

Entwicklung und Evaluierung von Strategien zur Inline-Prozessregelung beim Freiformbiegen

Pirmin Gaißer^{1, a *}, Tim C. Lüth¹

¹Lehrstuhl für Mikrotechnik und Medizingerätetechnik (MiMed), Technische Universität München, Boltzmannstraße 15, 85748 Garching, Deutschland

^apirmin.gaisser@tum.de

Keywords: Freiformbiegen, Inline-Prozessregelung, Sensorfusion, Nachbiegekinematik, Rapid Prototyping.

Abstract. Dieser Beitrag stellt das Konzept und den aktuellen Entwicklungsstand einer robotischen Inline-Prozessregelung im Rahmen des DFG-Projekts LU604/52-1 vor. Zur Validierung der Regelungsstrategien wurde eine 2D-Versuchsanlage realisiert, die mittels optischem 3D-Tracking die Bauteilgeometrie in Echtzeit erfasst. Das Freiformbiegen ermöglicht die flexible Fertigung komplexer 3D-Geometrien, steht jedoch vor der Herausforderung, hohe Fertigungsgenauigkeiten trotz schwankender Materialeigenschaften prozesssicher zu gewährleisten. Der wissenschaftliche Fokus liegt auf der Systemarchitektur des geschlossenen Regelkreises, der eine aktive Nachbiegekinematik zur Fehlerkompensation vorsieht. Es werden die methodische Vorgehensweise bei der Sensorfusion sowie die Anforderungen an die mechanische Korrekturereinheit diskutiert, um eine „First-Part-Right“-Fertigung zu erreichen.

Problemstellung

Das Freiformbiegen ist ein flexibler, inkrementeller Umformprozess, der die Fertigung komplexer dreidimensionaler Geometrien ermöglicht. Es können im Rahmen des durch die Biegemaschine vorgegebenen Arbeitsbereichs beliebige Krümmungsverläufe erzeugt werden. Die zentrale Herausforderung liegt jedoch in der Beherrschung von Störgrößen wie Materialinhomogenitäten, schwankenden Wandstärken und sich ändernden tribologischen Bedingungen. Diese Faktoren führen während des Prozesses zu Abweichungen von der idealen Biegelinie, die sich aufgrund von Hebelwirkungen global aufsummieren und die Maßhaltigkeit des Endprodukts beeinträchtigen. Ohne eine gezielte Korrektur während der Fertigung ist eine prozesssichere Einhaltung enger Toleranzen bisher kaum möglich [1].

Stand der Technik

Formgebundene Profil- oder Rohrbiegeverfahren sind das Profildruckbiegen, Pressbiegen und Kompressionsbiegen. Vor allem das Rotationsdruckbiegen ist in der Industrie viel eingesetztes Verfahren [2]. Dort wird das Rohr in einer rotierenden Bewegung um die Biegematrize gezogen und erreicht hohe Fertigungsgenauigkeiten. Dabei können jedoch nur stückweise stetige Krümmungen mit konstanten Radien hergestellt werden und benötigen für jeden Radius und Rohrdurchmesser eine dafür angefertigte Matrize. Freiformbiegen dagegen ist als kinematisches Biegeverfahren nach VDI 3430 [3] eingeordnet und ermöglicht es, freie 3D-Splines ohne Werkzeugwechsel zu generieren. Während beim Drei-Rollen-Biegen lediglich Biegungen in einer Ebene möglich sind, können beim Drei-Rollen-Schub-Biegen auch helixförmige 3D-Strukturen durch zusätzliche Torsion der Rohrachse geformt werden [4]. Beim von der Firma Nissin unter dem Begriff „MOS-Bending“ [5] entwickelten Freiformbiegen sind innerhalb der Maschinenspezifikationen beliebige dreidimensionale Splinegeometrien formbar. Bei diesem Verfahren wird das Werkstück durch eine feste Gleitlagerführung geschoben und mit einem in drei, fünf oder sechs Achsen angesteuerten Biegekopf kinematisch zu einer Krümmung gezwängt. Weitere Varianten des Freiformbiegens sind das TSS-Biegen [6], bei dem die Führung aus Rollen besteht und um die Werkstückachse

rotieren kann, und das Freiformbiegen mit Hexapod [7], bei dem der Biegekopf auf einer Stewart-Gough-Plattform montiert ist. Beim Freiformabrollbiegen wird der Vorschub ersetzt, indem die Führungs- und Biegerollen die zu biegende Rohrgeometrie abfahren, wodurch keine Schubspannungsüberlagerung an der Biegestelle auftritt [8].

In der aktuellen industriellen Praxis wird die Prozessführung beim Freiformbiegen primär vorab durch numerische Simulationen oder empirische Modelle bestimmt. Die Steuerung des Biegekopfs erfolgt statisch auf Basis dieser Vorberechnungen. Um Fehler zu kompensieren, werden gefertigte Bauteile nach dem Prozess offline vermessen, woraufhin die Parameter für den nächsten Durchlauf manuell angepasst werden. Bisherige Forschungsarbeiten haben bereits fundierte Grundlagen für das Prozessdesign und die Qualitätsüberwachung beim Freiformbiegen geschaffen [9]. Insbesondere Ansätze zum Inline-Tracking mittels Punktverfolgung [10] und zur geometrischen Überwachung der Biegekontur [11] zeigten das Potenzial optischer Erfassungsmethoden auf.

Die bestehende Herausforderung liegt jedoch in der Überführung dieser Überwachungsdaten in einen geschlossenen Regelkreis. Während bisherige Systeme oft erst nach dem Prozessschritt bewerten, zielt die aktuelle Forschung darauf ab, Abweichungen durch Latenz-optimierte Regelung und Aktorik in Echtzeit an der auftretenden Fehlerquelle zu kompensieren. Dies unterscheidet sich von dem Ansatz von Ismail et al. [12], der den Gesamtwinkelfehler durch Anpassungen der noch zu biegenden Restgeometrie reduziert. In verwandten Disziplinen wie dem Blechumformen oder Tiefziehen gibt es bereits Regelstrategien, die aus einer Abfolge von Biegen, Entlasten, Messen und Nachbiegen bestehen und Korrekturen am gebogenen Teil vornehmen [13]. Ziel meiner Forschung ist es, dies auf den Freiformbiegeprozess zu übertragen und Toleranzen nicht nur hinsichtlich der absoluten Pfadtreue, sondern auch relativ zwischen Bauteilsektionen sowie bezüglich der Querschnittsqualität sicherzustellen.

Nachteile des Stands der Technik

Die bisherige iterative Anpassung der Prozessparameter führt besonders bei kleinen Losgrößen zu einem ineffizienten Zeitaufwand und erheblichen Materialkosten durch Ausschuss. Da Korrekturfaktoren oft nur einzelne Radien berücksichtigen, entstehen signifikante Abweichungen bei komplexen Übergängen und Ebenenwechseln. Die fehlende Möglichkeit, unmittelbar auf unvorhersehbare Materialschwankungen während des Biegens zu reagieren, verhindert die Realisierung einer "First-Part-Right"-Strategie und schränkt die Wirtschaftlichkeit des Verfahrens für hochpräzise Anwendungen ein. Gerade das Freiformbiegen ist aufgrund seiner geometrischen Flexibilität im Vergleich zu in Serienproduktion verwendeten Verfahren wie dem Profilzugbiegen am besten für individuelle Kleinserien und den Prototypenbau geeignet, bei dem die Genauigkeit des ersten Bauteils eine noch größere Rolle spielt.

Lösungsansatz

Um die Ineffizienzen traditioneller Trial-and-Error-Methoden sowie die damit verbundenen Materialkosten zu reduzieren, besteht der in dieser Arbeit verfolgte Lösungsansatz aus der Entwicklung und Implementierung eines geschlossenen Regelkreises für den Freiformbiegeprozess. Dies erfordert die Realisierung einer robusten Inline-Erfassung der Bauteilgeometrie sowie die Integration einer aktiven Nachbiegekinematik, die direkt in den laufenden Prozess eingreifen kann. Ziel ist es, ein echtzeitfähiges System zu schaffen, das auf Basis von Sensoren und modellgestützter Regelung lokale Verformungsfehler erkennt und durch gezielte mechanische Korrekturingriffe kompensiert, um eine maximale globale Maßhaltigkeit zu erreichen.

Entwicklung

Das Projekt soll zu einem Stadium gelangen, bei dem die Regelung im Industriestandard für 3D-Geometrien und Rohre verschiedener Materialien und Wandstärken sowie Durchmesser

bis 90 Millimeter implementierbar ist. Dafür werden zunächst im kleinen Maßstab Theorien erprobt und iteriert. Der Entwicklungsprozess soll so ablaufen, dass zunächst eine Miniatur-2D-Biegemaschine aufgebaut wird, an der Sensorik und erste Korrekturmaßnahmen mittels vereinfachter Nachbiegekinematik erprobt werden können. Diese soll zunächst durch eine seitliche Schubbewegung das Bauteil in der Biegeebene korrigieren. Die Maschine folgt dem Drei-Rollen-Schubbiegeverfahren, da für 2D-Biegungen einfache Profilrollen ausreichen, um das Werkstück in der Ebene zu führen. Die Motoren verfügen über Drehmomente in der Größenordnung Newtonmeter, um 6 Millimeter Vollprofilrohre aus V2A-Stahl umformen zu können.

Anschließend soll dann eine 2,5D-Maschine aufgebaut werden, die mittelgroße Stahlrohre im Bereich 15 Millimeter Durchmesser biegen kann. Diese soll in der Lage sein einen Vorschub und einen Biegekopf in einer Richtung lateral zu aktuieren, sowie den Biegekopf aktiv zu rotieren. Außerdem soll das Rohr an der Vorschubeinspannung um seine Achse rotierbar sein. So können 2D-Kurven mit unterschiedlichen Biegeebenen aneinandergereiht werden, sodass 3D-Geometrien umsetzbar sind. Mit dieser Maschine ist dann bereits 3D-Nachbiegen nötig, das heißt, die Nachbiegekinematik benötigt bereits alle Freiheitsgrade, die dann im dritten Schritt auch bei der industriell einsetzbaren, geregelten 3D-Freiformbiegemaschine nötig sein werden. Dabei kann die Nachbiegekinematik entweder als Add-on für bestehende Industriemaschinen implementiert werden oder, falls nötig, eine Gesamtlösung inklusive Biegemaschine gebaut werden.

Konzept

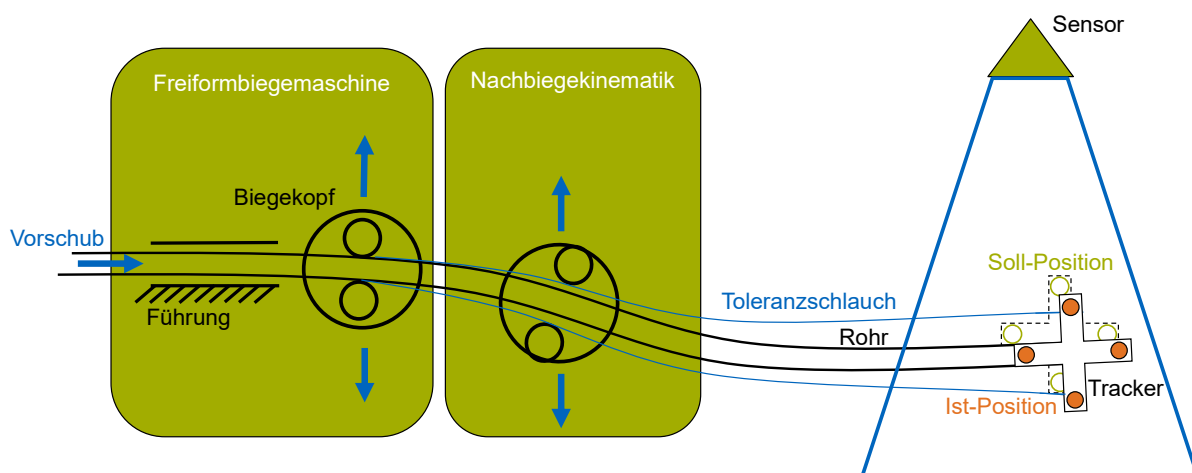


Abbildung 1: Konzept der geregelten Freiformbiegemaschine mittels Nachbiegekinematik und Sensorsystems. Der Toleranzschlauch weitet sich durch die Fehlerfortpflanzung zum offenen Ende hin. Während des In-line Trackings berührt die Nachbiegekinematik das Rohr nicht und kommt zum Eingriff, falls eine Toleranzüberschreitung detektiert wird.

Unabhängig von der Skalierung und dem Arbeitsbereich der Maschine lässt sich das Konzept der mittels Nachbiegekinematik geregelten Freiformbiegemaschine wie in Abbildung 1 darstellen. Der Freiformbiegemaschine ist eine Nachbiegekinematik nachgelagert und die Maßhaltigkeit der Rohrgeometrie wird im entlasteten Zustand durch Sensoren erfasst. So kann die tatsächliche Geometrie nur unter Einfluss des Eigengewichts gemessen und korrigiert werden. Aus den Anforderungen an das Werkstück ergibt sich ein Toleranzfeld um die Geometrie, das sowohl Winkel- und Krümmungsfehler als auch absolute Pfadtreue berücksichtigen kann.

Beschreibung des Lösungsprozesses

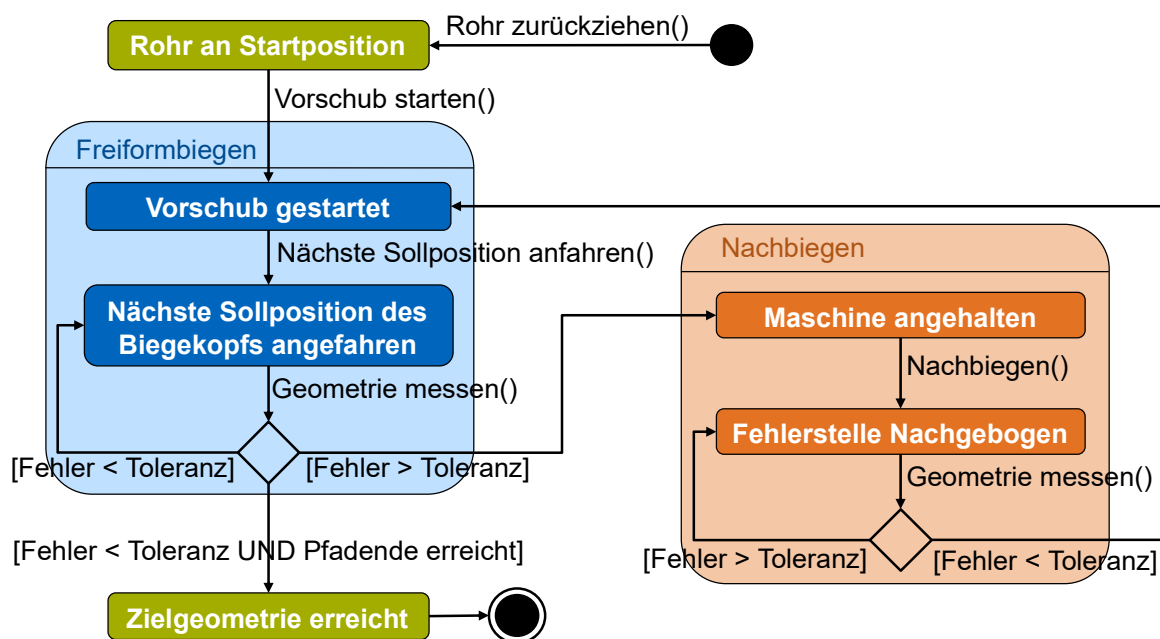


Abbildung 2: Zustandsdiagramm des geregelten Freiformbiegeprozesses mittels Nachbiegekinematik. Der unter kontinuierlichem Vorschub ablaufende Biegeprozess wird bei Überschreiten der Toleranz unterbrochen und ein iteratives Nachbiegen erfolgt, bis der Fehler behoben ist und der reguläre Biegeprozess wieder aufgenommen werden kann.

Der Lösungsprozess ist in Abbildung 2 skizziert. Nach der Initialisierung und der Positionierung des Rohres an der Startposition beginnt der kontinuierliche Vorschub. Das System arbeitet in diesem Zustand die vorgegebene Sollgeometrie ab, indem der Biegekopf schrittweise die berechneten Trajektorien anfährt. Während dieses aktiven Vorschubs wird die Bauteilgeometrie kontinuierlich in Echtzeit erfasst. Die Nachbiegekinematik folgt der Rohrbewegung, ist jedoch während des regulären Freiformbiegeprozesses nicht in Kontakt mit dem Rohr. Dies wird durch einen größeren Abstand zwischen den beiden Profilrollen im Vergleich zum Biegekopf gewährleistet (Abbildung 1).

Nach dem Anfahren jeder diskreten Sollposition erfolgt eine präzise Geometrie-Messung, um den aktuellen Fehlervektor zwischen der Soll- und der Ist-Position zu bestimmen. Solange dieser Fehler innerhalb der definierten Toleranzgrenzen liegt, wird der reguläre Biegevorgang bis zum Erreichen der Zielgeometrie fortgesetzt.

Überschreitet der Geometriefehler die zulässige Toleranz, wird der Vorschub unmittelbar unterbrochen und die Maschine in einen kontrollierten Haltezustand versetzt. Die Nachbiegeeinheit greift nun aktiv in den Prozess ein. Da das Material an dieser Stelle bereits plastisch verformt wurde, muss die Auslenkung auf Basis eines Materialmodells und Messdaten so eingestellt werden, dass eine gewünschte Winkelkorrektur erreicht wird. Denkbar ist hierfür eine Gaußprozess-Regression zu verwenden, die mit jeder neuen Biegung das Materialmodell überarbeitet. Nach dem Korrektureingriff wird das Bauteil mechanisch entlastet, um den Einfluss der elastischen Rückfederung zu eliminieren. Erst im entlasteten Zustand erfolgt eine erneute Geometriemessung.

Dieser Zyklus wird iterativ durchlaufen, bis der gemessene Fehler wieder innerhalb des Toleranzschlachts liegt. Aufgrund der potenziellen Materialermüdung bei vielen Iterationen ist die Anzahl der Korrekturzyklen begrenzt. Nach erfolgreicher Korrektur kehrt das System in den Zustand des aktiven Vorschubs zurück, bis die vollständige Zielgeometrie erreicht ist.

Aktueller Stand des Versuchsaufbaus

Der derzeitige Versuchsaufbau umfasst eine 2D-Miniatur-Biegeanlage für 6-mm-Rohre, die auf einem Drei-Rollen-Schub-Biegekonzept mit reibungsminimierenden Profillaufrollen basiert. Der Vorschub und der Biegekopf sind auf Linearführungen montiert. Die Steuerung mittels G-Code erfolgt über einen Raspberry Pi 5 in Kombination mit einer Mesa-Karte und zwei BLDC-Motoren, während ein Polaris-Vicra 3D-Kamerasystem der Firma „Northern Digital Inc“ das optische Tracking der Werkstückgeometrie übernimmt. Diese hat eine Bildwiederholrate von 20 Hertz bei einem RMS-Fehler von circa 0,25 Millimetern. Die in Abbildung 3 weißen Komponenten der Maschine sind zur schnellen Iteration im 3D-Druck gefertigt. Die Nachbiegekinematik ist noch nicht vorhanden. Der aktuelle Prototyp dient dazu, eine robuste Geometriemessung zu entwickeln. Dazu sind drei Trackerobjekte mit jeweils vier Markern an der Maschine angebracht. Der Tracker an der festen Führung dient als Referenz, während der am Ende des Rohres die Geometrie über den Verlauf der Biegung erfasst. Der am Biegekopf befestigte Tracker wird zur Kalibrierung des Kopfes verwendet und kann als weiterer Datenpunkt zur genaueren Berechnung der Ist-Geometrie herangezogen werden.

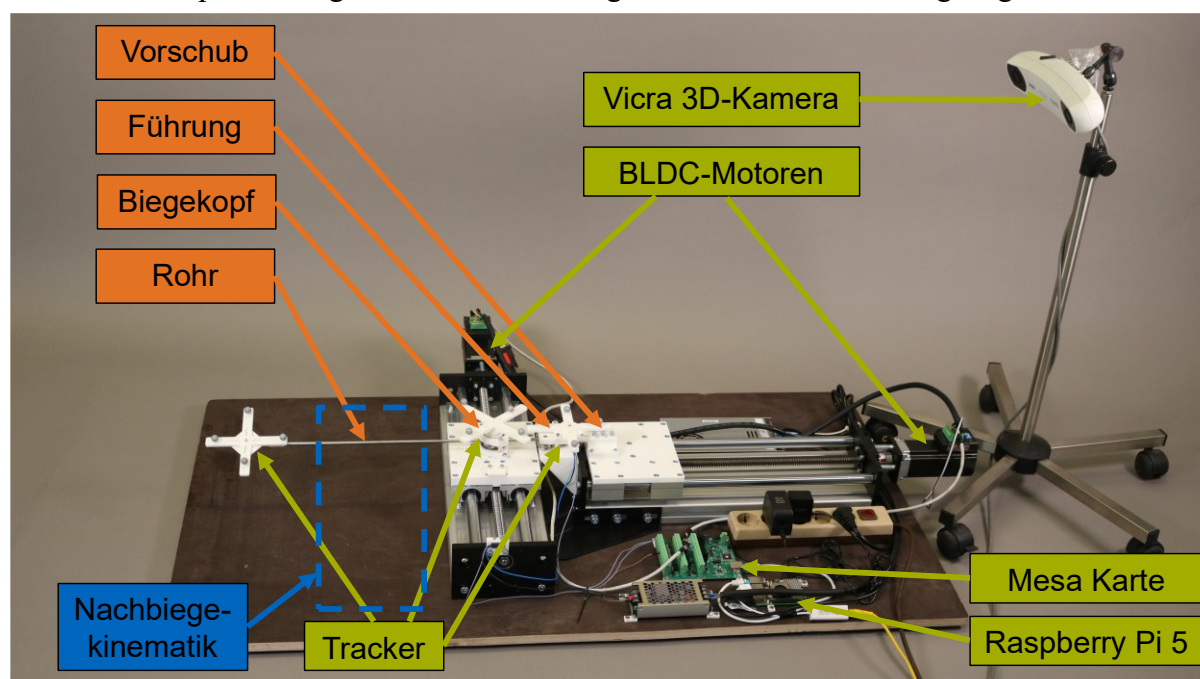


Abbildung 3: Aktuelle Umsetzung der Biegemaschine, bestehend aus einem Vorschub, einem Biegekopf, zwei angesteuerten Linearachsen und einem Sensorsystem basierend auf einer Vicra 3D-Kamera, die drei Trackerobjekte lokalisiert. Im blau gestrichelten Bereich ist die Nachbiegekinematik vorgesehen.

Ausblick

In der nächsten Projektphase soll die Nachbiegekinematik eingebunden werden, die sich im Abbildung 3 links des primären Biegekopfes befinden wird. Diese soll zunächst parallel zum Biegekopf durch eine zweite angetriebene Linearachse realisiert werden. Um den regulären Biegeprozess nicht zu beeinflussen, werden die Profillaufrollen des Nachbiegekopfes mit erhöhtem Spiel konstruiert, sodass sie das Rohr nur bei einer aktiven Korrekturmaßnahme berühren. Die Rohrdurchbiegung durch ihr Eigengewicht muss aus den Sensordaten gefiltert werden, und V-förmige Profilrollen sollen das schwerkraftbelastete Rohr in der Biegeebene zentrieren. Später kann die Nachbiegekinematik als um den Biegekopf rotierender Hebel konstruiert werden, um einen erweiterten Arbeitsraum zu realisieren.

Geprüft werden muss, wie gezielt das bereits plastifizierte Rohr nachgebogen werden kann und ob sich die Maschine so anhalten lässt, dass der zu korrigierende Fehler sich an der

richtigen Position befindet. Außerdem sollen die Messergebnisse der 3D-Kamera ausgewertet und mit alternativen Messmethoden verglichen werden. Denkbar sind Kameras, Beschleunigungssensoren oder Positionstaster, um die Rohrgeometrie zu messen.

Danksagung

Der vorliegende Beitrag stellt einen Auszug aus den Arbeiten eines Forschungsprojekts dar, das von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) unter der Projektnummer 538527325 gefördert wird.

Literaturverzeichnis

- [1] Scandola, Lorenzo (2025): Free-Form Bending: From Process Design to Quality Monitoring. Technische Universität München. Available online at <https://mediatum.ub.tum.de/1760289>.
- [2] Borchmann, Linda (2021): Regelung des Werkstoffflusses zur Erhöhung der Bauteilqualität beim Rotationszugbiegen. Dissertation. Universität Siegen.
- [3] Verein Deutscher Ingenieure (VDI) (2014). Richtlinie 3430: Rotationszugbiegen von Profilen. Düsseldorf: VDI-Verlag.
- [4] Vipavc, Daniel (2018): Eine Simulationsmethode für das 3-Rollen-Schubbiegen. Dissertation. Friedrich-Alexander-Universität Erlangen.
- [5] Murata, Makoto; Ohashi, Nobuhito; Suzuki, Hideo (1989): New flexible penetration bending of a tube. (1st Report, A study of MOS bending method). In Trans.JSME, Ser.C 55 (517), pp. 2488–2492. DOI: 10.1299/kikaic.55.2488.
- [6] Chatti, Sami; Hermes, M.; Tekkaya, A. Erman; Kleiner, Matthias (2010): The new TSS bending process: 3D bending of profiles with arbitrary cross-sections. In CIRP Annals 59 (1), pp. 315–318. DOI: 10.1016/j.cirp.2010.03.017.
- [7] Fraunhofer-Institut für Umformtechnik und Werkzeugmaschinen (2013): HexaBend - Freiformbiegen auf einer parallelkinematischen Biegemaschine : Verbundprojekt im Rahmenkonzept "KMU-Innovativ". Technische Informationsbibliothek u. Universitätsbibliothek. Chemnitz.
- [8] Nebeling, Daniel; Engel, Bernd (2023): Freiformabrollbiegen. Universitätsbibliothek Siegen.
- [9] Staupendahl, Daniel (2020): 3D Profile Bending with Five Controlled Degrees of Freedom. Dissertation. Technische Universität Dortmund.
- [10] Scandola, Lorenzo; Böhm, Viktor; Maier, Daniel; Tschannerl, Jeremias; Steinlehner, Florian; Hartmann, Christoph; Volk, Wolfram (2024): An inline point-tracking approach for the real-time monitoring of the free-form bending process. In Advances in Industrial and Manufacturing Engineering 9, p. 100150. DOI: 10.1016/j.aime.2024.100150.
- [11] Scandola, Lorenzo; Maier, Daniel; Meier, Johannes; Volk, Wolfram (2024): Inline Monitoring of the Geometry of Free-form Bent Components. In IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 1307 (1), p. 12036. DOI: 10.1088/1757-899X/1307/1/012036.
- [12] Ismail, Ahmed; Maier, Daniel; Stebner, Sophie; Münstermann, Sebastian; Volk, Wolfram; Lohmann, Boris (2023): Free-form Bending Control using Optimal Residual Strategies. In IFAC-PapersOnLine 56 (2), pp. 2671–2676. DOI: 10.1016/j.ifacol.2023.10.1358.
- [13] Allwood, J. M.; Duncan, S. R.; Cao, J.; Groche, P.; Hirt, G.; Kinsey, B. et al. (2016): Closed-loop control of product properties in metal forming. In CIRP Annals 65 (2), pp. 573–596. DOI: 10.1016/j.cirp.2016.06.002.