (1.1), und daraus resultierend die Rückfederung.

$$\epsilon_{\text{elastisch}} = \frac{R_{p0,2}}{E} \quad (1.1)$$

Anhand des apollonischen Berührproblems lässt sich die wirkende Dehnung auf den Draht anhand der Walzenpositionen beschreiben. Dafür ist es nötig den Durchmesser zu finden, der zu allen drei Rollen tangential läuft (**Abbildung 3**). Dadurch kann nachvollzogen werden, ab welchem Abstand zur neutralen Faser im Drahtquerschnitt plastische Dehnung vorliegt.

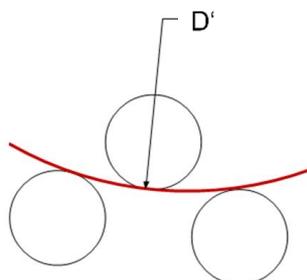


Abbildung 3: Beschreibung theoretischer Durchmesser D'

Der wirkende Durchmesser D' , bezüglich der neutralen Faser im Prozess kann anhand der Gleichungen (1.2) beschrieben werden.

$$\begin{aligned}(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 &= (r \pm r_1)^2 \\(x - x_2)^2 + (y - y_2)^2 &= (r \pm r_2)^2 \\(x - x_3)^2 + (y - y_3)^2 &= (r \pm r_3)^2\end{aligned}\tag{1.2}$$

Dafür sind die Positionen und Durchmesser der drei Rollen erforderlich, sowie der Verlauf des Drahtes durch die Maschine. Anhand der Drahtdicke ergeben sich dann die Dehnungen (elastisch und plastisch) an den Außen- und Innenkanten.

1.2 Theorie plastische Biegung und Rückfederung

Um die Vorgänge während des Biegevorgangs zu verstehen, ist es nötig die theoretischen Grundlagen zur plastischen Biegung zu betrachten. Bei der plastischen Biegung beginnt das Material an einem bestimmten Punkt y_f sich plastisch zu Verformen. Durch die plastische Verformung an der Außenkante entsteht dort eine bleibende plastische Verformung mit Eigenspannungen. Aufgrund der elastischen Verformung im mittleren Bereich versucht sich der Draht wieder zurückzubiegen. Dadurch entstehen an der Außenkante Druckspannungen, da hier entgegen der ursprünglichen Belastung ein Rückstellmoment entsteht, welches versucht die plastische Verformung rückgängig zu machen (**Abbildung 4**).

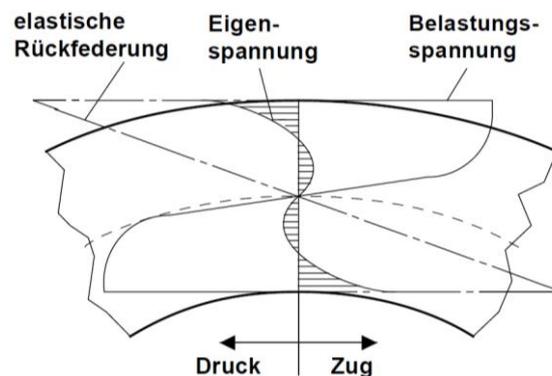


Abbildung 4: Beschreibung der plastischen Biegung [4]

Ausgehend von der wirkenden Dehnung aufgrund des theoretischen Durchmessers D' kann der Abstand zwischen der neutralen Faser und des Übergangs von elastischer zu plastischer Dehnung mit Gleichung (1.3) bestimmt werden.

$$y_f = \frac{D'}{2} \cdot \frac{R_{p0,2}}{E}\tag{1.3}$$

Durch Eigenspannungen im Ausgangsmaterial und schwankende Werkstoffkennwerte kann dieser Eigenspannungsverlauf bei gleichen Werkzeugeinstellungen variieren.

Der Spannungsverlauf ergibt sich aufgrund der folgenden Parameter:

- Die neutrale Faser ergibt sich bei einem eigenspannungsfreien Draht in der Drahtmitte, diese kann sich Aufgrund auftretender Eigenspannungen jedoch verschieben.
- Maximalstellen im Zug- / Druckbereich treten an der Stelle y_f auf, die den Beginn der plastischen Dehnung darstellt. Je weiter diese Stelle Richtung Außenfaser rückt, desto höher wird das Maximum.
- Die Höhe der Randfaserspannung hängt hauptsächlich vom gewünschten Durchmesser ab. Je kleiner der Durchmesser wird, desto größer wird die Rückfederung und damit das Spannungsmaxima an der Außenfaser.

Wenn nun die Werkstofftoleranzen zu Grunde gelegt werden lassen sich für die entstehende Geometrie, bzw. den entstehenden Eigenspannungsverlauf, bei gleichen Walzenpositionen die folgende Aussagen treffen:

- Min. Zugfestigkeit und die damit verbundene min. Dehngrenze führen aufgrund der Zunahme der plastischen Dehnung zu einem größeren Durchmesser, max. Zugfestigkeit bzw. Dehngrenze ergeben kleinere Durchmesser, dies ist über das frühere bzw. spätere Eintreten der plastischen Dehnung zu erklären.
- Zudem wandern die Zug- bzw. Druckmaxima je nach entstehenden Durchmesser in Richtung Randfaser bzw. neutrale Faser, dies hängt mit dem größer bzw. kleiner werdenden Durchmesser zusammen.

Somit beeinflussen die in **Tabelle 1** aufgeführten Werkstoffkennwerte direkt die entstehende Geometrie.

2 Simulationsaufbau

Als Elementtypen wurden verschiedene SOLID-Elementformen untersucht. Dabei wurden hauptsächlich die Auswirkungen auf die simulierten Durchmesser und die Eigenspannungsverläufe untersucht. Als Elementtypen kamen die ELFORM 1,2,-1 und -2 zum Einsatz, die nach [5] verwendet werden sollen (**Abbildung 5**).

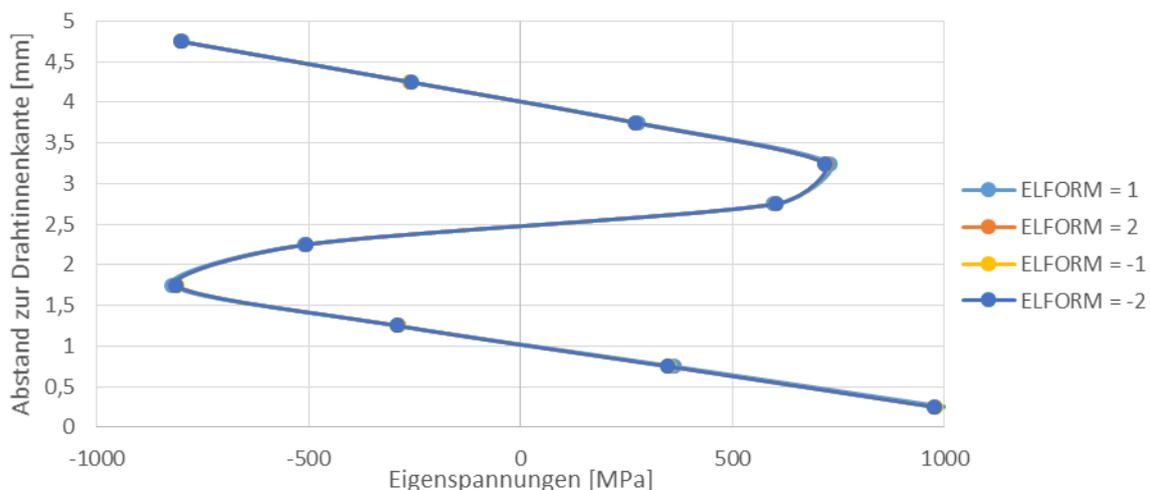


Abbildung 5: Eigenspannungen mit unterschiedlichen Elementtypen

Die Variation der Elementformulierung zeigt jedoch keine Auswirkung auf die entstehenden Eigenspannungen und Durchmesser. Die Genauigkeit des Spannungsverlaufes ist vor allem

von der Anzahl an Elementen über den Durchmesser abhängig. Hier muss jedoch ein Kompromiss zwischen Auflösung und Rechenzeit gefunden werden. Die Auflösung sollte so gewählt werden, damit möglichst jeder Spannungsteilbereich durch min. 2 Elemente abgedeckt wird, damit die Extrem- sowie die Nullstellen eindeutig lokalisiert werden können.

Die Auswertung der Spannungen erfolgt nach der Normalspannungshypothese, siehe Gleichung (2.1).

$$\sigma_v = \max(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3) \quad (2.1)$$

Dadurch werden die maximalen Zug- und Druckspannungen bewertet die entscheidend für die bleibende Verformung und Rückfederung sind. Weitergehend wurde mit diesen Erkenntnissen untersucht, in wie weit das Verhältnis von plastischer zu elastischer Dehnung für die Rückfederung ausschlaggebend wird, und ab welchen Durchmessern selbst kleine Änderungen der Rollenposition entscheidenden Einfluss auf das Ergebnis generieren. Dabei zeigte sich, dass sich bei kleiner werdendem theoretischem Durchmesser D' der simulierte Durchmesser immer weiter annähert. D.h. die Rückfederung nimmt immer weiter ab je größer das Verhältnis von plastischer zu elastischer Dehnung wird (**Abbildung 6**).

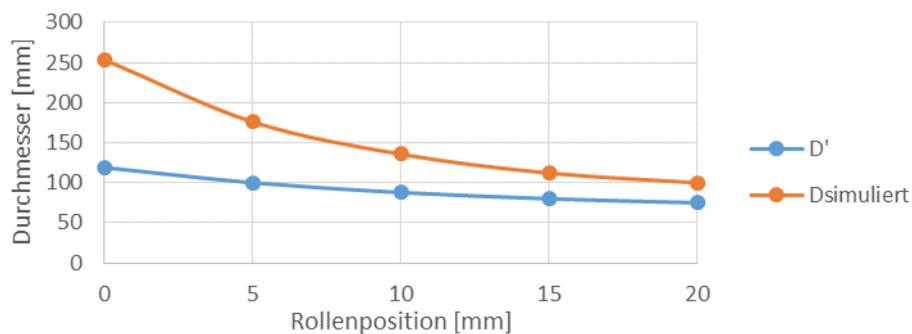


Abbildung 6: theoretischer und simulierter Durchmesser über die Rollenposition

Um den Einfluss der werkstoffmechanischen Eigenschaften zu ermitteln und mit den theoretischen Erkenntnissen zu vergleichen werden die Simulationen mit min. und max. Dehngrenze anhand des Datenblattes bei gleichbleibendem E-Modul durchgeführt. Mit dem in Gleichung (1.3) aufgestellten Zusammenhang, werden sich die Spannungsmaxima und –minima in Richtung Drahtaußenkante bzw. –innenkante verschieben. Diese Unterschiede wirken sich sowohl auf den entstehenden Durchmesser als auch auf den Eigenspannungsverlauf im Draht aus (**Abbildung 7**).

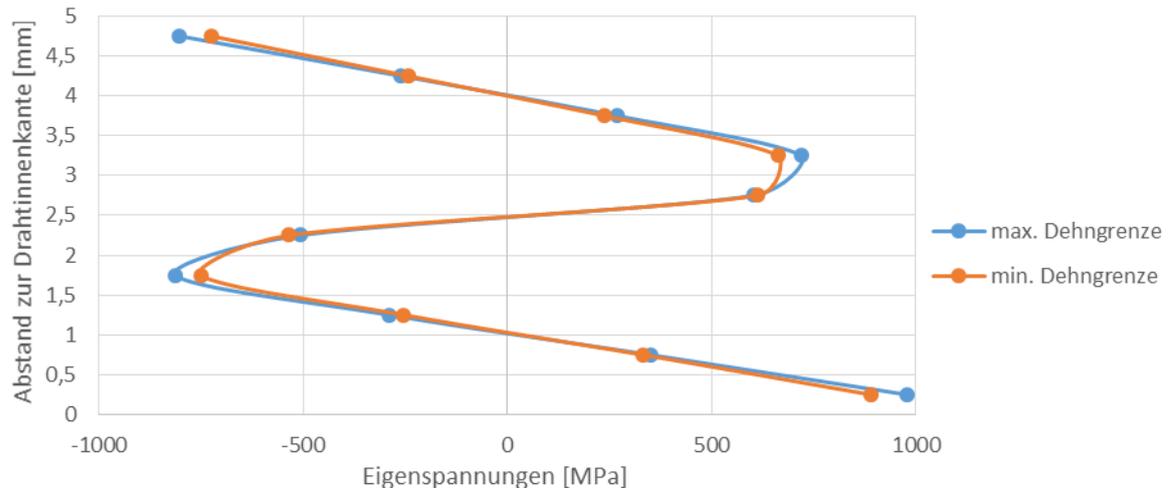


Abbildung 7: Eigenspannungsverlauf mit max. und min. Dehngrenze

Um die vorhandenen Eigenspannungen und den Eigenspannungsverlauf aus dem Zieh- und Vergüteprozess zu ermitteln, ist eine Spannungsmessung an oder nahe an der Oberfläche notwendig. Unter Annahme verschiedener Funktionen für den Spannungsverlauf, kann die Eigenspannungsverteilung im Draht aufgrund des Herstellprozesses berechnet werden. Anschließend werden die so erhaltenen unterschiedlichen Eigenspannungsverteilungen mittels FEM beurteilt und mit weiteren Versuchsergebnissen verglichen. Gleichung (2.2) gibt hierbei vor, ob es sich um eine lineare, quadratische oder polynome Funktion der Eigenspannungsverteilung handelt. Mit Gleichung (2.3) kann dann die Eigenspannungsverteilung über den Drahtquerschnitt berechnet werden.

$$\sigma=f(r) \tag{2.2}$$

$$F = \pi \int_0^{\frac{d_d}{2}} f(\sigma)^2 dA \tag{2.3}$$

Um die Berechnungen durchführen zu können, müssen je nach Funktionstyp einige Annahmen bezüglich des Verlaufes getroffen werden. Es müssen die folgenden Bedingungen erfüllt werden:

- Resultierend Kräfte aus dem Eigenspannungsverlauf müssen sich gegenseitig ausheben
- Maximalstelle muss in der Drahtmitte liegen.

Dies führt dann zu den drei folgenden Eigenspannungsverläufen im Ausgangsmaterial (Abbildung 8).

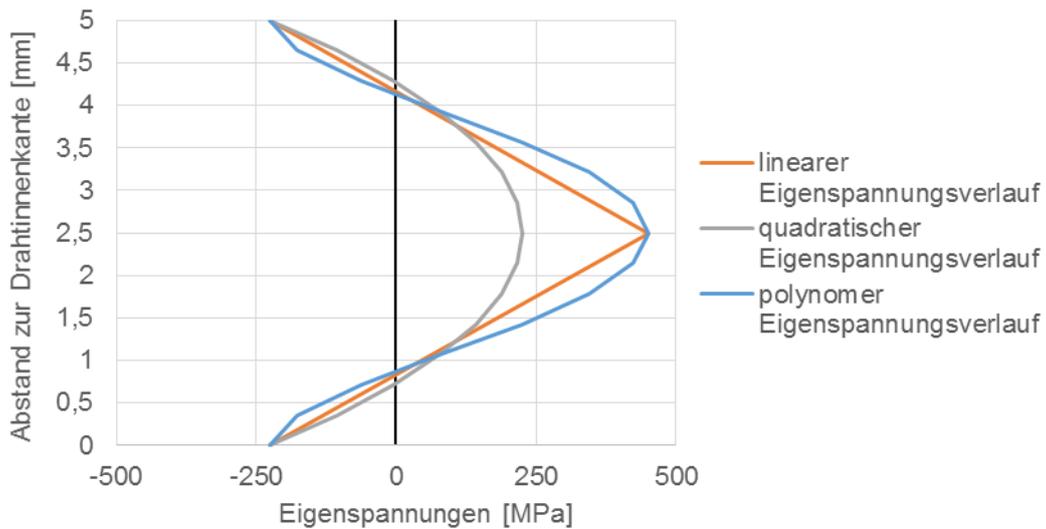


Abbildung 8: Berechnete theoretische Eigenspannungsverläufe

Man erkennt zwischen dem linearen und dem polynomen Spannungsverlauf nur kleine Unterschiede, wohingegen der quadratische Spannungsverlauf sich deutlich von den anderen bezüglich der max. Zugeigenspannungen in der Drahtmitte unterscheidet.

Für die Modellierung der Eigenspannungen in LS-DYNA wird das Keyword *INITIAL_STRESS_SOLID verwendet. Es wird ausgehend von den bisherigen Erkenntnissen Elementtyp 1 verwendet, dadurch muss für einen Integrationspunkt pro Element die Eigenspannung angegeben werden.

Die Eigenspannungen werden in einem Elementquerschnitt definiert und dann mithilfe eines MATLAB-Programmes auf das restliche Ausgangsmaterial verteilt (Abbildung 9). Somit weißt jeder Querschnitt des Ausgangsmaterial dieselben Eigenspannungen auf.

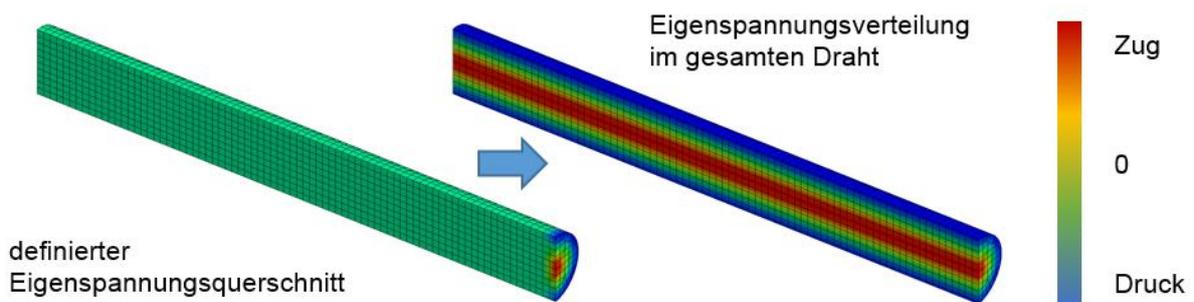


Abbildung 9: Funktionsschema des MatLab-Tools

3 Ergebnisse

Die Simulationen mit und ohne Eigenspannungen im Ausgangsmaterial zeigen beim Betrachten der von-Mises Spannungen keinen Unterschied (**Abbildung 10**).

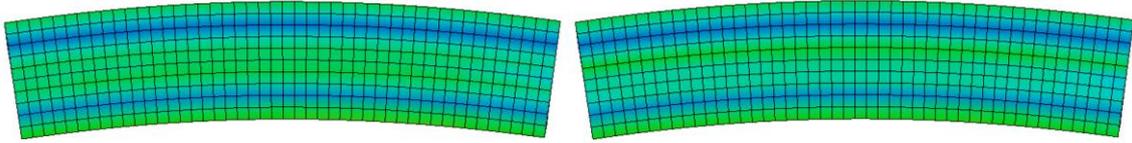


Abbildung 10: Vergleich mit und ohne Eigenspannungen im Ausgangsmaterial (von Mises)

Die Biege-Simulationen mit Eigenspannungen im Ausgangsmaterial zeigen keine Veränderung im Durchmesser, jedoch ändert sich der resultierende Eigenspannungsverlauf deutlich (**Abbildung 11**).

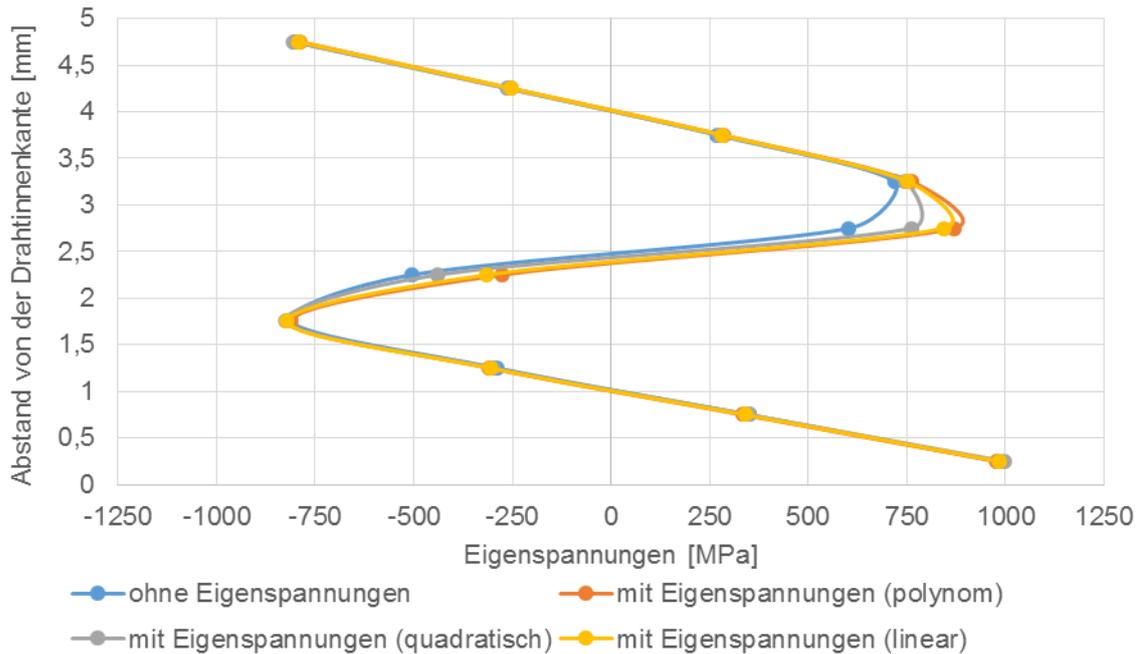


Abbildung 11: Eigenspannungsverläufe mit unterschiedlichen Eigenspannungen im Ausgangsmaterial

So zeigt sich in der Drahtmitte eine deutliche Verschiebung der neutralen Faser, trotzdem bleiben die Randfaserspannungen in der Simulation mit ca. 975 MPa annähernd gleich

Ausblick Montagesituation:

Eigenspannungen im Endprodukt haben erheblichen Einfluss auf die Montagesituation. Deshalb können Eigenspannungen dazu führen, dass sich Ringe früher plastisch verformen und somit die Ringe bei der Montage beschädigt werden.

Montage auf Wellen: Druckbelastungen an der Außenfaser

Für Ringe die auf Wellen montiert werden sollen ergeben sich mit diesem Fertigungsprozess gewisse Schwierigkeiten, da hier zu den bereits im Draht vorhandenen Druckeigenspannungen an der Außenfaser während der Montage zusätzliche Druckeigenspannungen hinzukommen. Dadurch wird das Material an der Außenfaser wesentlich früher plastisch verformt als dies bei einem eigenspannungsfreien Draht der Fall sein würde.

Montage in Bohrungen: Zugbelastung an der Außenfaser

Bei der Montage in Bohrungen muss der Ringdurchmesser kleiner werden als im eingebauten Zustand, Dadurch erfährt der Ring bei der Montage Zugspannungen an der Außenfaser und Druckspannungen an der Innenfaser. Durch die vorhandenen Eigenspannungen ist es somit möglich den Ring deutlich kleiner im elastischen Bereich zu drücken, als dies ohne Eigenspannungen möglich wäre.

4 Diskussion und Ausblick

Die Simulationen mit und ohne angenommene Eigenspannungen im Ausgangsmaterial zeigen, dass das hier angewendete Fertigungsverfahren für Ringe in Bohrungen aufgrund der Montagesituation gut geeignet ist. Für Ringe die auf Wellen montiert werden, weißt das Verfahren schwächen auf, da hier das Material sehr schnell plastisch verformt wird. Davon ausgehend müssen weiterreichende Untersuchungen zeigen, wie man den Fertigungsprozess so optimiert, dass bei Ringen für die Wellenmontage an der Außenfaser Zugspannungen und an der Innenfaser Druckspannungen vorliegen um dadurch den Montageprozess im Bereich der elastischen Verformung zu halten. Die Simulationen mit Eigenspannungen zeigen keine großen Veränderungen auf den Prozess und können deshalb in Zukunft für die Simulation vernachlässigt werden.

Literaturverzeichnis

- [1] DIN 7993, Runddraht-Sprengringe und –Sprengringnuten für Wellen und Bohrungen, Beuth Verlag GmbH; Berlin; 1970
- [2] Doege, E., Behrens, B.-A.: Handbuch Umformtechnik: Grundlagen, Technologien, Maschinen, Springer-Verlag Berlin-Heidelberg, 2007
- [3] Suzuki Garphyttan: Datenblatt – Stato 70, 2014
- [4] Meissner, M. Schorcht, H.-J.: Metallfedern: Grundlagen, Werkstoffe, Berechnung, Gestaltung und Rechnereinsatz, 2. überarbeitete Auflage, Springer-Verlag Berlin-Heidelberg, 2007
- [5] Erhart, E.: Review of Solid Element Formulations in LS-DYNA, LS-DYNA Entwicklerforum 2011