

Bedeutung der Maschinensteifigkeit für die Auslegung von Formspannbacken beim Rotationszugbiegen

Jonas Knoche^{1, a *}, Christopher Kuhnhen^{1, b}, Nadine Wurm^{1, c},
Daniel Nebeling^{1, d} und Bernd Engel^{1, e}

¹Lehrstuhl für Umformtechnik, Universität Siegen, Breite Straße 11, 57076 Siegen, Deutschland

^ajonas.knoche@uni-siegen.de, ^bchristopher.kuhnhen@uni-siegen.de,

^cnadine.wurm@uni-siegen.de, ^ddaniel.nebeling@uni-siegen.de, ^ebernd.engel@uni-siegen.de

Keywords: Rotationszugbiegen, Maschinensteifigkeit, Bauteilqualität, Formbiegung

Abstract. Formspannbacken werden beim Rotationszugbiegen erforderlich, wenn der Abstand zwischen zwei aufeinanderfolgenden Biegungen kleiner ist als die prozessbedingt notwendige Klemmlänge. Ihre Wirkflächen müssen dabei die Geometrie der vorherigen Biegung teilweise oder vollständig aufnehmen. In der Praxis weicht die reale Biegegeometrie häufig von der CAD-Geometrie ab, sodass letztere nur eingeschränkt zur Auslegung der Wirkflächen herangezogen werden kann. Diese Abweichungen entstehen, weil deterministische und stochastische Einflussgrößen des Prozesses bei der Konstruktion unberücksichtigt bleiben. Eine der dominierenden deterministischen Einflussgrößen ist die Steifigkeit der Biegemaschine, welche die Positionen und Ausrichtungen der Werkzeugelemente unter Last bestimmt. Eine Literaturrecherche zeigt die Sensitivität des Rotationszugbiegens gegenüber einer Verlagerung der Werkzeuge. Anhand des Maschinenaufbaus einer Biegemaschine gemäß VDI 3432 werden die Maschinenkomponenten einer Biegemaschine identifiziert, die maßgeblich die Verlagerung ausgewählter Werkzeugelemente beeinflussen. Die Verlagerungen der identifizierten Maschinenkomponenten unter Last werden mit dem optischen Messsystem Zeiss Aramis mittels prozessnaher Lastfälle vermessen.

Einleitung

Das Rotationszugbiegen (RZB) ist ein Biegeverfahren für die Herstellung von dünnwandigen Rohren mit kleinen Radien. Für die Einleitung des Biegemomentes muss eine prozessbedingte Zugkraft kraftschlüssig übertragen werden. Nach Hinkel hängt diese von der Biegeaufgabe (Wanddickenfaktor, Biegefaktor), der Kinematik des Gegenhalters, der Transportkinematik, der Anzahl der Dornglieder sowie der Tribologie ab. Abhängig davon, ob eine Klemmlänge oder ein Reibkoeffizient gegeben sind, müssen ein minimaler Reibkoeffizient oder eine minimale Klemmlänge gewährleistet werden [1].

Ausgehend von einer geforderten Bauteilgeometrie kann der Abstand zwischen zwei aufeinanderfolgende Biegungen die minimale Klemmlänge unterschreiten. In diesem Fall werden nach Miller Formspannbacken erforderlich. Wesentliches Merkmal von Formspannbacken ist, dass sie einen Teil oder die gesamte der Geometrie des vorherigen Bogens in ihrer Wirkfläche aufnehmen müssen. Oftmals wird für die Auslegung der Werkzeugwirkfläche einer Formspannbacke die CAD-Geometrie des Bauteils verwendet. Da die CAD-Geometrie nicht die deterministischen und stochastischen Einflussgrößen des RZB-Prozesses berücksichtigt, kommt es zu Abweichungen. Diese Abweichungen müssen während dem Einfahren des Werkzeuges mittels manueller Nacharbeit iterativ kompensiert werden [2].

Finite-Element (FE) Simulationen bieten die Möglichkeit deterministische Einflussgrößen zu modellieren. Zu den wesentlichen Einflussgrößen gehören die Materialeigenschaften des Halbzeuges, die initiale Ausrichtung der Werkzeuge, die Werkzeuggeometrien, die Werkzeugbewegungen, die Reibung zwischen den Werkzeugen und dem Rohr sowie die

Maschinensteifigkeit. Die Maschinensteifigkeit bestimmt die Verlagerung der Werkzeuge unter Last während dem Prozess.

Stand der Technik

Nach der VDI 3430 kann die Geometrie eines Biegebauteils anhand von sieben diskreten Merkmalen beschrieben werden. Dabei entsprechen die Merkmale Faltenbildung am Innenbogen und Rissbildung am Außenbogen den Verfahrensgrenzen des RZB. Laut Yazdani et al. sind für die Auslegung von Formspannbacken vor allem die Merkmale Faltenbildung, Querschnittsdeformation, Einfall und Rückfederung relevant, da sie die Geometrie im Bogenbereich einer Biegung beschreiben [3].

Engel und Mathes zeigen, dass die Positionierung und Ausrichtung des Faltenglätters relativ zur Biegeform einen großen Einfluss auf die Faltenbildung hat. Eine Verlagerung um 0,2 mm in Querrichtung, eine Anstellung um $0,2^\circ$ sowie eine Verlagerung um 1,0 mm in axialer Richtung führen zu einer signifikanten Faltenbildung [4].

Die Sensitivitätsanalyse von Borchmann et al. zeigt unter anderem, dass die Zustellung des Gegenhalters in Querrichtung einen großen Einfluss auf die Faltenbildung am Innenbogen hat. Die Querstellung des Gegenhalters wurde in einem Bereich zwischen 0 mm und 0,8 mm variiert. Die Variation erfolgte in 0,2 mm Schritten, wobei der Gegenhalter sukzessiv vom Rohr entfernt wurde. Zwischen zwei Schritten kam es zu einer deutlichen Zunahme der Faltenbildung [5].

Der Dorn überträgt die durch den Gegenhalter eingebrachte Querkraft auf den Faltenglätter. Je nachdem welche Art von Dorn verwendet wird, ragt dieser bis in den gebogenen Bereich des Rohres hinein und stützt so den Querschnitt des Rohres bis über die Übergangsebene hinaus [2]. Safdarian untersuchte in seiner Studie den Einfluss der Dornposition in axialer Richtung sowie der Anzahl der Dornglieder auf die Faltenbildung und Querschnittsdeformation. Durch eine höhere Anzahl an Dorngliedern ragt der Gliederdorn zunehmend in den Bogenbereich hinein, was eine geringere Querschnittsdeformation zur Folge hat. Je näher das vordere Ende des Dornschaftes der Übergangsebene ist, desto geringer ist die Faltenbildung [6]. Kajikawa et al. zeigen in ihrer Studie, dass die Verlagerung eines Stummeldornes um Zehntelmillimeter bereits Einfluss auf die Querschnittsdeformation hat [7].

Engel et al. zeigen, dass eine endliche Maschinensteifigkeit die Hauptursache für die Werkzeugverlagerungen im Prozess ist. Beim Freiformbiegen sorgt insbesondere die Verlagerung der Umformrolle für Abweichungen beim resultierenden Biegeradius [8]. Borchmann et al. untersuchten den Einfluss der Maschinensteifigkeit auf die Faltenbildung beim RZB. Mittels Bewegungsmessungen unter Last wurde die Steifigkeit einer Biegemaschine ermittelt. Zur Evaluierung des Einflusses auf die Faltenbildung wurde in Simulationen die Steifigkeit um Größenordnungen variiert. Die Modellierung der Steifigkeit erfolgte durch Federsteifigkeiten an den Werkzeulementen. Die Faltenbildung nimmt zu, wenn die Maschinensteifigkeit abnimmt [9].

Systemanalyse “Biegemaschine”

Für das RZB werden nach VDI 3430 zehn Maschinenachsen benötigt [10]. Sie sind für die koordinierte Bewegung der für das RZB erforderlichen Werkzeulemente verantwortlich. Abhängig von der Biegeaufgabe, dem Einsatzgebiet und der Antriebsart, ergeben sich unterschiedliche Aufbauten für Biegemaschinen. Einige grundlegende Maschinenkomponenten werden in der VDI 3432 beschrieben [11].

Die im Rahmen dieser Veröffentlichung betrachtete Biegemaschine RBV 35 der WAFIOS AG, Reutlingen, verfügt über zehn weggesteuerte Maschinenachsen. Der grundlegende Aufbau der RBV 35 ist in Anlehnung an VDI 3432 in Abbildung 1 dargestellt. Er besteht im Wesentlichen aus dem Maschinengrundkörper, der Positioniereinheit, der Gegenhalterquerzustellung und dem Biegekopf bestehend aus Höhenverstellung, Biegearm und Spannachse.

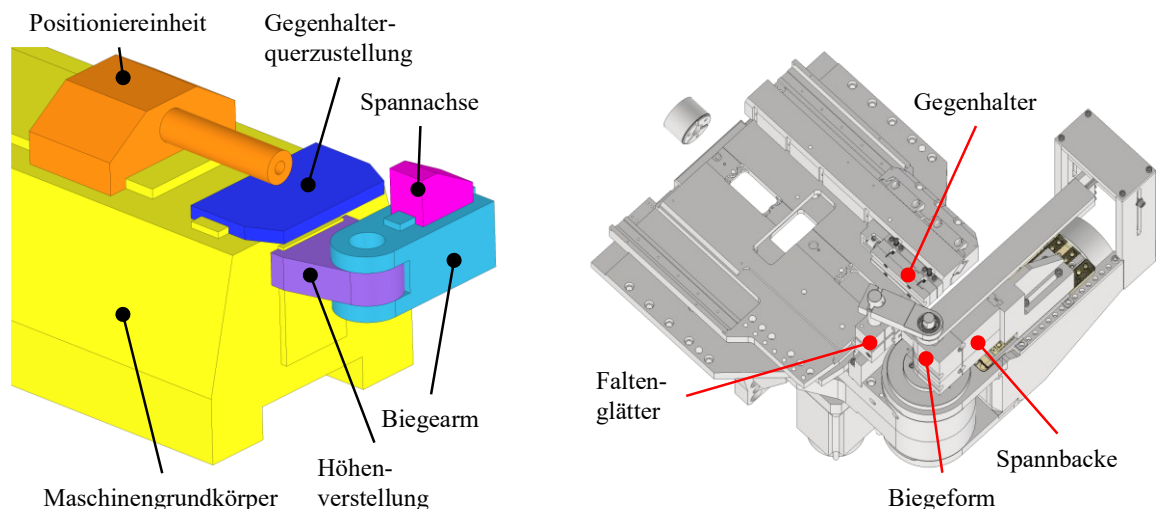


Abbildung 1: Maschinenkomponenten der RBV 35 in Anlehnung an die Maschinenkomponenten gemäß VDI 3432 (links) und Werkzeugaufbau (rechts)

Für die Verlagerung der Werkzelemente unter Last sind neben der inhärenten Nachgiebigkeit der verbundenen Maschinenkomponenten auch die Nachgiebigkeit der Schnittstellen zwischen den Maschinenkomponenten von Bedeutung. Vor diesem Hintergrund müssen für die Modellierung der Werkzeugverlagerungen die entsprechenden Maschinenkomponenten sowie etwaige kinematische Ketten identifiziert werden.

Die Biegeform bildet das zentrale Werkzelement beim RZB. Die weiteren Werkzelemente werden an ihr ausgerichtet sowie deren Bewegungen mit ihrer Drehung koordiniert. Die Biegeform sitzt auf dem Biegearm. Der Biegearm ist über die Höhenverstellung mit dem Maschinengrundkörper verbunden. Für die Klemmung des Rohres stützt sich die Spannbacke mit der Spannachse auf der Biegeform ab. Die Verlagerung der Biegeform ist damit die Summe aus einer Verlagerung relativ zum Biegearm infolge einer Querkraft durch die Spannachse sowie der Verlagerung der Höhenverstellung.

Der Faltenglätter stützt sich an seinem vorderen Ende an der Biegeform ab und ist über die Faltenglattersäule mit der Höhenverstellung verbunden. Über das Rohr und den Dorn wird der Faltenglätter mit einer Querkraft infolge einer Querkstellung des Gegenhalters belastet. Diese hat eine Verlagerung der Höhenverstellung zur Folge.

Der Gegenhalter ist mit der Gegenhalterquerkstellung verbunden und kann bei der betrachteten Biegemaschine zudem in Rohrlängsrichtung verfahren werden. Die Gegenhalterquerkstellung ist direkt mit dem Maschinengrundkörper verbunden. Durch die Querkstellung des Gegenhalters wird eine Querkraft eingebracht, die über das Rohr und den Dorn auf den Faltenglätter und die Biegeform übertragen wird. Die Folge ist eine Verlagerung des Faltenglätters und der Biegeform sowie der Maschinenkomponente Höhenverstellung. Gleichzeitig kommt es zu einer Verlagerung der Gegenhalterquerkstellung in Folge der Reaktionskraft auf die eingebrachte Querkraft.

Unter Berücksichtigung der im Stand der Technik aufgeführten Arbeiten, werden bei der Bewegungsmessung unter Last die Verlagerungen der Maschinenkomponenten Höhenverstellung und Gegenhalterquerkstellung betrachtet.

Bewegungsmessung unter Last

Für die Bewegungsmessung unter Last kommt das optische Messsystem ARAMIS 12M SRX der Carl Zeiss GOM Metrology GmbH, Braunschweig, zum Einsatz. Anhand von uncodierten Referenzpunktmarken können die dreidimensionalen Bewegungen einzelner Maschinenkomponenten und Werkzelemente erfasst werden. Für die Erfassung der wirkenden Kräfte, wird ein sensorischer Gegenhalter verwendet, der mit zwei Kraftmessdosen

vom Typ C9B der Hottinger Brüel & Kjaer GmbH, Darmstadt, ausgestattet ist, siehe Abbildung 2. Die Kraftmessdosen haben eine Kapazität von jeweils 20 kN. Die Kraftmessdosen sind über einen Messverstärker vom Typ HBM MGC der Hottinger Brüel & Kjaer GmbH, Darmstadt, mit dem Controller des ARAMIS 12M SRX verbunden. Dies ermöglicht eine synchronisierte Erfassung der wirkenden Kräfte und resultierenden Verlagerungen.

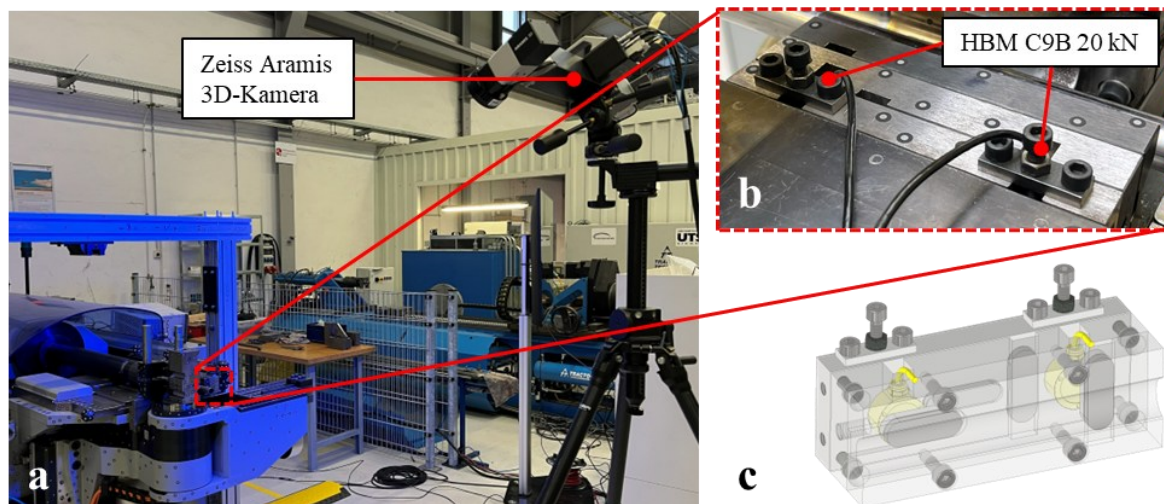


Abbildung 2: (a) Versuchsaufbau mit Zeiss Aramis 3D-Kamera, (b) Detailaufnahme des sensorischen Gegenhalters und (c) Konstruktion des sensorischen Gegenhalters inkl. Kraftmessdosen (gelb)

Die Bewegungsmessungen an den Maschinenkomponenten Höhenverstellung und Gegenhalterquerverstellung werden in zwei getrennten Lastfällen durchgeführt. Beim Lastfall „Höhenverstellung“ erfolgt die Krafteinleitung durch das Anfahren des Gegenhalters auf die Höhenverstellung. Die resultierende Gegenhalterquerkraft wird über ein eingespanntes Rohr und den Dorn auf die Biegeform und den Faltenglätter übertragen. Da die Zustellung des Gegenhalters in Querrichtung begrenzt ist, erfolgt eine Lasterhöhung durch ein sukzessives Unterlegen des Gegenhalters.

Beim Lastfall „Gegenhalterquerverstellung“ erfolgt die Krafteinleitung durch das Anfahren der Höhenverstellung auf den Gegenhalter. Die Biegeform und der Faltenglätter sind dabei im direkten Kontakt mit dem sensorischen Gegenhalter. Der Gegenhalter steht dabei auf der gleichen Position wie bei einer Biegung. Da die Querverstellung der Höhenverstellung keiner Begrenzung unterliegt, erfolgt die Lasterhöhung durch ein sukzessives Zustellen der Höhenverstellung in Querrichtung.

Da die Genauigkeit des ARAMIS 12M SRX von den Belichtungsverhältnissen beeinflusst wird, wird jede Laststufe für eine Zeitspanne gehalten. Damit können die Verlagerungen infolge sich ändernden Belastungen von jenen isoliert werden die aus sich ändernden Belichtungsverhältnissen resultieren. Diese Differenzierung ist insbesondere bei geringen Belastungen und daraus resultierenden geringen Verlagerungen wichtig. Die Auswertung der Verlagerungen erfolgt im Maschinenkoordinatensystem nach VDI 3430.

Ergebnisse

Lastfall „Höhenverstellung“. Bei der Bewegungsmessung für den Lastfall „Höhenverstellung“ wurden drei Laststufen angefahren. Die korrespondierenden Unterlagen des sensorischen Gegenhalters betrugen 0,9 mm, 1,2 mm und 1,5 mm. Die für die Unterlage 1,5 mm resultierenden Verlagerungen sind Abbildung 3 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die Verlagerung der Höhenverstellung von links nach rechts und von unten nach oben zunimmt.

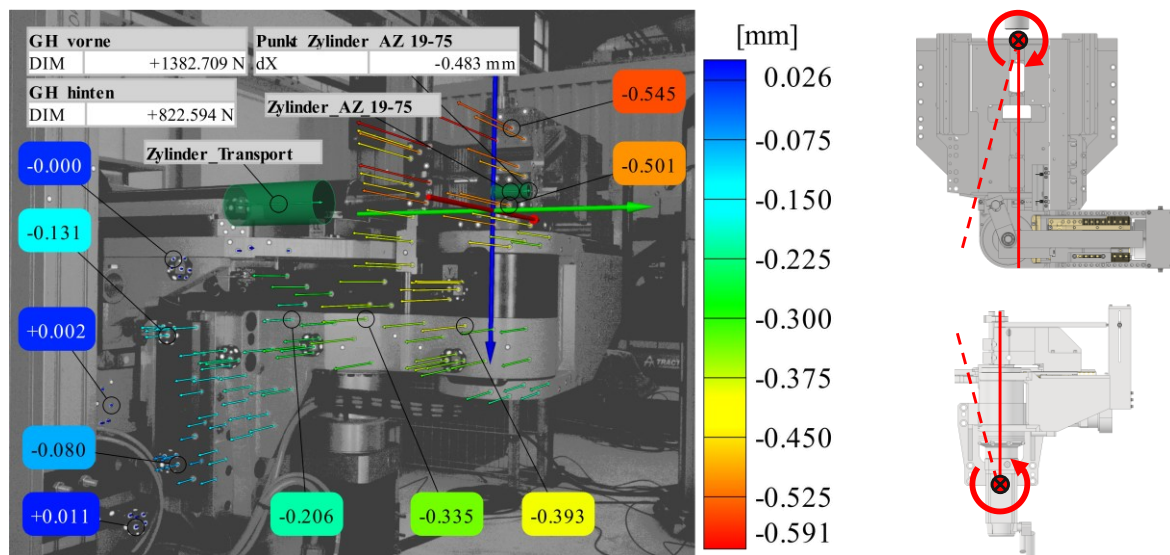


Abbildung 3: Verlagerung der Höhenverstellung bei Laststufe drei (links) und Bewegungsmodi der Verlagerung (rechts)

Für den Lastfall „Höhenverstellung“ wurde die Verlagerung der Biegeform im Bereich der Kavität als Vergleichsgröße definiert. Dabei wurden die Verlagerungen der Biegeform über die Dauer der Laststufen gemittelt. Abbildung 4 zeigt die für die drei Laststufen ermittelten Verlagerungen der Biegeform sowie der entsprechenden Kräfte.

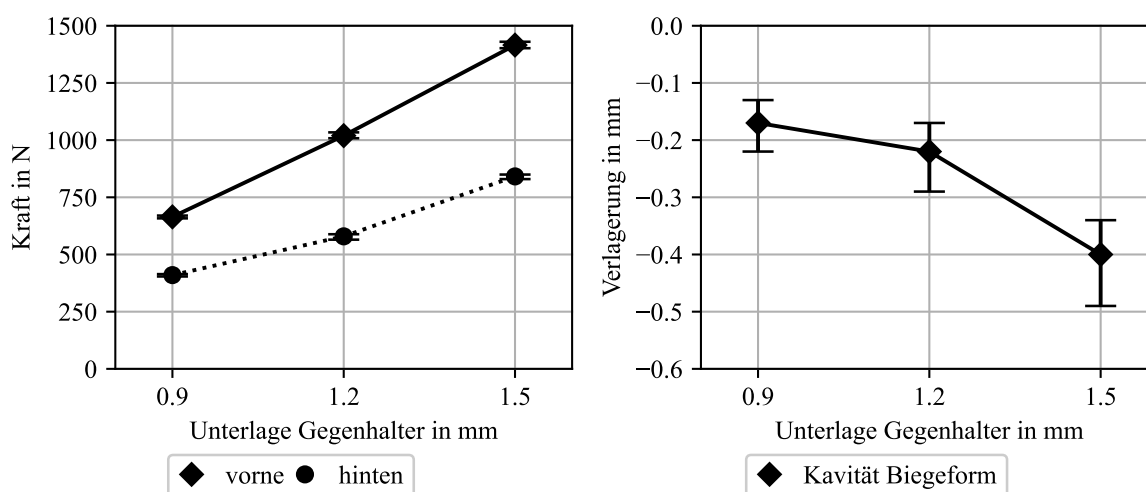


Abbildung 4: Kräfte und Verlagerungen der Biegeform für Lastfall „Höhenverstellung“

Die Verlagerung der Biegeform nimmt mit zunehmender Unterlage des Gegenhalters zu. Sie beträgt für die Unterlage 1,5 mm im Mittel -0,40 mm. Die am sensorischen Gegenhalter gemessenen Kräfte nehmen mit zunehmender Unterlage zu, dabei ist die Kraft an der vorderen Kraftmessdose stets größer als an der hinteren. Während die gemessenen Kräfte über die drei Laststufen nahezu linear zunehmen, ist die Zunahme der Verlagerung der Biegeform von der ersten zur zweiten Laststufe wesentlich kleiner als von der zweiten Laststufe zur dritten.

Die Schwankungsbreite der ermittelten Verlagerungen nimmt mit zunehmender Unterlage des Gegenhalters zu. Bei der Unterlage 0,9 mm beträgt sie etwa 0,1 mm und steigt bei Unterlage 1,5 mm auf etwa 0,15 mm an.

Lastfall „Gegenhalterquerverstellung“. Beim Lastfall „Gegenhalterquerverstellung“ wurden fünf Laststufen angefahren. Das Anfahren der Laststufen erfolgte manuell im Einrichtbetrieb

der Biegemaschine. Abbildung 5 zeigt die Verlagerung der Gegenhalterquerverstellung bei der fünften Laststufe.

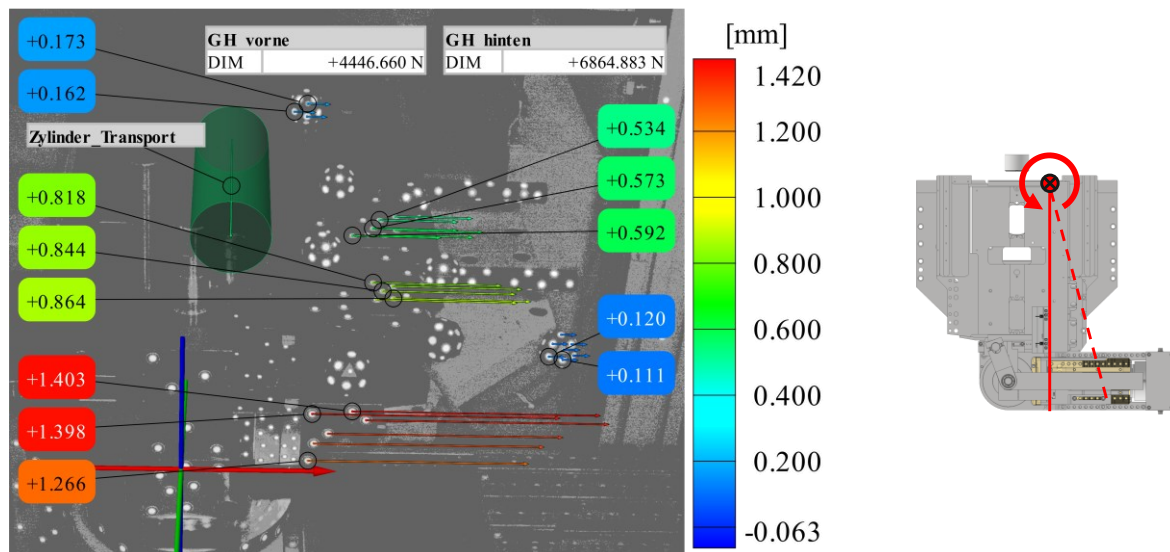


Abbildung 5: Verlagerung der Gegenhalterquerverstellung bei Laststufe fünf (links) und Bewegungsmodus der Verlagerung (rechts)

Die Verlagerung der Gegenhalterquerverstellung wurde an vier Position anhand dort platzierter Punktgruppen ausgewertet. Zusätzlich zu einer Mittelung über die Dauer der jeweiligen Laststufe erfolgte eine Mittelung innerhalb der betrachteten Punktgruppen. Die betrachteten Punktgruppen befinden sich am vorderen sowie hinteren Ende der Gegenhalterquerverstellung. Darüber hinaus wurden die Verlagerungen der Gleitlager für die Längsführung betrachtet. In Abbildung 6 sind die ermittelten Verlagerungen der Punktgruppen sowie die gemessenen Kräfte dargestellt.

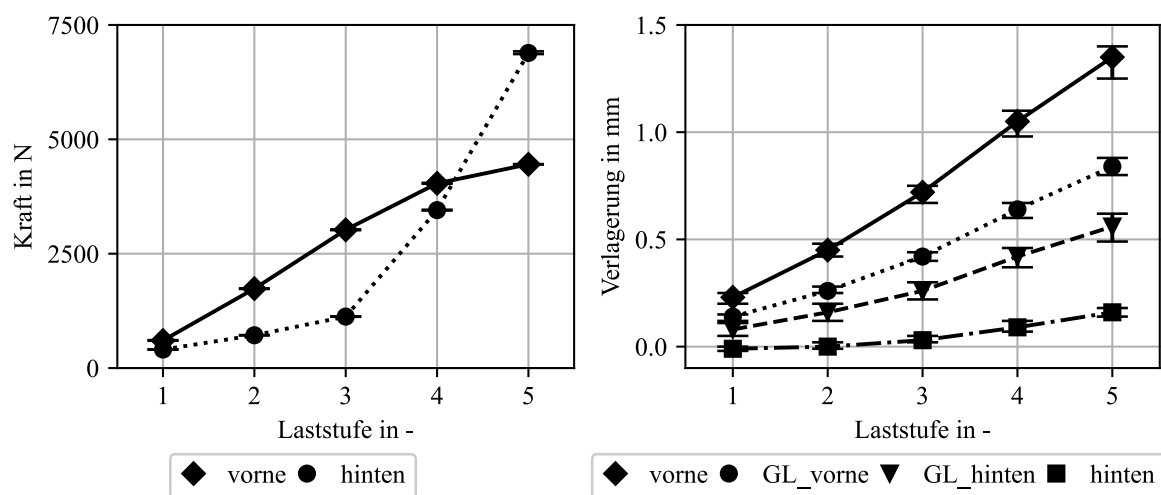


Abbildung 6: Kräfte und Verlagerungen der Gegenhalterquerverstellung für Lastfall "Gegenhalterquerstellung"

Die Verlagerung der Gegenhalterquerverstellung nimmt bei jeder Laststufe von hinten nach vorne zu. Bei den ersten drei Laststufen ist die Verlagerung des hinteren Endes im Bereich der Messungenauigkeit für das verwendete Messvolumen. Analog zum Lastfall „Höhenverstellung“ nehmen mit jeder Laststufe sowohl die Kräfte als auch die gemessenen Verlagerungen zu. Weiter ist die Kraft an der vorderen Kraftmessdose bis einschließlich Laststufe drei größer als an der hinteren Kraftmessdose. Zwischen Laststufe drei und vier steigt die Kraft an der hinteren Kraftmessdose überproportional an und ist bei Laststufe fünf größer als an der vorderen Kraftmessdose.

Die Schwankungsbreite der gemessenen Verlagerungen nimmt über die Laststufen betrachtet zu. Weiter nimmt sie am hinteren Ende wesentlich geringer als an den anderen Messstellen.

Diskussion

Lastfall „Höhenverstellung“. Wie Abbildung 3 zeigt, nimmt die Verlagerung der Höhenverstellung unter Last von links nach rechts und von unten nach oben zu. Ausgehend von dieser Beobachtung kann die Verlagerung in zwei Verlagerungsmodi unterteilt werden, siehe Abbildung 3. Einerseits kommt es zu einer Drehung um die z-Richtung, da die Biegeform und der Faltenglätter unter Einwirkung des Gegenhalters in negative x-Richtung verschoben werden. Bedingt durch den Hebelarm zwischen Krafteinleitungspunkt und der Führung der Höhenverstellung am Maschinengrundkörper ergeben sich bereits bei kleinen Verdrehungen größere Verlagerungen der Werkzeugelemente. Beim zweiten Verlagerungsmodus handelt es sich um eine Verdrehung um die y-Richtung. Da die gesamte Höhenverstellung zur Einstellung der Biegeebene verfahren wird, ergibt sich entlang der z-Richtung ein Hebelarm zwischen der Krafteinleitungsstelle und der Führung der Höhenverstellung. Analog zur Drehung um die z-Richtung ergeben sich mit zunehmendem Hebelarm auch bei kleinen Verdrehungen signifikante Verlagerungen der Werkzeugelemente.

Im Gegensatz zu den erfassten Kräften nimmt die Verlagerung der Biegeform im Bereich der Kavität nicht linear zu. Die Zunahme ist von Unterlage 0,9 mm zu 1,2 mm geringer als von Unterlage 1,2 mm zu 1,5 mm. Da an der kinematischen Kette zwischen Messstelle und Maschinengrundkörper mehrere Maschinenbauteile sowie deren Schnittstellen zueinander beteiligt sind, kann davon ausgegangen werden, dass die Differenz bei den Verlagerungen durch anhaltendes Setzverhalten verursacht wird. Die Schwankungsbreite der erfassten Verlagerungen beträgt mitunter 50 % des ermittelten Mittelwertes. Dabei weisen die parallel aufgezeichneten Kräfte eine wesentlich geringere Streuung auf. Da die Verlagerungsbilder bei allen Unterlagen des Gegenhalters die gleiche Verteilung aufweisen, kann dennoch davon ausgegangen werden, dass ein Großteil der Verlagerung durch die einwirkenden Belastungen hervorgerufen werden. Neben sich ändernden Belichtungsverhältnissen kann die bedingt durch die Ausrichtung des Messkopfes anteilige Bewegung in Tiefenrichtung des Messvolumens der Höhenverstellung für die erhöhte Schwankung der Verlagerungen verantwortlich sein.

Die erfassten Kräfte zeigen einen nahezu linearen Anstieg mit zunehmender Unterlage des Gegenhalters, siehe Abbildung 4. Dabei ist die Kraft an der vorderen Kraftmessdose stets größer als an der hinteren. Eine mögliche Ursache für diese Differenz ist, dass der Gegenhalter in der Biegeposition etwas hinter der Übergangsebene steht, um eine Kollision mit der Klemmbacke zu vermeiden. Damit befindet sich die vordere Kraftmessdose auf der Höhe der Faltenglätterschale und deren Übergang an die Biegeform. Die eingeleitete Querkraft wird somit nach der Einförmung des Rohres von den gegenüberliegenden Werkzeugelementen aufgenommen. Auf der Höhe der hinteren Kraftmessdose fehlt ein kraftaufnehmendes Werkzeugelement, sodass die aufgezeichnete Kraft wesentlich geringer ausfällt.

Bei einer gemeinsamen Betrachtung der aufgezeichneten Kräfte und Verlagerungen ist unter Berücksichtigung des angeführten Standes der Technik deutlich, dass die Verlagerung der Höhenverstellung bzw. der Biegeform signifikant sind und nicht vernachlässigt werden können. Es ist jedoch zu bedenken, dass es im Biegeprozess zu einer Entlastung der Werkzeugelemente Faltenglätter und Biegeform in kommt, da das Rohr unter Einfluss des einwirkenden Biegemomentes die Tendenz hat nach außen in Richtung des Gegenhalter auszuknicken. Damit es also zu einer Verlagerung der Höhenverstellung sowie der damit verbundenen Werkzeugelemente kommen kann, muss der Gegenhalter die durch das Biegemoment induzierte Querkraft aufnehmen und eine zusätzliche darüberhinausgehende Querkraft einleiten.

Lastfall „Gegenhalterquerverstellung“. Beim Lastfall „Gegenhalterquerverstellung“ kann als dominierender Verlagerungsmodus eine Verdrehung um die z-Richtung beobachtet werden, siehe Abbildung 5. Die Verlagerungen entlang der Gegenhalterquerverstellung nehmen mit zunehmender Zustellung der Höhenverstellung zu. Sie nimmt von hinten nach vorne zu, wobei die Verlagerung am hinteren Ende bis einschließlich Laststufe drei nahezu null ist.

Die erfassten Verlagerungen weisen für die ersten drei Laststufen eine nahezu lineare Zunahme auf. Die ermittelten Schwankungsbreiten sind wesentlich geringer als die zugrundeliegenden belastungsinduzierten Verlagerungen. Das für das hintere Ende ein magnetischer Adapter verwendet wurde und die Punktmarken damit von der Maschinenkomponente sowie etwaigen elastischen Verzerrungen entkoppelt sind, ist eine mögliche Erklärung für die geringere Streuung der Verlagerung am hinteren Ende der Gegenhalterquerverstellung.

Analog zum Lastfall „Höhenverstellung“ nehmen die Kräfte zunächst nahezu linear zu. Weiter ist die Kraft an der vorderen Kraftmessdose größer als an der hinteren. Zwischen den Laststufen drei und vier kommt es zu einem überproportionalen Anstieg der Kraft an der hinteren Kraftmessdose und mit Laststufe fünf ist sie höher als an der vorderen Kraftmessdose. Im Gegensatz zum Lastfall „Höhenverstellung“ stehen die Werkzeuge ohne ein eingespanntes Rohr und den Dorn im direkten Kontakt zueinander. Da eine leicht fehlerhafte Anstellung des Faltenglätters nicht ausgeschlossen werden kann, ist dies in Kombination mit Lage der Kraftmessdosen infolge der Biegeposition des Gegenhalters eine mögliche Erklärung für die initiale Differenz zwischen der vorderen und hinteren Kraftmessdose. Da sich die Gegenhalterquerverstellung und die Höhenverstellung mit zunehmender Anstellung zunehmend gegensätzlich verdrehen, wird die vordere Kraftmessdose weniger und die hintere Kraftmessdose durch das Zulaufen von Gegenhalter und Faltenglätter zunehmend belastet.

Durch die von Oz et al. veröffentlichten Datensätzen aus experimentellen Biegeversuchen ist bekannt, dass die Gegenhaltergesamtkraft während dem Biegeprozess und abhängig von den gewählten Prozessparametern im Maximum Werte zwischen 2,5 kN und 4,5 kN erreicht [12]. Damit entsprechen die für die Laststufen eins bis drei beobachteten Verlagerungen der Gegenhalterquerverstellung Verlagerungen wie sie in einem realen Biegeprozess zu erwarten sind. Unter Berücksichtigung des vorgestellten Standes der Technik liegen damit signifikante Verlagerungen des Werkzeugelementes Gegenhalter vor, die nicht vernachlässigt werden können.

Zusammenfassung und Ausblick

Wesentlich für die Auslegung von Formspannbacken beim RZB sind die Geometrie des vorherigen Bogens sowie dessen Schwankungen infolge stochastischer Einflussgrößen. Aus dem aktuellen Stand der Technik ist bekannt, dass initiale Fehlstellungen der Werkzeugelemente Faltenglätter, Gegenhalter und Dorn mitunter signifikanten Einfluss auf die resultierende Bauteilgeometrie haben. Dabei liegen die Fehlstellungen, ab denen der Einfluss signifikant wird, im Bereich weniger Zehntelmillimeter. Aufgrund einer endlichen Maschinensteifigkeit können sich im Prozess selbst bei einer perfekten initialen Ausrichtung und Positionierung der Werkzeugelemente Fehlstellungen ergeben, die sich negativ auf das Biegeergebnis auswirken.

Ausgehend vom vorgestellten Stand der Technik wurden am Beispiel einer Biegemaschine jene Maschinenkomponenten identifiziert, deren Steifigkeit eine Verlagerung der Werkzeugelemente Faltenglätter, Biegeform und Gegenhalter zur Folge haben. Anhand zweier Lastfälle wurden die Verlagerungen der Maschinenkomponenten Höhen- und Gegenhalterquerverstellung ermittelt. Die beobachteten Verlagerungen liegen für vergleichbare Belastungen aus dem Biegeprozess im Bereich mehrerer Zehntelmillimeter und damit in einer Größenordnung, bei der nach dem aktuellen Stand der Technik von einem negativen Einfluss auf das Biegeergebnis ausgegangen werden kann.

Anhand der identifizierten Verlagerungsmodi der Maschinenkomponenten werden mechanische Ersatzsysteme konstruiert und in die Simulation übertragen. Darauf aufbauend erfolgt ein Abgleich mit starren Werkzeugen zur Identifikation jener Maschinenkomponenten deren Steifigkeit den größten Einfluss auf die Bauteilgeometrie haben. Weiter werden die Werkzeugverlagerungen während dem Biegeprozess untersucht. Einerseits um Validität der konstruierten Ersatzsysteme zu evaluieren und andererseits, um das Zusammenspiel aller Werkzeugverlagerungen zu analysieren.

Danksagung

Diese Arbeit wurde von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) im Rahmen des Schwerpunktprogrammes SPP 2422 „Datengetriebene Modellierung in der Umformtechnik“ unter der Fördernummer 520256321 unterstützt.

Literaturverzeichnis

- [1] M. Hinkel, Hg. Prozessfenster für das Spannen von Rohrprofilen beim Rotationszugbiegen unter Berücksichtigung der Tribologie. Shaker Verlag, 2013.
- [2] G. Miller, Tube forming processes: A comprehensive guide. Dearborn, Mich.: SME Society of Manufacturing Engineers, 2003.
- [3] A. Yazdani, J. Knoche, B. Engel und K. van Laerhoven, "Tube geometry prediction in rotary draw bending process using Random Forest regression," at - Automatisierungstechnik, Jg. 73, Nr. 4, S. 223–231, 2025, doi: 10.1515/auto-2024-0131.
- [4] B. Engel und C. Mathes, Hg. Erweiterung der Prozessfähigkeit des Rotationszugbiegens durch ein alternatives Faltenglätterkonzept, 1. Aufl. (EFB-Forschungsbericht 378). Hannover: Europäische Forschungsgesellschaft für Blechverarbeitung e.V. (EFB), 2013.
- [5] L. Borchmann, C. Kuhnhen, P. Frohn und B. Engel, "Sensitivity analysis of the rotary draw bending process as a database of digital equipping support," Procedia Manufacturing, Jg. 29, S. 592–599, 2019, doi: 10.1016/j.promfg.2019.02.100.
- [6] R. Safdarian, "Experimental and numerical investigation of wrinkling and tube ovality in the rotary draw bending process," Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, Jg. 233, Nr. 16, S. 5568–5584, 2019, doi: 10.1177/0954406219850857.
- [7] S. Kajikawa, G. Wang, T. Kuboki, M. Watanabe und A. Tsuchiya, "Prevention of defects by optimizing mandrel position and shape in rotary draw bending of copper tube with thin wall," Procedia Manufacturing, Jg. 15, S. 828–835, 2018, doi: 10.1016/j.promfg.2018.07.413.
- [8] B. Engel, S. Kersten und D. Anders, "Spline-Interpolation and Calculation of Machine Parameters for the Three-Roll-Pushbending of Spline-Contours," (DOI: 10.1002/srin.201100077) Steel Research international, Jg. 82, Nr. 10, S. 1180–1186, 2011, doi: 10.1002/srin.201100077.
- [9] L. Borchmann, C. Heftrich und B. Engel, "Influence of the stiffness of machine axes on the formation of wrinkles during rotary draw bending," SN Appl. Sci., Jg. 2, Nr. 10, 2020, doi: 10.1007/s42452-020-03419-1.
- [10] Rotationszugbiegen von Profilen, VDI 3430, Verein Deutscher Ingenieure e.V., Düsseldorf, Jun. 2014.
- [11] Rotationszugbiegemaschinen - Grundlagen und Kenngrößen, VDI 3432 Blatt 1, Verein Deutscher Ingenieure e.V., Düsseldorf, Jul. 2023.

- [12]Z. Oz, J. Knoche, A. Yazdani, B. Engel und K. van Laerhoven, "TubeBEND: A Real-World Dataset for Geometry Prediction in Rotary Draw Bending," Sep. 2025. [Online]. Verfügbar unter: <http://arxiv.org/pdf/2509.10272v1>