

Berechnung der Zustellkurven für Freiformbiegeprozesse mit einem inversen FE-Modell

Christian Thoma^{1,a *} und Peter Groche^{1,b}

¹Institut für Produktionstechnik und Umformmaschinen, Technische Universität Darmstadt,
Otto-Berndt-Straße 2, 64287 Darmstadt, Germany

^achristian.thoma@ptu.tu-darmstadt.de, ^bpeter.groche@ptu.tu-darmstadt.de

Keywords: Drei-Rollen-Schubbiegen, Spaltprofilbiegen, inverse FE-Simulation, Freiformbiegen

Abstract. In vielen Anwendungsbereichen werden komplexe gebogene Profile benötigt. Als Beispiel sind hier Schienen und Handläufe an Geländern zu nennen. Aber auch die Architektur, das Design und die Fahrzeugindustrie setzen auf solche Profile. Diese freiformgebogenen Bauteile können durch Schubbiegeverfahren wie z.B. das Drei-Rollen-Schubbiegen, Matrizen-Schubbiegen aber auch das Spaltprofilbiegen hergestellt werden.

Bei den Schubbiegeverfahren wird der Profiltrienverlauf durch den Zustellverlauf des Werkzeugs bestimmt. Aufgrund der Kinematik und Plastomechanik im Biegeprozess entstehen insbesondere beim Anbiegen aber auch bei Radienübergängen instationäre Radienbereiche. In diesen Profilabschnitten kommt es zu einem Ausschwingen auf den angestrebten Radienwert, wodurch es zu unerwünschten Abweichungen vom Zielradienverlauf kommt.

In diesem Beitrag wird ein inverses FE-Modell vorgestellt, mit dem unter der Vorgabe des gewünschten Ziel-Radienverlaufs die erforderliche Zustellkurve berechnet werden kann. Dabei wird zum einen der Anbiegebereich möglichst kurz ausgeführt und zum anderen wird das Ausschwingen des konstanten Radienwertes im instationären Einlaufbereich weitgehend vermieden. Abschließend erfolgt die Validierung der durch das inverse FE-Modell bestimmten Zustellkurven durch ein konventionelles Simulationsmodell.

Einführung

Freiformbiegeverfahren bieten den Vorteil, dass die Biegekonturerzeugung nicht werkzeuggebunden erfolgt, sondern durch die Relativbewegung von einzelnen Werkzeuglementen zueinander [1]. Damit ist es möglich mit nur einem Werkzeugsatz nahezu beliebige Biegekonturen herzustellen [2].

Aufgrund der hohen Flexibilität der Formgebung sind die Einsatzbereiche für das Freiformbiegen umfangreich [2]. Sie werden in der Architektur bzw. dem Bauwesen [3,4], im Möbelbau [5], dem Brückenbau, dem Automobil- und dem Leichtbau [6] eingesetzt. Konkrete Anwendungsgebiete sind beispielsweise im Bauwesen die gebogenen Handläufe einer Wendeltreppe [2] und im Fahrzeugbau Strukturbestandteile eines Chassis [6].

Die auftretenden Herausforderungen bei der Bestimmung von Zustellkurven für Freiformbiegeprozesse lassen sich im Wesentlichen in zwei Kategorien einordnen. Zum einen geht es um die Einbringung eines hinreichend genauen mittleren Radienverlaufs und einer Bogensegmentlänge umso die geforderten Lageanforderungen der Bogensegmente aus der Konstruktion zu erfüllen [7]. Zum anderen entstehen beim Anbiegen mit konstanten Zustellwerten und bei Radienübergängen ein unerwünschter instationärer Radienbereich mit ausgeprägten Radienmaxima und -minima [6]. Durch die Annahme eines konstanten Zustellwerts der Zustellkurve bleiben die Geometrie und die Umformhistorie im bereits gebogenen Radiensegment innerhalb der Einspannlänge unberücksichtigt.

Während bezüglich des ersten Aspekts mehrere unterschiedliche Lösungsansätze [7] existieren, ist im Stand der Technik keine Ansatz zur Bestimmung der jeweiligen Zustellkurve vorhanden um den instationären Radienbereich zu minimieren oder gar vollständig zu

vermeiden. Dieser Ansatz sollte dabei die Geometrie und Umformhistorie des bereits umgeformten Bogensegments innerhalb der Einspannlänge berücksichtigen.

Es existieren einige regelungstechnische Ansätze für die Einstellung eines gewünschten Radienverlaufs. Die Schwierigkeit besteht darin einerseits den Biegeradius in der Umformzone zu erfassen, welcher in der Regel durch das Werkzeugsystem unzugänglich ist. Andererseits ist es erforderlich aus dem gemessenen Radienwert in der Umformzone den entlasteten Radienwert zu bestimmen, was wiederum ein komplexes Modell erfordert. Erst wenn diese beiden Aspekte erfüllt sind, kann ein Regler den Radienverlauf entsprechend einstellen.[8]

Aus der dargelegten Problematik lässt sich abschließend die folgende Zielsetzung formulieren: Kann der instationäre Profilbereich vollständig vermieden werden und so direkt ohne ein Ausschwingen der Sollradius eingestellt werden?

Konventionelle FE-Modelle erfordern als Eingangsgrößen in der Regel Werkzeuggeometrien, -positionen und Materialdaten. Gängige Ausgangsgrößen sind beispielweise Spannungen, Dehnungen und die Geometrie des Bauteils. Inverse FE-Modelle invertieren diese Ein- und Ausgangsparameter von (konventionellen) FE-Modellen, sodass ursprüngliche Ausgangsgrößen wie Geometrien, Spannungen oder Dehnungen als Eingangsgröße verwendet werden können. Dadurch können beispielweise Materialeigenschaften oder Werkzeugbewegungen als Ausgangsgröße ermittelt werden.[9,10]

Eines der verbreitetsten inversen FE-Modelle dient der Bestimmung der Fließkurvenkoeffizienten für den einachsigen Zugversuch [9,10]. Dabei werden zusätzlich zur gemessenen Zugkraft und der ermittelten technischen Dehnung der Zugprobe unter anderem die Dehnungsverteilung in der Einschnürung und die Geometrie der Einschnürung übergeben.

Stand der Technik

Es existieren unterschiedliche Freiformbiegeverfahren, die untereinander eine geringfügig abweichende Kinematik, Werkzeug- und Profilgeometrie aufweisen [1]. Die bekanntesten Verfahren sind das Drei-Rollen-Schubbiegen (DRSB) und das Drei-Rollen-Biegen (DRB). Aber es existieren auch Sonderverfahren wie beispielsweise das Matrizen-Schubbiegen [1] und das Spaltprofilbiegen [11,12]. Abbildung 1 veranschaulicht diese Verfahren schematisch.

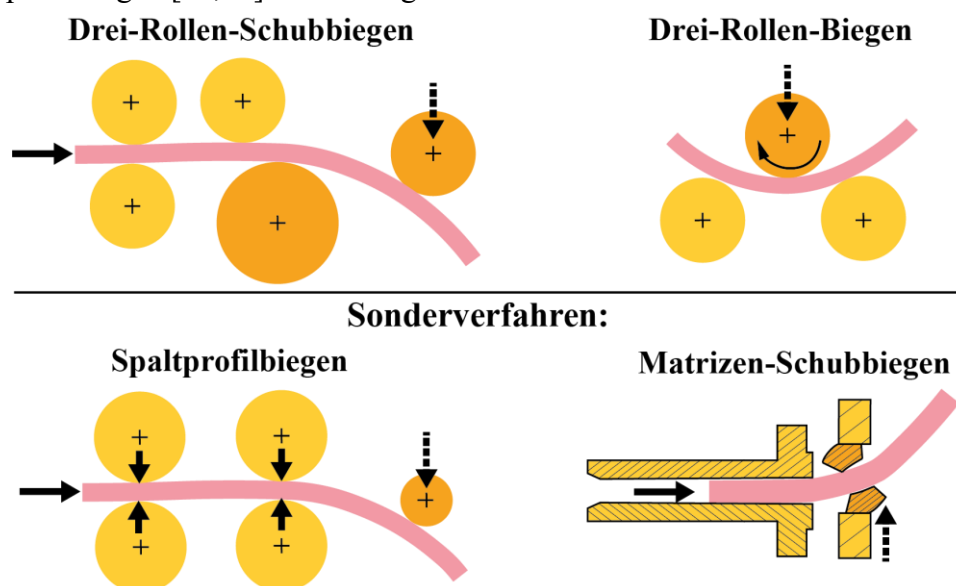


Abbildung 1: Schematische Darstellung einiger Freiformbiegeverfahren in Anlehnung an [1]

Abbildung 2 zeigt ein typisches freiformgebogenes Rohrbiegebauteil, welches im Anbiegebereich einen charakteristischen instationären Bereich aufweist. Die Länge des instationären Übergangsbereichs beträgt rund die doppelte Einspannlänge. Bei erstmaliger

Zustellung der Umformrolle entsteht das Radienminimum. Beim darauffolgenden Profilver Schub entsteht dann das Radienmaximum und anschließend schwingt sich der konstante Radius aus. Beim abschließenden Auffahren entsteht ebenfalls ein Übergangsbereich, allerdings ohne den instationären Charakter. [6]

Die Ursache für die Entstehung des instationären Radienbereichs besteht darin, dass beim Anbiegen das Profilsegment innerhalb der Einspannlänge überwiegend noch nicht plastifiziert ist und unter Vernachlässigung der elastischen Biegung nahezu gerade ist. Durch den fortlaufenden Profiltransport des Radiensegments mit dem Radienminimum ändern sich die geometrischen Randbedingungen, was sich wiederum auf die Umformzone auswirkt. [6]

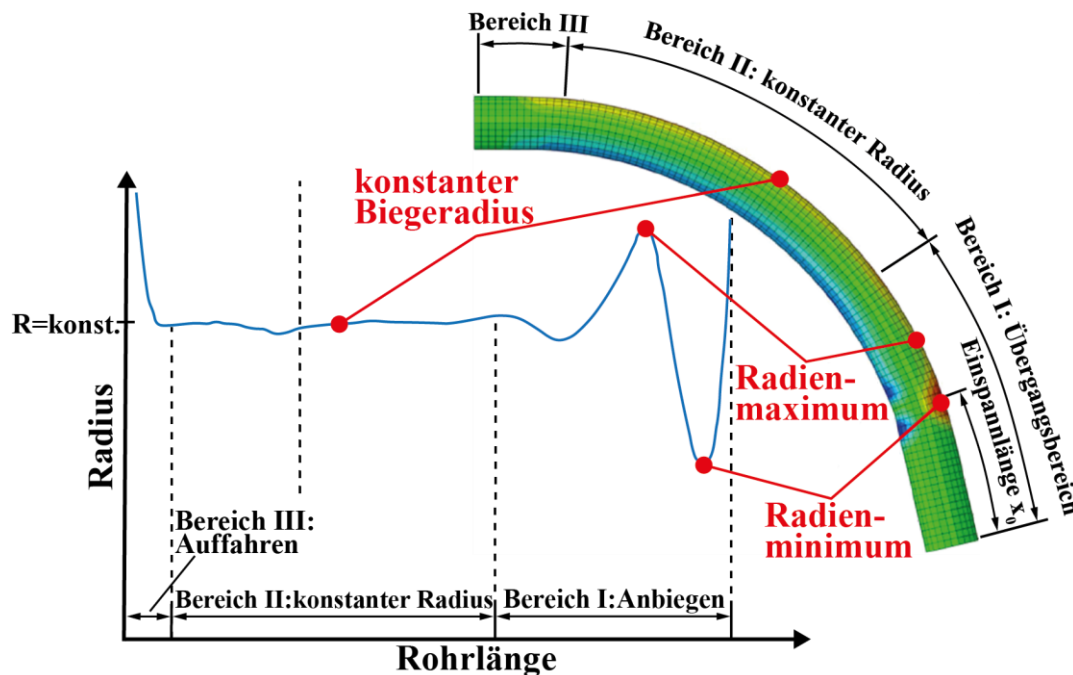


Abbildung 2: Typisches freiformgebogenes Rohrbiegebauteil mit zugehörigem charakteristischen Radienverlauf, in Anlehnung an [6]

Zahlreiche Autoren [6,7,13–18] analysieren die Profilkontur beim Freiformbiegen und berichten über die Entstehung des instationären Bereichs, welcher einen oszillierenden Radienverlauf aufweist.

Groth [7] untersucht zwar den Einfluss des Verschleifens der Zustellkurven und eine Überlagerung des Anfahrtswegs durch gleichzeitigen Profilver Schub und Zustellung der Umformrolle auf die Ausprägung des instationären Bereichs. Dabei leitet er aber keine Strategie ab, um diesen gezielt zu vermeiden. Beim Überschleifen werden die vorgegebenen NC-Koordinaten nicht vollständig angefahren, sondern eine Überschleifkurve generiert, die starke Beschleunigungsübergänge vermeidet. Dadurch werden allerdings die vorgegebenen Koordinaten nur annähernd angefahren. Vielmehr fokussiert sich Groth auf die Entwicklung einer Methodik, um mithilfe von Kompensations- und Korrekturmethode Lageabweichungen der Radienkontur iterativ zu minimieren. Dabei bleibt der instationäre Radienbereich bestehen, d.h. dieser Bereich wird nicht vermieden, aber bei der Auslegung von lagegenauen Biegekonturen mitberücksichtigt.

Andere Autoren [16–18] überlagern das Anbiegen mit einer zum Vorschub ansteigenden Zustellung, sodass dadurch zwar das Radienminimum reduziert wird, aber die Länge des Anbiegebereichs überwiegend gleich bleibt.

Gerlach [18] überträgt die elementaren Berechnungsmethoden von Blechbiegeprozessen auf das Biegen von Rundrohren. Aufbauend darauf entwickeln Engel & Kopfer [19] ein Berechnungsmodell auf Basis eines einseitig eingespannten Biegebalkens, womit der Anbiegebereich bis zum Radienminimum analytisch berechnet werden kann. Eine

Bestimmung der darauffolgenden Radienmaxima und des konstanten Radienverlaufes ist nicht möglich.[7]

In der industriellen Praxis werden häufig und immer noch die Parameter zur Herstellung einer sollkonturnahen Biegegeometrie iterativ ermittelt. Bei der Verwendung von herkömmlichen FE-Modellen sind zur Bestimmung der Zustellparameter eine Vielzahl von Iterationsschritten erforderlich, sodass eine Auslegung durch diese meist nicht praktikabel ist. [2]

Es existieren auch Ansätze [8] durch Vorgabe eines Sollwertes durch einen Regler den Biegekonturverlauf einzustellen. Hierbei liegt die Schwierigkeit darin, dass aufgrund der Unzugänglichkeit der Umformzone und der noch nicht erfolgten Rückfederung der Biegekontur diese messtechnisch nicht erfasst werden kann, um diese entsprechend einzuregeln. Während einige Modelle zur Bestimmung der Zustellparameter für Freiformbiegeprozesse existieren, gibt es bis heute keine Ansätze, um gezielt Zustellkurvenverläufe für die Vermeidung des instationären Radienbereichs zu bestimmen und direkt den Soll-Radienverlauf einzustellen.

Aufbau des konventionellen Simulationsmodells

Um das inverse FE-Modell zur Bestimmung der Zustellkurve zu implementieren, werden zunächst zwei konventionelle FE-Modelle aufgebaut und anhand einiger relevanter Modellparameter hinsichtlich Konvergenz und Sensitivität untersucht und anschließend optimiert. Ziel dabei ist es, ein Optimum aus der Güte des berechneten Radienverlaufs bei gleichzeitig geringer Simulationszeit zu erreichen. Es ist davon auszugehen, dass ein stark schwankender berechneter Radienverlauf im späteren inversen FE-Modell ebenfalls zu schwankenden Zustellkurven oder sogar zu Divergenz des inversen Modells führen kann.

Abbildung 3 zeigt die beiden aufgebauten FE-Modelle mit den relevanten konstanten geometrischen Abmessungen. In der linken Abbildung befindet sich das Modell des DRSB und auf der rechten Seite ein daraus abgeleitetes Ersatzmodell, bei dem die Stütz- und Biegerolle durch einen vollflächigen Niederhalter mit vergleichbarer Außenkontur ersetzt wird. Der Abstand zwischen Biegerolle bzw. Niederhalter und der Umformrolle beträgt bei beiden Modellen 197,5 mm. Dieser Aufbau des Ersatzmodells wird auch in [18] beschrieben und dient hier dazu, eine stabilere Simulationsgrundlage für das inverse FE-Modell zu erhalten. Zwar führt das Ersatzmodell mit den Niederhaltern zu gering abweichenden Radienwerten im Vergleich zu dem Modell mit Rollen, da aber zunächst die relative Abbildung und Stabilität des Simulationsmodells wichtiger als absolute Radienwerte sind, wird dieses zunächst für das inverse Modell verwendet.

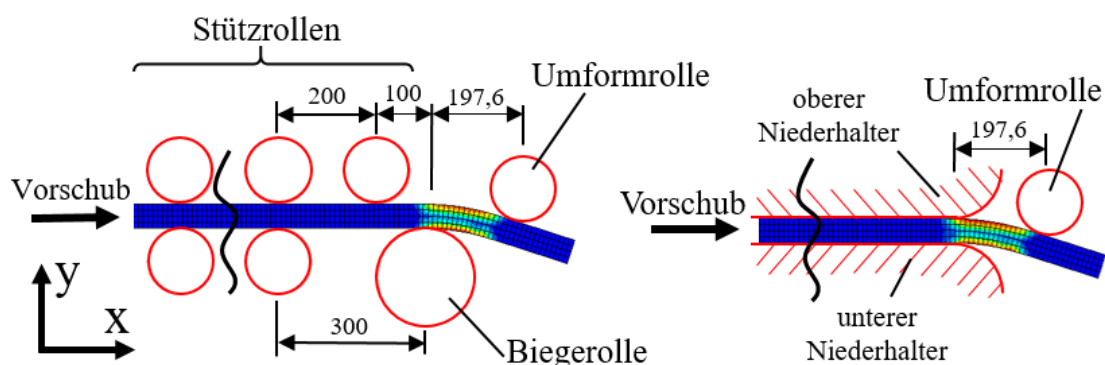


Abbildung 3: Links: FE-Modell des DRSB. Rechts: vereinfachtes FE-Modell mit Niederhalter, Abmessungen in mm

Beide FE-Modelle sind zweidimensional aufgebaut und bilden eine Vierkantstange aus Vollmaterial ab. Grund hierfür ist die mögliche Verwendung einer geringen Elementenanzahl, um damit die Rechenzeit möglichst gering zu halten. Dabei wird die Querschnittsveränderung

in der dritten Dimension (hier z-Richtung) vernachlässigt. Diese Modellannahme kann getroffen werden, da primär die qualitative Abbildung des Radienverlaufs im Fokus steht.

Bezüglich der kinematischen Positionierung der Umformrolle, wurde die lineare Anfahrstrategie (vgl. Groth [7]) modelliert, bei der die Umformrolle nur in y-Richtung entsprechend der Zustellkurve positioniert wird. Innerhalb dieser Anfahrstrategie ist hervorzuheben, dass der Profilver Schub erst dann beginnt, wenn der erste Wert der Zustellkurve (bzw. der konstante Zustellwert) erreicht ist. Dies ermöglicht es den ersten Radienwert (beim konstanten Zustellverlauf das Radienminimum) schnellstmöglich zu erreichen, und den Anbiegebereich möglichst kurz zu halten. Weitere Randbedingungen und Modellparameter der beiden zweidimensionalen FE-Modelle befinden sich in der Tabelle 1.

Tabelle 1: Modellparameter der beiden Simulationsmodelle

Bezeichnung	Wert	Bezeichnung	Wert
FEM-Software	Marc Mentat 2019	Querkontraktionszahl	0,33
Abmessungen der Vierkantstange	2000 mm x 50 mm x 50 mm (l x h x t)	Zustellung	
Elementtyp	quad 4 (2D Elemente mit 4 Integrationspunkten)	Diskretisierungsanalyse (y-Richtung)	40 mm
Anzahl der Elemente in Profilhöhe (y-Richtung)	4	Hebelarmlänge (x-Richtung)	197,5 mm
Kontaktberechnung	Node to Segment, reibungsfrei	Radius der Stützrollen	67,5 mm
Material	DD11	Radius der Biegerolle und der Niederhalter	100 mm
Materialmodell	Isotrop, von Mises	Radius der Umformrolle	67,5 mm
E-Modul	200 000 N/mm ²	gesamter Vorschubweg Profils (x-Richtung)	1500 mm

Die in der obigen Tabelle 1 nicht vorhandenen Modellparameter werden aufgrund der Konvergenzanalyse im folgenden Abschnitt variiert. Als Start- und Referenzwerte werden, die in der mittleren Spalte der Tabelle 2 aufgeführten Werte, herangezogen. Werte mit der Kennzeichnung „default“ stellen die voreingestellten Werte bzw. die durch die Simulationssoftware Marc Mentat 2019 selbst bestimmen Modellparameter dar.

Konvergenzanalyse des konventionellen FE-Modells

Das Ziel der im folgenden aufgezeigten Konvergenzanalyse ist es, die relevanten Modellparameter bzw. deren Einfluss auf die Güte des Radienverlaufs und der Simulationsdauer zu ermitteln. Das übergeordnete Ziel hierbei ist es, für das aufzubauende inverse FE-Modell eine gute Grundlage des Konvergenzverhaltens des zu ermittelnden Zustellwertes zu gewährleisten und die Simulationsdauer gering zu halten, welche zwangsweise durch die zusätzlichen Iterationsschleifen ansteigen wird.

Für die variierten Parameter wurden insgesamt vier Modellparameter ausgewählt. Diese sind die Elementkantenlänge in x-Richtung (bzw. die Anzahl der Elemente in x-Richtung), die Anzahl der Inkremente je mm Vorschubweg, die Krafttoleranz (force tolerance) als Konvergenzkriterium der jeweiligen Inkremente, der Kontaktgewichtungsfaktor (contact bias factor) und die Kontakttoleranz (contact tolerance), die den Wert definiert, wie genau die Kontaktbedingungen erfüllt werden.

Für die Konvergenzanalyse werden die Parameter des beschriebenen Modells aus der Tabelle 1 herangezogen. Dabei wird eine konstante Zustellung der Biegerolle von 40 mm gesetzt, woraus ein mittlerer Radius von 467 mm resultiert. Die Zustellung der Umformrolle erfolgt ohne Vorschub, anschließend wird der Profilver Schub gestartet und die Umformrolle verbleibt bei der gesetzten Zustellung.

Tabelle 2: Gewählte Modellparameter vor und nach der Konvergenzanalyse

Modellparameter	Startwert	finaler Referenzwert
Elementkantenlänge in Vorschubrichtung (x)	10	10
Inkrement je mm Vorschub (Inkrement gesamt)	0,63 (1000)	1,30 (2000)
Krafttoleranz (force tolerance)	0,1 (default)	0,001
Kontaktgewichtungsfaktor (contact bias factor)	0,95 (default)	0,95 (default)
Kontakttoleranz (contact tolerance)	0,5 (default)	0,01

Ausgehend von den in Tabelle 2 (mittlere Spalte) gelisteten Startwerten, werden die Parameter teilfaktoriell variiert. Die gewählten Variationswerte sind in Tabelle 3 aufgelistet. Nicht für alle Werte der Modellparameter werden Größen definiert. Die nicht durchgeführten Werte bzw. Zellen sind in der Tabelle deshalb durchgestrichen.

Tabelle 3: Variierte Modellparameter der Konvergenzanalyse

Bezeichnung Parameter	Wert 1	Wert 2	Wert 3	Wert 4	Wert 5
Elementkantenlänge in Vorschubrichtung (x)	10	5	1	-	-
Inkrement je mm Vorschub (Inkrement gesamt)	0,19 (300)	0,33 (500)	0,63 (1000)	1,30 (2000)	2,60 (4000)
Krafttoleranz	0,1	0,05	0,005	0,001	-
Kontaktgewichtungsfaktor	0,95	0,6	0,99	-	-
Kontakttoleranz	0,5	0,1	0,01	0,001	0,0001

Für die Bewertung der Güte des Radienverlaufs wird der stationäre Radienbereich herangezogen. Dieser wird anhand der Position der Knoten auf dem mittleren Längspfad des Profils (neutrale Faser) berechnet. Für die Berechnung wird Formel (1) nach [20] herangezogen, wobei die Ableitungen $f'(x)$ und $f''(x)$ diskret anhand der Stützstellen berechnen wird. Diese Stützstellen sind die x-y-Positionen der Knoten der Profilmittellinie. Eine Glättung der ermittelten Radienwerte erfolgt nicht.

$$R(x) = \frac{(1 + f'(x)^2)^{\frac{3}{2}}}{f''(x)} \quad (1)$$

Im stationären Radienbereich wurden die jeweiligen Standardabweichungen aus den dort vorliegenden Radienwerten ermittelt. Für die Konvergenzanalyse mit einer Profillänge von 2000 mm und einem Vorschubweg von 1500 mm, wird der stationäre Bereich von 380 mm (unmittelbar nach dem Anbiegen) bis 1240 mm (Bereich kurz vor dem Auffahren) definiert. (Vgl. hierzu auch Abbildung 3 und Abbildung 9.)

Die Standardabweichung beschreibt hier die mittlere Abweichung von dem durchschnittlichen Radienwert im stationären Bereich. Dabei wurde ausschließlich die normalisierte Standardabweichung verwendet. Bei einer zu hohen Standardabweichung können das Radienminimum und -maximum nicht von den Radienwerten im konstanten Bereich unterschieden werden. Außerdem verursachen bereits kleinere Radienabweichungen ebenfalls eine Änderung des Zustellwertes was absolut unerwünscht ist.

Das Diagramm links unten der Abbildung 4 zeigt die ermittelten Standardabweichungen. Dabei fällt deutlich auf, dass die Elementkantenlänge und die Anzahl der Inkremente je Vorschubweg den größten Einfluss auf die Standardabweichung haben. Besonders auffällig ist, dass mit geringerer Elementkantenlänge (bzw. eine höhere Anzahl an Elementen) die Standardabweichung deutlich steigt. Aus diesem Grund wurde die Elementkantenlänge von 10 mm beibehalten und lediglich die Anzahl der Inkremente erhöht. Ein weiterer Grund für die Beibehaltung ist der Fokus auf eine präzise Abbildung des instationären Anbiegeverhaltens und einer schnellen Simulation, nicht aber auf eine absolut genaue Abbildung des korrekten Radienverlaufs. Die übrigen Größen haben einen geringeren Einfluss auf die Standardabweichung.

Die beiden oberen Diagramme in der Abbildung 4 zeigen die Simulationszeiten der jeweiligen Modellparameter. Dabei zeigt das rechte Diagramm einen vergrößerten Ausschnitt des vollständigen Diagramms (links oben). Diese wurde mit einem Thread eines Intel i7-10700 berechnet. Dabei gilt allerdings zu beachten, dass die Werte aufgrund der Auslastungsschwankungen des PC-Gesamtsystems schwanken können, aber jeweils nur eine Stichprobe erhoben wurde.

Aus den oberen Diagrammen geht hervor, dass die minimal benötigte Simulationsdauer bei 0,63 Inkrementen je mm Vorschub ein Optimum aufweist, ansonsten ist im Gegensatz zur Elementanzahl und Krafttoleranz nur ein geringfügiges Ansteigen zu verzeichnen.

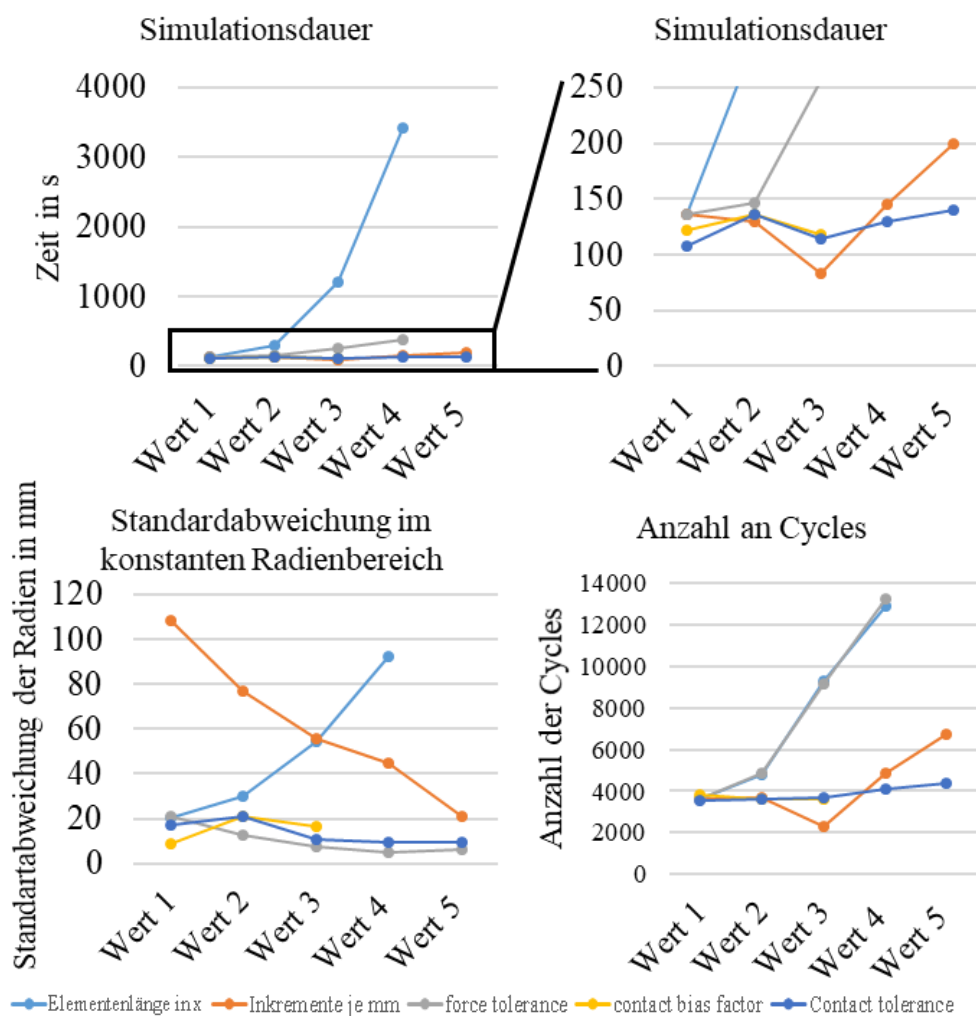


Abbildung 4: Ergebnisse der Konvergenzanalyse. Links unten: Standardabweichung. Oben: Simulationsdauer. Rechts unten: Anzahl der Cycles

In dem Diagramm rechts unten der Abbildung 4 ist die benötigte Anzahl des Cycles für die Gesamtsimulation dargestellt. Die Anzahl Cycles kennzeichnet die Gesamtzahl an notwendigen Lösungsschritten, die in den jeweiligen Inkrementen erforderlich sind, um Konvergenz zu erreichen. Eine ansteigende Anzahl der Cycles stellt demnach einen höheren numerischen Aufwand dar. Allerdings gilt zu beachten, dass beispielsweise bei der Erhöhung der Elementanzahl bei gleicher Anzahl der Cycles die Simulationszeit stark ansteigt.

Das Diagramm in der Abbildung rechts unten zeigt bis auf die Elementkantenlänge in x-Richtung die gleichen Tendenzen wie das Diagramm mit der Simulationsdauer auf, abgesehen von dem Verlauf der Elementkantenlänge. Grund hierfür ist, dass für die erhöhte Elementanzahl nicht zwangsweise mehr Cycles erforderlich sind, aber die Berechnung eines einzelnen Cycles deutlich mehr Zeit in Anspruch nimmt.

Auf Basis der durchgeführten Konvergenzanalyse werden für den weiteren Verlauf der Simulationen die in der rechten Spalte der Tabelle 2 befindlichen Parameter gewählt. Abgesehen von Elementkantenlänge (bzw. Elementanzahl) und Kontaktgewichtungsfaktor werden diese soweit geändert, dass die Standardabweichung reduziert wird. Der Kontaktgewichtungsfaktor wird nicht verändert, da hier kein eindeutiger Trend zu erkennen ist.

Abschließend wurden für den in der rechten Spalte gezeigten Referenzparametersatz die Simulationen erneut durchgeführt. Hierbei konnte eine Standardabweichung von 0,67 mm (anstatt 20,6 mm) bei einer Simulationsdauer von 315 s (anstatt 136 s) erreicht werden. Diese erreichten Werte stellen für das aufzubauende inverse FE-Modell einen guten Kompromiss aus Güte des Radienverlaufs und Simulationszeit dar.

Aufbau des inversen FE-Modells

Das in diesem Paper vorgestellte inverse FE-Modell wird anhand eines vereinfachten DRSB-Modells erarbeitet, lässt sich aber entsprechend auf weitere Freiformbiegeprozesse übertragen.

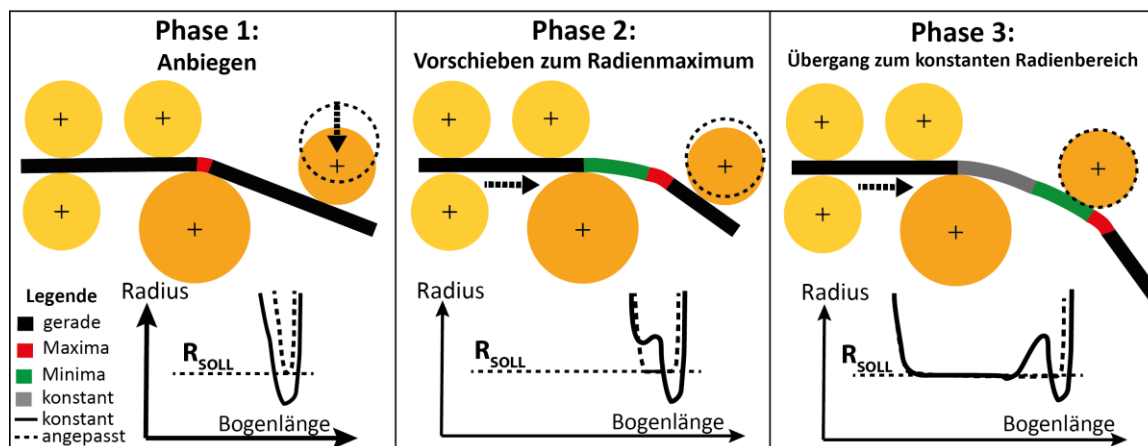


Abbildung 5: Drei Phasen der Entstehung des instationären Radienbereichs vs. erforderliche Position der Umformrolle zur Vermeidung des instationären Radienbereichs

Abbildung 5 veranschaulicht die drei Phasen zur Entstehung des instationären und anschließend konstanten Radienbereichs. Des Weiteren sind durch die gestrichelten Linien die eigentlich erforderliche Zustellposition der Umformrolle eingezeichnet, sowie der daraus resultierende Radienverlauf. Dabei ist der bereits entsprechend plastifizierte Radienbereich vereinfacht schematisch dargestellt und der Radius farblich hervorgehoben.

In der Phase 1 erfolgt das Anbiegen, in dem bei konstanter Zustellung das Radienminimum entsteht. Beim Zufahren des konstanten Zustellwerts wird aufgrund der fehlenden Krümmung innerhalb der Einspannlänge das Profil in der Umformzone immer überbogen, was zu einem Radienminimum führt. In Phase 2 bewegt sich bei anschließendem Profilver Schub das

Radienminimum weiter Richtung Umformrolle. Dabei entsteht das Radienmaximum. Abschließend schwingt in Phase 3 das Radienmaximum zum konstanten Radienbereich aus. Wie in der Abbildung durch die gestrichelte Linie dargestellt, sollte das inverse FE-Modell beim Anbiegen die Umformrolle nur so weit zustellen, dass das entstehende Radienminimum lediglich dem gewünschten stationären Radienwert entspricht. Beim anschließenden Vorschieben des Profils muss die Rolle entsprechend der Geometrie und Elastomechanik des eingespannten Radiensegments positioniert werden, um den Radienwert konstant zu halten.

Abbildung 6 zeigt das Ablaufdiagramm des inversen FE-Modells mit den zwei übergeordneten Schleifen. In der ersten Phase findet das Anbiegen ($n=1$) statt. Nachdem das DRSB-Modell entsprechend mit einem Startwert für die Umformrollenzustellung y_{Start} aufgebaut ist, wird zunächst der erste Belastungsfall das Anbiegen ohne Vorschub durchgeführt. Anschließend werden die Rollen entfernt, um die Rückfederung des belasteten Profils zu ermöglichen. Nach Ablauf der Simulation wird der Radienverlauf ausgewertet.

Wie bereits im Kapitel der Sensitivitätsanalyse erwähnt, wird der Radienverlauf an allen Knoten der Profilmittte ausgewertet. Während des Anbiegevorgangs ($n=1$) ist der zu optimierende Radienwert immer das Radienminimum. Liegt der Ist-Radienwert nicht innerhalb einer definierten Toleranz, siehe Gleichung (2), wird mithilfe der Optimierungsfunktion ein neuer Startwert y_{Start} bestimmt. Falls der Ist-Radienwert innerhalb der definierten Toleranz liegt, siehe Gleichung (2), so wird das Bogenlängeninkrement n um eine Einheit inkrementiert $n=n+1$. Für die im folgenden durchgeführte Berechnungen wird der Toleranzwert empirisch auf $R_{\text{toll}} = 0,1 \text{ mm}$ festgelegt.

$$R_{\text{Soll}} - R_{\text{toll}} < R_{\text{Ist}} < R_{\text{Soll}} + R_{\text{toll}} \quad (2)$$

Ist der Soll-Radienwert eingestellt, erfolgt die erste Phase mit Profilver Schub ($n=2$). Hierfür wird das Modell durch den Belastungsfall „Vorschieben und y_{zu} anpassen“ ergänzt, in dem der Profilver Schub erfolgt. Das Speichern eines Restartfiles erfolgt nun zwischen dem Belastungsfall Vorschieben und Rückfedern, welches vor jeder Iteration wieder eingeladen wird. Somit werden alle berechnete Inkremente bei denen $R_{\text{Ist}} \neq R_{\text{Soll}}$ und der Profilver Schub dienen verworfen. Alle Inkremente der Rückfederungs- bzw. Entlastungssimulationen die nach jedem Bogensegment erfolgen, werden ebenfalls verworfen.

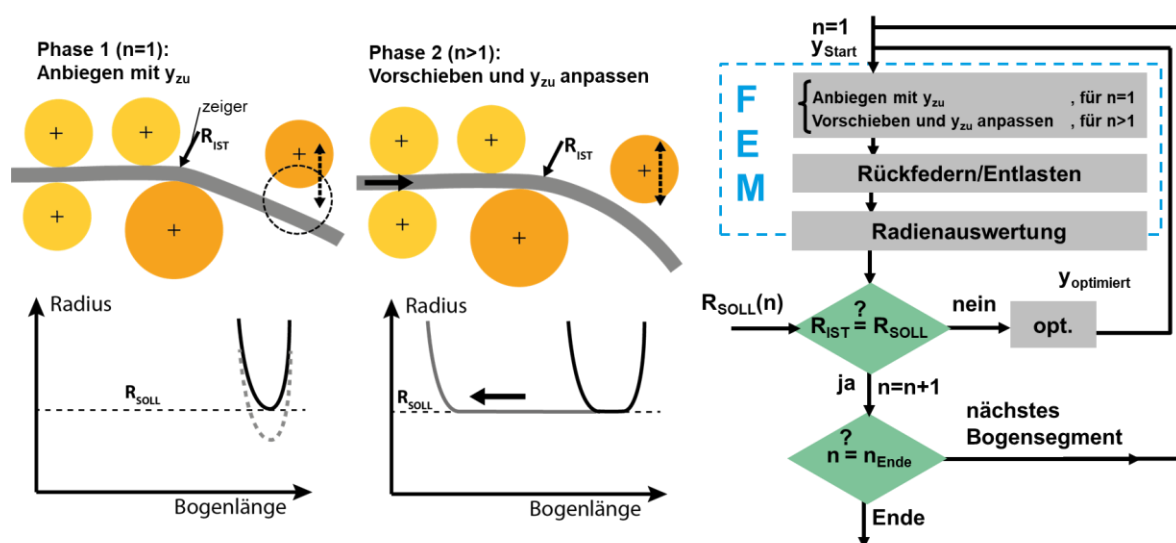


Abbildung 6: Ablaufdiagramm des inversen FE-Modells

Ausgehend von dem in $n=1$ bestimmten Radienminimum wird ein Zeiger gesetzt (siehe Abbildung 6), der bei $n=n+1$ um das Vorschubinkrement weiter entlang der Bogenlänge zeigt,

an dem sich der Radius bei $R(n=2)$ einformt. Somit zeigt der Zeiger genau auf den Mittelpunkt der beeinflussbaren Umformzone.

An dieser Stelle werden Restartfiles verwendet, um die Simulation nicht von Anfang an durchführen zu müssen, sondern ab dem vorher konvergierten Zustellwert. Ist auch im nächsten Bogenlängeninkrement die Konvergenz des Zustellwerts erreicht, so werden das Profil und der Zeiger wiederum um das Vorschubinkrement verschoben, bis die gewünschte gebogene Bogenlänge erreicht ist.

Für das entsprechend formulierte Optimierungsproblem kann das Newton-Raphson [21] Verfahren, oder ein beliebiges andere Optimierungsverfahren verwendet werden. Die Schrittweite des Bogenlängeninkrements entspricht der Elementkantenlänge in x-Richtung. Der Modellaufbau, die Realisierung der beiden äußeren Schleifen, sowie die fortlaufende Auswertung, Modifizierung und das Starten der Simulation werden durch ein Pythonskript realisiert.

Es lässt sich festhalten, dass durch zwei übergeordnete Schleifen das konventionelle DRSB-FE-Modell invertiert werden kann. Damit lassen sich die Radienwerte an jedem Bogenlängeninkrement einstellen und die erforderliche Zustellkurven ausgeben.

Ergebnisse

Im folgenden Abschnitt werden einige ermittelte Zustellkurven und die entsprechend resultierenden Radienverläufe aufgezeigt, bei denen das DRSB-Ersatzmodell verwendet wurde (siehe Abbildung 3 rechts). Dabei erfolgt die Gegenüberstellung durch die mit dem konventionellen FE-Modell ermittelten Radienverläufe mit konstanten Zustellkurven. Die inkrementelle Bogensegmentlänge an dessen Stützstellen die Optimierung stattfindet, wird entsprechend der Elementkantenlänge auf 10 mm gesetzt (vgl. siehe Tabelle 2).

Abbildung 7 links zeigt die mit dem inversen FE-Modell bestimmten Zustellkurven für die Zielradienwerte $R = 490$ mm und $R = 600$ mm sowie die äquivalenten Zustellkurven mit konstanter Zustellung in Abhängigkeit des Vorschubweges. Es fällt auf, dass der erste Zustellwert aus dem inversen Verlauf deutlich geringer ausfällt. Dieser steigt anschließend degressiv an, bis der konstante Zustellwert erreicht ist.

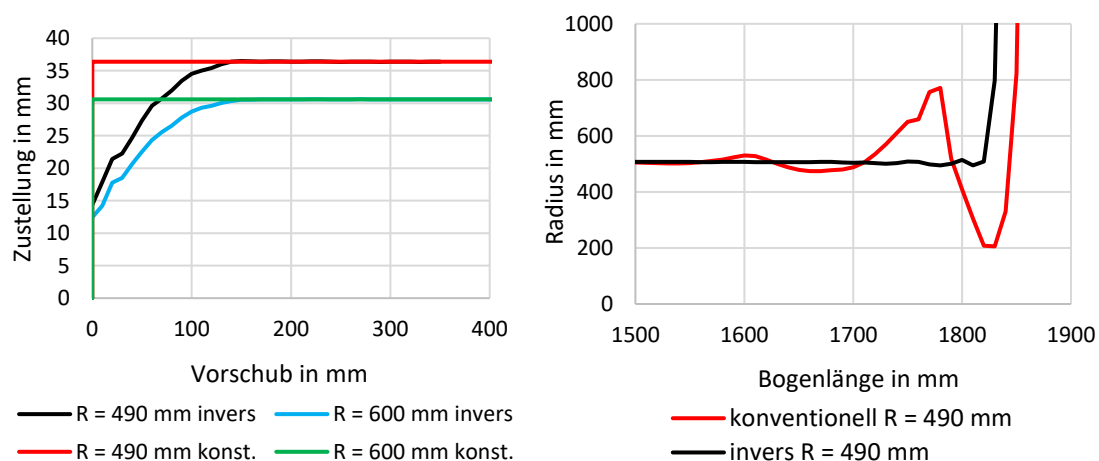


Abbildung 7: Links: Zustellkurven des inversen und konventionellen Modells. Rechts: Radienverlauf mit linearem und invers berechnetem Zustellverlauf

Wie Abbildung 7 rechts für den Radienwert $R = 490$ mm zeigt, bleibt ein Überbiegen des Profils (Radienminimum) und des daraus entstehenden charakteristischen Radienverlaufs aus. Somit ist es möglich den instationären Bereich nahezu vollständig zu vermeiden und den Anbiegebereich damit stark zu verkürzen. In dem gezeigten Fall reduziert sich die Abweichung des Radienmaximum auf 7 mm (anstatt 264 mm) und das Radienminimum auf 13 mm (anstatt 302 mm) in Bezug zum konstanten Radienbereich.

In Abbildung 8 sind die Abweichungen der Radienmaxima und -minima sowohl aus der Simulation mit konstanten Zustellwerten als auch aus dem inversen FE-Modell aufgetragen. Die Radienwerte des konstanten Bereichs reichen hier von 350 mm bis 900 mm. Über alle acht unterschiedlichen Radienwerte konnte im Mittel das Radienminimum um 95 % und das Radienmaximum um 96 % verringert werden. Die stärkste Verringerung eines der Radienmaxima und -minima von 96 % bzw. 97 % erfolgt bei dem stationären Radienwert 490 mm.

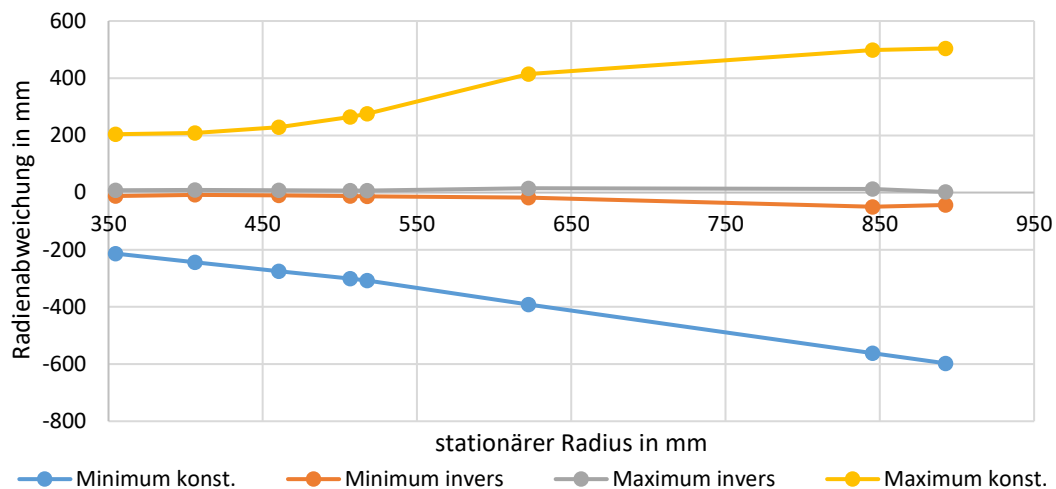


Abbildung 8: Abweichungen der Radienminima und -maxima in Bezug auf den stationären Radienwert des konventionellen und inversen FE-Modells

Das Diagramm in Abbildung 9 zeigt zwei Radienverläufe mit einer Bogensegmentlänge von 450 mm und einem stationären Radienwert von 490 mm. Während der Radienverlauf aus dem inversen FE-Modell und die Bogensegmentlänge von 450 mm als Eingangsparameter übergeben wurden, musste der konventionell bestimmte Radienverlauf aufwändig manuell iterativ auf die geforderte Bogensegmentlänge eingestellt werden. Grund hierfür ist, dass der Profilver Schubweg nicht mit der Bogensegmentlänge identisch ist.

Die Ursache für die Verschiebung zwischen den beiden Radienverläufen liegt darin begründet, dass beim Überbiegen des Radienminimums sich die Anbiegeposition verschiebt. Bei kleiner werdendem Minimum bewegt sich dieses in Richtung größerer Bogenlängenpositionen (Tote Länge am Profilende). Dieser Versatz muss ansprechend berücksichtigt werden.

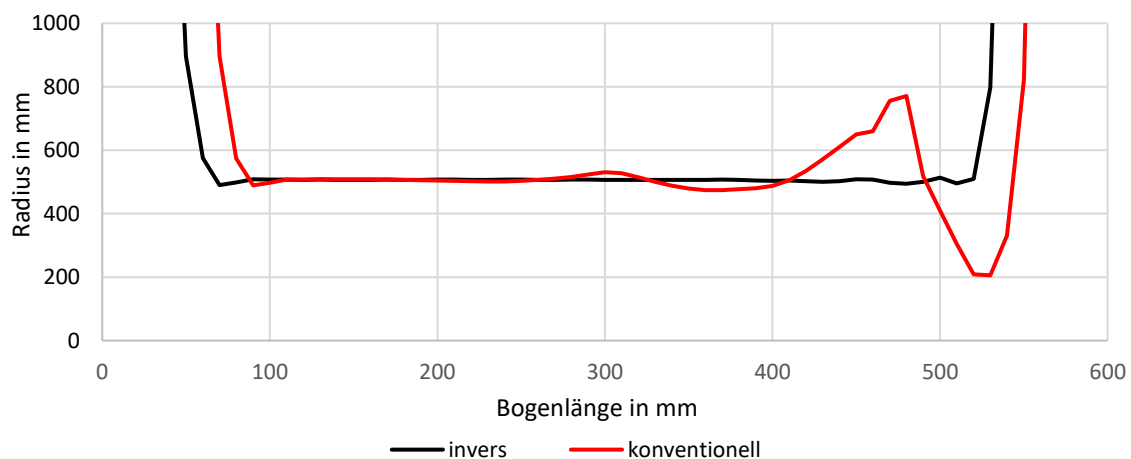


Abbildung 9: 450 mm langes Bogensegment durch das inverse und konventionelle (konstanter Zustellverlauf) FE-Modell simuliert

Anhand der gezeigten Radienverläufe lässt sich ableiten, dass es durch die invers berechneten Zustellkurven potenziell möglich ist, Radiensegmente mit geringeren Radienwerten umzuformen. Im Gegensatz zu konstanten Zustellverläufen entstehen hierdurch keine potenziell kritischen Radienminima bei denen Profilversagen aufgrund von Spannungsüberhöhungen zu erwarten ist. Somit bietet die vorgestellte Berechnung der Zustellkurve das Potential, die Prozessgrenzen bei Freiformbiegeprozessen zu erweitern.

Zusammenfassung

Aufbauend auf einem vereinfachten FE-Modell für das DRSB erfolgte die Invertierung dieses Modells, sodass unter Vorgabe eines Radienverlaufs die erforderliche Zustellkurve numerisch bestimmt werden kann.

Auf Grundlage der durchgeführten Konvergenzanalyse des DRSB-Modells hinsichtlich Güte des Radienverlaufs wurden die Modellparameter Anzahl der Inkremente je Vorschubweg, Krafttoleranz und Kontakttoleranz entsprechend eingestellt. Hiermit konnte eine niedrige Standardabweichung der konstanten Radienwerte von 0,67 mm bei einem moderaten Anstieg der Simulationszeit erreicht werden, was für eine stabile Konvergenz der zu ermittelnden Zustellwerte zielführend ist.

Das invertierte DRSB-Modell wurde mithilfe von zwei Schleifen anhand eines Pythonskriptes realisiert. Hierbei optimiert die innere Iterationsschleife den gesuchten Zustellwert unter Vorgabe des Radienwertes. Die äußere Schleife ermöglicht den inkrementellen Profilver Schub und damit die Einbringung der Radienwerte in Abhängigkeit der Bogenlängenposition. Die anschließende Gegenüberstellung der konventionell und invers berechneten Radienverläufe mit identischen konstanten Radienwerten, zeigt ein nahezu vollständiges Ausbleiben des instationären Radienbereichs bei den invers berechneten Zustellkurven.

Für insgesamt 8 betrachtete Radienwerte von 350 mm bis 900 mm konnten das Radienminimum im Mittel um 95 % und das Radienmaximum um 96 % reduziert werden. Des Weiteren erfolgte ein Vergleich zwischen einem invers und konventionell berechneten Radiensegment. Während die Segmentlänge des invers berechneten Bogensegments durch die gegebenen Radienverläufe vorgegeben und eingehalten wurde, waren für den konventionellen Ansatz mehrere manuelle Iterationen notwendig, da der erforderliche Vorschubweg unbekannt war.

Die invers berechneten Zustellkurven bieten das Potenzial, die Prozessgrenzen in Richtung kleinerer Radiensegmente zu erweitern, indem beim Anbiegen kein Radienminimum entsteht, welches versagenskritische Spannungen aufweist und daher zum Bauteilversagen führt.

Zukünftig ist es denkbar, dass vereinfachte inverse FE-Modell des DRSB auf andere komplexere Modelle und Freiformbiegeprozesse, wie beispielsweise das DRB, das 3D-DRSB oder das Spaltprofilbiegen zu übertragen. Dabei ist auch eine Vorgabe von Lagerandbedingungen an das Modell möglich. Abschließend kann auf Basis dieses inversen FE-Modells eine Methodik zur Auslegung von Freiformbiegeprozessen abgeleitet werden, bei denen zusätzlich noch weitere Prozessrandbedingungen, wie beispielsweise die minimale Größe des Anbiegebereiches und des Übergangsbereiches einfließen müssen, welche sich physikalisch nicht vermeiden lassen.

Literaturverzeichnis

- [1] VDI 3430. Rotationszugbiegen von Profilen: Beuth Verlag GmbH; 2014.
- [2] Kersten S. Prozessmodelle zum Drei-Rollen-Schubbiegen von Rohrprofilen [Zugl.: Siegen, Univ., Diss., 2013]. Aachen: Shaker; 2013.
- [3] Dirksen U. Testumgebung für Prozessregelungen zum Drei-Rollen-Profilbiegen mit virtuellem und realem Biegeprozess [Zugl.: Dortmund, Techn. Univ., Diss., 2008]. Aachen: Shaker; 2008.

- [4] Chatti S. Optimierung der Fertigungsgenauigkeit beim Profilbiegen [Zugl.: Dortmund, Univ., Diss., 1997]. Aachen: Shaker; 1998.
- [5] Franz W-D. Maschinelles Rohrbiegen: Verfahren und Maschinen. Düsseldorf: VDI-Verl; 1988.
- [6] Engel B, Kersten S. Sensitivitätsanalyse beim Freiformbiegen von Rohrprofilen. In: Bauteile der Zukunft. Hannover: EFB, 2010; 2010.
- [7] Groth S. Methode zur Produktplanung beim Freiformbiegen [Dissertation]. Düren: Shaker Verlag; 2020.
- [8] Yang M, Shima S, Watanabe T. Model-based Control for Three-Roll Bending Process of Channel Bar. *Journal of Engineering for Industry* 1990;112(4):346–51. <https://doi.org/10.1115/1.2899598>.
- [9] Coppieters S, Traphöner H, Stiebert F, Balan T, Kuwabara T, Tekkaya AE. Large strain flow curve identification for sheet metal. *Journal of Materials Processing Technology* 2022;308:117725. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2022.117725>.
- [10] Murray-Smith DJ. The inverse simulation approach: a focused review of methods and applications. *Mathematics and Computers in Simulation* 2000;53(4-6):239–47. [https://doi.org/10.1016/S0378-4754\(00\)00210-X](https://doi.org/10.1016/S0378-4754(00)00210-X).
- [11] Groche P, Taplick C, Özel M, Mahajan P, Stahl S. Benefits of stress superposition in combined bending-linear flow splitting process. *Int J Mater Form* 2016;11(1):19–29. <https://doi.org/10.1007/s12289-016-1325-4>.
- [12] Taplick C. Kombiniertes Hochkant-Biegen und Spaltprofilieren. Zugl.: Darmstadt, Techn. Univ., Diss., 2016. Aachen: Shaker Verlag GmbH; 2016.
- [13] Arnet H. Profilbiegen mit kinematischer Gestalterzeugung [Zugl.: Erlangen, Nürnberg, Univ., Diss., 1999]. Bamberg: Meisenbach; 1999.
- [14] Staupendahl D, Tekkaya AE. Inline-Measurement of Complex Profile Contours for the Generation of Process Parameters Used in 3D-Bending. *Future Trends in Steel Development, Processing Technologies and Applications* 2017.
- [15] Staupendahl D. 3D profile bending with five controlled degrees of freedom [Dissertation]. Düren: Shaker Verlag; Shaker Verlag; 2021.
- [16] Vipavc D. Eine Simulationsmethode für das 3-Rollen-Schubbiegen: FAU University Press; 2019.
- [17] Engel B, Kopfer P. Improving the curvature of bent profiles by adjusting the process kinematics of the Three-Roll-Pushbending Process. 4th DORP 2011 - Dortmunder Kolloquium zum Rohr- und Profilbiegen 2011:127–30.
- [18] Gerlach C. Ein Beitrag zur Herstellung definierter Freiformbiegegeometrien bei Rohren und Profilen [Zugl.: Siegen, Univ., Diss., 2010]. Aachen: Shaker; 2010.
- [19] Kopfer P, Engel B. An approach to calculate the bending line of free-form-bent tubes based on analytical plasticity models. *International Symposium on Plasticity* 2013;2013.
- [20] Taschenbuch der Mathematik. 8th ed. Frankfurt am Main: Deutsch; 2012.
- [21] Deuffhard P. Newton methods for nonlinear problems: Affine invariance and adaptive algorithms. Beijing: Science Press; 2006.