

Krümmungsmessung und Regelung mehrstufiger Prozesse beim Drei-Rollen-Biegen von Profilen

Vom Fachbereich Maschinenbau
an der Technischen Universität Darmstadt

zur

Erlangung des Grades eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte

Dissertation

von

Thomas Valentin Kessler

aus Würzburg

Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wirtsch.-Ing. P. Groche

Mitberichterstatter: Prof. Dr.-Ing. Bernd Engel

Tag der Einreichung: 19.12.2022

Tag der mündlichen Prüfung: 25.04.2023

Darmstadt 2023

D17

Kessler, Thomas Valentin: Krümmungsmessung und Regelung mehrstufiger
Prozesse beim Drei-Rollen-Biegen von Profilen

Darmstadt, Technische Universität Darmstadt,

Jahr der Veröffentlichung der Dissertation auf TUpriints: 2024

URN:nbn:de:tuda-tuprints-266186

Tag der mündlichen Prüfung: 25.04.2023

Veröffentlicht unter CC BY-SA 4.0 International

<https://creativecommons.org/licenses/>

Vorwort und Danksagung

Der Inhalt der vorliegenden Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Produktionstechnik und Umformmaschinen (PtU) der TU Darmstadt. Mein besonderer Dank gilt dem Institutsleiter Herrn Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wirtsch.-Ing. Peter Groche für diese Möglichkeit, die Übernahme des Erstgutachtens sowie das mir entgegengebrachte Vertrauen und die lehrreiche Zusammenarbeit. Vor allem die konstruktiven Rahmenbedingungen sowie die gewährten Freiräume bei der Forschungsarbeit haben mir hierbei zahlreiche Möglichkeiten eröffnet mich persönlich und beruflich weiterzuentwickeln. Ebenso danke ich dem Leiter des Lehrstuhls für Umformtechnik der Universität Siegen, Herrn Prof. Dr.-Ing. Bernd Engel, für die Übernahme des Korreferats.

Für die finanzielle Unterstützung während meiner Forschungsarbeit danke ich der Landes-Offensive zur Entwicklung wissenschaftlich-ökonomischer Exzellenz (LOEWE) des Landes Hessen sowie der Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen „Otto von Guericke“ (AiF). Weiterer Dank gilt den Projektpartnern TriLogiX und Herkules Wetzlar. Hierbei möchte ich mich besonders bei Herrn Joshua Pullich und Herrn Dr.-Ing Dominik Huttel bedanken.

Weiterhin gilt mein Dank allen Mitarbeitern und Mitarbeiterinnen des Instituts für den kollegialen Zusammenhalt und das konstruktive Arbeitsumfeld. Ein besonderer Dank gilt hierbei Julian Sinz, Matthias Moneke und Henning Husmann für die Freundschaft am Institut und im Privaten. Darüber hinaus bedanke ich mich bei Henning Husmann sowie Dominik Huttel für die Durchsicht meiner Arbeit. Auch danke ich all meinen Studierenden, die mich bei meiner Forschungstätigkeit unterstützt haben. Besonders hervorzuheben ist hierbei Herr Paul Winnewisser, dem ich überaus dankbar bin.

Von ganzem Herzen bedanke ich mich bei meinen Eltern Monika und Karl Heinz für den Rückhalt und die Unterstützung während meiner gesamten Ausbildung. Meiner Schwester Kathrin möchte ich für die stetige und bedingungslose Unterstützung in allen Lebenslagen danken. Ebenso gilt mein Dank ihrem Partner Marcel sowie meinen Nichten Marie und Nele. Ohne meine Familie und ihre Unterstützung wäre diese Arbeit nicht möglich gewesen.

Darmstadt, im Dezember 2022

Thomas Kessler

Kurzzusammenfassung

Krümmungsmessung und Regelung mehrstufiger Prozesse beim Drei-Rollen-Biegen von Profilen

Im Bereich des Profilbiegens stellen Freiformbiegeverfahren aufgrund ihrer nicht werkzeuggebundenen Formgebung die Verfahren mit der höchsten Flexibilität dar. Das Drei-Rollen-Biegen bietet hier aufgrund der Möglichkeit einer mehrstufigen Biegeumformung im Reversierbetrieb entscheidende Vorteile bei geringen Stückzahlen. Dies ermöglicht eine iterative Prozessführung, mit der bereits ab einer Losgröße von eins eine ausschussfreie Produktion ermöglicht werden kann. Die mehrstufige Prozessführung wirkt sich aufgrund der damit verbundenen Durchlaufzeiten jedoch nachteilig auf die Wirtschaftlichkeit der Prozesse aus. Ausschlaggebend sind hierbei vor allem die Prozessnebenzeiten zum in der Regel manuellen Messen der Profilkontur und Adaptieren des Prozesses. Ebenso ist aufgrund eines geringen Automatisierungsgrads oft ein hoher personeller Einsatz erforderlich, um durch das Adaptieren des Prozesses die gewünschte Qualität zu erzielen.

Um diese Nachteile zu kompensieren, dabei jedoch die vielfältigen Vorteile einer mehrstufigen Prozessführung zu erhalten, ist das Ziel der vorliegenden Arbeit die Entwicklung und Untersuchung von Krümmungsmesssystemen zur Reduktion der Prozessnebenzeiten sowie eines wirtschaftlichen und flexibel einsetzbaren Prozessregelungskonzepts für mehrstufige Drei-Rollen-Biegeprozesse bei geringen Losgrößen. Beides dient dem übergeordneten Ziel der Erhöhung des Automatisierungsgrads des Drei-Rollen-Biegens.

Als Grundlage für diese Entwicklungen wird im Rahmen der Arbeit das Krümmungs- und Rückfederungsverhalten in ein- und mehrstufigen Drei-Rollen-Biegeprozessen anhand numerischer Simulationen untersucht. Auf Basis der gewonnenen Erkenntnisse zum Rückfederungsverhalten wird dann ein Ansatz zur Prognose der Rückfederung in geregelten, mehrstufigen Drei-Rollen-Biegeprozessen entwickelt und in geregelten, numerischen Simulationen analysiert. Basis der Prognose bilden hierbei die aus zwei vorangegangenen Prozessstufen gewonnenen Daten zur Rückfederung des Profils. Zur Übertragung des Regelungskonzepts auf den realen Prozess werden zwei Messsysteme entwickelt, die eine Erfassung der zu regelnden Krümmungs- und Konturdaten

erlauben. Die Messunsicherheit beider Systeme wird dabei anhand der Krümmung entlasteter Profile untersucht und einer Analyse der Fehlereinflüsse unterzogen.

Der entwickelte Ansatz zur Prognose der Rückfederung kommt schließlich in einem Produkt Controller zum Einsatz, der auf einer Versuchsanlage implementiert wird und die Regelung der Krümmung unter Last bei mehrstufigen Prozessen erlaubt. Der Controller dient dabei der Prognose der Rückfederung und, darauf basierend, der Vorgabe des Sollwertes. Durch eine geeignete Wahl seiner Parameter kann zudem der Einfluss von Messunsicherheiten reduziert werden. In Prozessuntersuchungen wird abschließend gezeigt, dass die entwickelte Regelung die Fertigung gekrümmter Profile mit Abweichungen vom Sollradius des entlasteten Profils von weniger als 1,5 % ermöglicht.

Abstract

In the field of profile bending, free-form bending processes represent the processes with the highest flexibility due to their non-tool-bound forming. Here, three-roll bending offers decisive advantages for small quantities due to the possibility of multi-stage bending in reverse mode. This enables an iterative process guidance, with which a batch size as small as one can be produced without scrap. However, the multi-stage process guidance has a negative effect on the economic efficiency of the processes due to the associated processing times. Here, the decisive factors are the non-productive process times for measuring the profile contour, usually done manually, and adapting the process. Also, due to a low degree of automation, a high level of personnel expenditure is often required in order to achieve the desired quality by adapting the process.

In order to compensate for these disadvantages while retaining the manifold advantages of a multi-stage process guidance, the aim of the present work is to develop and investigate curvature measurement systems for reducing auxiliary process times and to create and validate an economical and flexibly applicable closed-loop process control concept for multi-stage three-roll bending processes with small batch sizes. Both serve the overall goal of increasing the degree of automation of three-roll bending.

As a basis for the developments, the curvature and spring-back behavior in single- and multi-stage three-roll bending processes is investigated in numerical simulations. Based on the knowledge gained on the spring-back behavior, an approach for its prediction in close-loop controlled multistage three-roll bending processes is developed and analyzed using close-loop controlled numerical simulations. The prediction is based on the data on the spring-back of the profile obtained from two process stages that have already been carried out. In order to transfer the control concept to the real process, two measuring systems are developed which allow the measurement of the curvature as well as the contour data. The measurement uncertainty of both systems is investi-

gated on the basis of the curvature of unloaded profiles and subjected to an analysis of the error influences.

The developed approach for predicting the spring-back is finally used in a product controller, which is implemented on a test machine and allows the closed-loop control of curvature under load in multi-stage processes. The controller is used to predict the spring-back and, based on this, to specify the target value for the next bending step. Furthermore, the influence of measurement uncertainties can be reduced by a suitable choice of its parameters. Finally, process investigations show that the developed control system enables the production of curved profiles with deviations from the nominal radius of the unloaded profile of less than 1.5 %.

Inhaltsverzeichnis

| | |
|---|-----------|
| Inhaltsverzeichnis | I |
| Formelzeichen und Abkürzungen | V |
| 1 Einleitung | 1 |
| 2 Stand der Technik | 5 |
| 2.1 Anwendungsgebiete gebogener Profile | 5 |
| 2.2 Profilhalbzeuge..... | 9 |
| 2.2.1 Kategorisierung von Profilhalbzeugen | 9 |
| 2.2.2 Eigenschaften von Profilhalbzeugen..... | 10 |
| 2.3 Profilbiegeverfahren | 12 |
| 2.3.1 Versagensfälle, Fertigungsgenauigkeit und Bauteilqualität | 13 |
| 2.3.2 Einteilung der Profilbiegeverfahren..... | 14 |
| 2.4 Drei-Rollen-Biegen | 17 |
| 2.4.1 Einflussgrößen beim Drei-Rollen-Profilbiegen | 19 |
| 2.4.2 Berechnungsansätze | 21 |
| 2.4.3 Prozessautomatisierung und –regelung | 25 |
| 2.5 Krümmungs- und Konturmessung beim Profilbiegen..... | 31 |
| 2.6 Fazit..... | 36 |
| 3 Motivation, Zielsetzung und Vorgehensweise | 37 |
| 4 Versuchsanlage und –material | 41 |
| 4.1 Drei-Rollen-Biegemaschine..... | 41 |
| 4.2 Numerisches Grundmodell des Drei-Rollen-Biegeprozesses | 42 |
| 5 Numerische Untersuchung des Drei-Rollen-Biegens | 47 |
| 5.1 Analyse des Krümmungsverlaufs beim Drei-Rollen-Biegen..... | 48 |

| | | |
|----------|---|-----------|
| 5.1.1 | Untersuchung des Krümmungsmaximums beim Drei-Rollen-Biegen | 48 |
| 5.1.2 | Einfluss der Messbereichsgröße..... | 54 |
| 5.1.3 | Prozessverhalten und Charakteristika des Krümmungsverlaufs beim Drei-Rollenbiegen..... | 57 |
| 5.2 | Untersuchung des Rückfederungsverhaltens in ein- und mehrstufigen Drei-Rollen-Biegeprozessen..... | 60 |
| 5.3 | Prognose der Rückfederung in mehrstufigen Drei-Rollen-Biegeprozessen..... | 61 |
| 5.4 | Untersuchung der prognostizierten Rückfederung in einem geregelten Prozess..... | 65 |
| 5.4.1 | Implementierung der Regelung der Krümmung unter Last in der FE-Simulation..... | 65 |
| 5.4.2 | Untersuchung der Rückfederungsprognose..... | 67 |
| 5.5 | Erkenntnisse zur Krümmungsmessung beim Drei-Rollen-Biegen..... | 69 |
| 6 | Produkt Controller zur Regelung mehrstufiger Drei-Rollen-Biegeprozesse..... | 73 |
| 7 | Entwicklung von Krümmungsmesssystemen für das Drei Rollen-Biegen..... | 79 |
| 7.1 | Mobiles Krümmungsmessgerät..... | 79 |
| 7.1.1 | Aufbau und Funktionsweise..... | 79 |
| 7.1.2 | Messung und Berechnung der Profilkrümmung..... | 81 |
| 7.2 | Optisches Krümmungsmesssystem..... | 82 |
| 7.2.1 | Aufbau und Funktionsweise..... | 82 |
| 7.2.2 | Messung eines Konturabschnitts und Radiusberechnung..... | 83 |
| 7.3 | Untersuchung der Messgenauigkeiten..... | 84 |
| 7.3.1 | Analyse der Messergebnisse des mobilen Messgeräts..... | 87 |
| 7.3.2 | Analyse der Messergebnisse des optischen Messsystems..... | 93 |
| 7.4 | Anwendungspotential der entwickelten Messsysteme..... | 97 |

| | | |
|-----------|---|------------|
| 7.4.1 | Verbesserungsmöglichkeiten und Bewertung des Anwendungspotentials des mobilen Messgeräts | 98 |
| 7.4.2 | Verbesserungsmöglichkeiten und Bewertung des Anwendungspotentials des optischen Messsystems | 99 |
| 8 | Experimentelle Untersuchung der Regelung mehrstufiger Drei-Rollen-Biegeprozesse | 101 |
| 8.1 | Versuchsaufbau, -parameter und -durchführung | 101 |
| 8.1.1 | Messung und Online-Regelung der Krümmung unter Last | 101 |
| 8.1.2 | Versuchsdurchführung | 106 |
| 8.1.3 | Offline-Regelung durch den Produkt Controller | 107 |
| 8.2 | Experimentelle Untersuchung des entwickelten Produkt Controllers in mehrstufigen Prozessen | 108 |
| 9 | Zusammenfassung und Ausblick | 115 |
| 10 | Anhang | 118 |
| 10.1 | Abgleich des numerischen Modells mit Experimenten | 118 |
| 10.2 | Durchgeführte Prozesssimulationen | 119 |
| 10.3 | Ergebnisse der Untersuchung der Messgenauigkeit der entwickelten Messsysteme | 120 |
| 10.4 | Praxisbeispiel eines mehrstufigen Drei-Rollen-Biegeprozesses | 121 |
| 11 | Literaturverzeichnis | 123 |

Formelzeichen und Abkürzungen

Formelzeichen, lateinische Buchstaben

| Zeichen | Einheit | Bedeutung |
|-----------------------------|----------------------|---|
| A | [mm ²] | Querschnittsfläche des Profils |
| b | [mm] | Bogenlänge |
| b _k | [mm] | Breite eines erfassten Konturabschnitts |
| b _{konf} | [mm] | Breite des Konfidenzbereichs |
| b _m | [mm] | Breite des Messbereichs |
| E | [N/mm ²] | Elastizitätsmodul |
| F _{x,A} | [N] | x-Komponente der Kraft im Kontaktpunkt A |
| F _{x,B} | [N] | x-Komponente der Kraft im Kontaktpunkt B |
| F _{x,C} | [N] | x-Komponente der Kraft im Kontaktpunkt C |
| F _{y,A} | [N] | y-Komponente der Kraft im Kontaktpunkt A |
| F _{y,B} | [N] | y-Komponente der Kraft im Kontaktpunkt B |
| F _{y,C} | [N] | y-Komponente der Kraft im Kontaktpunkt C |
| k | [1/mm] | Krümmung |
| k ₀ | [1/mm] | Ausgangskrümmung in mehrstufigen Prozessen |
| k _b | [1/mm] | bleibende Krümmung nach Biegung |
| k _e | [1/mm] | Krümmung des entlasteten Profils |
| k _{Kontaktpunkt A} | [1/mm] | Krümmung im Kontaktpunkt A |
| k _{Kontaktpunkt B} | [1/mm] | Krümmung im Kontaktpunkt B |
| k _{Kontaktpunkt C} | [1/mm] | Krümmung im Kontaktpunkt C |
| k _l | [1/mm] | berechnete Krümmung unter Last |
| k _m | [1/mm] | Krümmungsmaximum unter Last |
| m | [-] | Steigung der Extrapolationsgeraden |
| M ₁ | [Nm] | Ersatzmoment im Lagerpunkt A |
| M ₂ | [Nm] | Ersatzmoment im Lagerpunkt C |
| M _b | [Nm] | Biegemoment |
| M _{Max} | [Nm] | maximales Biegemoment |
| q | [-] | Faktor zur Reduzierung des Stützpunktabstands |
| R | [mm] | Radius |
| R _e | [mm] | Radius des entlasteten Profils |
| R _{e,prog} | [mm] | prognostizierter Radius des entlasteten Profils |

| | | |
|-------------------------------|----------------------|---|
| $R_{e,soll}$ | [mm] | Soll-Radius des entlasteten Profils |
| R_{ist} | [mm] | vorliegender Ist-Radius |
| R_l | [mm] | Radius unter Last |
| R_m | [N/mm ²] | Zugfestigkeit |
| $R_{p0,2}$ | [N/mm ²] | 0,2%-Dehngrenze |
| R_{pl} | [mm] | prognostizierter Radius unter Last |
| R_{soll} | [mm] | Soll-Radius |
| s | [mm] | Stützpunktabstand |
| s_1 | [mm] | Stützpunktabstand zwischen bestehenden Datenpunkten |
| s_2 | [mm] | Stützpunktabstand zwischen bestehendem Datenpunkt und Ziel-Radius |
| s_{red} | [mm] | reduzierter Stützpunktabstand |
| t | [s] | Zeit |
| $v_{\text{Kontaktpunkt A}}$ | [mm/s] | Oberflächengeschwindigkeit des Profils im Kontaktpunkt A |
| $v_{\text{Kontaktpunkt B}}$ | [mm/s] | Oberflächengeschwindigkeit des Profils im Kontaktpunkt B |
| $v_{\text{Kontaktpunkt C}}$ | [mm/s] | Oberflächengeschwindigkeit des Profils im Kontaktpunkt C |
| $v_{neutral}$ | [mm/s] | mittlere Geschwindigkeit der neutralen Faser des Profils |
| $v_{\text{Oberfläche Rolle}}$ | [mm/s] | Oberflächengeschwindigkeit der Rolle |
| w | [-] | Faktor zur Definition der Breite des Konfidenzbereichs |

Formelzeichen, griechische Buchstaben

| Zeichen | Einheit | Bedeutung |
|------------------|----------------------|------------------------|
| θ_1 | [rad] | Tangentenwinkel |
| $\dot{\theta}_1$ | [rad/s] | Winkelgeschwindigkeit |
| σ_e | [N/mm ²] | Hauptspannung |
| σ_r | [N/mm ²] | Radiale Spannung |
| θ | [°] | Winkel |
| σ_x | [N/mm ²] | Spannung in x-Richtung |
| ε_x | [-] | Dehnung in x-Richtung |

Abkürzungen

| Abkürzung | Bedeutung |
|------------------|---|
| 2D | zweidimensional |
| 3D | dreidimensional |
| AiF | Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen |
| ber | berechnet |
| bspw. | beispielsweise |
| bzw. | beziehungsweise |
| ca. | circa |
| CAD | Computer-Aided-Design |
| DIN | Deutsches Institut für Normung |
| e | Regeldifferenz |
| et al. | et alii, und andere |
| etc. | et cetera |
| FE | Finite-Elemente |
| FEM | Finite-Elemente-Methode |
| gem | gemessen |
| ISO | International Organization for Standardization, Internationale Organisation für Normung |
| LOEWE | Landes-Offensive zur Entwicklung wissenschaftlich-ökonomischer Exzellenz |
| MEMS | Microelectromechanical systems |
| Nr. | Nummer |
| prog | prognostiziert |
| u | Stellgröße |
| vgl. | vergleiche |

1 Einleitung

Die fortwährende Corona-Pandemie und die Auswirkungen des Ukraine-Kriegs beeinflussen die industrielle Produktion nachhaltig. Vor allem der Produktionsstandort Deutschland ist hierbei durch die gestiegenen Energiekosten gefährdet [DAM22]. Die Zerrüttung von Lieferketten und des internationalen Warenverkehrs konfrontiert Unternehmen zudem aufgrund mangelnder Verfügbarkeiten und erheblicher Preissteigerungen von Roh- und Fertigungsmaterialien mit der Herausforderung, Lieferverpflichtungen zu erfüllen und die Wirtschaftlichkeit der Produktion zu wahren [SCH22]. Infolge der Krisen sind neben den Beschaffungsmärkten auch die Absatzmärkte von einer gestiegenen Volatilität und Unsicherheit geprägt. Dies reicht von sinkenden Stückzahlen, schnell wechselnden Kundenanforderungen bis hin zum Wegbrechen von Kunden und ganzen Märkten [KNE20].

Vor dem Hintergrund der beschriebenen Herausforderungen werden neben der Forderung nach einer Eindämmung der Energiekosten [DAM22], Forderungen nach einer Erhöhung der Resilienz der industriellen Produktion erneuert und bekräftigt [BOR22, BUN22, GRO20, KNE20, WAG20]. Resilienz ist in diesem Kontext die Fähigkeit, trotz Störungen und Einschränkungen, die Effizienz sowie eine Mindestleistungs- und -lieferfähigkeit zu erhalten sowie Einschränkungen schnell wieder zu beseitigen [GRO20, KNE20].

Auf der Prozess- und Anlagenebene gilt es hierbei die notwendige Flexibilität zu gewährleisten und zu steigern. Nyhuis et al. definieren die Flexibilität eines Produktionssystems als die Fähigkeit, dieses schnell mit einem geringen Aufwand an zu erwartende Veränderungen innerhalb einer vorab starr festgelegten Bandbreite anzupassen [NYH08a, NYH08b]. Veränderungen können hierbei etwa Schwankungen der Stückzahlen oder zu produzierende Produktvarianten sein. Yang et al. definieren speziell für die Umformtechnik Kriterien zur Klassifizierung und Steigerung der Flexibilität von Umformprozessen [YAN18]. Diese sind

- die technische und wirtschaftliche Realisierbarkeit und Herstellung geringer Stückzahlen,
- die Komplexität der herstellbaren Produktformen,
- die Freiheitsgrade der Werkzeugbewegungen und
- die Variation physischer Prozess- und Produktparameter (z.B. Material, Geometrie, Temperatur).

Im Bereich des Profilbiegens stellen Freiformbiegeverfahren aufgrund ihrer nicht werkzeuggebundenen Formgebung die Verfahren mit der höchsten Flexibilität dar. Industriell etablierte Verfahren sind hierbei das Druckbiegen mit beweglicher Matrize [GAN05, NEU01], das Drei-Rollen-Schubbiegen [ENG11, VAT14] und das Drei-Rollen-Biegen [CHA97, DIR08]. Während die hohe Flexibilität des Druckbiegens mit beweglicher Matrize durch die Freiheitsgrade des Werkzeugs und die Komplexität der produzierbaren 3D-Formen geprägt ist, ist eine wirtschaftliche Realisierbarkeit geringer Stückzahlen aufgrund hoher Werkzeugkosten oftmals nicht möglich. Aufgrund der einstufigen Umformung dieses Prozesses erfolgt die Ermittlung der Prozessparameter, ebenso wie beim Drei-Rollen-Schubbiegen, experimentell und ist in der Regel mit einigem Ausschuss verbunden. Dies kann die Wirtschaftlichkeit beider Verfahren bei geringen Stückzahlen stark beeinträchtigen.

Das Drei-Rollen-Biegen bietet hier aufgrund der Möglichkeit einer mehrstufigen Biegeumformung im Reversierbetrieb entscheidende Vorteile bei geringen Stückzahlen. So ermöglicht die Mehrstufigkeit eine iterative Prozessführung, mit der bereits ab einer Losgröße von eins, eine ausschussfreie Produktion ermöglicht werden kann. Ebenfalls können hierdurch Schwankungen der Halbzeugeigenschaften kompensiert und ein breiteres Halbzeugspektrum verarbeitet werden. Die mehrstufige Prozessführung wirkt sich aufgrund der damit verbundenen Durchlaufzeiten jedoch nachteilig auf die Wirtschaftlichkeit der Prozesse aus. Ausschlaggebend sind hierbei vor allem die Prozessnebenzeiten zum in der Regel manuellen Messen der Profilkontur und Adaptieren des Prozesses. Ebenso ist aufgrund eines geringen Automatisierungsgrads oft ein hoher personeller Einsatz erforderlich, um durch das Adaptieren des Prozesses die gewünschte Qualität zu erzielen.

Um diese Nachteile für die industrielle Praxis zu kompensieren, dabei jedoch die vielfältigen Vorteile einer mehrstufigen Prozessführung zu erhalten, wird in der vorliegenden Arbeit eine Prozessregelung für mehrstufige Drei-Rollen-Biegeprozesse vorgestellt und untersucht. Um die hierzu erforderliche Datenerhebung in einem wirtschaftlich verträglichem Maß sicherzustellen und eine gesteigerte Prozessflexibilität nicht zu Lasten einer personalaufwendigen Datenerfassung zu realisieren, werden ebenfalls die notwendigen Messsysteme zur wirtschaftlichen Erfassung der Profilkrümmung entwickelt und untersucht.

2 Stand der Technik

Um einen Überblick über die eingangs behandelten Themen zu geben, werden nachfolgend die Grundlagen kinematischer Profilbiegeverfahren, insbesondere die des Drei-Rollen-Profilbiegens erläutert. Weiterführend wird auf gängige Profilhalbzeuge, vorherrschende industrielle Toleranzen sowie die Automatisierung und Regelung von DRPB-Prozessen eingegangen.

2.1 Anwendungsgebiete gebogener Profile

Gebogene Profile haben ein breites Anwendungsspektrum, das sich über eine Vielzahl von Anwendungsbereichen und Branchen erstreckt und von einfachen zweidimensionalen bis hin zu komplexen dreidimensionalen Biegekonturen reicht (Abbildung 1).



Abbildung 1 Beispiele für Anwendungsgebiete gebogener Profile

Nach [CHA97] sind die Hauptanwendungsbereiche gebogener Profile das Bauwesen, Verkehrssysteme, der Maschinen- und Apparatebau sowie Hebe- und Förderanlagen. Die stetige Neu- und Weiterentwicklung von Profilbiegeverfahren [GAN07, MÜL07] sowie Innovationen in der Halbzeugherstellung [GRO18b, NEB21, TAP16] ermöglichen dabei zunehmend neue Formge-

bungsmöglichkeiten, welche zu einem dynamisch wachsenden Anwendungsspektrum beitragen.

Der Einsatz gebogener Profile ermöglicht die Realisierung von Strukturen mit hoher Steifigkeit, die zusätzlich eine hohe Funktionalität aufweisen können [HER12]. Integrierbare Funktionen gebogener Profile können dabei unter anderem die Folgenden sein:

- Leitungsfunktion (materiell, elektrisch)
- Führungsfunktion
- Übertragungsfunktion (Leistung, Momente)

Im Bereich des Bauwesens und der Architektur ermöglichen die frei herstellbaren Formen gebogener Profile eine individuelle Gestaltung von Konstruktionen sowie die Realisierung von leistungsfähigen Tragstrukturen (Abbildung 2). So führte die Nutzung gekrümmter Träger in Stahlbogenbrücken des 19. Jahrhunderts zur Realisierung stetig steigender Spannweiten. Abbildung 2 a) zeigt ein solches Bauwerk am Beispiel der in Porto (Portugal) errichteten Ponte Dom Luis I mit einer Spannweite von 172 m [TRA18].

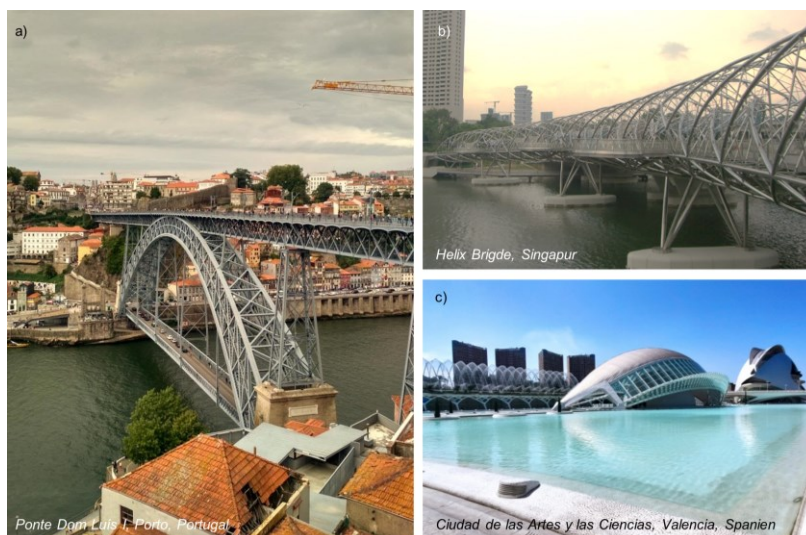


Abbildung 2 Gebogene Profile im Bauwesen und der Architektur

Beim Bau der Helix Bridge (Singapur, siehe Abbildung 2 b)) und des L'Hemisferic in der Ciudad de las Artes y las Ciencias (Valencia, Spanien, siehe Abbildung 2 c)) trugen die Formgebungsmöglichkeiten gebogener Profile zur Umsetzung eines von der Natur inspirierten Designs bei. Hierbei wurde die

Gestaltung der Helix Bridge von der schraubenförmigen Anordnung von DNA und das L'Hemisferic vom menschlichen Auge inspiriert [DOM01, MIC17]. Des Weiteren kommen gebogene Profile in Leichtbautragwerken und dem Fassadenbau zum Einsatz. Ein Beispiel hierfür ist die Membranbauweise der Allianzarena in München, deren 2.784 Luftkissen von dünnwandigen, gebogenen Aluminiumprofilen in Form gehalten werden [ALL22, ALU22, GEN05].

Auch in Verkehrssystemen ist nach Chatti der Einsatz von Profilen, die als Wegbereiter für Leichtbaukonstruktionen zu sehen sind, nicht mehr wegzudenken [CHA04]. Hier bietet der Einsatz gebogener Profile zusätzliche Vorteile in Bezug auf die Gestaltung von aerodynamischen Formen sowie ressourcen- und raumsparenden Designs [HER08]. Ebenso lassen sich durch den Einsatz gebogener Profile Fügestellen reduzieren und so Produktionskosten senken [ENG10].

Im Automotive Sektor ist eines der bekanntesten Beispiele für den Einsatz gebogener Profile die Audi Space Frame (ASF) Technologie im Karosseriebau (siehe Abbildung 3). In der ursprünglichen Form des ASF (erste Audi A8-Generation) bildeten Aluminium-Strangpressprofile und –Druckgussteile ein Fachwerk, das durch Aluminiumbleche ausgesteift wurde. Im Vergleich zur konventionellen Stahlbauweise konnte hierbei eine Gewichtsersparnis von mehr als 40% realisiert werden [LUN17].

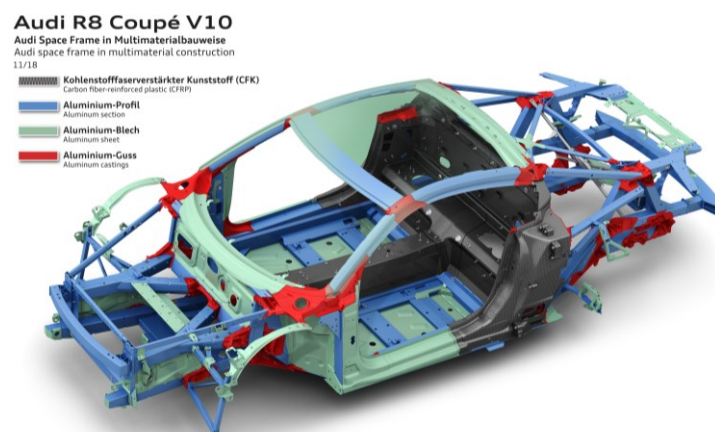


Abbildung 3 Audi Space Frame in Multimaterialbauweise [AUD19]

Im Flugzeugbau, zum Beispiel beim Airbus A380, kommen gebogene Profile aus Aluminium als Spanten im Flugzeugrumpf zum Einsatz [DIR04].

Aber auch bei Schienenfahrzeugen in Differenzialbauweise, wie z.B. dem Triebkopf des ICE 3, tragen gekrümmte Profile bei der Formgestaltung zur Umsetzung hoher aerodynamischer Anforderungen bei [KLA02].

Neben reinen Tragaufgaben in strukturellen Anwendungen werden gebogene Profile oftmals auch zur weiterführenden Funktionserfüllung eingesetzt (vgl. Abbildung 4). So übernehmen gebogene Schienen auch Führungsaufgaben in Förder- und Führungssystemen und tragen dabei zu einer optimalen Nutzung der räumlichen Gegebenheiten bei [HER12]. Anwendungsgebiete sind hierbei z. B. die innerbetriebliche Logistik und die Bühnentechnik. In der Verfahrenstechnik kommen aus gebogenen Rohren hergestellte Wendelrohrapparate zur Beeinflussung der Verweilzeit in chemischen Reaktionen zum Einsatz [KOC20]. Weitere Anwendungen von gebogenen Profilwendeln sind Induktionsspulen und Wärmeübertrager.

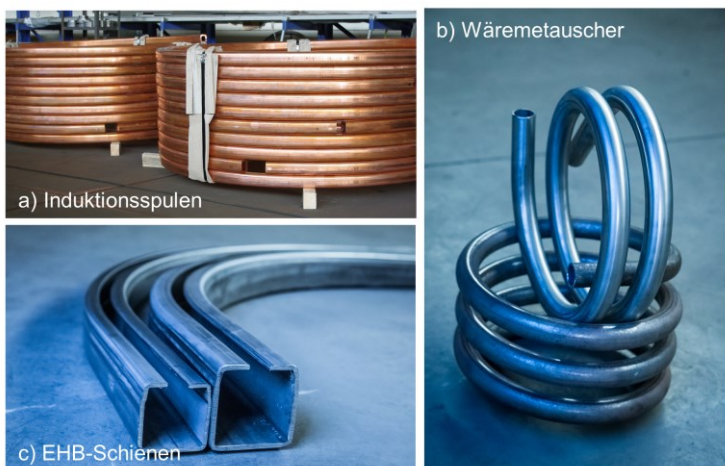


Abbildung 4 Beispiele für funktionelle Anwendungen gebogener Profile [HER22b]

Aufgrund dieses diversen Anwendungsspektrums gebogener Profile ergeben sich typische Produktstückzahlen, die von Einzelanfertigungen bis hin zu Großserien reichen. Die Abmessungen der Bauteile reichen hierbei von wenigen Zentimetern bis hin zu Bauteilen mit einer abgewickelten Länge im zweistelligen Meterbereich.

2.2 Profilhalbzeuge

Je nach Anwendungsfall ergeben sich unterschiedlichste Anforderungen an die Geometrie und Eigenschaften des Ausgangshalbzeugs, die in einer nahezu unbegrenzten Vielfalt von Profilhalbzeugen resultieren.

2.2.1 Kategorisierung von Profilhalbzeugen

Die Vielfalt der auf dem Markt verfügbaren und technisch herstellbaren Profilhalbzeuge lässt sich anhand der Kategorien

- Querschnittsgeometrie,
- Herstellungsverfahren,
- eingesetztem Werkstoff und
- Nachbehandlung

differenzieren.

Bei der Querschnittsgeometrie wird zwischen offenen, geschlossenen und vollen Querschnittsformen sowie Sonderformen unterschieden. Einzelne Geometriemerkmale wie z. B. die Ausprägung der Kantengeometrie sind jedoch abhängig vom Herstellungsverfahren. So ist bei gezogenen Profilen eine scharfkantige Querschnittsgeometrie möglich, während bei walzprofilierten Profilen eine Kantenverrundung durch das Herstellungsverfahren vorgegeben ist. Ebenso kann eine Querschnittsgeometrie durch unterschiedliche Verfahren hergestellt werden. Auf dem Markt sind bspw. Rundrohre mit identischen Abmessungen sowohl als nahtlos gezogene Rohre als auch als längsnahtgeschweißte, walzprofilerte Rohre verfügbar. Darüber hinaus beeinflusst das Herstellungsverfahren die Profileigenschaften durch auftretende Gefügeveränderungen wie z. B. beim Spaltprofilieren [KAU13], Kaltverfestigung und ins Halbzeug eingebrachte Eigenspannungen wie z. B. beim Walzprofilieren [MON21]. Abbildung 5 gibt einen Überblick über die möglichen Profilherstellungsverfahren mit exemplarischen Querschnittsformen.




























| | Herstellungsverfahren | Warmwalzen | Warm-/Kaltwalzen | Ziehen | Gesenk- / Schwenkbiegen | Walzprofilieren | Spaltprofilieren | Strangpressen | Vorgefertigte Werkstücke |
|--------------------------|-----------------------|---|---|---|---|---|---|--|---|
| Profilquerschnittsgruppe | Offen |  |  |  |  |  |  |  |  |
| | Geschlossen | - | - |  |  |  |  |  |  |
| | Voll |  |  |  | - | - | - |  |  |
| | Sonderform |  |  |  |  |  |  |  |  |

Abbildung 5 Querschnittsformen in Abhängigkeit des Herstellungsverfahrens in Anlehnung an [FIN95]

Die beim Profilbiegen verarbeiteten Werkstoffe sind vor allem verschiedenste Stähle, Aluminium und Kupfer sowie deren Legierungen.

Nachbehandlungen von Profilhalbzeugen können Wärmebehandlungen wie das Spannungsarmglühen, Oberflächenbehandlungen wie das Strahlen oder Schleifen und andere mechanische Nachbearbeitungen wie z. B. das Schaben der Innennaht von längsgeschweißten Rohren sein.

2.2.2 Eigenschaften von Profilhalbzeugen

Der verwendete Werkstoff, das Herstellungsverfahren sowie ggf. die Nachbehandlung eines Profilhalbzeugs beeinflussen bei einer gegebenen Querschnittsgeometrie die Qualität des Halbzeugs und somit Profileigenschaften, die den Biegeprozess direkt beeinflussen. Tabelle 1 enthält die Profileigenschaften die nach [DIR08] einen maßgeblichen Einfluss haben.

Tabelle 1 Einflussparameter von Profilhalbzeugen auf den Biegeprozess

| Geometrie | Werkstoff | Eigenspannungen |
|---|---|--|
| <ul style="list-style-type: none"> ▪ Toleranzen der der Querschnittsgeometrie <ul style="list-style-type: none"> • Äußere Querschnittsabmessungen, Wandstärken, Schenkellängen • Konkavität bzw. Konvexität • Winkelhaltigkeit (z.B. bei Winkel- oder U-Profilen) ▪ Verwindung des Profils ▪ Geradheit des Profils | <ul style="list-style-type: none"> ▪ E- Modul ▪ Streckgrenze ▪ Verfestigungsverhalten ▪ Anisotropie | <p><i>z.B. durch über den Querschnitt inhomogen eingebrachte Längsdehnungen wie beim Walzprofilieren</i></p> |

Abweichungen der geometrischen Eigenschaften sowie Eigenspannungen eines Profils führen zu veränderten Spannungsverhältnissen im Profilquerschnitt während eines Biegeprozesses und können die Rückfederung sowie die Querschnittsdeformationen beeinflussen. Schwankungen der Werkstoffeigenschaften wie z. B. des Elastizitätsmoduls (E-Moduls) beeinflussen die elastische Rückfederung des Profils direkt und können bei gleichbleibenden Prozessparametern zu einer unterschiedlichen bleibenden Krümmung des Profils führen. Im Allgemeinen können derartige Schwankungen der Eigenschaften zwischen verschiedenen Chargen eines Profils, zwischen verschiedenen Profilen einer Charge sowie innerhalb eines Profils selbst auftreten. Die Schwankungen innerhalb eines Profils können dabei sowohl über dem Querschnitt als auch über der Länge des Profils auftreten. Zulässige Schwankungen der Eigenschaften von vielen Profilverfahren werden in Normen, welche die technischen Lieferbedingungen enthalten, oder individuell zwischen Halbbeugeherstellern und Kunden definiert. Ein Beispiel für eine Norm ist die DIN EN 10277:2018-09 [DEU18], welche die technischen Lieferbedingungen für Blankstahlerzeugnisse definiert. Tabelle 2 zeigt exemplarisch die Toleranzen zweier Profile des Werkstoffs S235JR.

Tabelle 2 Technische Lieferbedingung S235JR [DEU19b, DEU19a, DEU18]

| Herstellungsverfahren | Querschnittsabmessungen [mm] | Toleranz | $R_{p0,2}$ [Mpa] | R_m [Mpa] | Geradheit (zulässige Abweichung für Referenzlänge 1 m) [mm] |
|---|------------------------------|--------------------|------------------|-------------|---|
| Kaltgezogen oder wärmebehandelt und kaltgezogen | 30 x 30 | Toleranzklasse h11 | ≥ 260 | 390 bis 730 | $\leq 1,5$ |
| Warmgewalzt | 70 x 30 | ± 1 mm | ≥ 215 | 410 bis 560 | ≤ 4 |

Während für die geometrischen Profileigenschaften zulässige Toleranzen angegeben werden, werden für Werkstoffkennwerte wie die Dehngrenze $R_{p0,2}$ oder die Zugfestigkeit R_m nur Mindestwerte, die nicht unterschritten werden sollten, oder sehr grobe Bereiche angegeben. Die definierten oder ggf. vereinbarten Toleranzen, Grenzwerte und Wertebereiche der Halbbeuge differenzieren jedoch nicht, ob die Schwankungen innerhalb eines Profils oder zwischen verschiedenen Profilen des gleichen Halbbeugs auftreten. So kann beispiels-

weise die Steckgrenze innerhalb des Querschnitts von kalt gebogenen L- bzw. U-Profilen (Werkstoff 1.0570), bedingt durch die eingebrachte Kaltverfestigung in den Biegeanten Werte im Bereich 450-570 MPa bzw. 320-480 MPa annehmen [FUN83b, FUN83a]. Dirksen untersuchte für je drei verschiedene Profilhalbzeuge der Werkstoffe EN-AW 6060 und S235 JR die Schwankungen ausgewählter Profileigenschaften über der Länge eines Profils [DIR08]. Hierbei wies beispielsweise ein walzprofiliertes Vierkantprofil (30 x 15 x 2 mm, Werkstoff S235 JR) Abweichungen des E-Moduls von bis zu 7 % zum Mittelwert auf, während bei einem kaltgezogenen Flachprofil (20 x 5 mm, Werkstoff S235 JR) nur ca. 2 % Abweichung auftraten. Aufgrund der teils starken Variation der Abweichungen zwischen den untersuchten Profilen kommt Dirksen zu dem Schluss, dass diese auf die verfahrensspezifischen Eigenschaften der Herstellungsverfahren zurückzuführen sind [DIR08].

Die bei einem Profilhalbzeug auftretenden Schwankungen der Eigenschaften können die Qualität des Biegeergebnisses sowie die Wirtschaftlichkeit des jeweiligen Profilbiegeverfahrens erheblich beeinflussen. Treten bei einem Profil starke Schwankungen der Eigenschaften auf, so können die daraus resultierenden Schwankungen der Geometrie des gebogenen Bauteils je nach Biegeverfahren zu einer erhöhten Ausschussrate oder zu einem erhöhten Personaleinsatz führen. Der erhöhte Personaleinsatz zur Kompensation der Schwankungen der Halbzeugeigenschaften ist hierbei bedingt durch die Notwendigkeit regelmäßiger Qualitätsprüfung, Eingriffe in den Prozess und Adaption der Prozessparameter. Die Wahl des Halbzeugs kann daher die Auswahl des Biegeverfahrens beeinflussen.

2.3 Profilbiegeverfahren

Aufgrund des breiten Anwendungsspektrums gebogener Profile und Profilhalbzeuge und den damit verbundenen differenzierten Anforderungen an die Biegeumformung kommen unterschiedliche Profilbiegeverfahren mit teils spezieller Eignung zum Einsatz [HOF12]. So existieren Verfahren, die auf unterschiedliche Sonderfälle spezialisiert sind [DIR06]. Beispiele hierfür sind Biegeverfahren, die direkt mit dem Herstellungsprozess des Halbzeugs verknüpft sind [DRÖ07, KLA06, TAP16]. Neben dem Halbzeug sind die Komplexität der

zu biegender Kontur, die zu produzierenden Stückzahlen und die Anforderungen an die Qualität des Biegeergebnisses (z. B. Konturgenauigkeit oder zulässige Querschnittsdeformationen) entscheidende Faktoren für die Wahl eines Profilbiegeverfahrens.

2.3.1 Versagensfälle, Fertigungsgenauigkeit und Bauteilqualität

In Abhängigkeit der Anwendung von gebogenen Profilen ergeben sich spezielle Anforderungen an die Qualität eines Bauteils, welche die Wahl eines Profilbiegeverfahrens stark beeinflussen können. Während beispielsweise im Kraftwerksbau Rohrbauteile möglichst konstante Wanddicken aufweisen müssen, werden bei Sichtbauteilen im Automobilbau eine hohe Qualität der Profilloberfläche sowie eine hohe Maßhaltigkeit der gebogenen Kontur gefordert.

Vollertsen et al. definieren in [VOL99] Fehler in der Fertigungsgenauigkeit und Versagensfälle beim Biegen von stranggepressten Profilen. Diese sind jedoch auch für Halbzeuge zutreffend, die mit anderen Fertigungsverfahren hergestellt werden (Abbildung 6).






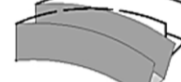


| | | | | |
|-----------------------|---|---|--|---|
| Versagensfälle |  |  |  |  |
| | Risse | Kollaps | Falten | Aufwölbe |
| Fertigungsgenauigkeit |  |  |  |  |
| | Lokale Krümmung | 3D-Konturabweichung | Querschnittsdeformation | Torsion |

Abbildung 6 Versagensfälle und Fehler in der Fertigungsgenauigkeit beim Profilbiegen nach [VOL99]

Mangels spezieller Standards und Normen für Profilbiegebauteile werden diese oft nach der DIN ISO 2768 bemaßt und abgenommen. In Anbetracht des Mangels eines Standards definieren Holstein und Hermes in [HOL17] vier Biegequalitätsklassen zur Bewertung der Eigenschaften von Profilbiegeteilen. Hierin werden die Profileigenschaften in den Hauptkategorien Biegekontur,

Querschnitt und Oberfläche unterteilt. Abweichend zu der von Vollertsen et al. vorgeschlagenen Definition von Falten als Versagensfall, sind diese hier in Abhängigkeit der Ausprägungsstärke als zulässig definiert. Ebenso werden die Wanddickenänderung am Innen- und Außenbogen von Profilen und Schäden an der Oberfläche als Qualitätsmerkmale aufgeführt. Hinsichtlich der Biegekontur sind für 2D-gebogene Bauteile und einfache 3D-Bauteile zulässige Konturabweichungen in Abhängigkeit der Biegegrundfläche definiert. Diese können zwar beispielsweise mit Schablonen bestimmt werden, jedoch ist die Prüfbarkeit stark abhängig von den verfügbaren Messmitteln und der Bauteilgröße. Unternehmen im Bereich des Profilbiegens definieren ihre Toleranzen daher oft auch in Abhängigkeit der verfügbaren Messmittel [HER22a]. Aufgrund der differenzierten Anforderungen an die Produkte sind meist individuelle Absprachen zwischen Kunde und Auftragnehmer erforderlich und die Bauteilqualität kundengerecht zu spezifizieren.

2.3.2 Einteilung der Profilbiegeverfahren

Während DIN 8586 Biegeverfahren nach geradliniger und drehender Werkzeugbewegung sowie dem Biegen mit Wirkenergie unterteilt [DEU03], definieren Vollertsen et al. in [VOL99] zwei weitere Kriterien zur Differenzierung von Profilbiegeverfahren. Dies ist zum einen die Unterscheidung anhand der im Prozess wirkenden Kräfte und Momente. Zum anderen wird zwischen kinematischen Verfahren mit einer nicht-werkzeuggebundenen Formgebung und Verfahren mit einer werkzeuggebundenen Formgebung unterschieden, wobei sich letztere für Profilbiegeverfahren etabliert hat [ARN99, CHA04, DIR08, STA21].

Verfahren mit werkzeuggebundener Formgebung

In der Gruppe der Verfahren mit werkzeuggebundener Formgebung sind das Streckbiegen, das Gesenkbiegen sowie das Rundbiegen wichtige Verfahren.

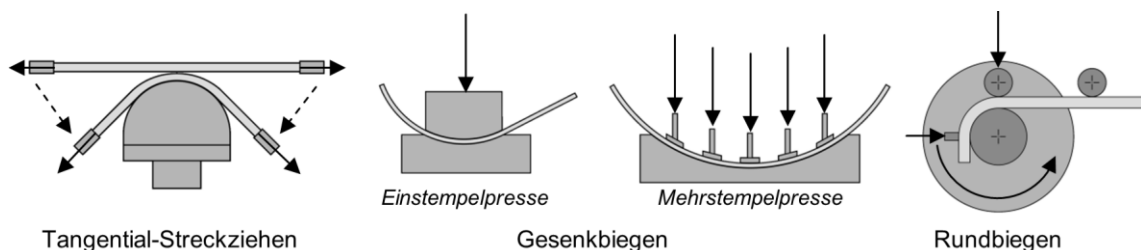


Abbildung 7 Profilbiegeverfahren mit werkzeuggebundener Formgebung [CHA04]

Verfahren mit werkzeuggebundener Formgebung sind aufgrund hoher Werkzeugkosten oft nur für große Stückzahlen wirtschaftlich einsetzbar und verfügen im Vergleich zu kinematischen Verfahren über eine geringe Flexibilität hinsichtlich der fertigbaren Konturen. Sie zeichnen sich durch eine sehr gute Führung des Profils während der Umformung aus, da die Biegekontur durch das Werkzeug vorgegeben wird. Vorteilhaft ist, dass durch die definierte Führung des Profils Querschnittsdeformationen minimiert werden können. Nachteilig ist, dass durch die starre Werkzeugform die Rückfederung bei der Werkzeuggestaltung berücksichtigt werden muss und Schwankungen der Halbzugeigenschaften diesbezüglich nur bedingt kompensiert werden können. Zusätzlich eingebrachte Zugbeanspruchungen, wie zum Beispiel beim Streckbiegen ermöglichen jedoch eine Reduzierung der Rückfederung, wodurch Fertigungsgenauigkeiten erzielt werden können, die durch kinematische Profilbiegeverfahren nur schwer erreichbar sind [HER12].

Das Streckbiegen findet aufgrund hoher Werkzeugkosten vor allem bei sehr großen Stückzahlen Anwendung, beispielsweise in der Automobilindustrie [HOF12]. Die wesentlichen Verfahrensvarianten sind das Tangentialstreckbiegen und das Abrollstreckbiegen. Streckbiegeverfahren zeichnen sich durch eine Überlagerung der Biegebeanspruchung des Profils mit einer Zugbeanspruchung aus. Hierdurch wird die Rückfederung signifikant reduziert und eine höhere Fertigungsgenauigkeit ermöglicht [SPR99]. Ebenso wird durch die eingebrachten Zugspannungen das Risiko möglicher Falten und Wellen im Druckbereich der Biegung reduziert [HOF12].

Das Gesenkbiegen von Profilen erfolgt in Abhängigkeit der Bauteillänge schrittweise oder auf der gesamten Länge der Matrize und wird beispielsweise zum Biegen von Spanten im Schiffbau eingesetzt [HOF12]. Es kommen sowohl Einstempel-, als auch Mehrstempelpressen zum Einsatz [ZOR70].

Für das Rundbiegen existieren verschiedene Verfahrensvarianten mit unterschiedlichen Anwendungsgebieten. Planscheiben-Biegemaschinen eignen sich beispielsweise besonders zum Biegen asymmetrischer Profile mit komplexen Querschnittsformen [ADE93]. Hierbei wird das Werkstück um einen sich drehenden Werkzeugkern, welcher an die Biegekontur des Profils unter Belastung angepasst ist, gebogen. Ein für das Biegen von Rohren bedeuten-

des Rundbiegeverfahren ist das Rotationszugbiegen mit Dorn, das auch als Dornbiegen oder Rohrbiegen bezeichnet wird. Der im Verfahren wirkende Formschluss zwischen Werkzeugen und Rohr ermöglicht unerwünschten Querschnittsänderungen entgegenzuwirken [ENG08]. Des Weiteren können kleine Biegeverhältnisse (Biegeradius / Rohraußendurchmesser ≤ 3) erzielt sowie große Wanddickenverhältnisse (Rohrdurchmesser / Rohrwanddicke ≥ 30) verarbeitet werden [DIR06].

Kinematische Verfahren mit nicht-werkzeuggebundener Formgebung

Kinematische Profilbiegeverfahren, die auch Freiformbiegeverfahren genannt werden, zeichnen sich durch eine Formgebung aus, die durch die relative Zu- stellung der Werkzeuge zueinander beeinflusst wird. Hierdurch kann im Ver- gleich zur werkzeuggebundenen Formgebung eine erhöhte Flexibilität erreicht werden. So kann die zu erzielende Profilkontur und –länge in einem weiten Bereich variiert werden sowie die Rückfederung des Profils durch eine Anpas- sung der Werkzeugzustellung kompensiert werden. Aufgrund der hohen Flexi- bilität kinematischer Profilbiegeverfahren werden diese in der Industrie oft für kleine Losgrößen eingesetzt [DIR08].

Bedeutende Freiformverfahren sind das Druckbiegen mit beweglicher Matrize, das Drei-Rollen-Schubbiegen und das Drei-Rollen-Biegen (Abbildung 8).

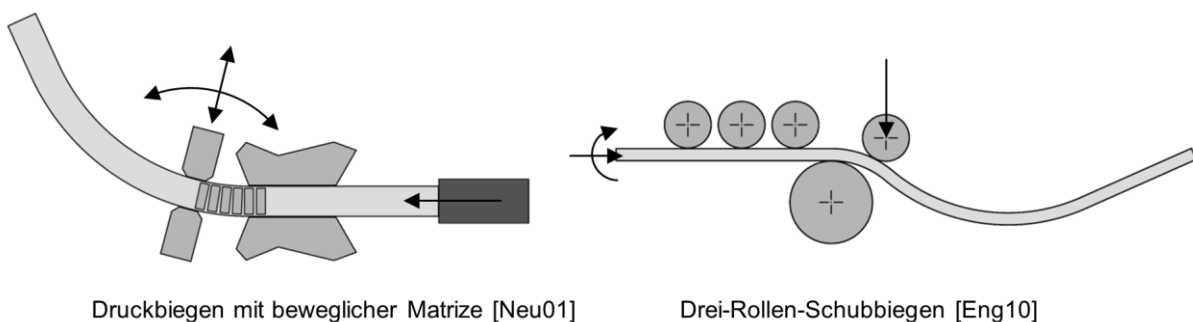


Abbildung 8 Kinematische Profilbiegeverfahren mit nicht-werkzeuggebundener Formgebung [Neu01,Eng10]

Druckbiegeverfahren mit beweglicher Matrize ermöglichen die Herstellung dreidimensionaler Profilkonturen mit hoher Komplexität. Das erste Verfahren dieser Art wurde 1989 von Murata für das Biegen von Rohren entwickelt [MUR90]. In der ursprünglichen Form des Verfahrens ist die Matrize sphärisch

im Biegekopf gelagert, der orthogonal zur Vorschubrichtung des Rohrs entlang zweier translatorischer Achsen bewegt werden kann. Der Vorschub des Rohrs erfolgt dabei über eine Vorschubstange, in die das Rohr eingespannt ist. Das Biegen kann mit und ohne Dorn durchgeführt werden. Weiterentwicklungen des Verfahrens mit bis zu sechs Freiheitsgraden des Biegekopfs können bei Rohren kleine Biegeverhältnisse (Biegeradius / Rohraußendurchmesser ≤ 2) erzielen [MM06]. Maschinen mit fünf und sechs Achsen verfügen darüber hinaus über zusätzliche rotatorische Achsen des Biegekopfs und ermöglichen hierdurch auch die Torsion von Profilen mit nicht-kreisförmigem Querschnitt [GAN07]. Die Bestimmung der Prozessparameter erfolgt bei diesen Prozessen in der Praxis vor dem eigentlichen Produzieren iterativ durch das Biegen und Messen mehrerer Profile [WER21].

Das Drei-Rollen-Schubbiegen (DRSB) ist ein bedeutendes Verfahren zum Rohrbiegen von zwei- und dreidimensionalen Biegegeometrien. Auch bei diesem Verfahren erfolgt der Vorschub des Profils über eine Schubstange. Das Profil wird um eine stationäre Biegerolle durch eine relative Zustellung der Umformrolle gebogen. Die Biegung kann mit und ohne Dorn durchgeführt werden. Zur Realisierung von räumlichen Biegegeometrien kann bei rotationssymmetrischen Profilen durch eine Rotation der Vorschubstange die Biegung mit einer Torsion überlagert werden [KER13]. Das Biegen von 2D-Konturen von Profilen mit nicht-kreisrundem Querschnitt ist ebenfalls möglich und wird von Gerlach in [GER10] untersucht.

2.4 Drei-Rollen-Biegen

Das Drei-Rollen-Biegen ist ein universell einsetzbares Verfahren zum Biegen von Profilen [CHA99, CHA03b]. Durch die vergleichsweise niedrigen Maschinenkosten ist es eines der am weitesten verbreiteten Maschinenkonzepte [CHA04]. Durch die Möglichkeit zur Verarbeitung unterschiedlicher Profilhalbzeuge und die Erreichbarkeit unterschiedlicher Biegeradien mit einem einzigen Rollensatz ergibt sich eine hohe Flexibilität. Grundlage hierfür ist ein funktio-neller Zusammenhang zwischen Biegeradius und Biegerollenposition [CHA97].

Bestehende Maschinenvarianten unterscheiden sich durch

- eine symmetrische oder asymmetrische Rollenordnung,
- die Lage der Arbeitsebene (horizontal oder vertikal),
- die Anzahl der zustellbaren Rollen,
- die Zustellrichtung und
- die Anzahl der angetriebenen Rollen.

Im Rahmen dieser Arbeit werden Drei-Rollen-Biegemaschinen mit einer symmetrischen Rollenordnung, drei rotatorisch angetriebenen Rollen, und einer einzelnen Zustellrolle behandelt (Abbildung 9).

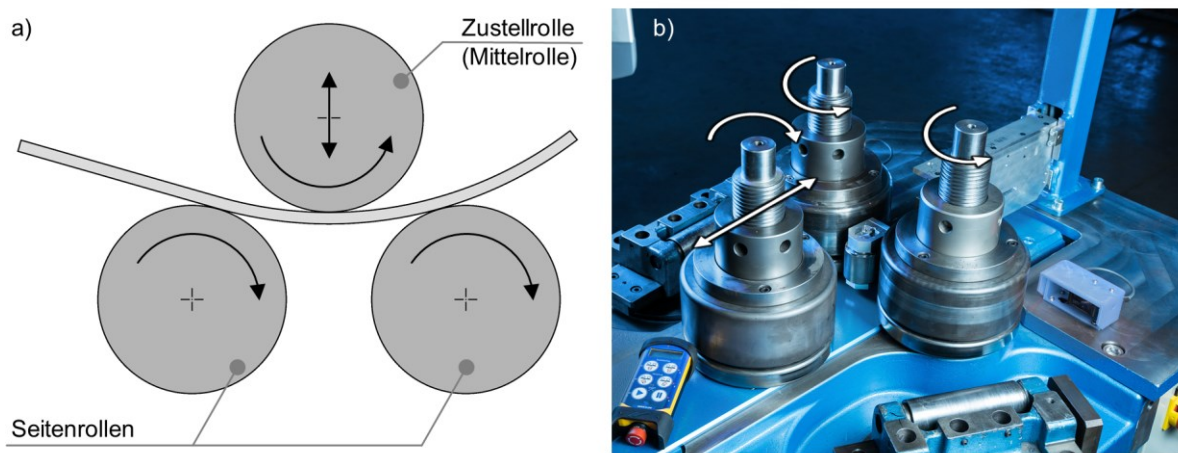


Abbildung 9 Drei-Rollen-Biegen: a) Verfahrensprinzip, b) Biegemaschine BO229 mit Universalrollensatz [HER22b]

Die Prozessführung erfolgt in der Industrie sowohl CNC- als auch manuell gesteuert. Vor allem bei komplexeren Biegegeometrien wie Ellipsen oder Klothoiden und der Kompensation von Materialschwankungen über der Länge eines Profils können das Fachwissen und die Erfahrung der Mitarbeiter ausschlaggebend sein. In Abhängigkeit der Stückzahl und Halbzeuggüte kann die Prozessführung einstufig oder mehrstufig durchgeführt werden. So können bei großen Stückzahlen und geringen Schwankungen der Halbzeugeigenschaften die Prozessparameter vor der eigentlichen Produktion durch Biegeversuche ermittelt und anschließend die Profile in einer einstufigen Biegung umgeformt werden (Abbildung 10).

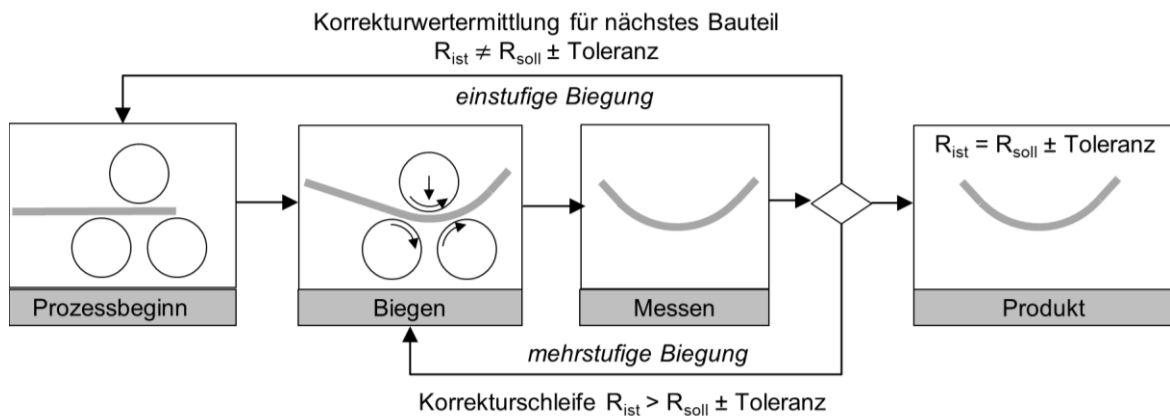


Abbildung 10 Prozessführung beim Drei-Rollen-Biegen

Bei geringen Stückzahlen oder nicht mehr akzeptablen Schwankungen der Halbzeugeigenschaften kann die Biegung durch ein iteratives Anpassen der Prozessparameter mehrstufig erfolgen, was eine Kompensation auftretender Halbzeugschwankungen ermöglicht (Abbildung 10). Die Messung der Profilkontur erfolgt hierbei in der Regel manuell (siehe Kapitel 2.5). Die Möglichkeit einer mehrstufigen Umformung ermöglicht zudem die Herstellung von Biegegeometrien, bei denen die in einer einstufigen Umformung erforderliche Umformarbeit nicht mehr von der eingesetzten Maschine geleistet werden kann.

2.4.1 Einflussgrößen beim Drei-Rollen-Profilbiegen

Neben den in Kapitel 2.2.2 beschriebenen Einflussgrößen des verwendeten Halbzeugs beeinflussen eine große Anzahl von Prozessparametern und deren Wechselwirkungen Profilbiegeprozesse (Abbildung 11). Dies ist einer der Gründe für den bisher geringen Automatisierungsgrad des Drei-Rollen-Biegens und hat eine empirische Vorgehensweise in der Prozessführung und -planung zur Folge. So werden in der industriellen Praxis oftmals so genannte Musterbiegungen zur Bestimmung der erzielbaren Bauteilqualität durchgeführt, beispielsweise in Hinblick auf Querschnittsdeformationen. Eine genaue Beschreibung des Umformverhaltens von Profilen beim Drei-Rollen-Biegen ist dabei durch die vielfältigen Prozesseinflüsse, insbesondere im plastischen Bereich, problematisch [HER12].

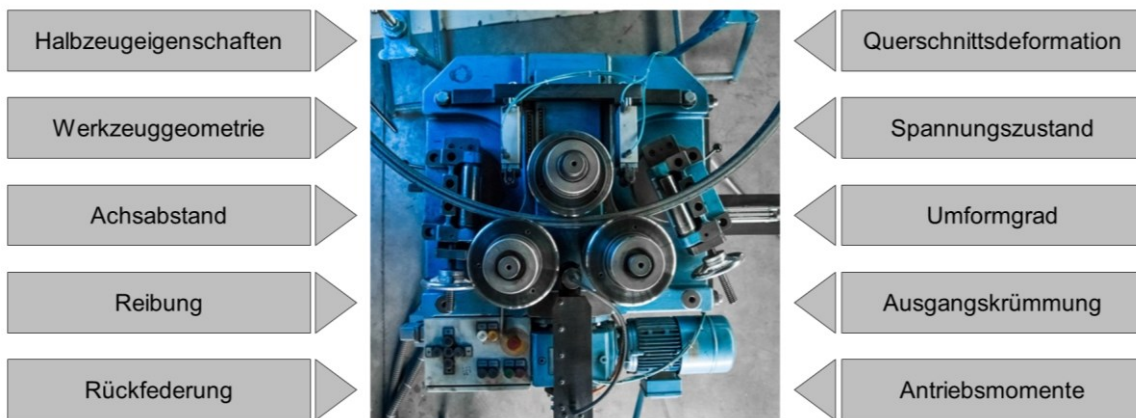


Abbildung 11 Einflussgrößen beim Drei-Rollen-Biegen in Anlehnung an [CHA97]

Biegeprozesse sind durch Zug- und Druckspannungen geprägt, die durch ein äußeres Biegemoment induziert werden. Durch die inhomogene Verteilung des Umformgrads in gebogenen Profilen ergeben sich Eigenspannungen, die auch nach der Entlastung im Profil verbleiben (Abbildung 12).

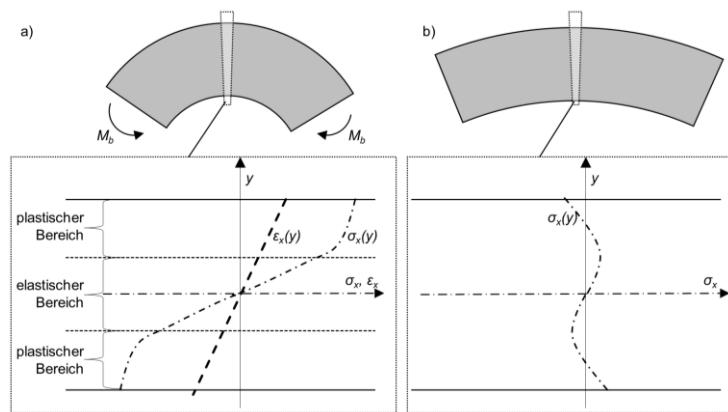


Abbildung 12 Spannungszustand bei reiner Biegemomentenbelastung: a) Profil unter Last, b) entlastetes Profil

Beim Drei-Rollen-Biegen wird die Biegung zusätzlich von Quer- und Längskräften überlagert, sodass der Idealfall eines reinen Biegemoments nicht vorliegt. Durch die hohen Widerstandsmomente von Profilen liegen beim Drei-Rollen-Biegen hohe Kontaktnormalkräfte an den Rollen vor. Hierdurch ergeben sich hohe Reibungskräfte zwischen dem Profil und den Rollen. Durch die Dehnung der Randbereiche des Profils beim Biegen ergeben sich korrespondierend hierzu unterschiedliche Geschwindigkeiten an der Profilloberfläche während der Umformung. Auftretende Differenzen zwischen Profil- und Rollenoberflächengeschwindigkeiten in den Kontaktpunkten sowie zwischen den

durch die Rollen übertragenen Axialkräften resultieren in Längskräften, welche die Profilkrümmung und das Rückfederungsverhalten beeinflussen. Hierbei führen zunehmende Längs- und Querkkräfte zu einer verminderten Rückfederung [CHA97].

Eines der Hauptprobleme beim Profilbiegen ist dabei die Deformation des Profilquerschnitts. Vor allem komplexe offene sowie geschlossene Profilquerschnitte stellen hierbei eine Herausforderung dar. Maßnahmen zur Reduktion von Querschnittsdeformationen werden in [CHA97] vorgestellt. Diese umfassen in der industriellen Praxis beispielsweise Zusatzwerkzeuge zur Stabilisierung des Profilquerschnitts, Kunststoff-Inlays sowie das Füllen von Profilen mit Sand, Öl, Wasser oder niedrigschmelzenden Legierungen. Durch Verformungen des Querschnitts während des Biegevorgangs überlagern sich Längs-, Quer- und Schubspannungen und es wird ein dreiachsiger Spannungszustand erreicht.

Aufgrund der hohen Komplexität der Einflussgrößen beim Drei-Rollen-Biegen existieren zum aktuellen Zeitpunkt keine analytischen Berechnungsmodelle, die alle der aufgeführten Einflussgrößen einbeziehen.

2.4.2 Berechnungsansätze

Die Simulation von Umformprozessen zur Bestimmung von Prozess- und Werkzeugparametern ist heute nicht mehr aus der industriellen Praxis wegzudenken. Im Bereich des Profilbiegens wird jedoch meist auf FEM-Simulationen verzichtet, da diese in der Regel kostenintensiver und zeitaufwendiger als ein Biegeversuch sind. Die Ausnahme bilden hier die Auslegung und Optimierung von Profilquerschnitten von Sonderprofilen. In der Praxis ist die Prozessplanung und Ermittlung von Prozessparametern in der Regel von Erfahrungswissen und einer empirischen Vorgehensweise geprägt. In der Literatur werden jedoch auch verschiedene Berechnungsansätze behandelt, die entscheidend zum physikalischen Prozessverständnis beitragen und eine Prädiktion von Prozessparametern ermöglichen. Diese können nach Kleiner in

- analytische,
- halbanalytische und
- Finite-Elemente-Methoden (FEM)

unterteilt werden [KLE91].

Wichtige Prozessparameter kinematischer Biegeverfahren, die mit diesen Berechnungsansätzen vorhergesagt werden, sind

- die die Biegekontur definierende Werkzeugpositionierung,
- der belastete und entlastete Radius sowie das Verhältnis von belastetem und entlastetem Radius zur Bestimmung der Rückfederung sowie
- das erforderliche Biegemoment und die durch die Antriebe zu leistende Umformarbeit zur Auslegung von Maschinen und Werkzeugen.

Engel und Kersten nutzen in [ENG12], unter der Annahme einer idealplastischen Umformung, einen geometrischen Ansatz zur Berechnung der erforderlichen Rollenzustellung bzw. des Radius' unter Last bei einer gegebenen Zustellung beim Drei-Rollen-Schubbiegen. In Kombination mit numerischen und experimentellen Untersuchungen wird unter Verwendung des geometrischen Ansatzes ein Standard-Biegeversuch zur Charakterisierung von Profilen beim Drei-Rollen-Schubbiegen entwickelt, bei der ein linearer Ansatz das Verhältnis von belastetem und entlastetem Radius beschreibt. Trotz der Vernachlässigung aller Prozesseinflüsse konnten für die untersuchten Prozessfenster sehr gute Ergebnisse mit Hilfe dieses Ansatzes erzielt werden.

Yang et al, Chatti und Dirksen haben darüber hinaus halbanalytische Prozesssimulationen speziell für das Drei-Rollen-Biegen entwickelt [CHA97, DIR08, YAN90]. Allen gemein ist die Verwendung einer analytisch hergeleiteten Momenten-Krümmungs-Beziehung zur Bestimmung des Rückfederungsverhaltens.

Diesen analytischen Ansätzen zur Bestimmung von Momenten-Krümmungs-Beziehungen liegen folgende Annahmen zu Grunde [HER12]:

- Das Profil hat über der betrachteten Länge im Ausgangszustand eine konstante Querschnittsform.
- Ebene Querschnitte bleiben eben und senkrecht zur Biegeachse (Bernoulli-Euler-Hypothese). Es treten keine Schubspannungen auf.
- Alle Spannungen sind auf einer Höhe des Profilquerschnitts konstant. Es treten keine lokalen Spannungsspitzen auf.
- Die Normalspannung senkrecht zur Biegeebene wird vernachlässigt.

- Das Material hat im Zug- und Druckbereich gleiche Spannungs-Dehnungs-Charakteristiken.
- Die ungelängten und spannungsfreien Fasern des Profilquerschnitts fallen während des Umformgangs zusammen.
- Das Material ist homogen und isotrop. Eigenspannungen und lokale Kennwertschwankungen über dem Querschnitt und der Profillängsachse sind vor dem Biegen nicht vorhanden.

Des Weiteren wird meist ein vereinfachter ebener Spannungszustand angenommen um den Rechenaufwand gering zu halten (Abbildung 13 a)).

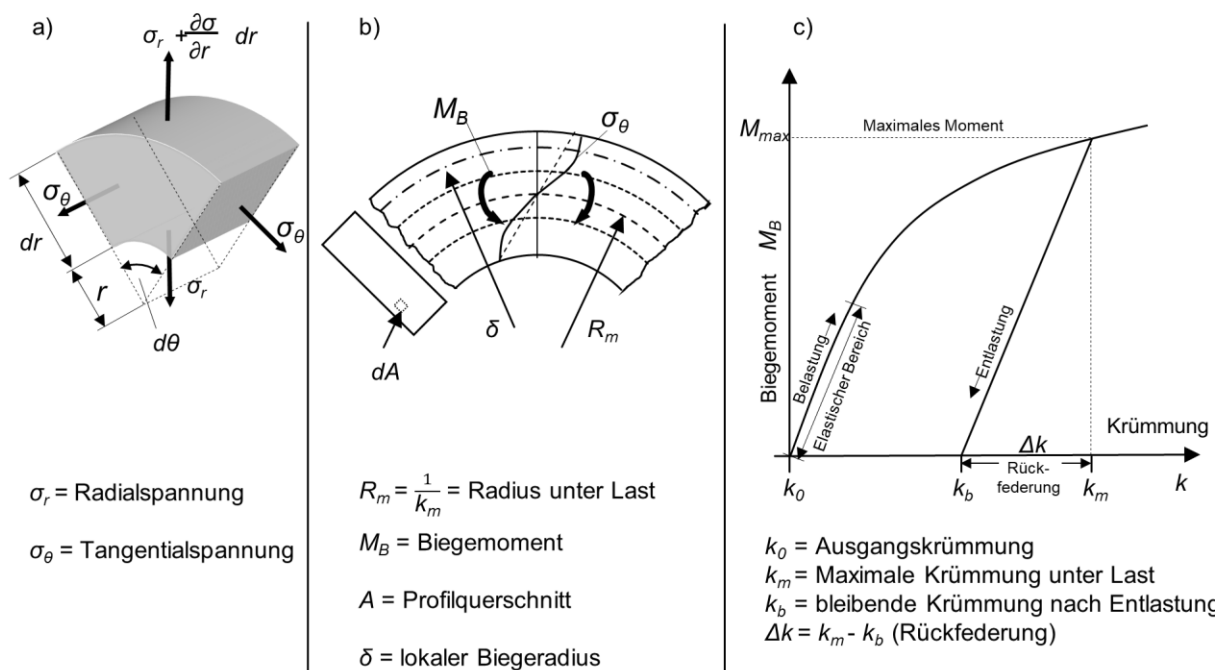


Abbildung 13 a) Vereinfachter Spannungszustand an einem infinitesimal kleinen Volumenelement eines kreisbogenförmigen gebogenen Profils, b) Berechnung des Biegemoments, c) Momenten-Krümmungs-Beziehung

Das erforderliche Biegemoment kann zum Beispiel nach dem Ansatz von Vdovin [VDO80] (Abbildung 13 b)) mit der Gleichung

$$M_B = \int_A \sigma_\theta (\delta - R_m) dA \quad (1)$$

berechnet werden. Die Rückfederung Δk kann anschließend unter Annahme einer linearen Entlastung (Abbildung 13 c)) nach der Beziehung

$$\Delta k = k_m - k_b = \frac{M_b}{EI} \quad (2)$$

berechnet werden. Alternativ zur analytischen Bestimmung kann die Momenten-Krümmungs-Beziehung auch experimentell ermittelt werden [ADE93].

Im Folgenden wird näher auf die halbanalytischen Prozessmodelle nach Chatti und Dirksen eingegangen.

Nach Chatti [CHA97] durchläuft ein Profil beim Drei-Rollen-Biegen ausgehend von einer vorliegenden Ausgangskrümmung k_0 des Profils einen charakteristischen Krümmungsverlauf, der durch das elastisch-plastische Materialverhalten geprägt ist und über die zugrundeliegende Momenten-Krümmungsbeziehung bestimmt wird (Abbildung 14 a)). In Abhängigkeit der Querschnittsform des Profils kommen hierbei Ansätze von Lippmann [LIP59], Hänert [HÄN73], Wiebeck [WIE76] und Vdovin [VDO80] zum Einsatz. Das Biegemoment ändert sich in der betrachteten Umformzone zwischen den Kontaktpunkten des Profils mit den Rollen A und C näherungsweise linear und hat sein Maximum im Kontaktpunkt B. Analog hierzu durchläuft das Profil im Bereich des Kontaktpunktes B sein Krümmungsmaximum k_m . Zwischen dem Kontaktpunkt B und C nimmt die Krümmung aufgrund der elastischen Rückfederung linear ab, bis die bleibende Krümmung k_b am Kontaktpunkt C erreicht ist.

Bei der Bestimmung der Biegelinie in der Umformzone wird der belastete Profilabschnitt durch einen geraden, vollständig elastischen Ersatzbiegebalken ersetzt, an dem alle weiteren Berechnungen durchgeführt werden. Der Ersatzbalken wird in den Kontaktpunkten A und C mit den Lagermomenten M_1 und M_2 und im Kontaktpunkt B mit der Einzellast P belastet. Aus der so berechneten Biegelinie wird anschließend die erforderliche Rollenzustellung abgeleitet (Abbildung 14 b)).

Dirksens Prozesssimulationsmodell „Profi V2“ [DIR08] baut direkt auf dem Simulationsmodell „Profi“ von Chatti auf, jedoch erfolgt die Ermittlung der Biege-

linie, aufbauend auf Arbeiten im Bereich der Blechumformung [HEL02], indem diese in einzelne Segmente zerlegt wird. Anhand der lokal wirkenden Biegemomente werden die Krümmungen der einzelnen Segmente berechnet und diese im Anschluss wieder aneinandergereiht. Hierdurch kann die Biegelinie genauer berechnet werden und der nicht-lineare Verlauf der Krümmung in der Umformzone in den Berechnungen berücksichtigt werden.

Bei beiden Simulationsmodellen erfolgt die Berechnung der Biegelinie iterativ aufgrund der sich ändernden Kontaktpunkte des Profils mit den Rollen. Ebenso sind in beiden Fällen die Kenntnis des E-Moduls E , der Streckgrenze R_p sowie der Fließkurve zur Beschreibung des Profilwerkstoffs erforderlich.

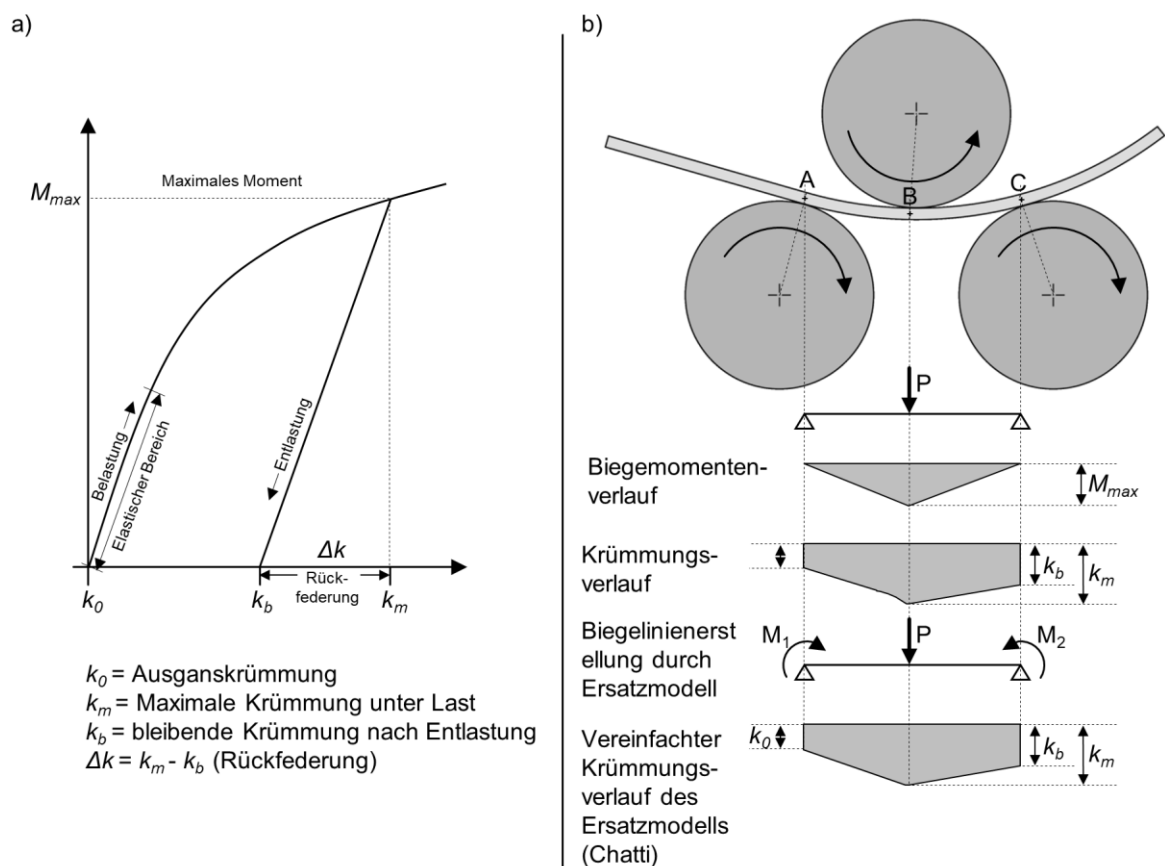


Abbildung 14 a) Momenten-Krümmungsbeziehung b) Prozesssimulationsmodell „Profi“ [CHA97]

2.4.3 Prozessautomatisierung und -regelung

Wie bereits ausgeführt weist das Drei-Rollen-Biegen in der industriellen Praxis bislang einen geringen Automatisierungsgrad auf und ist durch eine empiri-

sche Vorgehensweise geprägt. Groche et al. und Behrens et al. stellen in [BEH19, GRO18a*] ein Stufenmodell für die Automatisierung von Umform- bzw. Produktionsprozessen vor (Abbildung 15). Hierbei werden in Abhängigkeit der Aufteilung der Aufgaben zwischen Mensch und Maschine (System) sechs Stufen der Automatisierung unterschieden.

| | STUFE 0 Nur Bediener | STUFE 1 Assistiert | STUFE 2 Grundlegend automatisiert | STUFE 3 Erweitert automatisiert | STUFE 4 Hoch-automatisiert | STUFE 5 Vollautomatisiert |
|----------|-------------------------------|------------------------------|--|--|--|--|
| Bediener | | | | | | |
| | | | | | | System |
| | Maschinensteuerung (Antriebe) | Maschinenregelung (Antriebe) | Regelung von Prozessgrößen (z.B. Kraft, Beölung) | Regelung ausgewählter Produktmerkmale durch Adaption an geänderte Umgebungsbedingungen und Aufgabenstellungen + Erkennen der Systemgrenzen Maschinen- und Prozessregelung Qualitätssicherung | Regelung aller relevanten Produktmerkmale / Behebung definierter Fehlerbilder durch Adaption an geänderte Umgebungsbedingungen und Aufgabenstellungen + Erkennen der Systemgrenzen Maschinen- und Prozessregelung Qualitätssicherung | Regelung aller relevanten Produktmerkmale / Behebung definierter Fehlerbilder durch Adaption an geänderte Umgebungsbedingungen, Aufgabenstellungen und menschliche Perzeption + Erweitern der Systemgrenzen selbstlernende Maschinen- und Prozessregelung Qualitätssicherung |

Abbildung 15 Automatisierungsstufen von Fertigungsprozessen nach [BEH19, GRO18a*]

Der industrielle Standard des Drei-Rollen-Biegens von Profilen ist hierbei in den Stufen 0 und 1 einzuordnen. Auf Stufe 2 (Abbildung 15) ordnet das Modell Prozesse ein, in welchen eine Regelung von Prozessgrößen implementiert ist, wie z. B. die Regelung der Umformkraft in [GRO14]. Aufgrund der beschriebenen vielfältigen Einflussgrößen beim Drei-Rollen-Biegen ist eine reine Regelung von Prozessgrößen ohne das Einbeziehen von messtechnisch erfassten Werkstück- oder Produktgrößen unzureichend und die im Modell beschriebene Stufe 2 daher nicht auf das Drei-Rollen-Biegen anwendbar. Alternativ hierzu wird in [KES18*] diese Stufe für das Drei-Rollen-Biegen neu definiert. Aufgrund der empirischen und iterativen Prozessführung (Abbildung 10) sind das Messen der Profilgeometrie sowie das Adaptieren des Prozesses inhärent mit dem Prozess verknüpft. Im Kontext der daraus resultierenden Nebenzeiten werden auf Stufe 2 für das Drei-Rollen-Biegen Messsysteme und Assistenzsysteme eingeordnet, die das maschinenbedienende Personal bei diesen Auf-

gaben unterstützen oder Teilaufgaben gänzlich übernehmen und somit zu einer Reduzierung der Nebenzeiten und Steigerung der Produktivität beitragen [KES18*]. In diesem Kontext wurden in wissenschaftlichen Untersuchungen und industriellen Anwendungen verschiedene Ansätze und Entwicklungen für Messsysteme beim Profilbiegen verfolgt (siehe Kapitel 2.5).

Eine Regelung der Profilkrümmung, als Produkteigenschaft, beim Drei-Rollen-Biegen stellt einen Prozess der Stufe 3 dar (Abbildung 15). Vielfältige Konzepte einer derartigen Regelung wurden in verschiedenen Arbeiten entwickelt und untersucht und sollen im Folgenden vorgestellt werden. Nach Allwood et al. kann die Regelung von Umformprozessen dabei allgemein in Online- und Offline-Regelungen unterteilt werden [ALL16]. Abbildung 16 zeigt in Anlehnung daran die prinzipiellen Regelkreise für eine Online- und Offline-Regelung der Profilkrümmung beim Drei-Rollen-Biegen.

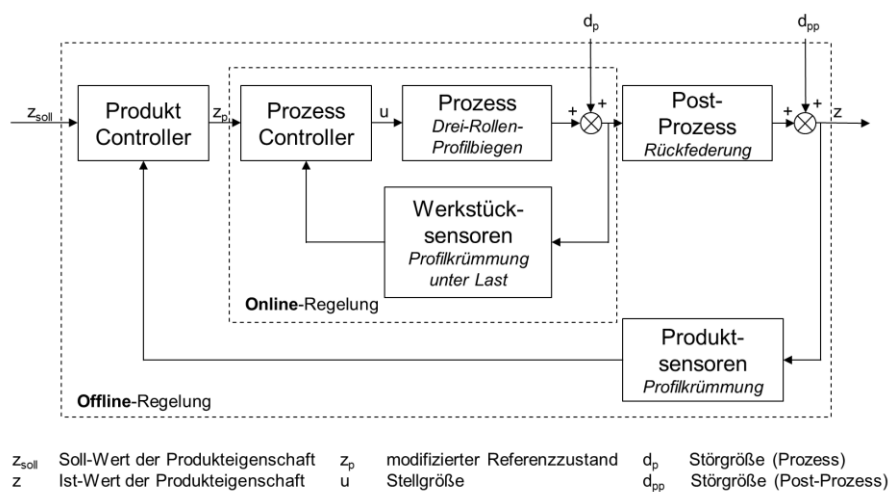


Abbildung 16 Online- und Offline Regelung der Profilkrümmung beim Drei-Rollen-Biegen in Anlehnung an [ALL16]

Hierbei sind Werkstücksensoren als Sensoren zu verstehen, welche den Zustand des Produkts während eines Umformprozesses erfassen, und Produktsensoren als solche, die den Zustand des Produkts nach einem dem eigentlichen Umformprozess nachgelagerten Post-Prozess erfassen. Hierbei bleibt der Produktsensor Bestandteil eines geschlossenen Regelkreises, insofern die zurückgeführten Produktparameter zur Regelung von folgenden Produkten genutzt werden können. Im Fall des Drei-Rollen-Biegens ist es zusätz-

lich möglich, die zurückgeführten Produktparameter zur Regelung von mehrstufigen Biegungen zu nutzen.

Chatti entwickelte und untersuchte in [CHA97] nach der Unterscheidung von Allwood et al. eine Offline-Regelung der Profilkrümmung beim Drei-Rollen-Biegen. Hierbei dient das Simulationsmodell „Profi“ als Modell des Prozesses zur Prädiktion der Rollenzustellung und die darin enthaltene Momenten-Krümmungs-Beziehung wird als Modell des Post-Prozesses zur Prädiktion der Rückfederung verwendet. Über einen Krümmungssensor auf Basis eines Fadengebers (siehe Kapitel 2.5) am Auslauf der Anlage wird die Krümmung $k_{b,gem}$ des entlasteten Profils gemessen und anhand dessen eine neue Rollenzustellung in „Profi“ berechnet. Die Regelung wird experimentell anhand von einstufigen Biegungen mit einer konstanten Soll-Krümmung und bis zu drei Regelschritten über der Länge des Profils untersucht. Aufgrund der zeitverzögerten Auswirkung eines Regelschritts auf die Krümmung des entlasteten Profils treten hierbei jedoch Totzeiten auf, welche in den experimentellen Untersuchungen äquivalent zu 500 mm Profillänge sind.

Yang et al. stellen in [YAN90] eine Online-Regelung der Profilkrümmung vor (Abbildung 17). Hierbei wird ein halbanalytisches Modell des Prozesses zur Prädiktion der initialen Rollenzustellung anhand des Soll-Werts von k_b verwendet. Die Rückfederung wird modellhaft über die Beziehung der Krümmungen k_m und k_b abgebildet, die aus einer Momenten-Krümmungs-Beziehung abgeleitet wird, und die bleibende Krümmung $k_{b,prog}$ anhand der gemessenen Krümmung unter Last $k_{m,gem}$ prognostiziert. Zur Messung der Profilkrümmung unter Last kommt ein taktiler Krümmungssensor nach der Drei-Punkt-Methode zum Einsatz (siehe Kapitel 2.5). Eine Regeldifferenz der prognostizierten Krümmung $k_{b,prog}$ zum Sollwert der Krümmung k_b wird an einen PID-Regler weitergegeben und dieser berechnet eine Korrektur der Rollenzustellung. Da eine Messung der entlasteten Krümmung k_b nicht erfolgt, können Ungenauigkeiten in der modellbasierten Prognose der bleibenden Krümmung $k_{b,prog}$ nicht korrigiert werden.

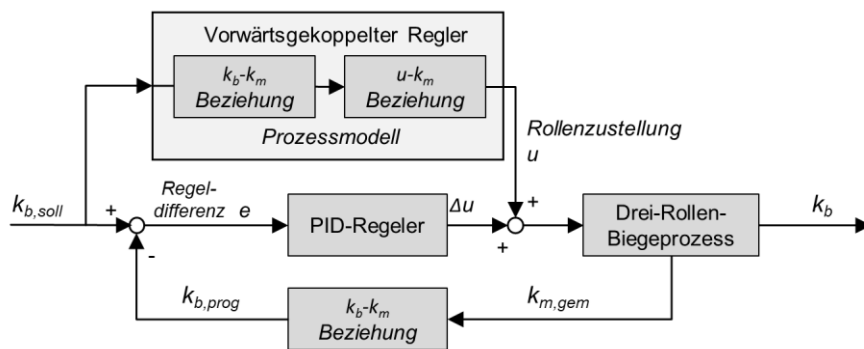


Abbildung 17 Online-Prozessregelung für das Drei-Rollen-Biegen nach [YAN90]

Die vorgestellte Prozessregelung wurde experimentell in einstufigen Biegungen (U-Profil 10x10x1 mm, Werkstoff: AA 6063) untersucht und bei einer vorgegebenen Sollkrümmung von 0,002 (Radius = 500 mm) eine Abweichung von weniger als $\pm 3\%$ ermittelt.

Auch Hardt et al. stellen in [HAR82] eine Online-Regelung für das Drei-Rollen-Biegen vor (Abbildung 18). Analog zu der Regelung von Yang et al. wird hierbei die Krümmung unter Last $k_{m,gem}$ gemessen und geregelt. Durch die zusätzliche Erfassung des im Prozess wirkenden Biegemoments M_b , kann bei dieser Regelung der Aufwand zur Ermittlung der erforderlichen Materialparameter und des Prozessmodells erheblich reduziert werden. Das Biegemoment wird hier anhand der auf die Auslaufrolle wirkenden Kraft berechnet, die messtechnisch erfasst wird. Die Rückfederung Δk_{prog} wird anhand der Δk - M_b -Beziehung prognostiziert. Diese kann hierbei entweder experimentell bestimmt werden oder alternativ auf Basis der Biegesteifigkeit nach Gleichung 2 berechnet werden. Mit Hilfe der gemessenen Krümmung $k_{m,gem}$ und der prognostizierten Rückfederung Δk_{prog} wird die prognostizierte bleibende Krümmung $k_{b,prog}$ berechnet. Eine Regeldifferenz der prognostizierten Krümmung $k_{b,prog}$ vom Sollwert k_b wird an einen I-Regler gegeben, der die Rollenzustellung korrigiert. Da keine Messung und Rückführung der Krümmung des entlasteten Profils k_b erfolgt, können auch bei dieser Regelung Ungenauigkeiten der prognostizierten Rückfederungen Δk nicht kompensiert werden. Die experimentelle Untersuchung der Regelung anhand einstufiger Biegungen von Flachprofilen führte bei konstanten Sollwertvorgaben (Radien von 150 mm und 230 mm) zu Abweichungen vom Zielradius von weniger als $\pm 3\%$.

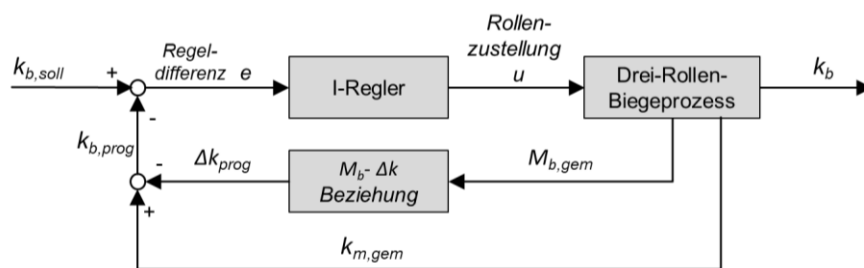


Abbildung 18 Online-Regelung beim Drei-Rollen-Biegen nach [HAR82]

Eine Kombination einer Online- mit einer Offline-Regelung wird von Dirksen in [DIR08] vorgestellt und untersucht. Hierbei erfolgt die Online-Regelung in Anlehnung an die Regelung von Hardt et al.. Abweichend zur Regelung von Hardt et al. kommt ein I-Regler zum Einsatz, mit Hilfe dessen ein Korrekturwert der Krümmung unter Last k_m bestimmt wird. Anhand der korrigierten Krümmung unter Last wird mit Hilfe der, durch das Prozesssimulationssystem „Profi V2“ ermittelten Beziehung zwischen Krümmung unter Last und Rollenzustellung (k_m - u -Beziehung) die Rollenzustellung u angepasst. Die Berechnungen der Δk - M_b -Beziehung sowie der initialen Soll-Krümmung unter Last $k_{m,soll}$ anhand der Sollkrümmung $k_{b,soll}$ werden ebenfalls mit Hilfe von „Profi V2“ durchgeführt. Die Messung der Krümmung unter Last $k_{m,gem}$ erfolgt durch einen Laser-Triangulations-Sensor, der im Bereich der Umformzone auf einer Linearachse verfahren wird (siehe Kapitel 2.5). Die Berechnung des Biegemoments M_b erfolgt anhand der durch „Profi V2“ berechneten Kontaktpunkte des Profils mit den Rollen und der auf die Mittelrolle wirkenden Hauptkraft, die messtechnisch erfasst wird. Die Krümmung des entlasteten Profils $k_{b,gem}$ wird mit Hilfe des von Chatti entwickelten Krümmungssensors auf Basis eines Fadengebers am Auslauf der Maschine gemessen (siehe Kapitel 2.5). Anhand der zurückgeführten Krümmung $k_{b,gem}$ wird schließlich die Regeldifferenz der bleibenden Krümmung berechnet, aufbereitet und die korrigierte, prognostizierte Krümmung $k_{b,prog}$ berechnet.

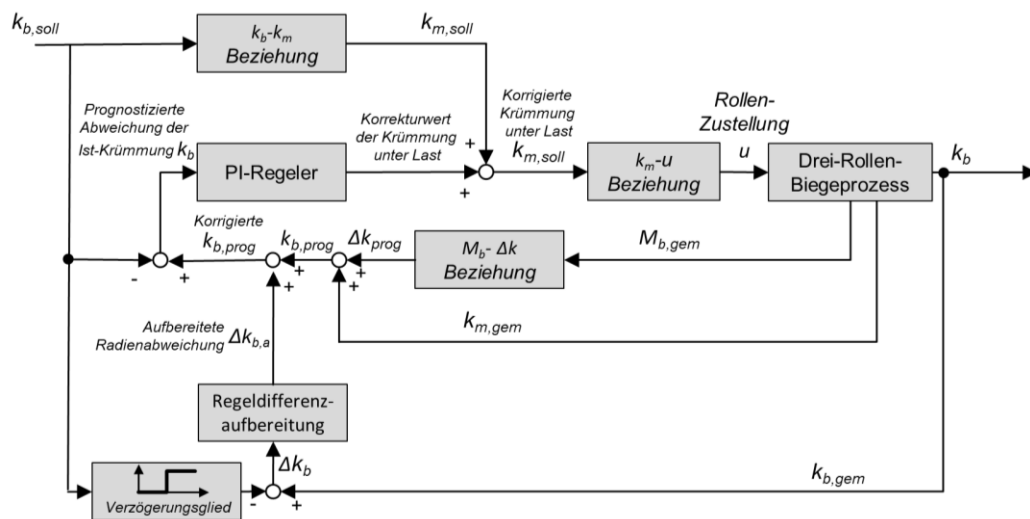


Abbildung 19 Prozessregelung TRB nach Dirksen [DIR08]

Die Regelung wurde experimentell anhand von Vierkant-Hohlprofilen (20 x 30 x 2 mm, Werkstoff S235JR) untersucht. Hierbei wurde über die Länge eines Profils die Krümmung des entlasteten Profils geregelt. Auch hier kam es aufgrund der zeitverzögerten Auswirkung eines Regelschritts der Offline-Regelung auf die Krümmung des entlasteten Profils zu Totzeiten während der Regelung.

2.5 Krümmungs- und Konturmessung beim Profilbiegen

Wie im vorangestellten Kapitel dargestellt, bildet die messtechnische Erfassung der Profilkrümmung bzw. der Profilkontur die Grundlage für eine Erhöhung des Automatisierungsgrads des Drei-Rollen-Biegens. Aufgrund der Nachfrage nach geeigneten Sensoren wurden in wissenschaftlichen Untersuchungen und industriellen Anwendungen verschiedene Ansätze und Entwicklungen vorangetrieben. Chatti analysierte verschiedene Verfahren und kategorisierte sie in taktile und berührungslose Messungen sowie in Integral- und Stützpunktverfahren (Abbildung 20) [CHA97]. Dirksen erweiterte diese Kategorien durch eine weitere Unterscheidung zwischen Online- und Offline-Messungen [DIR08] und Staupendahl fügte die Kategorie Inertialverfahren hinzu [STA21]. Abbildung 20 zeigt zusammenfassend die relevantesten Messverfahren auf der Grundlage der Klassifizierungen von Chatti, Dirksen und Staupendahl, erweitert um die Unterscheidung zwischen Krümmungs- und

Konturmessverfahren. Konturmesssysteme erfassen die Geometrie und die Kontur eines gebogenen Profils als Ganzes. Die Krümmung wird dann von der gemessenen Kontur abgeleitet. Im Gegensatz dazu erfassen Krümmungsmesssysteme die lokalen Krümmungen eines gebogenen Profils. Die Messung der lokalen Krümmung ist dabei immer mit einer Mittelung verbunden, da ihre Berechnung nicht anhand eines einzelnen Punktes der Kontur erfolgen kann und somit immer den diesen Punkt umgebenden Konturbereich mit einschließt. Mit zunehmender Größe des betrachteten Konturumfeldes bewirkt die Mittelwertbildung eine zunehmende Glättung des Krümmungsverlaufs. Weiterhin ist der Bestimmung der lokalen Krümmung die Annahme inhärent, dass der betrachtete Konturbereich als Kreissegment beschrieben werden kann. Diese Annahme ist im Allgemeinen nicht zutreffend, da der betrachtete Konturabschnitt infinitesimal klein sein müsste, was bei bestehenden Krümmungsmesssystemen beim Profilbiegen nicht der Fall ist. Daher beschreiben gemessene Krümmungsverläufe eine Kontur immer nur näherungsweise. Die Qualität dieser Näherung spiegelt sich in der Rekonstruktion der Kontur aus den inkrementellen Krümmungsmessungen in Bezug auf die Bogenlänge, sofern bekannt, wider.

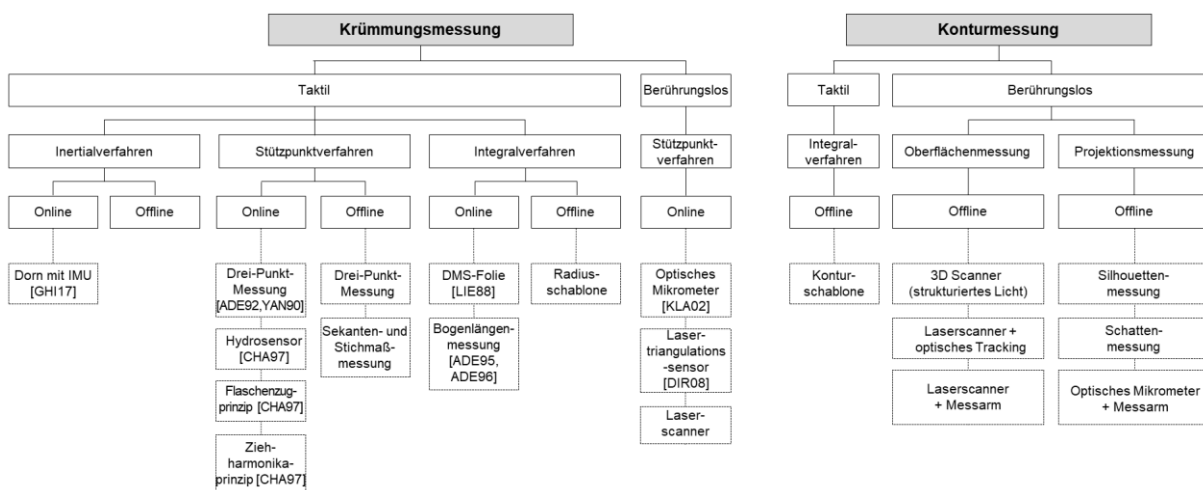


Abbildung 20 Systeme zur Messung der Krümmung und Kontur von gebogenen Profilen [KES23*]

Kommerziell erhältliche 3D-Konturmesssysteme basieren auf berührungslosen optischen Verfahren und können Konturdaten direkt verarbeiten und ausgeben. Sie lassen sich in Oberflächen- und Projektionsmessungen kategorisieren [STA21]. Diese Systeme bieten eine hohe Messgenauigkeit, auch bei gro-

ßen Messvolumen und großen Messobjekten. So wird z.B. die Messgenauigkeit für Laserscanner mit Koordinatenmessarmen mit $< 0,2$ mm für Messdistanzen bis zu 4,98 m angegeben [HEX22]. Allen Systemen ist gemeinsam, dass sie nur offline eingesetzt werden können.

Für Oberflächenmessungen werden 3D-Scanner mit strukturiertem Licht oder Laserscanner in Kombination mit Koordinatenmessarmen oder optischen Trackinggeräten eingesetzt. Bei diesen Systemen ist die Größe der Messobjekte technisch nicht begrenzt. Allerdings kann die Verarbeitung der Messdaten zur Gewinnung der Profilkontur sehr zeitaufwendig sein. Während für kreisförmige Querschnitte automatisierte Verarbeitungssoftwarelösungen existieren, können Profile mit nicht kreisförmigen Querschnitten aufgrund einer komplexeren Messung sowie Datenverarbeitung immer noch eine Herausforderung darstellen und sind Gegenstand aktueller Entwicklungen.

Konturprojektionsmesssysteme verwenden Silhouetten- oder Schattenmessungen zur Bestimmung der Kontur [PIP22, THI09]. Die Nachteile dieser Systeme sind Größenbeschränkungen des Messobjekts, da geschlossene Messkabinen verwendet werden. Außerdem können nur Profile mit kreisförmigen Querschnitten vermessen werden. Profile mit nicht kreisförmigen Querschnitten führen zu verzerrten 2D-Projektionen, die mit der Verarbeitungssoftware nicht interpretiert werden können [STA21].

Obwohl Konturmesssysteme eine hohe Genauigkeit bieten, ist ihr Einsatz, insbesondere für 2D-Konturen beim Drei-Rollen-Biegen, nicht immer wirtschaftlich. Die Krümmungsmessung bietet daher beim Drei-Rollen-Biegen eine oft kostengünstigere und effizientere Alternative. Der Standard für diese Krümmungsmessungen in der Industrie umfasst Radiuslehren und Sekantenhöhenmessungen. Für komplexere Konturen werden zudem teils Konturlehren zur abschließenden Qualitätskontrolle eingesetzt. Besonders im Lohnbiegebereich erfolgt die Definition der Soll-Kontur oftmals auch durch vom Kunden bereitgestellte Schablonen.

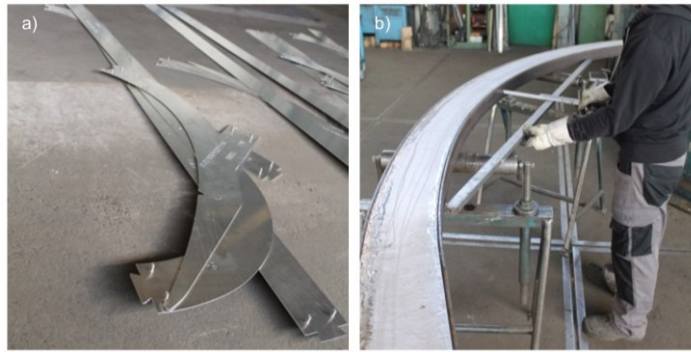


Abbildung 21 Kontur- Krümmungsmessung beim Drei-Rollen-Biegen: a) Radius- und Konturschablonen, b) Messung der Sekantenhöhe

Über diese industriellen Standards hinaus wurden in Industrie und Wissenschaft verschiedene Ansätze zur Messung der Krümmung entwickelt. Die gebräuchlichsten Verfahren, die hierbei verwendet werden, sind Stützpunktverfahren.

Durch die Messung der Koordinaten von mindestens drei Punkten auf der Profilkontur kann die lokale Krümmung berechnet werden. Dabei können Oberflächenbeschädigungen am Profil zu Abweichungen in der berechneten Krümmung führen. Außerdem besteht ein Zielkonflikt zwischen der Messung kleiner Krümmungen und einem möglichst geringen Abstand zwischen den äußeren Messpunkten. So nimmt mit zunehmendem Abstand der äußeren Messpunkte die vom mittleren Punkt erfasste Sekantenhöhe zu, so dass auch kleine Krümmungen mit einem begrenzten Messfehler gemessen werden können. Umgekehrt nimmt die Anwendbarkeit des Verfahrens für die Messung von Krümmungsübergängen mit zunehmendem Abstand der äußeren Messpunkte ab [DIR08]. Aus diesen Gründen sind Dreipunktmesssysteme hinsichtlich der Genauigkeit für ein breiteres Spektrum von Krümmungen nur sehr eingeschränkt einsetzbar.

Für Online-Messungen an 3D-gekrümmten Profile hat Staupendahl ein solches System mit drei Kontaktpunkten in einen Profilbiegeprozess mit fünf Freiheitsgraden integriert [STA21]. Die Genauigkeit der Online-Messung wurde im Vergleich zu einem 3D-Scanner mit strukturiertem Licht (GOM Atos) untersucht. In dem untersuchten Radiusbereich von 250 mm bis 2000 mm wird eine Genauigkeit zwischen 0,23 % und 2,0 % angegeben.

Um die Genauigkeit von Stützpunktverfahren zu erhöhen, wurden in der Literatur zudem Ansätze mit mehr Messpunkten untersucht. Chatti integrierte hierbei z. B. einen auf einem Fadengeber basierenden Sensor nach dem Flaschenzugprinzip mit fünf Kontaktpunkten in eine Drei-Rollen-Biegemaschine. Die Genauigkeit wurde hierbei mit 0,5 % für Radien von 100 mm bis 1000 mm angegeben [CHA97].

Dirksen verwendete einen einzelnen Triangulationssensor, der auf einer linearen Achse montiert war, um ein Online-Messsystem in einem Drei-Rollen-Biegeprozess einzurichten und die Krümmung unter Last während des Prozesses zu messen [CHA03a, DIR08]. Die für die Radiusberechnung erforderlichen Punkte wurden ermittelt, indem der Sensor während des Biegens mit hoher Geschwindigkeit im Verhältnis zur Profilbewegung auf der Linearachse hin und her bewegt wurde. Obgleich die erzielte Genauigkeit des entwickelten Systems in der Arbeit nicht explizit angegeben ist, wurde sie untersucht. Hierzu wurden statisch positionierte Radiuslehren vermessen und eine Koordinatenmessmaschine (KMM) (Prismo Vast 5 HTG, Carl Zeiss AG) für Referenzmessungen herangezogen. Aufgrund der höheren Abweichung bei größeren Radien wurde ein Kalibrierfeld in Bezug auf den Radius und die Verfahrensgeschwindigkeit des Sensors auf der Linearachse ermittelt und angewendet. Die Messfehler der ermittelten Mittelwerte des Radius sind in Abbildung 22 dargestellt.

Neben taktilen und optischen Stützpunktverfahren bieten inertielle Messeinheiten (Inertial Measurement Units - IMU) und Ansätze des Motion Trackings Möglichkeiten, Kontur- und Krümmungsdaten zu erhalten. Ghiotti et al. entwarfen und entwickelten einen Dorn mit einem eingebetteten IMU zur Überwachung der Profilkrümmung nach der Rückfederung beim Drei-Rollen-Schubbiegen [GHI17]. Hierbei werden über das 3-Achsen-Gyroskop des IMU die Winkelgeschwindigkeiten der Dornspitze gemessen und durch deren zeitliche Integration der Orientierungswinkel der Dornspitze berechnet. Dieser wurde dann zur Berechnung des Biegeradius in Bezug auf die Länge des Dorns verwendet. Die Genauigkeit des Messsystems wird in der entsprechenden Arbeit nicht explizit angegeben, wurde aber experimentell untersucht. Die Er-

gebnisse wurden dabei mit Messungen mit einer KMM (Prismo 7 Vast, Carl Zeiss AG) verglichen (Abbildung 22).

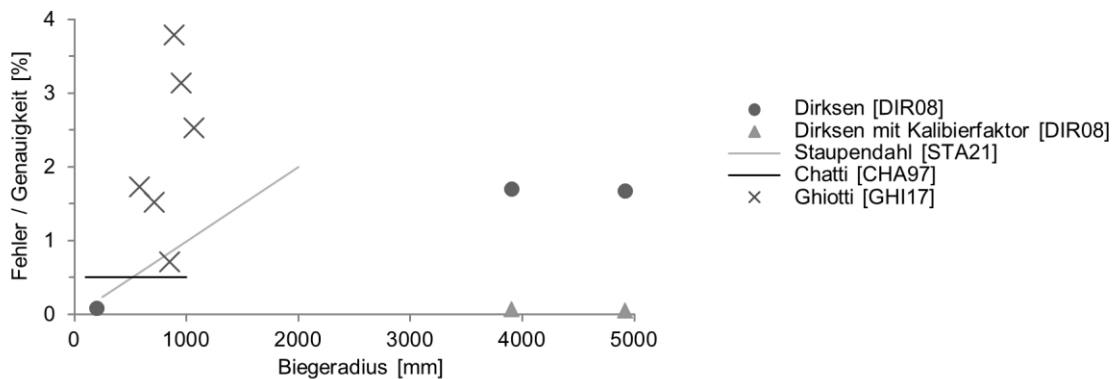


Abbildung 22 Fehler bzw. Genauigkeit von in der Literatur untersuchten Messsystemen

2.6 Fazit

Aus den Ausführungen zum Stand der Technik geht das Drei-Rollen-Biegen als ein stark empirisch geprägter Prozess mit einer hohen Komplexität von Einflussgrößen hervor. Die empirische Prägung des Prozesses verdeutlicht sich anhand der industriell etablierten, iterativen Prozessführung. Vor allem in mehrstufigen Prozessen kann hierbei das wiederholte Messen des Werkstücks zu hohen Prozessnebenzeiten führen. Durch den Mangel an geeigneter Messtechnik für das Drei-Rollen-Biegen erfolgt das Messen auch zum heutigen Tag in der Regel manuell. Mitunter deswegen konnten sich bisherige Ansätze zur Regelung der Profilkrümmung beim Drei-Rollen-Biegen nicht industriell etablieren. Zudem fehlt es an Untersuchungen von Prozessregelungen in mehrstufigen Drei-Rollen-Biegeprozessen. In den vorgestellten Arbeiten beschränken sich die Untersuchungen zur Regelung der Profilkrümmung auf einstufige Prozesse.

3 Motivation, Zielsetzung und Vorgehensweise

Das Drei-Rollen-Biegen ist aufgrund seiner universellen Einsetzbarkeit eines der am häufigsten genutzten kinematischen Profilbiegeverfahren in der Industrie. Während der allmähliche Wandel von einer konventionellen Massenproduktion hin zu einer kundenorientierten seriellen Maßanfertigung viele Prozesse in der Umformtechnik vor die Herausforderung einer gesteigerten Flexibilität stellt [YAN18], ist diese dem Drei-Rollen-Biegen inhärent. Durch die nicht werkzeuggebundene Formgebung ist es möglich, mit einem Rollensatz nicht nur eine Vielzahl von Biegegeometrien herzustellen, sondern auch unterschiedliche Halbzeuge zu verarbeiten. Die gefertigten Losgrößen beim Drei-Rollen-Biegen sind hierbei meist klein. Einer der Schlüsselfaktoren für die Flexibilität des Prozesses sind, neben der nicht werkzeuggebundenen Formgebung, das Knowhow und Erfahrungswissen des für die Prozessführung verantwortlichen Fachpersonals. Die Aneignung dieses domänenspezifischen Wissens durch das Personal erfordert hierbei oftmals viele Jahre. Vor dem Hintergrund einer gestiegenen Personalfuktuation und des Fachkräftemangels [IFO22], steigt die Nachfrage nach Automatisierungslösungen zur Steigerung der Wirtschaftlichkeit des Drei-Rollen-Biegens bei gleichzeitiger Wahrung der Flexibilität.

Ein zentrales Hindernis für Automatisierungslösungen des Drei-Rollen-Biegens ist der Mangel an Messtechnik, die eine effiziente Ermittlung der Profilkrümmung bzw. der Profilkontur mit der erforderlichen Genauigkeit ermöglicht. Während auf dem Markt verfügbare Konturmesssysteme bei kinematischen 3D-Profilbiegeverfahren zur Adaption der Prozessparameter und Qualitätskontrolle weit verbreitet sind, ist ihr Einsatz bei mehrstufigen Drei-Rollen-Biegeprozessen aufgrund zeitaufwendiger Messprozesse nicht wirtschaftlich möglich. Darüber hinaus übersteigen die Investitionskosten oftmals die Kosten der Biegemaschine selbst. Eine automatische oder halbautomatische Messung der Profilkrümmung bzw. der Profilkontur könnte bereits zu einer signifikanten Steigerung der Wirtschaftlichkeit des Drei-Rollen-Biegens beitragen.

Vor allem bei Bauteilen mit großen Abmessungen, mit Profil-Ausgangslängen von bis zu 18 m, übersteigen die Prozessnebenzeiten zum Messen meist die Prozesszeiten der eigentlichen Biegeoperation und erfordern dabei oftmals mehr als eine Person.

Die Steuerung von Drei-Rollen-Biegeprozessen ist aufgrund der Vielzahl von Einflussfaktoren von einer empirischen Vorgehensweise geprägt. Insbesondere bei mehrstufigen Drei-Rollen-Biegeprozessen ist die Wirtschaftlichkeit stark abhängig vom Knowhow des für die Prozessführung verantwortlichen Fachpersonals. Im Stand der Technik beschriebene analytische Berechnungsansätze und halbanalytische Modelle sowie die darauf basierenden Prozessregelungen für Drei-Rollen-Biegeprozesse konnten sich bisher nicht industriell etablieren. Einer der Hauptgründe hierfür ist, dass die dafür erforderlichen Materialcharakterisierungen zeitaufwendig und mit zusätzlichen Kosten verbunden sind, was der Flexibilität und Wirtschaftlichkeit des Prozesses abträglich ist. Des Weiteren liegen der messtechnischen Ermittlung des Biegemoments beim Drei-Rollen-Biegen oftmals Vereinfachungen zugrunde, welche die Genauigkeit eines Modells beeinträchtigen können. Zur exakten Bestimmung des wirkenden Biegemoments wären neben den Kontaktnormalkräften zwischen Profil und Rollen, die Kenntnis der Koordinaten der Kontaktpunkte, der Biegelinie in der Umformzone, der Reibungskennwerte sowie der Relativgeschwindigkeiten und der an den einzelnen Rollen wirkenden Momente erforderlich. Ebenso stellt die Integration der Kraft- und Momenten-Messtechnik in bestehende Maschinenarchitekturen beim Drei-Rollen-Biegen eine Herausforderung dar. Zwar existieren Ansätze zur näherungsweise Bestimmung der Kontaktpunkte während des Prozesses [GRO17*] und Entwicklungen von sensorischen Maschinenelementen [AL-22, KRE17], die die Integration erforderlicher Kraft- und Momenten-Messtechnik vereinfachen, jedoch gehen damit auch nicht unerhebliche Investitionskosten einher.

Neben den beschriebenen Hindernissen für eine industrielle Nutzung bestehender Prozessregelungen, fokussieren sich diese für gewöhnlich auch nur auf einstufige Drei-Rollen-Biegeprozesse. Hierdurch wird einer der wesentlichen Vorteile des Prozesses, nämlich die Möglichkeit einer mehrstufigen und damit flexiblen Umformung, außer Acht gelassen. So können in mehrstufigen Drei-Rollen-Biegeprozessen gewonnene Prozessdaten bereits durchgeführter

Biegeschritte dazu genutzt werden, die Prozessparameter folgender Biegeschritte zu prognostizieren.

Mit der übergeordneten Zielsetzung einer Erhöhung des Automatisierungsgrads des Drei-Rollen-Biegens von Profilen, lassen sich anhand der beschriebenen Ausgangssituation und dem Stand der Technik folgende Ziele für diese Arbeit ableiten:

- Zur Reduktion der Prozessnebenzeiten durch das Messen der Profilkrümmung und –kontur und als Basis für eine Regelung der Profilkrümmung sind Krümmungsmesssysteme zu entwickeln. Diese sind dann auf ihre Messgenauigkeit hin zu untersuchen und anhand dessen ihr wirtschaftliches Anwendungspotential zu bewerten.
- Um die wirtschaftliche und flexible Anwendbarkeit einer Prozessregelung auch bei geringen Stückzahlen zu ermöglichen, ist eine Regelung von mehrstufigen Drei-Rollen-Biegeprozessen zu entwickeln, die ohne den Aufwand einer zusätzlichen Materialcharakterisierung anwendbar ist.

Zur Erreichung der gesetzten Ziele erfolgt zunächst die numerische Modellierung und Untersuchung des Drei-Rollen-Biegeprozess. In den numerischen Untersuchungen wird das Prozessverhalten hinsichtlich der sich ausbildenden Krümmung abgeleitet und aufbauend darauf das Rückfederungsverhalten in ein- und mehrstufigen Prozessen untersucht. Dabei ist es das Ziel, den Einfluss der in mehrstufigen Prozessen geänderten Kontaktbedingungen und die daraus resultierende Kraftereinleitung in das Profil auf das Rückfederungsverhalten zu identifizieren. Aufbauend auf der Analyse des Rückfederungsverhaltens wird dann eine Regelung der Krümmung unter Last mit Hilfe einer Subroutine für das numerische Modell implementiert und eine Methode zur Prognose der Rückfederung in mehrstufigen Drei-Rollen-Biegeprozessen vorgestellt. Die Methode zur Prognose der Rückfederung dient hierbei als Produkt-Controller nach der Definition von Allwood et al. [ALL16] (siehe Kapitel 2.4.3 Abbildung 16) zur Regelung mehrstufiger Drei-Rollen-Biegeprozesse. Auf Basis der numerischen Untersuchungen werden schließlich Anforderungen an die Messtechnik zur Erfassung der Krümmung gestellt.

Zur Validierung der Prozessregelung wird diese experimentell untersucht und an den realen Prozess angepasst. Hierzu erfolgen zunächst die Vorstellung der entwickelten Messsysteme zur Erfassung der Profilkrümmung sowie die Untersuchung ihrer Messgenauigkeit. Die Ergebnisse der Untersuchungen der Messgenauigkeit dienen der anschließenden Bewertung des Anwendungspotentials der entwickelten Messsysteme. Den Abschluss bilden die Vorstellung der auf einer Drei-Rollen-Profilbiegemaschine implementierten Regelung sowie deren experimentelle Untersuchung hinsichtlich ihrer Leistungsfähigkeit.

4 Versuchsanlage und –material

4.1 Drei-Rollen-Biegemaschine

Für die experimentellen Untersuchungen des Drei-Rollen-Biegens kommt eine BO229 der Firma Herkules Wetzlar GmbH mit einem Universalrollensatz zum Einsatz (Abbildung 23).

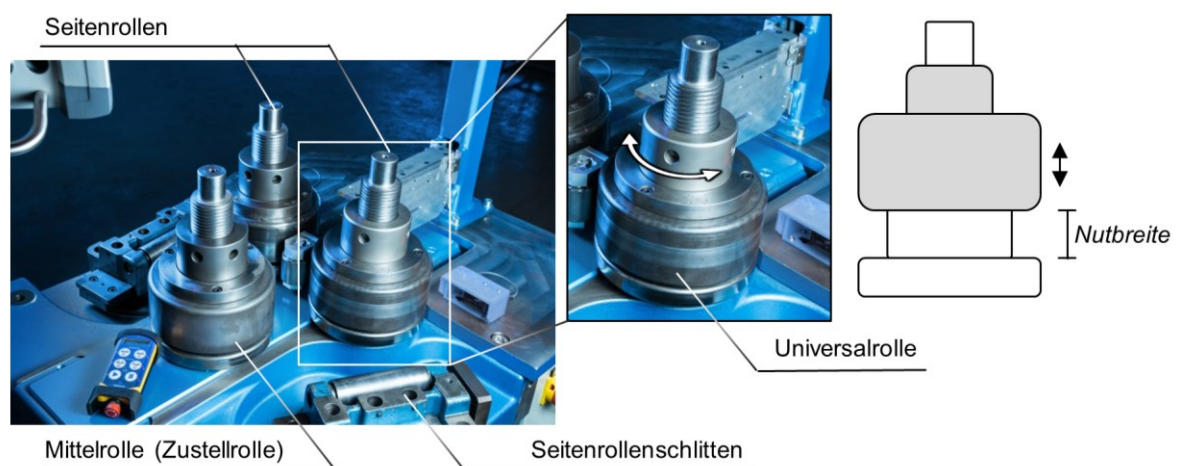


Abbildung 23 Drei-Rollen-Biegemaschine BO229 mit Universalrollensatz

Alle drei Rollen haben einen rotatorischen Servoantrieb. Die Zustellung der Mittelrolle erfolgt über einen Servoantrieb mit einer Trapezspindel. Die Maschine ist neben einer speicherprogrammierbaren Steuerung (SPS) mit einem Industrie-PC ausgestattet. Der Achsabstand der Seitenrollen beträgt 280 mm und der effektive Rollendurchmesser des verwendeten Universalrollensatzes liegt für alle Rollen bei 180 mm. Der obere Teil jeder Rolle lässt sich über ein Gewinde in seiner Höhe verstellen, sodass die Nutbreite an die Abmessung des Profils angepasst werden kann. Ebenso lässt sich durch ein Klemmen des Profils in der Nut der Kraftübertrag hinsichtlich des Vorschubs erhöhen. Am Ein- und Auslauf der Anlage befinden sich die Seitenrollenschlitten zur Führung des Profils in der Vertikalen.

Als Versuchsmaterial kamen in den experimentellen Untersuchungen ein kaltgezogenes Vierkantprofil (S235JRC+C, DIN EN 10278, 30x30 mm) und ein längsnahtgeschweißtes quadratisches Profilrohr (S235JRH, DIN EN 10219, 40x40x3 mm, Wanddickenverhältnis 13,33) zum Einsatz. Für die numerischen Untersuchungen wurden die Materialparameter des kaltgezogenen Vierkantprofils herangezogen.

4.2 Numerisches Grundmodell des Drei-Rollen-Biegeprozesses

Die numerische Modellierung des Prozesses auf Basis der Finite Elemente Methode erfolgt analog zu den geometrischen Verhältnissen der Versuchsanlage. Die Rollen sind hierbei als Starrkörper modelliert und eine Verformung oder Veränderung der Position durch auftretende Reaktionskräfte wird vernachlässigt.

Aufgrund der großen Profillängen und der damit erforderlichen, hohen Elementanzahl zur Untersuchung des Prozessverhaltens wird der Prozess zweidimensional modelliert, sodass Elementanzahl und Berechnungszeit reduziert werden können. Hierdurch wird ein ebener Dehnungszustand im Profil angenommen und eine Vereinfachung des Modells gegenüber der Realität vorgenommen. Diese Vorgehensweise hat sich jedoch in vorangegangenen Untersuchungen von Chatti und Dirksen bewährt [CHA97, DIR08].

Der Aufbau des Grundmodells in der Simulationssoftware Marc Mentat (Version 2012.1.1) und die Vernetzung des Profils sind in Abbildung 24 dargestellt. Als Elementtyp kommen zweidimensionale Elemente vom Typ 115 mit vier Knoten zum Einsatz. Die Kantenlänge der Elemente beträgt mit Ausnahme der den Seitenrollen zugewandten Elemente 1 mm. Dies entspricht einer Anzahl von 30 Elementen über die Dicke des Profils. In vergleichbaren Untersuchungen durch Dirksen führt eine Konvergenzanalyse zum Ergebnis, dass eine Anzahl von acht Elementen über der Dicke eines Profils mit vergleichbaren Abmessungen ausreichend ist [DIR08]. Die Vernetzung der den Seitenrollen zugewandten Elemente wird lokal verfeinert, sodass die Kantenlänge an der Außenseite 0,5 mm beträgt (Abbildung 24). Diese Verfeinerung wird vorgenommen, da die Knotenkoordinaten am Rand des Profils als Stützpunkte zur Be-

rechnung der Krümmung herangezogen werden und durch eine hohe Stützpunktanzahl eine höhere Genauigkeit der Krümmungsabbildung möglich wird.

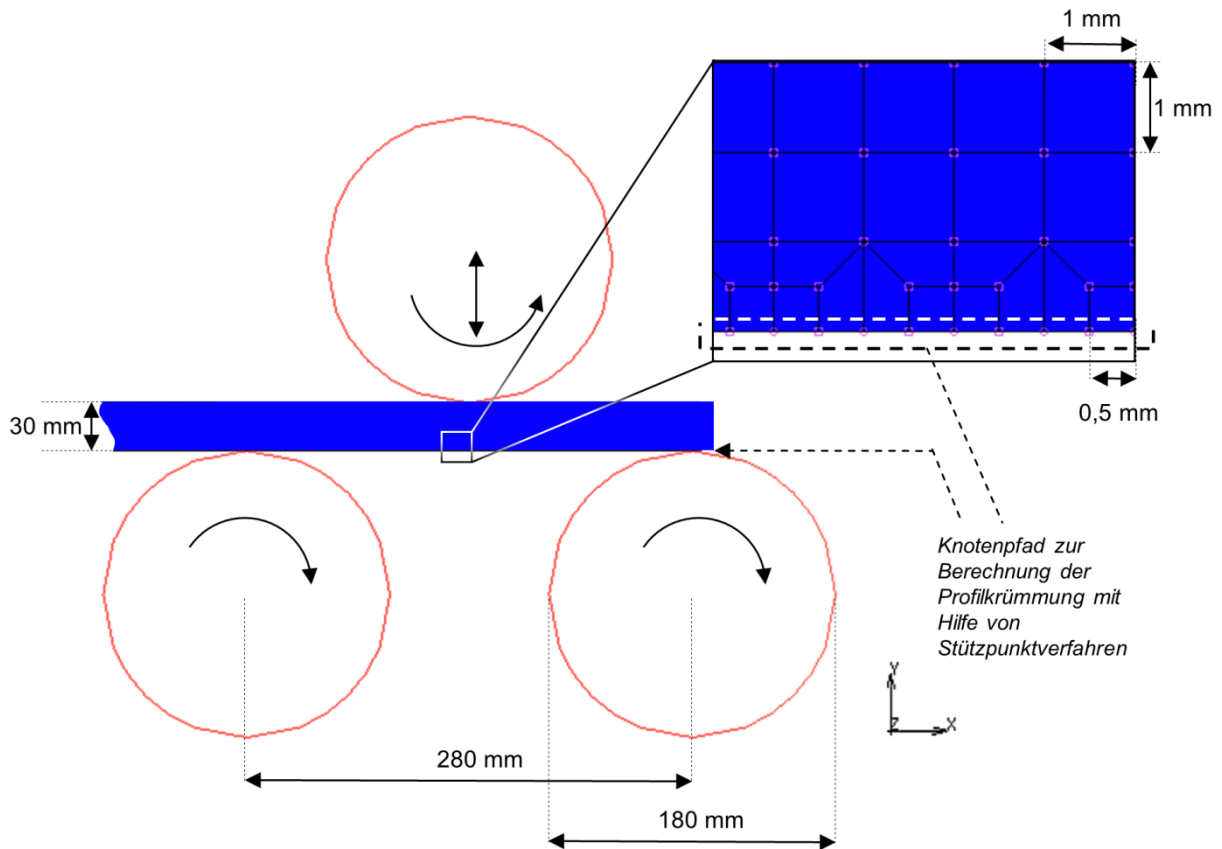


Abbildung 24 Numerisches Grundmodell des Drei-Rollen-Biegeprozesses

Im Zuge einzelner, weiterführender Untersuchungen wird die Vernetzung des in Abbildung 24 eingezeichneten Knotenpfads zur Berechnung der Profilkrümmung nochmals lokal verfeinert, sodass die Kantenlänge an der Außenseite 0,25 mm beträgt. Dies wird im folgenden Kapitel an entsprechender Stelle kenntlich gemacht.

Der Vorschub des Profils erfolgt über den Reibkraftschluss mit den Rollen nach dem Coulombschen Reibungsgesetz. Die Rollen drehen mit einer konstanten Winkelgeschwindigkeit von $105,3 \text{ }^\circ/\text{s}$. Um die Klemmwirkung des Universalrollensatzes beim Kraftübertrag von den Rollen auf das Profil zu berücksichtigen, wird ein Reibungskoeffizient von $\mu = 0,4$ verwendet.

Zur Abbildung des Materialverhaltens wurden aus dem Versuchswerkstoff S235JRC+C Rundzugproben nach DIN 50125 [DEU16] hergestellt und Zug-

versuche nach DIN EN ISO 6892-1 [DEU20] durchgeführt. Die abgeleitete Fließkurve wird nach dem Ansatz von Ludwik [LUD03] extrapoliert. Der Elastizitätsmodul beträgt $E = 190.000 \frac{N}{mm^2}$ und die Querkontraktionszahl $\nu = 0,3$.

Es werden sowohl ein- als auch mehrstufige Prozesse mit dem Modell simuliert. Dabei kommt ein impliziter Solver zum Einsatz. Abbildung 25 zeigt hierzu schematisch den zeitlichen Ablauf der simulierten Prozesse.

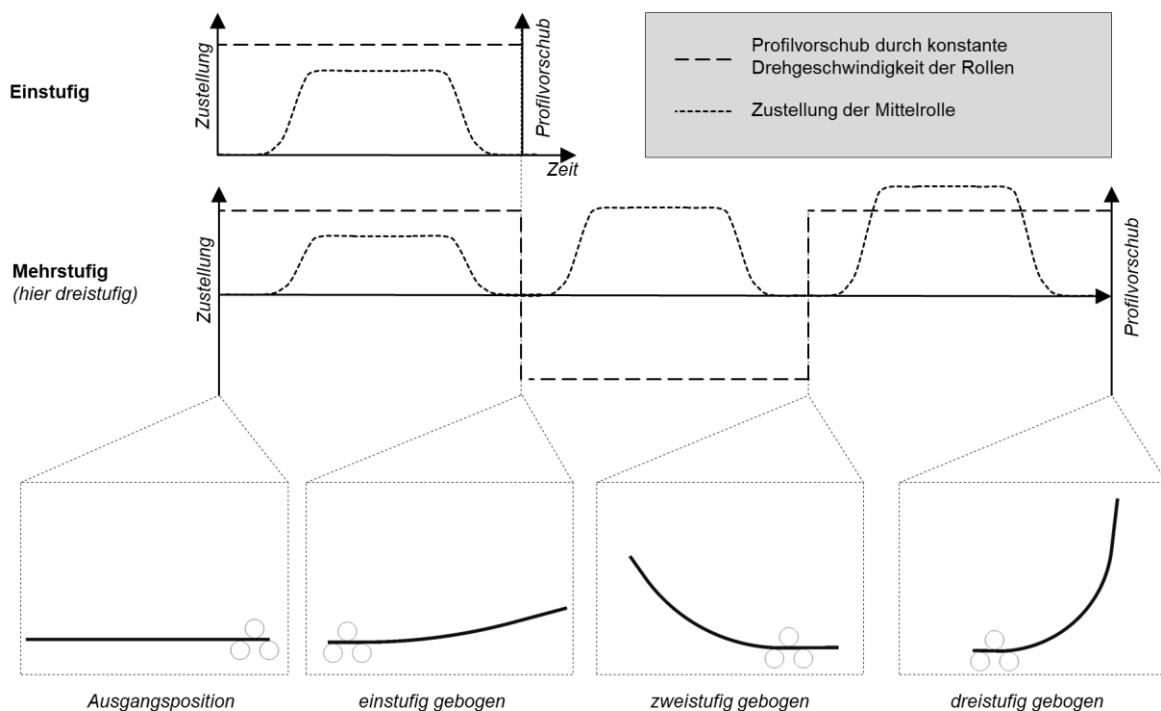


Abbildung 25 Schematische Darstellung der durchgeführten ein- und mehrstufigen Prozesssimulationen

Zur Berechnung der im Prozess vorliegenden Profilkrümmungen werden für jedes Inkrement einer Simulation die Knotenkoordinaten entlang des in Abbildung 24 dargestellten Knotenpfads im Post-Processing ermittelt. Aus den Knotenkoordinaten wird mittels eines Levenberg-Marquardt-Algorithmus [MAR63] zu jedem Zeitinkrement die Krümmung im jeweils betrachteten Bereich des Profils berechnet.

Die Validierung des Modells erfolgte anhand einstufiger Prozesse mit verschiedenen, vorgegebenen Zustellungen der Mittelrolle durch einen Abgleich der resultierenden Krümmung des entlasteten Profils mit Realversuchen auf

der Versuchsanlage. Hierzu wurden die Konturen der in Realversuchen gebogenen Profile mit einem 3D-Scanner mit strukturiertem Licht (GOM Atos III, Gesellschaft für optische Messtechnik mbH) gemessen und die Krümmung mit einem Levenberg-Marquardt-Algorithmus berechnet. Die dabei festgestellten Abweichungen zum numerischen Modell sind als gering einzustufen (siehe Anhang 10.1). Mit einer steigenden Zustellung kam es zu einem Anstieg der Abweichungen, was auf die Nachgiebigkeit der Versuchsanlage zurückzuführen ist. Diese ist im Modell nicht berücksichtigt.

5 Numerische Untersuchung des Drei-Rollen-Biegens

Zu Beginn der numerischen Untersuchungen steht die Untersuchung der Ausbildung und Lage des Krümmungsmaximums. Hierauf basierend erfolgt eine Analyse des Krümmungsverlaufs des Profils unter Last und im entlasteten Zustand. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen dienen zum einen dazu, die Parameter zur Untersuchung des Rückfederungsverhaltens festzulegen. Zum anderen können erste Anforderungen an die zu entwickelnde Messtechnik abgeleitet werden.

Darauf aufbauend findet die Untersuchung des Rückfederungsverhaltens in ein- und mehrstufigen Drei-Rollen-Biegeprozessen anhand der Krümmung des Profils im be- und entlasteten Zustand statt. Die daraus gewonnenen Erkenntnisse bilden die Grundlage für die Entwicklung eines Ansatzes zur Prognose der Rückfederung in mehrstufigen Drei-Rollen-Biegeprozessen.

Zur Untersuchung des Prognoseansatzes erfolgt mit Hilfe einer Subroutine die Implementierung einer Online-Regelung der Krümmung unter Last in der Simulation. In den damit durchgeführten Untersuchungen dient der Prognoseansatz als Produkt-Controller nach der Definition von Allwood et al. [ALL16] (siehe Kapitel 2.4.3 Abbildung 16) zur Regelung mehrstufiger Drei-Rollen-Biegeprozesse.

Im Rahmen der numerischen Untersuchungen wurden ein- und mehrstufige Simulationen des Drei-Rollen-Biegeprozesses mit verschiedenen Zustellungen der Mittelrolle durchgeführt. Eine vollständige Auflistung der durchgeführten Simulationen ist dem Anhang zu entnehmen.

5.1 Analyse des Krümmungsverlaufs beim Drei-Rollen-Biegen

5.1.1 Untersuchung des Krümmungsmaximums beim Drei-Rollen-Biegen

Für die Untersuchung des Krümmungsmaximums wurde zunächst der Krümmungsverlauf zwischen den beiden Seitenrollen in einem eingefahrenen stationären Prozesszustand betrachtet. In diesem Verhalten sich bei konstanter Mittelrollenposition alle Zustandsgrößen des Prozesses zeitlich näherungsweise konstant.

Verlauf der Krümmung zwischen den Seitenrollen

Die Untersuchungen wurden anhand ein- und mehrstufiger Prozesssimulationen durchgeführt. Bei allen untersuchten Simulationen kann ein charakteristischer Krümmungsverlauf zwischen den Kontaktpunkten der Seitenrollen festgestellt werden. Dieser wird im Folgenden anhand einer einstufigen Prozesssimulation vorgestellt und analysiert.

Abbildung 26 zeigt exemplarisch den Krümmungsverlauf zwischen den Kontaktpunkten des Profils mit den Seitenrollen in einem einstufigen Prozess. Wie in Abschnitt 4.2 beschrieben ist, wurde hierbei die Krümmung an der, der Mittelrolle abgewandten Profilseite ausgewertet (vgl. Abbildung 24). Die Krümmung wurde anhand der Koordinaten von 41 nebeneinander liegenden Knoten gleitend über den betrachteten Bereich berechnet. Die Zustellung der Mittelrolle beträgt hierbei 6,5 mm.

Wie zu erkennen ist, nimmt die Krümmung ausgehend von der am Kontaktpunkt A mit der Seitenrolle am Einlauf vorliegenden Ausgangskrümmung des Profils zunächst linear zu, was bei einem linear-elastischen Verhalten zu erwarten ist (Abbildung 26). Die Abweichungen im Bereich des Kontaktpunkts A vom linearen Verlauf sind hierbei auf die lokal vorliegende Flächenpressung zurückzuführen. Mit dem Überschreiten der Fließgrenze steigt die Krümmung dann exponentiell bis zum Erreichen des Krümmungsmaximums an. Der exponentielle Anstieg ist auf das plastische Materialverhalten zurückzuführen. Die Steigungen des Krümmungsverlaufs im linear elastischen und im plastischen Bereich sind hierbei neben den Materialeigenschaften (E-Modul, Fließ-

grenze und –kurve) auch von der Ausgangskrümmung des Profils und dem Abstand der Kontaktpunkte A und B abhängig. Im Bereich des Kontaktpunkts der Mittelrolle bildet sich, bedingt durch eine lokale Querschnittsminderung aufgrund der hier im Kontaktpunkt wirkenden Spannungsüberhöhungen, ein lokales Plateau im Verlauf der Krümmung aus. Der Kontaktpunkt B ist hierbei außermittig entgegen der Vorschubrichtung verschoben. Nach dem Erreichen des Krümmungsmaximums nimmt die Krümmung im weiteren Verlauf aufgrund der elastischen Rückfederung wieder näherungsweise linear ab. Die Änderung der Krümmung pro Längeneinheit ist hierbei abhängig vom Rückfederungsverhalten und dem Abstand des Krümmungsmaximums zum Kontaktpunkt C. Das Rückfederungsverhalten ist hierbei durch das Verhältnis des Krümmungsmaximums zur bleibenden Krümmung nach der Rückfederung $\frac{k_m}{k_b}$ charakterisiert.

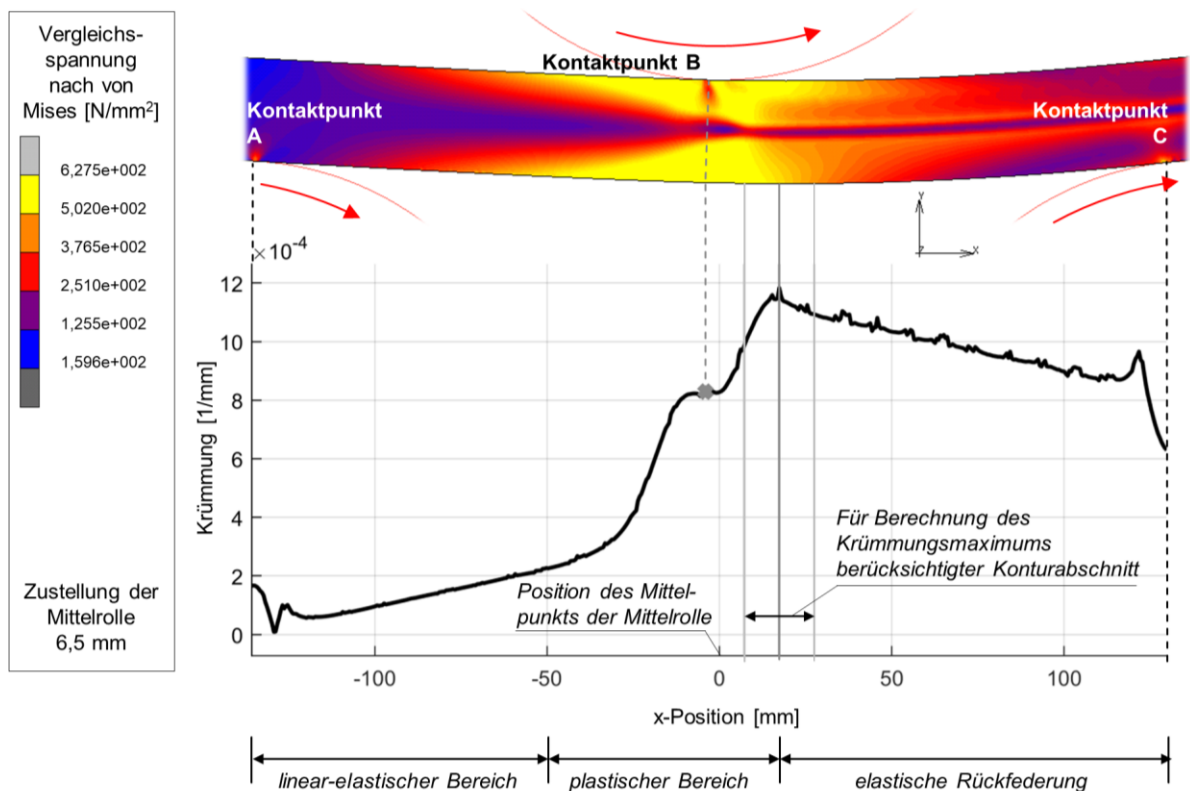


Abbildung 26 Krümmungsverlauf zwischen den Kontaktpunkten des Profils mit den Seitenrollen (stationärer Prozesszustand)

Bedingt durch die Berechnung der Krümmung über die Koordinaten von 41 Knoten, gibt der in Abbildung 26 dargestellte Krümmungsverlauf einen gleiten-

den Mittelwert der eigentlichen Krümmung wieder. Während der qualitative Verlauf hierdurch in angemessener Form dargestellt wird, müsste zur Berechnung des wahren Krümmungsmaximums und dessen Position ein infinitesimal kleiner Konturabschnitt betrachtet werden. Das wahre Krümmungsmaximum liegt hierbei in der dem Kontaktpunkt B zugewandten Hälfte des in Abbildung 26 eingezeichneten Konturabschnitts, der zur Berechnung des Maximums herangezogen wurde. Dies stützt sich auf die Annahme, dass die Krümmungsänderung pro Längeneinheit im plastischen Bereich höher ist als im Bereich der elastischen Rückfederung. Ebenso stimmt dies mit dem, in diesem Bereich vorliegendem Maximum der Vergleichsspannung über dem Profilquerschnitt überein (siehe Abbildung 26). Die Anzahl der zur Berechnung der Krümmung genutzten Knoten und somit die Größe des betrachteten Konturbereichs, der im Folgenden als Messbereich bezeichnet wird, beeinflusst folglich sowohl den Betrag als auch die Lage des ermittelten Krümmungsmaximums.

Durch die Mittelung bei der Berechnung des Krümmungsmaximums kann es zudem zu Abweichungen des berechneten Krümmungsmaximums zwischen ein- und mehrstufigen Prozessen kommen. Abbildung 27 zeigt schematisch die Krümmungsverläufe unter Last eines ein- und eines mehrstufigen Prozesses, die das gleiche Krümmungsmaximum aufweisen.

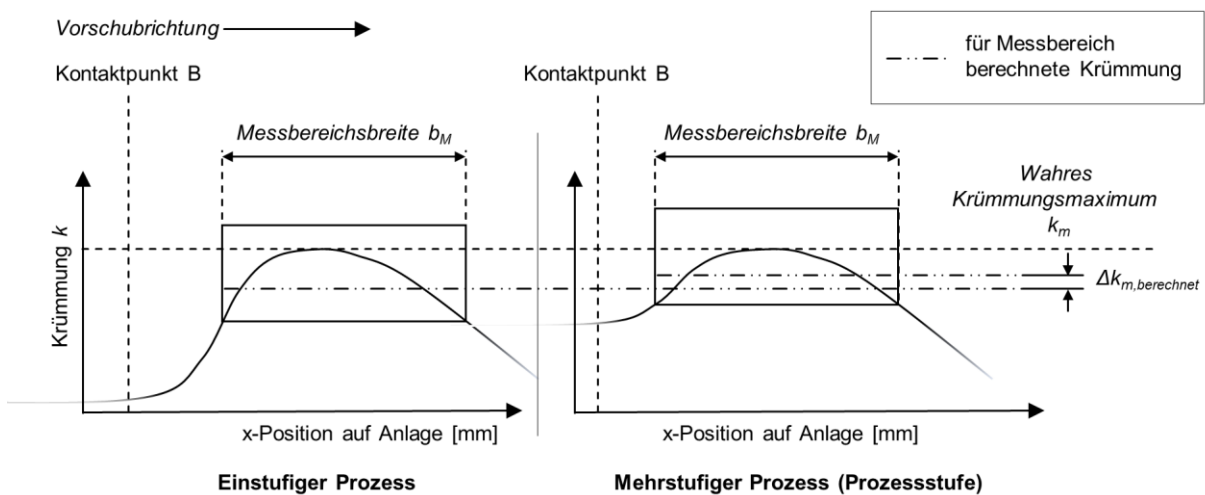


Abbildung 27 Schematische Darstellung des Krümmungsverlaufs in ein- und mehrstufigen Prozessen mit dem gleichen Krümmungsmaximum

Durch die bereits vorliegende Ausgangskrümmung in mehrstufigen Prozessen sowie eine daraus resultierende Verschiebung der Kontaktpunkte wird die

Steigung des Krümmungsverlaufs beeinflusst. Bei einer gleichbleibenden Messbereichsbreite kann dies zu einer Abweichung $\Delta k_{m,berechnet}$ der berechneten Krümmungmaxima bei ein- und mehrstufigen Prozessen führen, obwohl in beiden Prozessen ein identisches, wahres Krümmungsmaximum vorliegt (Abbildung 27). Umgekehrt kann das berechnete Krümmungsmaximum in ein- und mehrstufigen Prozessen auch gleich sein, obwohl die wahren Krümmungmaxima unterschiedlich sind. Insgesamt kann angenommen werden, dass das wahre Krümmungsmaximum besser genähert werden kann, wenn der das Maximum umgebende Krümmungsverlauf geringere Steigungen aufweist.

Lage des Krümmungsmaximums

In bestehenden Untersuchungen und Modellansätzen zum Drei-Rollen-Biegen wird angenommen, dass das Maximum der Krümmung und des Biegemoments im Kontaktpunkt B der Mittelrolle mit dem Profil auftritt [CHA97, DIR08]. Entgegen diesen Annahmen bildet sich das Krümmungsmaximum nicht am Kontaktpunkt B der Mittelrolle aus, sondern ist in Vorschubrichtung verlagert. Dies wird im Folgenden anhand der kinematischen Bedingungen und der auf das Profil wirkenden Kräfte hergeleitet.

Unter der Annahme, dass sich die neutrale spannungsfreie Faser während des Prozesses in der Mitte des Profilquerschnitts befindet und sich hier über der Profillänge eine konstante Vorschubgeschwindigkeit

$$v_{neutral} = \textit{konstant} \tag{3}$$

ausbildet, können folgende Annahmen getroffen werden.

Durch die Dehnung der äußeren Faser des Profils beim Biegen nimmt die Oberflächengeschwindigkeit hier analog zum Krümmungsverlauf bis zum Krümmungsmaximum zu. Mit der elastischen Rückfederung nimmt die Oberflächengeschwindigkeit wieder ab. Für die Krümmung k und die Oberflächengeschwindigkeit v des Profils in den Kontaktpunkten A und C lassen sich anhand des Krümmungsverlaufs in Abbildung 26 folgende Aussagen treffen.

$$k_{\text{Kontaktpunkt A}} < k_{\text{Kontaktpunkt C}} \tag{4}$$

$$v_{\text{Kontaktpunkt A}} < v_{\text{Kontaktpunkt C}} \quad (5)$$

Des Weiteren gilt für einstufige Prozesse

$$v_{\text{Kontaktpunkt A}} = v_{\text{neutral}} \quad (6)$$

und

$$v_{\text{Kontaktpunkt A}} > v_{\text{neutral}} \quad (7)$$

für mehrstufige Prozesse, aufgrund der bereits vorliegenden Ausgangskrümmung des Profils.

Die innere Faser des Profils erfährt durch die Biegung eine Stauchung, wodurch für die Oberflächengeschwindigkeit des Profils im Kontaktpunkt B

$$v_{\text{Kontaktpunkt B}} < v_{\text{neutral}} \quad (8)$$

gilt.

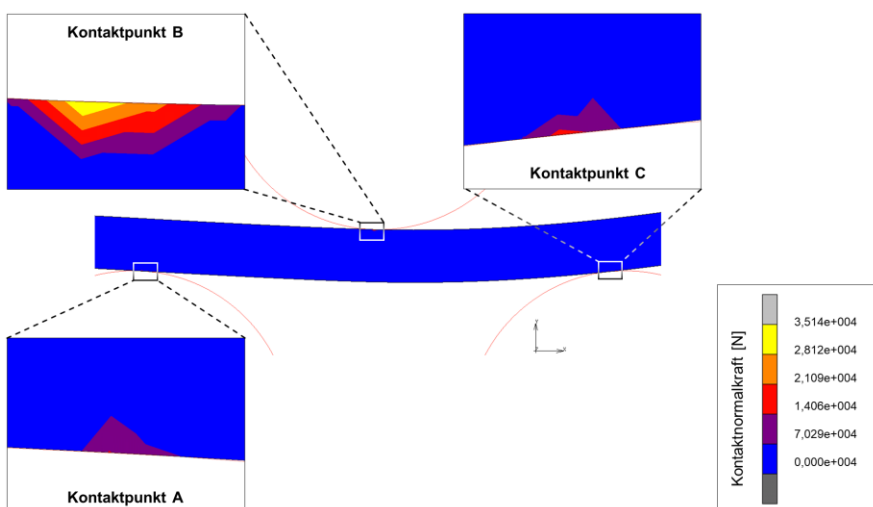


Abbildung 28 Kontaktnormalkräfte an den Rollen im stationären Prozesszustand

Unter der Annahme der Randbedingung, dass aufgrund der Kontaktnormalkräfte im Kontaktpunkt B, die hier die höchsten sind (Abbildung 28), eine Rollreibung vorliegt, gilt:

$$v_{\text{Kontaktpunkt B}} = v_{\text{Oberfläche Rolle}} \quad (9)$$

Da die Oberflächengeschwindigkeit für alle Rollen gleich ist, folgt aus (3)-(9):

$$v_{\text{Kontaktpunkt A}} > v_{\text{Oberfläche Rolle}} \quad (10)$$

$$v_{\text{Kontaktpunkt C}} > v_{\text{Oberfläche Rolle}} \quad (11)$$

Hieraus ergibt sich durch die Relativbewegung des Profils gegenüber den Seitenrollen in den Kontaktpunkten A und C eine der Vorschubbewegung entgegenwirkende Gleitreibungskraft. Dies stimmt mit den in der Simulation berechneten Reaktionskräften an den Rollen sowie den resultierenden Momenten überein (Abbildung 29).

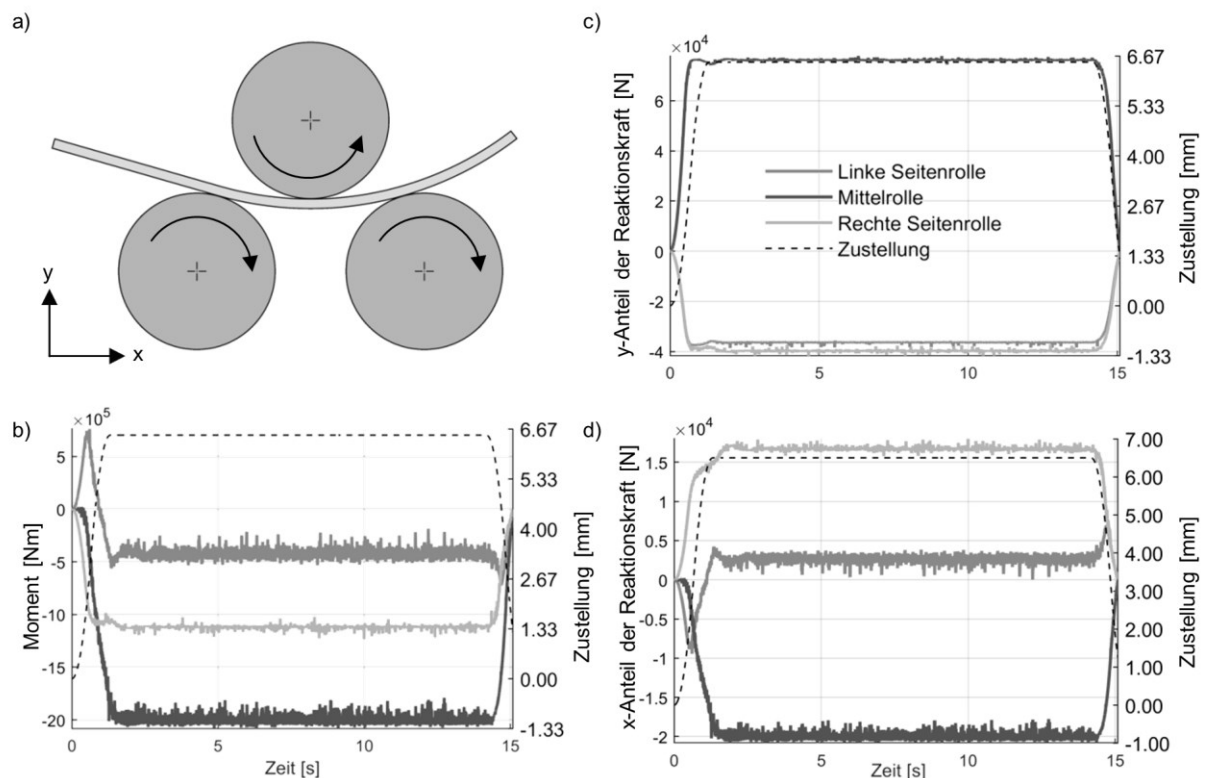


Abbildung 29 Reaktionskräfte und -momente an den Rollen: a) Lage des Koordinatensystems, b) Momente an Rollen, c) y-Anteil der Reaktionskraft, d) x-Anteil der Reaktionskraft

Ausgehend von den vorliegenden Reaktionskräften an den Rollen ergibt sich das in Abbildung 30 dargestellte Lastenkollektiv.

Aus den wirkenden Hauptkräften ($F_{y,A}$, $F_{y,B}$, $F_{y,C}$) ergibt sich ein Biegemoment, welches sein Maximum im Kontaktpunkt B erreicht. Die Überlagerung des gebogenen Profils mit den orthogonal zur Zustellrichtung wirkenden Kräften

$(F_{x,A}, F_{x,B}, F_{x,C})$ führt zu einer Verschiebung des maximalen Biegemoments und somit des Krümmungsmaximums in Vorschubrichtung.

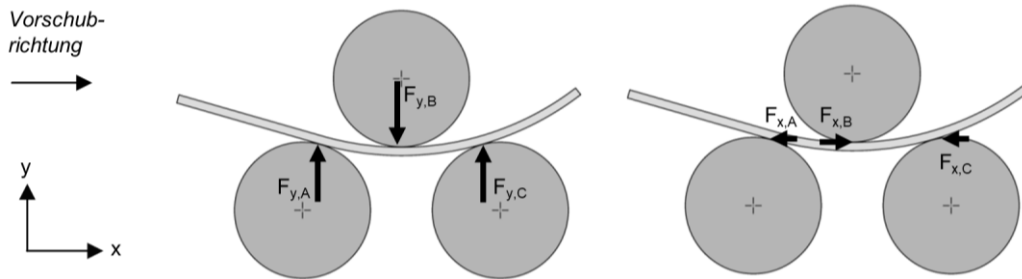


Abbildung 30 Auf Profil wirkendes Lastenkollektiv (Richtung der angreifenden Kräfte, aufgeteilt in x- und y-Komponente)

In den durchgeführten Simulationen nimmt die Verlagerung des Krümmungsmaximums in Vorschubrichtung mit einer steigenden Krümmung zu. Abbildung 31 zeigt hierzu die Position der jeweils berechneten Krümmung unter Last in Abhängigkeit des Radius unter Last. Die maximale Verlagerung des Krümmungsmaximums liegt hierbei in Bezug auf die x-Position unterhalb von 32 mm.

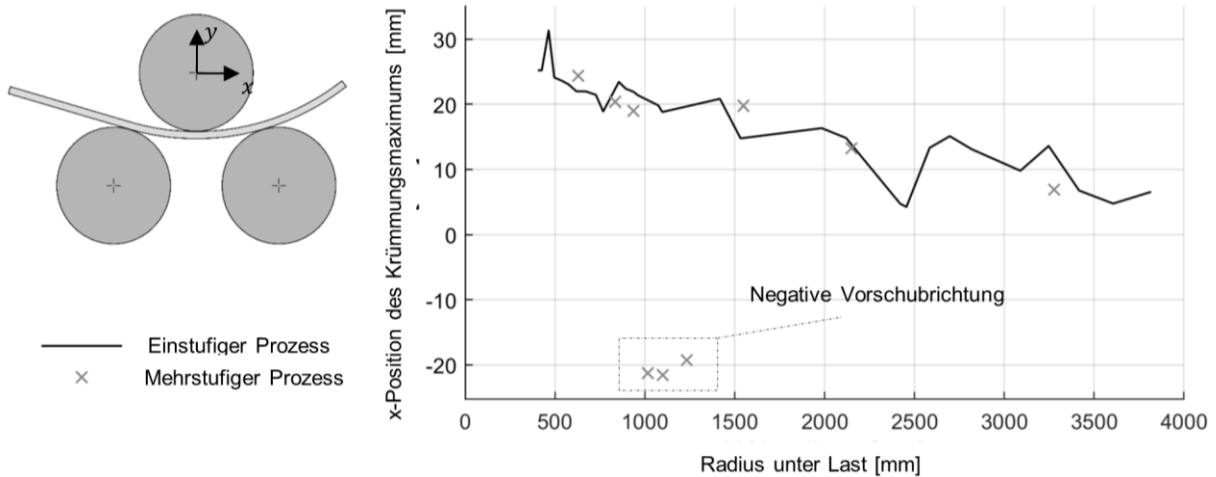


Abbildung 31 Lage des Krümmungsmaximums in den durchgeführten Simulationen (Messbereichsgröße 81 Knoten, entspricht einer Messbereichsbreite von ca. 40 mm)

5.1.2 Einfluss der Messbereichsgröße

Wie im Stand der Technik beschrieben, liegt bei der Krümmungsbestimmung mit Stützpunktverfahren ein Zielkonflikt zwischen einer geringen Messbereichsgröße und der Messung kleiner Krümmungen mit ausreichender Genauigkeit vor. Darüber hinaus hat die Messbereichsgröße, wie zuvor beschrieben,

einen Einfluss auf das berechnete Krümmungsmaximum, welches im Folgenden als Krümmung unter Last bezeichnet wird. Entsprechend wird der Einfluss der Messbereichsgröße im Folgenden analysiert.

Bei der Auswertung der Profilkrümmung ist die Messbereichsgröße durch die Anzahl der zur Berechnung der Krümmung betrachteten, nebeneinanderliegenden Knoten definiert. Zur Untersuchung des Einflusses erfolgt die Berechnung der Krümmung entlang des Profils mit verschiedenen Messbereichsgrößen (Abbildung 32). Die jeweils berechnete Krümmung ist hierbei dem Knoten in der Mitte des Messbereichs zugeordnet. Auf diese Weise wird für jeden Knoten die Krümmung unter Last berechnet und analog hierzu die Krümmung am jeweiligen Knoten im entlasteten Zustand berechnet.

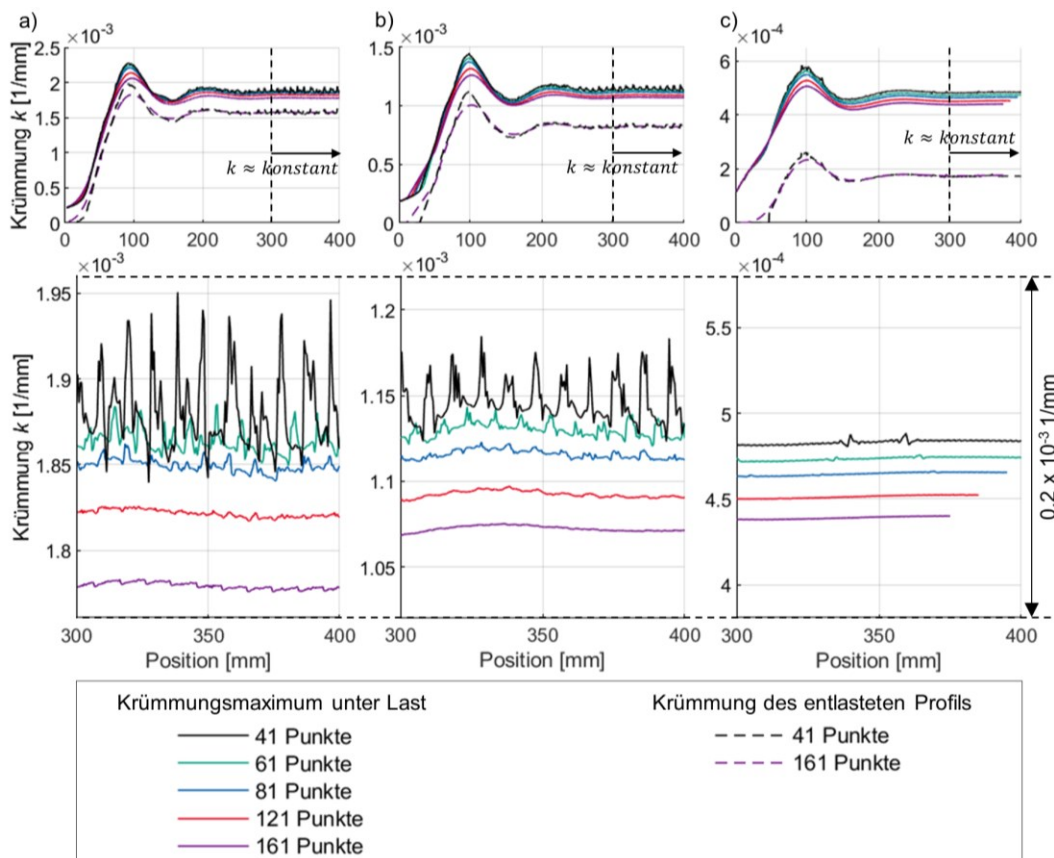


Abbildung 32 Einfluss der Messbereichsgröße: a) Mittelrollenzustellung 10,00 mm, b) Mittelrollenzustellung 6,50 mm, c) Mittelrollenzustellung 3,00 mm

Abbildung 32 zeigt die berechneten Krümmungen aufgetragen über der Position der Knoten in Bezug auf die neutrale Faser des Profils im betrachteten Profilsabschnitt. Dargestellt sind diese für drei unterschiedliche Zustellungen der

Mittelrolle zwischen 10,0 mm und 3,0 mm (a),b) und c)). Betrachtet wird der Bereich, in dem der Verlauf der Krümmung des entlasteten Profils von Null beginnend ansteigt, bis sich eine konstante Krümmung ausbildet.

Es ist zu erkennen, dass die Größe des Messbereichs nur einen geringen Einfluss auf die Krümmung des entlasteten Profils aufweist. Im Bereich der konstanten Krümmung führt eine Verringerung der Messbereichsgröße hierbei, bedingt durch die Diskretisierung des Modells, zu einem Rauschen. Liegt hingegen keine konstante Krümmung vor, hat ein größerer Messbereich durch die Bildung eines gleitenden Mittelwerts einen größeren Effekt auf den berechneten Krümmungsverlauf. Hier kommt es zu einer Glättung des wahren Krümmungsverlaufs, der nur mit einem infinitesimal kleinen Messbereich zu bestimmen wäre.

Der gleiche Glättungseffekt ist auch bei der Krümmung unter Last für nicht konstante Krümmungen zu beobachten. Mit abnehmender Messbereichsgröße konvergiert die berechnete Krümmung unter Last gegen das wahre Krümmungsmaximum. Da, wie in Kapitel 5.1.1 beschrieben, der zur Berechnung der Krümmung unter Last betrachtete Messbereich stets eine nicht-konstante Krümmung aufweist, tritt dieses Konvergenzverhalten auch in demjenigen Bereich des Verlaufs auf, in dem die Krümmung unter Last einen konstanten Wert annimmt. Die jeweils unteren Diagramme zeigen eine Vergrößerung dieses Bereiches. Daraus ergibt sich, dass für die möglichst exakte Erfassung der Krümmung unter Last ein möglichst kleiner Messbereich verwendet werden sollte, um so den Fehler durch die Mittelung zu reduzieren.

Aufgrund der Diskretisierung des Modells kommt es bei hohen Krümmungen und Messbereichen mit weniger als 81 Knoten jedoch zu einem numerischen Rauschen, dessen Schwankungen größer sind als die aus der Mittelung eines größeren Messbereichs resultierenden Abweichungen. Aus diesem Grund wurden in den folgenden Untersuchungen 81 Knoten zur Berechnung der Krümmung verwendet, was einer Messbereichsgröße von ungefähr 40 mm entspricht. Dies gilt sowohl für die Krümmung unter Last als auch für die Krümmung des entlasteten Profils.

5.1.3 Prozessverhalten und Charakteristika des Krümmungsverlaufs beim Drei-Rollenbiegen

Während bei der konstruktiven und fertigungstechnischen Beschreibung von gebogenen Profilen in der Regel eine Kombination von Segmenten mit diskreten Krümmungswerten verwendet wird, weisen mit kinematischen Biegeverfahren hergestellte gebogene Profile keine sprunghaften Änderungen im Verlauf der Krümmung auf [GRO18c]. Vielmehr nimmt die Krümmung über die Länge des Profils einen stetig differenzierbaren Verlauf an. Dadurch ergeben sich Übergangsbereiche zwischen Segmenten unterschiedlicher Krümmung eines gebogenen Profils. Engel und Kersten [ENG10] sowie Merklein et. al [MER12] haben den Krümmungsverlauf bei Drei-Rollen-Schubbiegeprozessen untersucht und drei bzw. vier charakteristische Zonen definiert. Aufgrund der kinematischen Ähnlichkeiten zum Drei-Rollen-Biegen lassen sich auch hier vergleichbare Zonen beobachten [KES23*].

Zur Untersuchung des Krümmungsverlaufs beim Drei-Rollen-Biegen und des Prozessverhaltens wurden zunächst der zeitliche Verlauf der Krümmung unter Last sowie der Verlauf der Zustellung der Mittelrolle betrachtet. Abbildung 33 zeigt hierzu exemplarische Verläufe über der Prozessdauer.

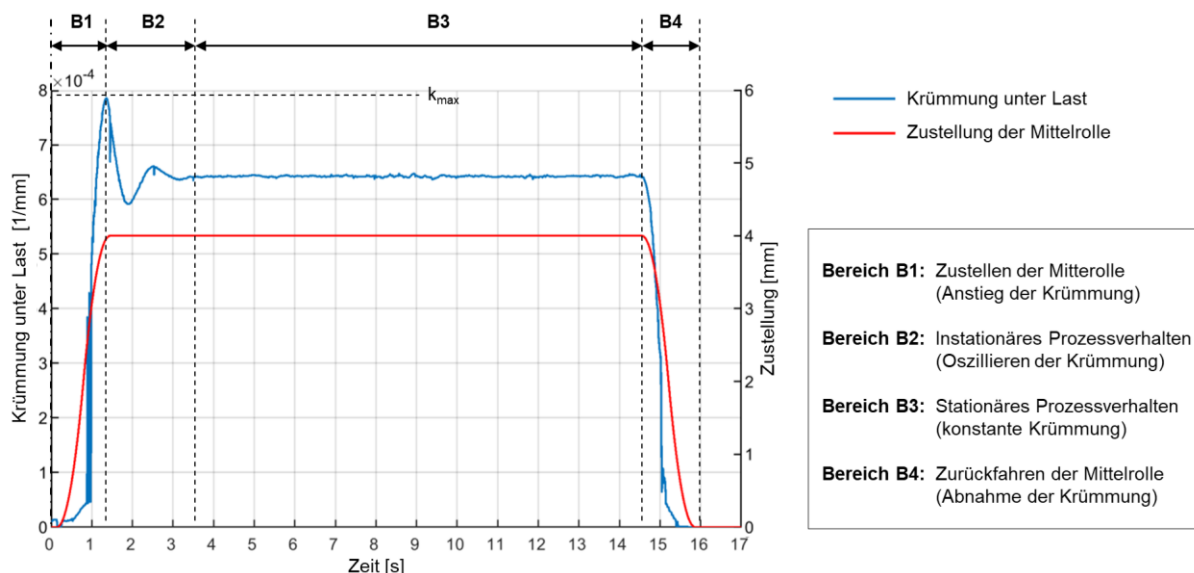


Abbildung 33 Zeitlicher Verlauf der Krümmung unter Last und der Zustellung der Mittelrolle

Die Unstetigkeiten im Verlauf der Krümmung in den Bereichen B1 und B4 sind hierbei auf die Diskretisierung des Modells und die Anzahl der verwendeten Knoten (81 Knoten) zur Berechnung der Krümmung zurückzuführen.

Der Krümmungsverlauf in Abbildung 33, der im Folgenden in Anlehnung an [ENG10] und [MER12] analysiert wird, repräsentiert den eines einstufigen Prozesses. Vergleichbare charakteristische Verläufe liegen auch in mehrstufigen Prozessen bei einer konstanten Ausgangskrümmung des Profils vor.

Im Bereich B1 wird die Mittelrolle zugestellt. Beim Drei-Rollen-Biegen erfolgt dies in der Regel über eine Vorschublänge des Profils, die ein Viertel bis die Hälfte des Achsabstands der Seitenrollen beträgt. Mit der Zustellung steigt die Krümmung an und erreicht ihr Maximum, sobald die maximale Zustellung erreicht ist. Erfolgt die Zustellung der Mittelrolle über einen größeren Vorschubweg des Profils, so wird das Krümmungsmaximum bereits vor der maximalen Zustellung erreicht und das im Bereich B2 vorliegende Oszillieren der Krümmung tritt auf. Dies ist als ein instationärer Prozesszustand zu klassifizieren, da die Krümmung trotz konstanter Position der Mittelwalze oszilliert, was zu ausgeprägten lokalen Maxima und Minima der Krümmung führt. Die Oszillation tritt aufgrund einer Änderung der Kontaktverhältnisse bei dem weiteren Profilver Schub auf. Beim Erreichen der maximalen Zustellung weist das Profil zwischen der Mittelrolle und der Seitenrolle am Auslauf über seine Länge eine unterschiedlich starke Plastifizierung auf. Hierdurch federt es beim weiteren Profilver Schub unterschiedlich stark zurück, was zu der Änderung der Kontaktverhältnisse führt.

Abbildung 34 zeigt hierzu die Änderung der x-Position der Kontaktpunktkoordinaten, die anhand der Position der Knoten, die im Kontakt mit der jeweiligen Rolle sind, berechnet wurden. Während nach dem Erreichen der maximalen Zustellung keine signifikante Änderung der Kontaktpunkte mit der Mittelrolle und der linken Seitenrolle am Einlauf der Maschine stattfindet, verlagert sich der Kontaktpunkt mit der rechten Seitenrolle am Auslauf der Maschine weiter in negativer Richtung und schwingt korrelierend zur Krümmung. Durch die aus der Änderung der Kontaktpunktposition resultierende, unterschiedliche Auslenkung des Profils, kommt es zu den lokal ausgeprägten Maxima und Minima im Krümmungsverlauf im Bereich B2.

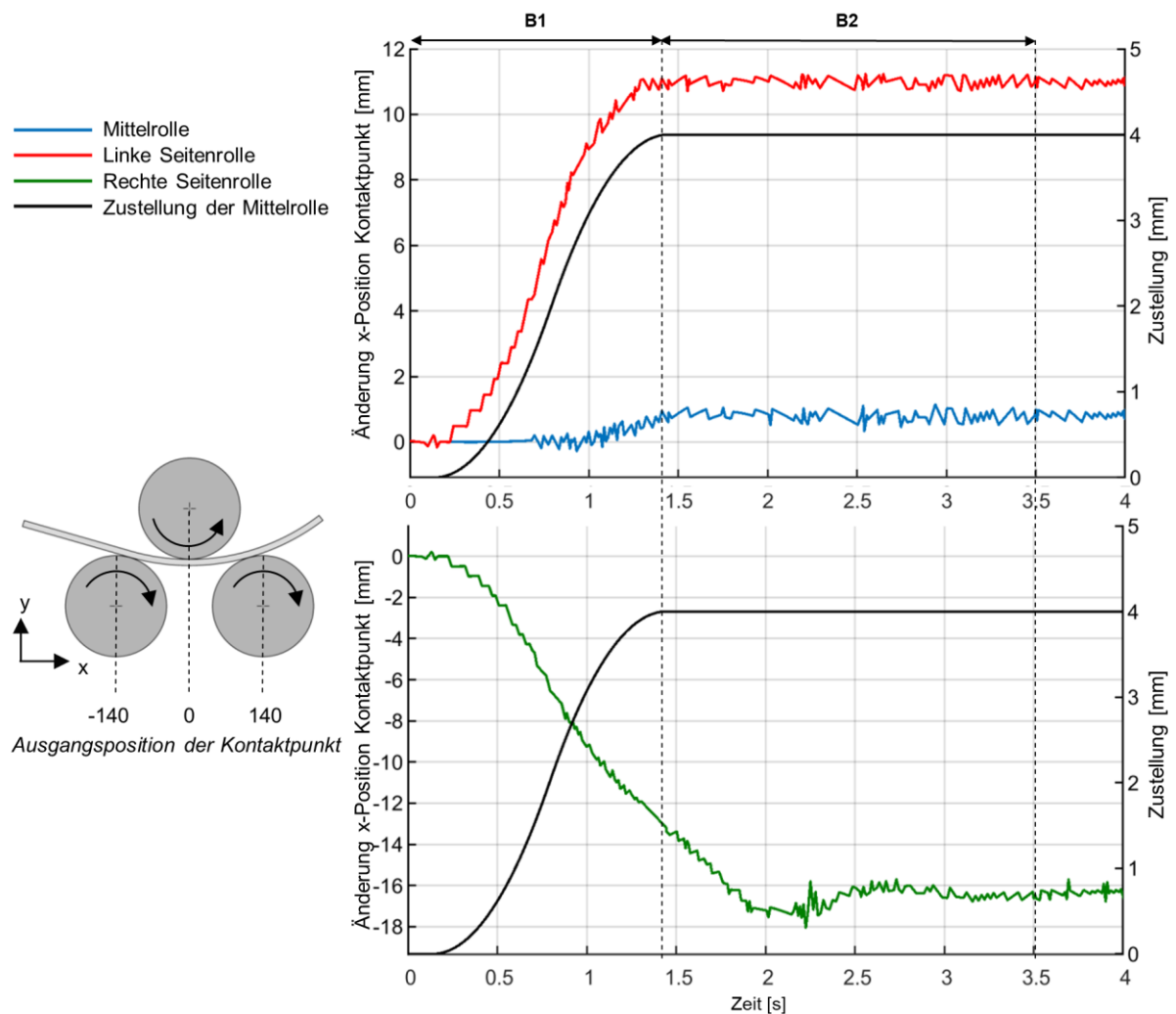


Abbildung 34 Änderung der Kontaktpunktpositionen

Nach dem Abklingen der Schwingungen bildet sich in Bereich B3 eine konstante Krümmung aus. In diesem Bereich wird der Prozesszustand daher als stationär klassifiziert. In den durchgeführten Simulationen klingen die Schwingungen ausgehend vom Krümmungsmaximum nach einem Profilver Schub, der ca. dem Achsabstand der Seitenrollen entspricht, ab.

Im Auslaufbereich B3 fährt die Mittelrolle auf ihre Ausgangsposition zurück und die Profilkümmung reduziert sich bis auf die Ausgangskrümmung.

Der charakteristische Verlauf der Krümmung unter Last sowie die in Abbildung 33 eingezeichneten Bereiche spiegeln sich in der Krümmung des entlasteten Profils wider. Abbildung 35 zeigt hierzu den Krümmungsverlauf des entlasteten Profils über der Profillänge.

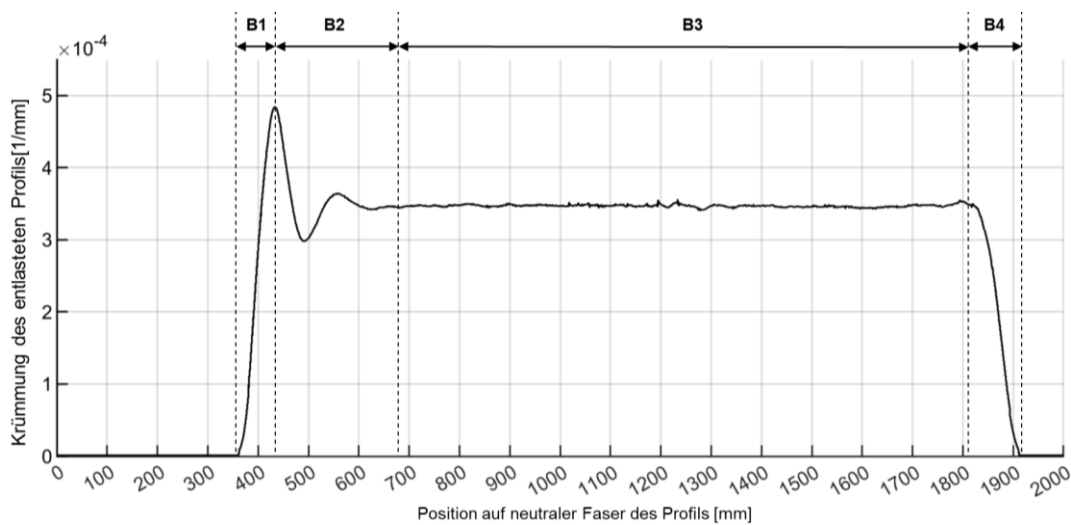


Abbildung 35 Krümmungsverlauf des entlasteten Profils über Profillänge

5.2 Untersuchung des Rückfederungsverhaltens in ein- und mehrstufigen Drei-Rollen-Biegeprozessen

Wie im Stand der Technik beschrieben, können dem Biegemoment überlagerte Quer- und Längskräfte das Rückfederungsverhalten beeinflussen. So führen der Biegung überlagerte Zugkräfte, wie beim Streckbiegen, zu einer geminderten Rückfederung. Ebenso führen überlagerte Querkräfte zu einer Verminderung der Rückfederung.

Aufgrund der in mehrstufigen Drei-Rollen-Biegeprozessen vorliegenden Ausgangskrümmung kommt es zu einem reduzierten Abstand der Kontaktpunkte der Seitenrollen. Dies führt im Vergleich zu einem einstufigen Prozess, in dem das gleiche Biegemoment vorliegt, zu höheren Kontaktnormalkräften und somit zu höheren Querkräften. Durch die höheren Kontaktnormalkräfte ergeben sich ebenfalls höhere Reibungskräfte in den Kontaktpunkten, was zu geänderten Längskräften, die auf das Profil wirken, führt.

Die Untersuchung des Einflusses einer mehrstufigen Biegung auf das Rückfederungsverhalten erfolgt anhand der Auswertung der Rückfederung in den durchgeführten Simulationen. Betrachtet wird hierbei ein stationärer Prozesszustand, in dem sich eine konstante Krümmung unter Last ausbildet. Für die in dem entsprechenden Bereich des Profils liegenden Knoten (Bereich B3, siehe Kapitel 5.1.3), definiert die berechnete Krümmung unter Last und die Krümmung des entlasteten Profils das Rückfederungsverhalten.

Abbildung 36 zeigt das für die durchgeführten Simulationen bestimmte Rückfederungsverhalten anhand des Radius unter Last in Abhängigkeit des Radius des entlasteten Profils.

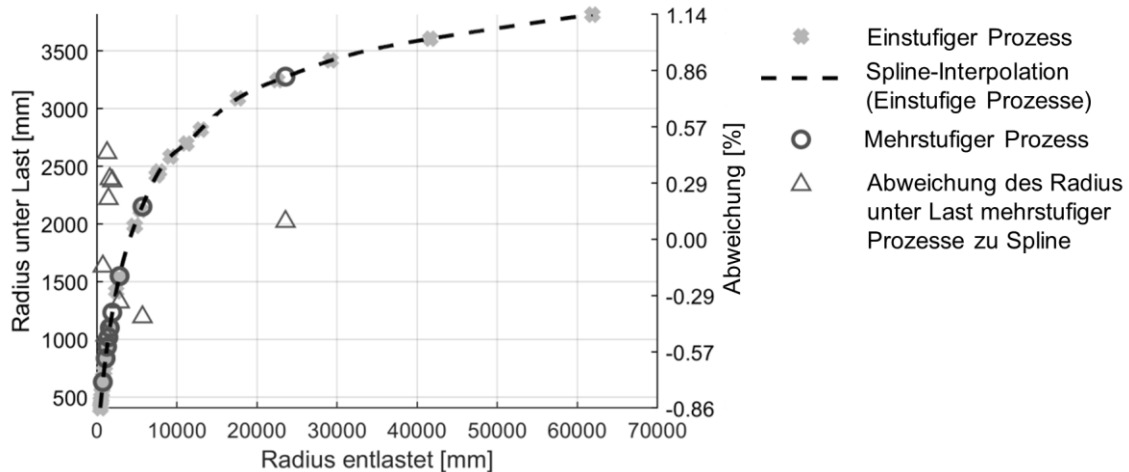


Abbildung 36 Rückfederungsverhalten in ein- und mehrstufigen Prozessen

Die sich aus den einstufigen Prozessen ergebende Rückfederungskurve ist hierbei durch eine Spline-Interpolation genähert. Ebenso ist die berechnete Abweichung des Radius unter Last in den mehrstufigen Prozessen von der interpolierten Rückfederungskurve dargestellt. Wie Abbildung 36 zeigt, sind die hierbei auftretenden Abweichungen geringer als 0,5 %. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass diese auch den Fehler durch die Mittelung bei der Berechnung der Krümmung unter Last beinhalten. Aufgrund der geringen Abweichungen wird davon ausgegangen, dass die in mehrstufigen Prozessen vorliegenden, geänderten Quer- und Längskraftverhältnisse keinen signifikanten Einfluss auf die Rückfederung haben.

5.3 Prognose der Rückfederung in mehrstufigen Drei-Rollen-Biegeprozessen

In diesem Kapitel wird ein Ansatz zur Prognose der Rückfederung in mehrstufigen Drei-Rollen-Biegeprozessen vorgestellt. Ziel hierbei ist es, die Krümmung unter Last k_l für eine gewünschte Krümmung des entlasteten Profils k_e zu prognostizieren. Die Prognose soll hierbei in einer Offline-Regelung als Produkt Controller nach der Definition von Allwood et al. [ALL16] für einen

mehrstufigen Drei-Rollen-Biegeprozess eingesetzt werden. Der innere Online-Regelkreis ist hierbei eine Regelung der Krümmung unter Last k_l (Abbildung 37).

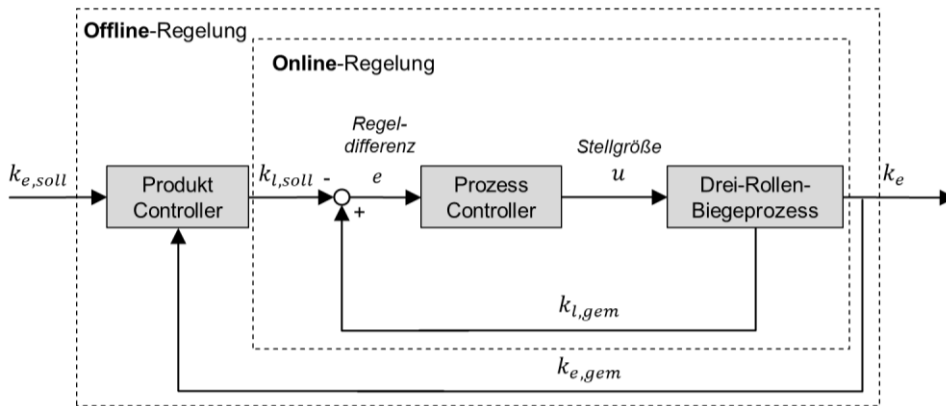


Abbildung 37 Online- und Offline-Regelung der Profilkrümmung

Zur Prognose der Rückfederung bzw. der Krümmung unter Last für eine gewünschte Krümmung des entlasteten Profils soll die im vorherigen Kapitel beschriebene Rückfederungskurve extrapoliert werden. Grundlage der Extrapolation bilden die Datenpunkte, die aus bereits durchgeführten Prozessstufen in einem mehrstufigen Prozess gewonnen wurden.

Die Rückfederungskurve in Abbildung 36 lässt sich, lokal begrenzt, näherungsweise durch Polynome zweiter Ordnung sowie durch Ansätze von Exponentialfunktionen beschreiben, die unter anderem auch bei der Modellierung von Fließkurven Anwendung finden (z. B. [SWI52]). Stark lokal begrenzt, liefern auch lineare Ansätze eine gute Näherung der Kurve. Die Steigung der Kurve nimmt dabei mit einem zunehmenden Radius des entlasteten Profils kontinuierlich ab und nähert sich asymptotisch einer Steigung von Null, was den Fall einer rein elastischen Umformung widerspiegelt. Die maximale Steigung der Kurve ist zudem stets geringer als 1, da dies den Grenzfall einer ideal-plastischen Umformung darstellt.

Während Polynome zweiter Ordnung sowie Ansätze von Exponentialfunktionen gute Ergebnisse für eine lokale Interpolation der Rückfederungskurve liefern, sind diese für eine Extrapolation zur Prognose der Rückfederung nur bedingt geeignet.

Im Folgenden wird von dem Szenario ausgegangen, dass vor einem mehrstufigen Drei-Rollen-Biegeprozess keinerlei Daten zum Rückfederungsverhalten des verwendeten Halbzeugs vorliegen. Aufbauend darauf müssten für eine Extrapolation und Prognose zunächst mindestens n Prozessstufen durchgeführt werden, wobei n der Anzahl der Koeffizienten des gewählten Funktionsansatzes entspricht. Dies würde sich bei Funktionsansätzen höherer Ordnung negativ auf die Wirtschaftlichkeit des Prozesses auswirken. Während die Rückfederungskurve zwischen vorhandenen Datenpunkten gut durch Polynome zweiter Ordnung oder Ansätze von Exponentialfunktionen abgebildet werden kann, kann es bei einer Extrapolation zu einem Überbiegen des Profils kommen. Abbildung 38 zeigt schematisch das beschriebene Überbiegen bei einer Extrapolation mit einem Polynom zweiter Ordnung.

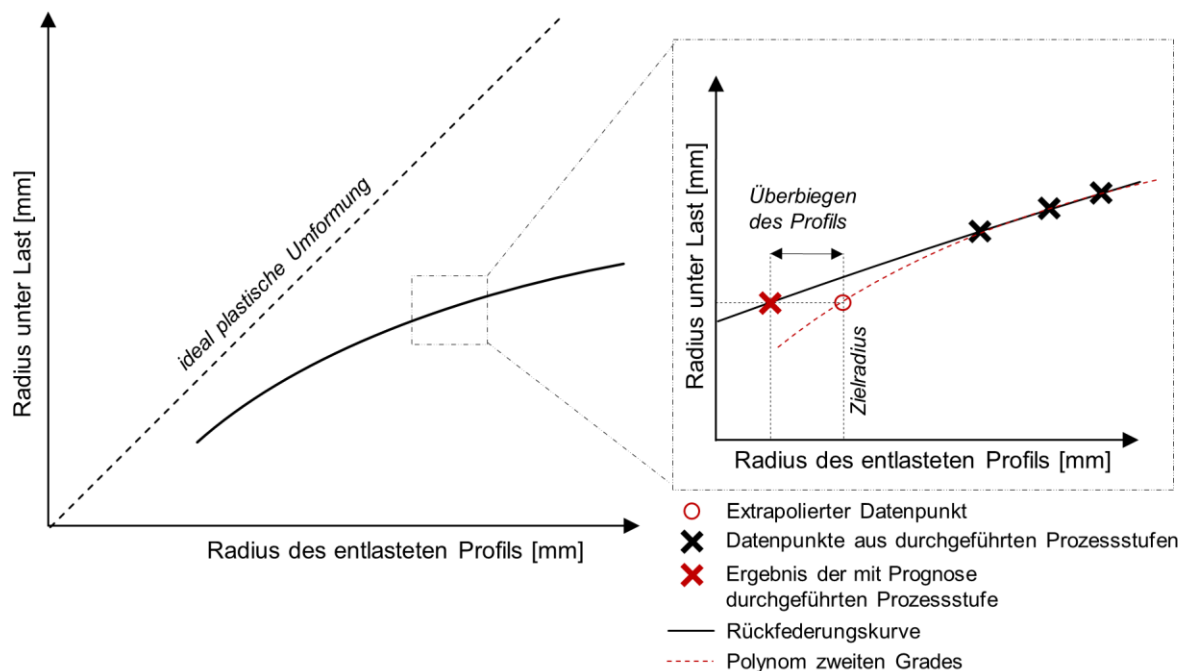


Abbildung 38 Überbiegen des Profils bei Extrapolation der Rückfederungskurve mit Polynom zweiter Ordnung

Unter der Annahme, dass bei einem Überbiegen des Profils Ausschuss entsteht, ist dies nicht zulässig. Um ein Überbiegen auszuschließen, wird für die Extrapolation der Rückfederungskurve daher ein linearer Ansatz gewählt. Hierdurch kann bereits auf der Basis von zwei Datenpunkten eine Extrapolati-

on der Rückfederungskurve durchgeführt werden. Ebenso ist ein Überbiegen bei ausreichender Qualität der Datenpunkte ausgeschlossen (Abbildung 39).

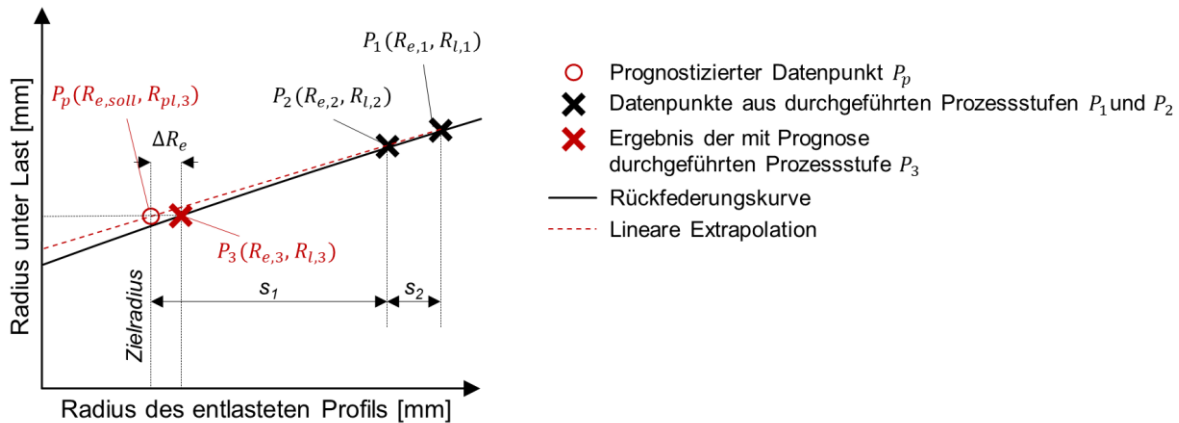


Abbildung 39 Lineare Extrapolation der Rückfederungskurve

Die in Abbildung 39 dargestellte Abweichung ΔR_e des Radius des entlasteten Profils von der Prognose nimmt hierbei mit abnehmenden Stützpunktabständen s_1 und s_2 ab und konvergiert gegen Null, wobei sich eine Messungenauigkeit jedoch stärker auswirken kann. Die Stützpunktabstände sind bei einem gegebenen Zielradius des entlasteten Profils $R_{e,soll}$ abhängig von den für die ersten beiden Prozessstufen vorgegebenen Sollwerten des Radius unter Last $R_{l,1}$ und $R_{l,2}$ sowie dem Rückfederungsverhalten des Profils und den daraus resultierenden Radien des entlasteten Profils $R_{e,1}$ und $R_{e,2}$. Die vorgegebenen Sollwerte des Radius unter Last $R_{l,1}$ und $R_{l,2}$ für die ersten beiden Prozessstufen werden im Folgenden als Startwerte bezeichnet.

Die Steigung m der extrapolierten Geraden lässt sich nach

$$m = \frac{R_{l,1} - R_{l,2}}{R_{e,1} - R_{e,2}} \quad (12)$$

berechnen. Mit dieser ergibt sich der Sollwert des Radius unter Last $R_{pl,3}$ für die nächste Prozessstufe aus

$$R_{pl,3} = R_{l,2} - (R_{e,2} - R_{e,soll}) * m \quad (13)$$

bei gegebenem Zielradius $R_{e,soll}$. Die prognostizierte Rückfederung ΔR entspricht somit

$$\Delta R = R_{pl,3} - R_{e,soll} \quad (14)$$

Zur Untersuchung des vorgestellten Ansatzes zur Prognose der Rückfederung wird eine Regelung der Krümmung unter Last für die Prozesssimulation mit Hilfe einer Subroutine implementiert. Diese sowie die Ergebnisse der Untersuchung werden im Folgenden vorgestellt.

5.4 Untersuchung der prognostizierten Rückfederung in einem geregelten Prozess

Um den im vorherigen Kapitel vorgestellten Ansatz zur Prognose der Rückfederung zu untersuchen, wird mit Hilfe der Subroutine „Motion“ (Marc Mentat Version 2012.1.0) eine Online-Regelung der Krümmung unter Last für die Prozesssimulation implementiert.

5.4.1 Implementierung der Regelung der Krümmung unter Last in der FE-Simulation

Abbildung 40 zeigt den Regelkreis, der in der Subroutine implementierten Online-Regelung der Krümmung unter Last.

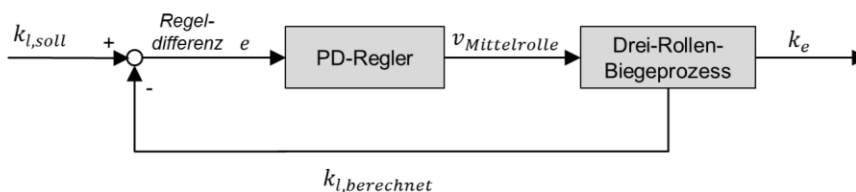


Abbildung 40 Implementierte Online-Regelung der Krümmung unter Last

In jedem Inkrement der Simulation wird anhand der Knotenkoordinaten die Krümmung unter Last $k_{l,berechnet}$ berechnet, die Regeldifferenz e zum vorgegebenen Sollwert $k_{l,soll}$ berechnet und diese an einen PD-Regler weitergegeben. Der PD-Regler, dessen Auslegung empirisch erfolgte, berechnet aus der Regeldifferenz eine Anpassung der Zustellgeschwindigkeit der Mittelrolle $v_{Mittelrolle}$. Um die realen Bedingungen des Prozesses abzubilden, sind die maximale Geschwindigkeit sowie die maximale Beschleunigung der Mittelrolle nach den Angaben des Herstellers der Versuchsanlage begrenzt.

Um den Einfluss des numerischen Rauschens auf die Bestimmung der Krümmung unter Last und somit auf den Regelkreis zu minimieren, ist die Vernet-

zung im für die Berechnung verwendeten Knotenpfad verfeinert (Abbildung 41). Die verwendete Anzahl der Knoten zur Berechnung der Krümmung unter Last entspricht somit 161 Knoten aufgrund der Halbierung der Kantenlänge im betrachteten Knotenpfad.

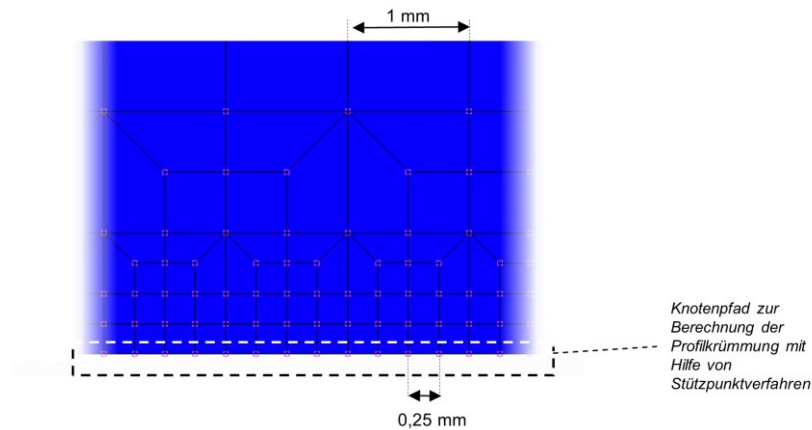


Abbildung 41 Verfeinerung der Vernetzung des Knotenpfads für die Berechnung der Krümmung unter Last

Die Vorgabe des Sollwerts erfolgt in Abhängigkeit der Zeit als Sollkurve, um so die Übergangsbereiche im Krümmungsverlauf zu berücksichtigen. Ebenso soll hierdurch das charakteristische Oszillieren der Krümmung reduziert werden. Abbildung 42 zeigt hierzu exemplarisch den Krümmungsverlauf eines geregelten einstufigen Prozesses.

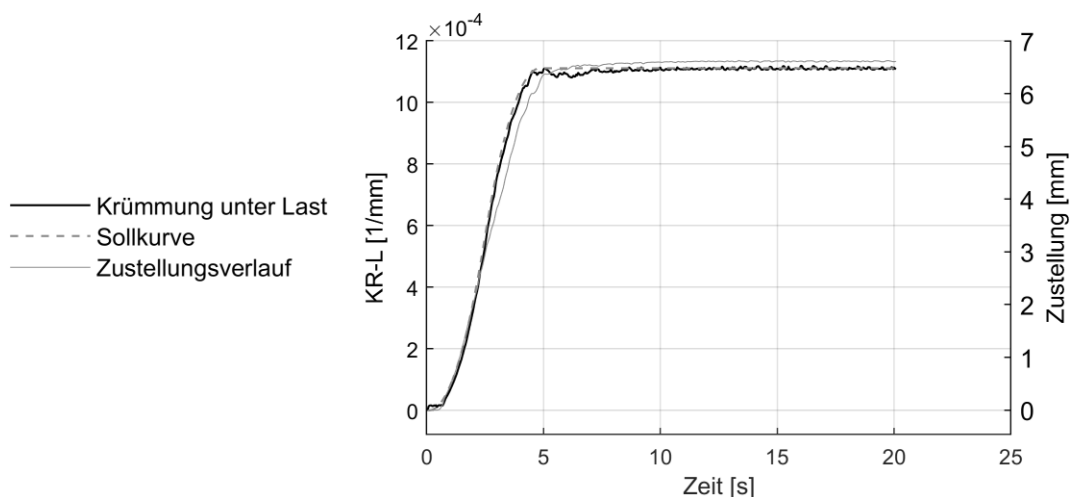


Abbildung 42 Krümmungsverlauf eines geregelten einstufigen Prozesses

Mit der Regelung konnte das charakteristische Oszillieren der Krümmung hinsichtlich der auftretenden Amplituden deutlich reduziert werden.

5.4.2 Untersuchung der Rückfederungsprognose

Die Untersuchung des Prognoseansatzes wurde anhand von dreistufigen Prozessen mit der geregelten Prozesssimulation durchgeführt. Als Startwerte für die Sollkrümmung unter Last werden

$$k_{l,soll\ 1} = \frac{1}{R_{e,soll}} \quad \text{und} \quad (15)$$

$$k_{l,soll\ 2} = \frac{1}{0,9 * R_{e,soll}} \quad (16)$$

zur Generierung der für die Extrapolation erforderlichen Datenpunkte verwendet. Anhand der aus den ersten beiden Prozessstufen gewonnenen Datenpunkte erfolgt die Prognose des Sollwerts der Krümmung unter Last

$$k_{l,soll\ 3} = \frac{1}{R_{pl,3}} \quad (17)$$

für den Zielradius $R_{pl,3}$ nach Gleichung (13).

In den Untersuchungen konnten folgende Effekte beobachtet werden: Eine höhere Ausgangskrümmung in mehrstufigen Prozessen steigert die Güte der Näherung des wahren Krümmungsmaximums durch die Berechnung der Krümmung unter Last. Dies bestätigt die hierzu in Kapitel 5.1.1 getroffenen Annahmen. Hierbei kann angenommen werden, dass die Näherung des Krümmungsmaximums umso besser ist, je geringer die Differenz zwischen diesem und der Ausgangskrümmung in der betrachteten Prozessstufe ist. Durch die daraus resultierende unterschiedliche Güte der Näherung des wahren Krümmungsmaximums in den ersten beiden Prozessstufen kann es bei der Prognose zu einer zu großen Steigung der extrapolierten Geraden kommen, was in Abhängigkeit des Stützabstands s_2 zu einem Überbiegen des Profils führen kann.

Zur Veranschaulichung ist dies in Abbildung 43 schematisch dargestellt. Die Prognose wird somit von der mit der Bestimmung der Krümmung unter Last verbundenen Unsicherheit beeinflusst.

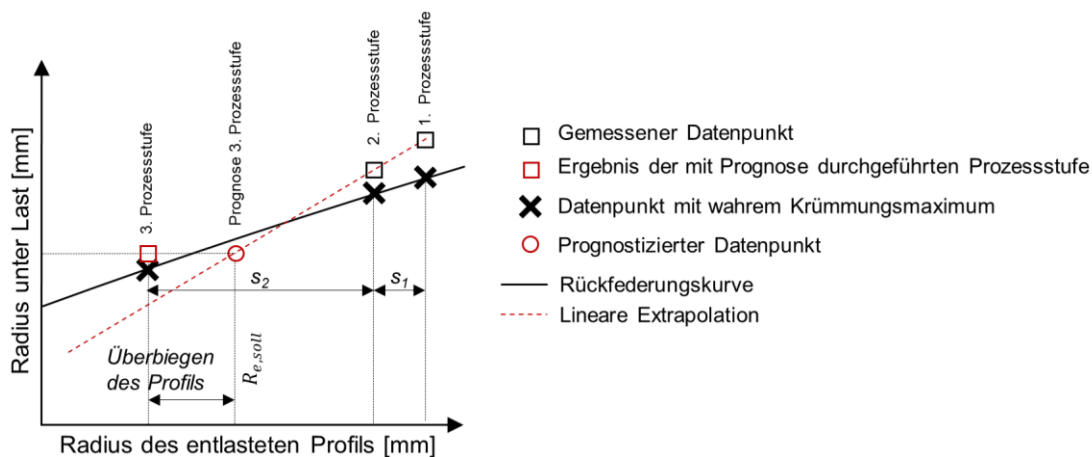


Abbildung 43 Einfluss der Güte der Näherung des Krümmungsmaximums auf die Prognose der Rückfederung

Durch eine Reduzierung der Messbereichsgröße kann der Effekt der unterschiedlichen Näherungsgüte in den ersten beiden Prozessschritten deutlich reduziert werden. Abbildung 44 zeigt hierzu das Ergebnis einer geregelten dreistufigen und einer geregelten einstufigen Simulation (Messbereichsgröße 161 Punkte, in Abbildung rot dargestellt).

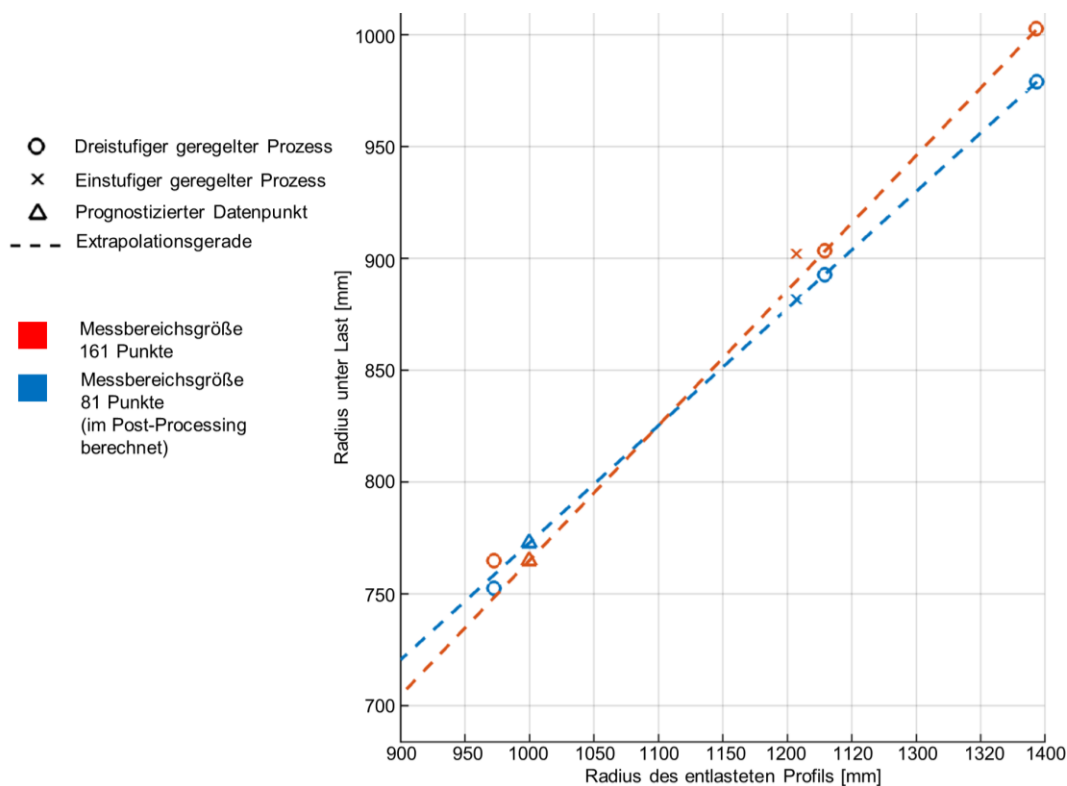


Abbildung 44 Einfluss der Messbereichsgröße auf die Prognose der Rückfederung in mehrstufigen Prozessen

Für beide Simulationen wurde im Post-Processing nochmals der Radius unter Last und des entlasteten Profils mit einer reduzierten Messbereichsgröße von 81 Punkten berechnet (in Abbildung blau dargestellt). Dies entspricht einer Messbereichsbreite von ungefähr 20 mm. Während die in rot dargestellten Datenpunkte den in Abbildung 43 dargestellten Effekt widerspiegeln, konnte durch die im Post-Processing durchgeführten Berechnungen die lokale Steigung der Rückfederungskurve besser genähert werden. Dies wird durch die im Post-Processing berechneten Radien des einstufigen geregelten Prozesses verdeutlicht. Der so berechnete Datenpunkt fällt mit der Extrapolationsgeraden zusammen. Bei einer Prognose der Rückfederung auf Basis der im Post-Processing gewonnenen Datenpunkte, wäre es nicht zu einem Überbiegen des Zielradius gekommen. Die Lage des Datenpunktes der dritten Prozessstufe (blau) unterhalb der Extrapolationsgeraden (blau) verdeutlicht dies.

Eine reduzierte Messbereichsgröße von 81 Knoten führte in der geregelten Simulation aufgrund einer Verstärkung des numerischen Rauschens zu einer starken Beeinflussung des implementierten Reglers. Ebenso stellt die Realisierung eines derart kleinen Messbereichs zur Bestimmung der Krümmung unter Last mit der erforderlichen Genauigkeit im realen Prozess eine große Herausforderung dar. Aufgrund dessen wurden die numerischen Untersuchungen an dieser Stelle beendet. Stattdessen wurde anhand der gewonnenen Erkenntnisse unter der Berücksichtigung der mit der Bestimmung der Krümmung unter Last verbundenen Unsicherheiten bei der Prognose der Rückfederung ein erweiterter Produkt Controller entwickelt. Dieser wird in Kapitel 6 vorgestellt.

5.5 Erkenntnisse zur Krümmungsmessung beim Drei-Rollen-Biegen

Anhand der durchgeführten numerischen Untersuchungen lassen sich zusammenfassend für die Messung der Krümmung im realen Prozess folgende Erkenntnisse ableiten.

Hinsichtlich der Messung der Krümmung des entlasteten Profils lassen sich diese anhand der folgenden Szenarien differenzieren. Im ersten Szenario

dient die Messung der Krümmung des entlasteten Profils lediglich der Adaption des Prozesses bzw. der Bestimmung der Rückfederung anhand der sich ausbildenden konstanten Krümmung. Hierbei spielt die Größe des Messbereichs eine untergeordnete Rolle. Dabei ist jedoch anzunehmen, dass die Messung bei einem größeren Messbereich aufgrund der damit verbundenen stärkeren Mittelung, weniger sensitiv gegenüber Fehlereinflüssen ist. Im zweiten Szenario dient die Messung der Krümmung zusätzlich zum ersten Szenario der Qualitätskontrolle der Soll-Biegegeometrie. Hierbei wird der erfasste Krümmungsverlauf und die dazu korrespondierende Bogenlänge zur Rekonstruktion der erfassten Biegegeometrie genutzt. Insofern diese nicht nur eine konstante Krümmung aufweist, beeinflusst die Messbereichsgröße die Genauigkeit der rekonstruierten Biegegeometrie. Ausschlaggebend hierbei ist die aus der Messbereichsgröße resultierende Mittelung der Krümmung in Bereichen des Profils, die keine konstante Krümmung aufweisen. Mit abnehmender Messbereichsgröße wird hierbei der Effekt der Mittelung reduziert. Jedoch kann dies eine gesteigerte Sensitivität der Messung gegenüber Fehlereinflüssen zur Folge haben. Im zweiten Szenario ist demnach hinsichtlich der Messbereichsgröße ein Kompromiss bezüglich der Fehlersensitivität der Messung konstanter und nicht konstanter Krümmungen einzugehen.

Für die Messung der Krümmung des Profils unter Last ist die Größe des Messbereichs ausschlaggebend für die Güte der Näherung des wahren Krümmungsmaximums. Je geringer die Messbereichsgröße desto besser kann das wahre Krümmungsmaximum genähert werden. Auch hier ist jedoch von einer gesteigerten Sensitivität der Messung gegenüber Fehlereinflüssen mit abnehmender Messbereichsgröße auszugehen. Somit ist auch hierbei ein Kompromiss zwischen einem möglichst kleinem Messbereich und der Fehlersensitivität der Messung einzugehen. Neben der Messbereichsgröße ist für die Messung der Krümmung unter Last auch die Lage des Messbereichs ausschlaggebend. Anhand der Ergebnisse der numerischen Untersuchungen zur Lage des Krümmungsmaximums werden diesbezüglich folgende Annahmen getroffen: Bei einer Messbereichsgröße von 40 mm beträgt die maximale Verschiebung des Krümmungsmaximums ausgehend vom Mittelpunkt der Mittelrolle ca. 30 mm (siehe Abbildung 31). Um das Krümmungsmaximum bei einer Messbereichsbreite von ca. 40 mm in beiden Vorschubrichtungen erfassen zu

können, sollte die Biegelinie im betrachteten Prozess somit symmetrisch zur Mittelrolle auf einer Breite von 100 mm erfasst werden (Abbildung 45).

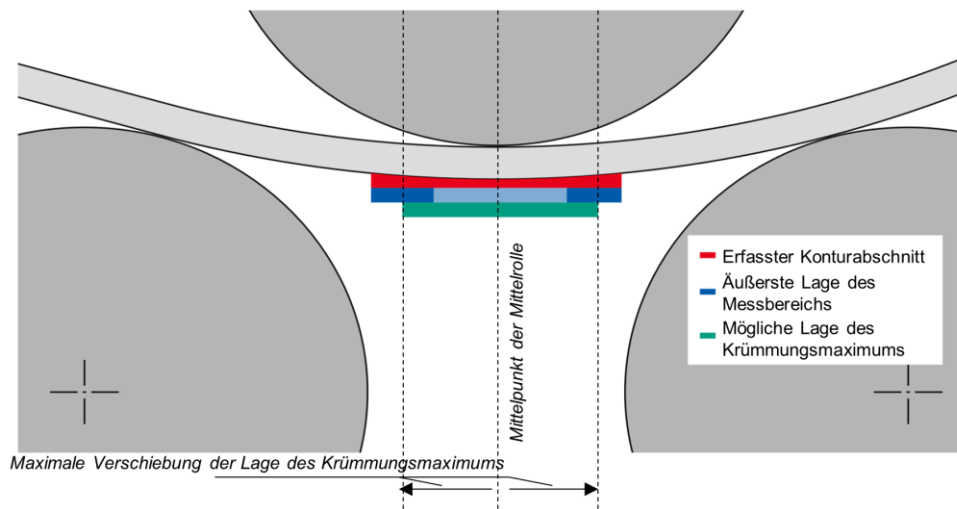


Abbildung 45 Zur Bestimmung der Krümmung unter Last erforderliche Konturabschnitterfassung

6 Produkt Controller zur Regelung mehrstufiger Drei-Rollen-Biegeprozesse

Die numerischen Untersuchungen haben aufgezeigt, dass eine Prognose der Rückfederung stark durch die Unsicherheiten bei der Bestimmung der Krümmung unter Last beeinflusst wird. Den folgenden Ausführungen liegt die Annahme zugrunde, dass die bestimmte Krümmung unter Last aufgrund der damit verbundenen Mittelung stets kleiner ist als das wahre Krümmungsmaximum. Bei der Betrachtung der Rückfederungskurve bedeutet dies für den Fall unter Last, dass der bestimmte Radius stets größer ist als der wahre Radius. Ebenfalls wird angenommen, dass die Güte der Näherung des Krümmungsmaximums unter Last mit einer größeren Ausgangskrümmung in mehrstufigen Prozessen zunimmt.

Bei der Prognose der Rückfederung sind, ausgehend vom letzten ermittelten Datenpunkt der Rückfederungskurve, zwei Größen ausschlaggebend. Dies ist zum einen die Steigung der Geraden, die zur linearen Extrapolation der Rückfederungskurve genutzt wird. Zum anderen ist dies der Stützpunktabstand s zwischen dem Sollradius des entlasteten Profils $R_{e,soll}$ und dem letzten, ermittelten Datenpunkt der Rückfederungskurve.

Ist die berechnete Steigung der Geraden kleiner oder gleich der lokalen Steigung der Rückfederungskurve, resultiert aus der Prognose für die nächste Prozessstufe ein zu großer Radius des entlasteten Profils (Abbildung 46 a)). Diese Abweichung kann durch weitere Prozessstufen korrigiert werden und konvergiert für einen abnehmenden Stützpunktabstand s gegen Null.

Ist die Steigung der Geraden hingegen zu groß, kann es zu einem Überbiegen des Profils kommen. In Abhängigkeit des Stützpunktabstands sowie der Abweichung zwischen dem bestimmten Radius und dem wahren Radius unter Last kommt es zu einem Überbiegen oder einem zu großen Radius des entlasteten Profils. Ein Überbiegen des Sollradius $R_{e,soll}$ liegt vor, wenn der kritische Stützpunktabstand s_{krit} überschritten wird (Abbildung 46 b)). Eine prädik-

tive Bestimmung des kritischen Stützpunktabstands ist hierbei aufgrund der vorliegenden Unsicherheiten jedoch nicht möglich.

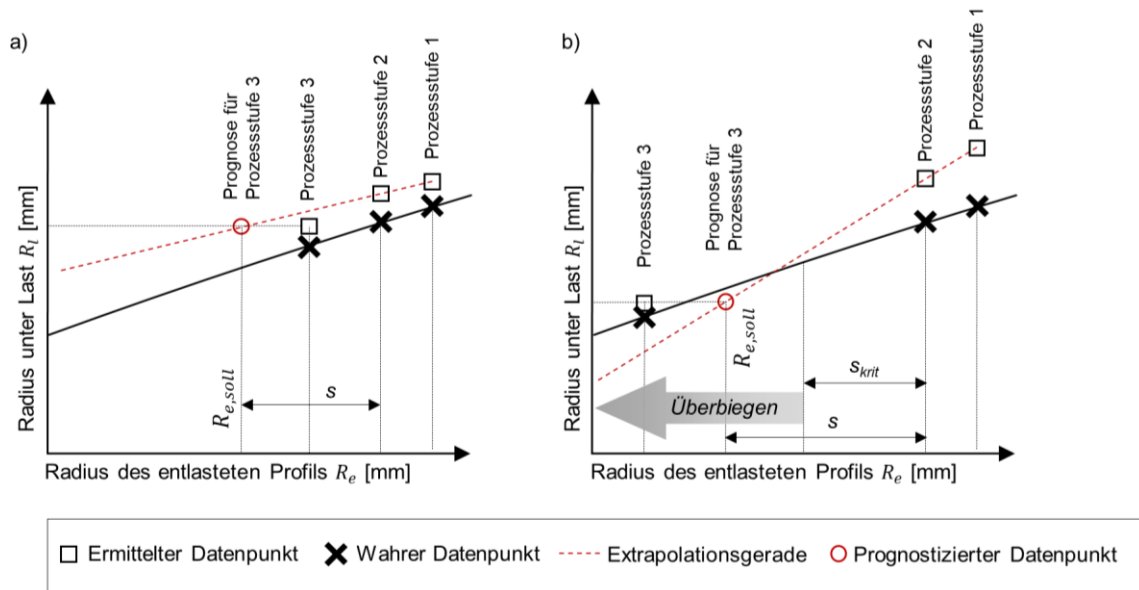


Abbildung 46 Einfluss der Steigung der Extrapolationsgeraden und des Stützpunktabstands auf das Ergebnis einer prognosebasierten Prozessstufe: a) Steigung ist kleiner oder gleich der lokalen Steigung der Rückfederungskurve, b) Steigung ist größer als die lokale Steigung der Rückfederungskurve

Um trotz der beschriebenen Unsicherheiten eine Regelung von mehrstufigen Prozessen zu ermöglichen, wurde auf Basis des vorgestellten Ansatzes zur Prognose der Rückfederung ein erweiterter, iterativer Produkt Controller entwickelt. Bei der Beschreibung dessen im Folgenden wird von einer Prozessstufenanzahl von drei oder höher ausgegangen.

Ausgehend von zwei durchgeführten Prozessstufen, in denen ein entlasteter Radius vorliegt, der größer ist als der eigentliche Sollradius $R_{e,soll}$, erfolgt die erste Prognose der Rückfederung. Um ein Überbiegen aufgrund einer zu großen Steigung der Extrapolationsgeraden zu vermeiden, wird für diese Prognose der Stützpunktabstand s um den Faktor q reduziert (Abbildung 47).

$$s_{red} = s * q, \quad \text{mit } q < 1 \quad (18)$$

Hierdurch wird ein Zielradius $R_{e,prog}$, der größer ist als der eigentliche Sollradius $R_{e,soll}$, für die Prognose verwendet.

$$R_{e,prog} = R_{e,soll} + (s - s_{red}) = R_{e,soll} + s * (1 - q) \quad (19)$$

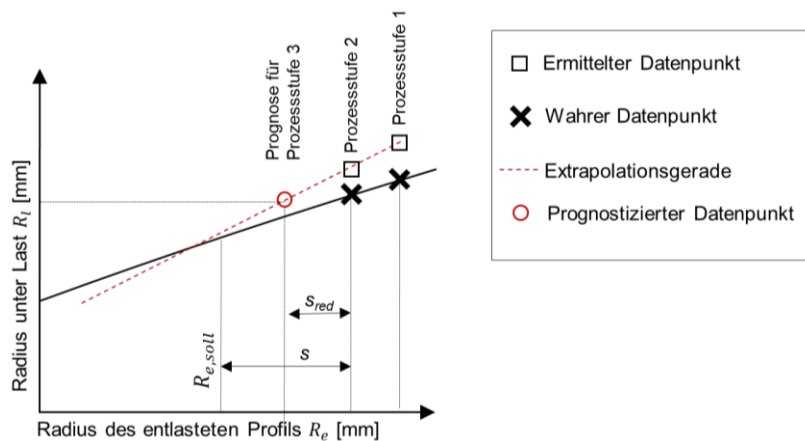


Abbildung 47 Reduzierung des Stützpunktabstands

Unter der Annahme, dass die Steigung der Extrapolationsgeraden in der Prognose zu groß ist, wird das Ergebnis der, auf Basis der Prognose durchgeführten Prozessstufe bewertet. Unterschieden werden hierbei zwei Fälle.

Im ersten Fall wird der für die Prognose verwendete Zielradius $R_{e,prog}$ überbogen. Für die darauf basierende Prognose des folgenden Prozessschritts würde hieraus eine geringere Steigung der Extrapolationsgeraden resultieren als in der vorherigen Prognose. Die Steigung nähert sich somit der wahren Steigung der Rückfederungskurve an. Zur Bewertung des in diesem Fall vorliegenden Ergebnisses der Prozessstufe wird daher ein Konfidenzbereich für den Radius des entlastenden Profils definiert (Abbildung 48). Die Breite des Konfidenzbereichs wird hierbei durch den Faktor w definiert.

$$b_{konf} = s * w, \text{ mit } w \leq (1 - q) \tag{20}$$

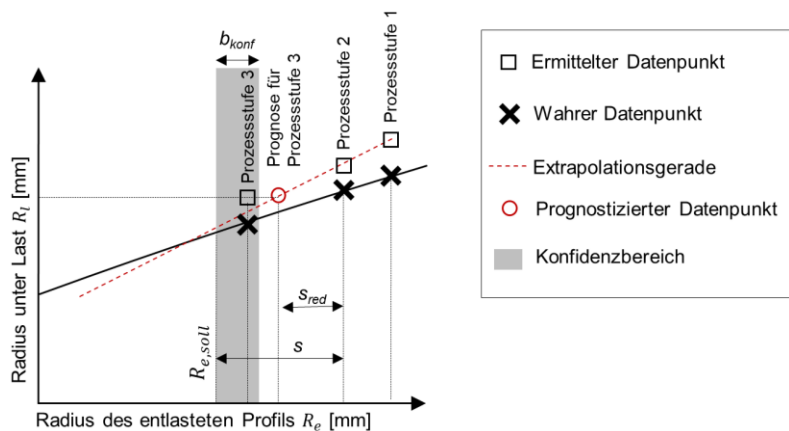


Abbildung 48 Konfidenzbereich zur Bewertung des Ergebnisses einer prognosebasierten Prozessstufe

Liegt der resultierende Radius des entlasteten Profils innerhalb des Konfidenzbereichs, wird für die Prognose des nächsten Prozessschritts der Sollradius $R_{e,soll}$ als Zielradius $R_{e,prog}$ verwendet. Liegt der resultierende Radius außerhalb des Konfidenzbereichs wird der nun vorliegende Stützabstand nochmals um den Faktor q reduziert und der daraus resultierende Zielradius für die nächste Prognose verwendet.

Im zweiten Fall wird der für die Prognose verwendete Zielradius nicht erreicht (Abbildung 49). Dies bedeutet, dass der resultierende entlastete Radius des Profils größer ist als der für die Prognose verwendete Zielradius. Für die Prognose des darauffolgenden Prozessschritts wird der in diesem Fall vorliegende Stützabstand ebenfalls wieder um den Faktor q reduziert und der daraus resultierende Zielradius für die Prognose des nächsten Prozessschritts verwendet.

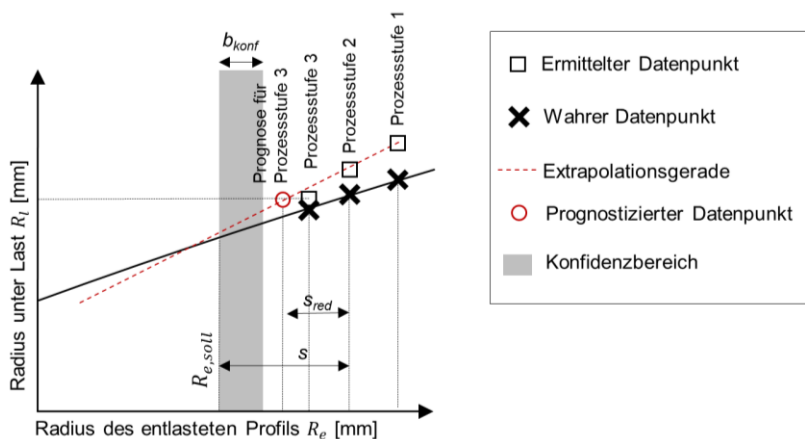


Abbildung 49 Nicht-Erreichen des prognostizierten Radius des entlasteten Profils

Die Bewertung des Prognoseergebnisses erfolgt in einer Schleife nach jeder durchgeführten Prozessstufe, beginnend bei der ersten Prozessstufe für die eine Prognose erstellt wurde. Die Schleife wird abgebrochen und der mehrstufige Drei-Rollen-Biegeprozess beendet, sobald der resultierende Radius des entlasteten Profils innerhalb der Toleranzen des Sollradius liegt oder dieser überbogen wird. Letzteres stellt den Versagensfall des Produkt Controllers dar.

Abbildung 50 zeigt das Struktogramm des auf der beschriebenen Vorgehensweise basierenden Algorithmus für den entwickelten Prozess Controller.

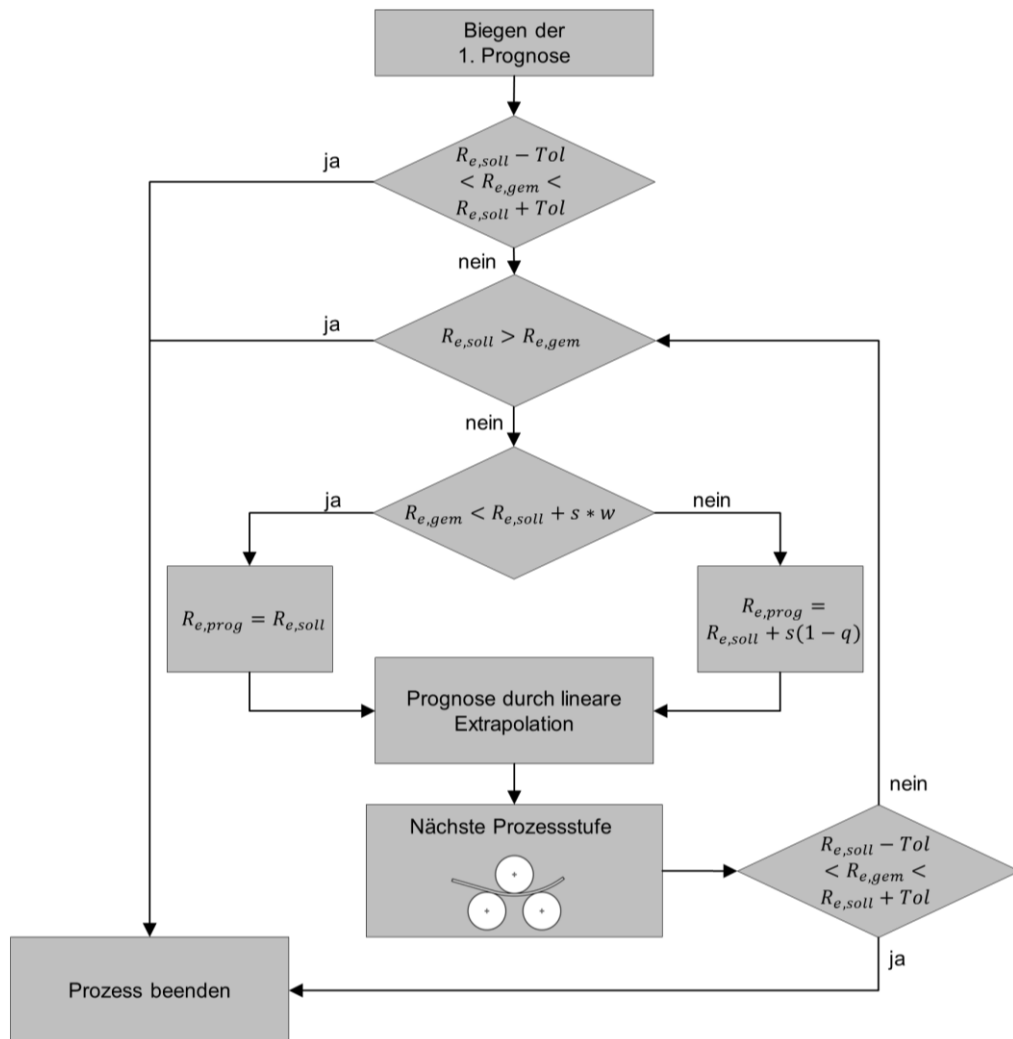


Abbildung 50 Struktogramm des Algorithmus des entwickelten Produkt Controllers

Das Konvergenzverhalten des dargestellten Algorithmus hinsichtlich der Steigung der Extrapolationsgeraden sowie des Erreichens des Sollradius' kann hierbei durch die Wahl der Parameter beeinflusst werden. Diese sind der Faktor q zur Reduzierung des Stützabstands sowie der, die Größe des Konfidenzbereichs definierenden Faktor w . Kleinere Stützabstände sollten hierbei zu einem schnelleren Konvergieren der Steigung der Extrapolationsgeraden gegen die lokale Steigung der Rückfederungskurve führen. Dies basiert auf der Annahme, dass die Güte der Näherung des Krümmungsmaximums unter Last mit einer zunehmenden Ausgangskrümmung in mehrstufigen Prozessen zunimmt.

Somit beeinflussen die gewählten Startwerte, in Form der ersten beiden durchgeführten Prozessstufen, durch den daraus resultierenden initialen Stützabstand ebenfalls das Konvergenzverhalten des Algorithmus.

Der vorgestellte Algorithmus wird experimentell in Kapitel 8.2 untersucht, während im folgenden Kapitel zunächst die hierfür verwendeten Krümmungsmesssysteme vorgestellt werden, die im Rahmen dieser Arbeit entwickelt wurden.

7 Entwicklung von Krümmungsmesssystemen für das Drei Rollen-Biegen

Im Rahmen dieser Arbeit wurden zwei Systeme zur Messung der Krümmung beim Drei-Rollen-Biegen entwickelt. Zum einen ist dies ein mobiles Krümmungsmessgerät zur Erfassung der Krümmung des entlasteten Profils. Ziel bei dieser Entwicklung war es, unabhängig von der Biegemaschine sowie deren Steuerung, eine effiziente Erfassung der Krümmung zu ermöglichen, um somit Nebenzeiten zu reduzieren. Zum anderen ist dies ein optisches Messsystem, welches sowohl die Krümmung des entlasteten Profils als auch die Krümmung unter Last erfassen kann. Letzteres bildet die sensorische Basis für die Umsetzung der entwickelten Regelung mehrstufiger Prozesse.

Im Folgenden werden die entwickelten Systeme vorgestellt und hinsichtlich ihrer Messgenauigkeit untersucht.

Untersuchungsergebnisse zur Genauigkeit der entwickelten Systeme wurden bereits in den eigenen Veröffentlichungen [GRO17*, GRO19*, KES23*, KES18*, KES19*] publiziert.

7.1 Mobiles Krümmungsmessgerät

Mit dem Ziel, eine Krümmungsmessung an entlasteten Profilen zu ermöglichen, die mit geringem Zeit- und Arbeitsaufwand durchgeführt werden kann, wurde ein mobiles Krümmungsmessgerät konzipiert und entwickelt. Dieses ist als handgeführtes, batteriebetriebenes Gerät konzipiert, das für Profile mit rechteckigen Querschnittsformen genutzt werden kann. Es erfasst die Krümmung durch ein Abfahren der Profilkontur.

7.1.1 Aufbau und Funktionsweise

Abbildung 51 zeigt das mobile Krümmungsmessgerät und seinen Aufbau. Während des Abfahrens einer Profilkontur mit dem Gerät (Abbildung 51 b) und

c)) wird mit einem Gyroskop die Winkelgeschwindigkeit $\dot{\theta}_1$ und mit Hilfe eines Reibrads die abgefahrene Bogenlänge b erfasst. Das verwendete Gyroskop ist Teil einer Inertial Measurement Unit (IMU) (MPU 9255, InvenSense Inc.), das im Gerät eingebettet ist. Das Reibrad hat einen Nenndurchmesser von 40 mm und ist an einen optischen Drehgeber (LPD3806-600BM-G5-24C, WISAMIC™) mit 600 Impulsen pro Umdrehung gekoppelt. Daraus ergibt sich eine nominelle Auflösung von 0,05236 mm der gemessenen Bogenlänge. Zur Bedienung und Anzeige von Informationen ist das Gerät mit einem Touch-Display ausgestattet.

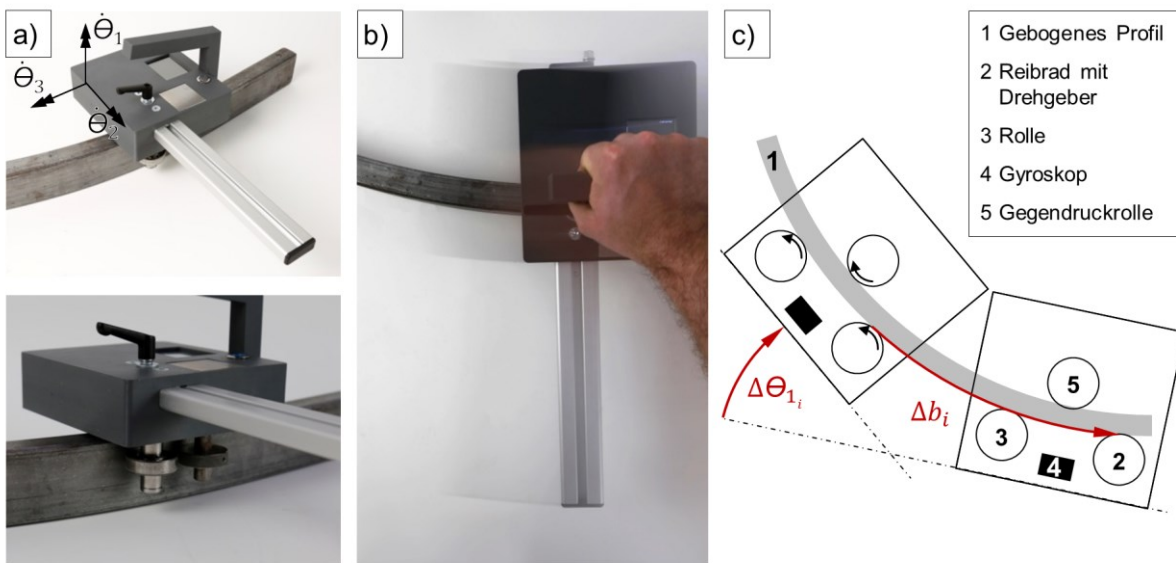


Abbildung 51 Mobiles Krümmungsmessgerät: a) Ausrichtung auf dem Profil, b) Abfahren der Profilkontur, c) Layout und inkrementelle Messung [KES23*]

Vor einer Messung wird das Gerät, wie in Abbildung 51 a) dargestellt, auf das Profil aufgesetzt. An der Unterseite des Geräts sind Kugeltopfrollen eingelassen, um eine widerstandsfreie Verfahrbewegung zu gewährleisten. Um sicherzustellen, dass die jeweilige Drehachse des Geräts, insbesondere des eingebetteten Gyroskops 4, orthogonal zur zu messenden Kontur ausgerichtet ist, ist die Position der Gegendruckrolle 5 (Abbildung 51 c)) einstellbar und diese über eine Feder gegen das Profil vorgespannt. Die Vorspannung dient auch dazu, dass die Rolle 3 und das Reibrad 2 während des gesamten Messvorgangs in ständigem Kontakt mit der Profiloberfläche stehen und somit eine tangentiale Ausrichtung des Gerätes zur Kontur ermöglicht wird (Abbildung 51 c)). Die Rolle 3, die als ein Rillenkugellager auf einer feststehenden Welle

ausgeführt ist, und das Reibrad 2 haben beide einen Nenndurchmesser von 40 mm und einen Achsabstand von 55 mm. Um eine schlupffreie Messung der Bogenlänge zu gewährleisten, ist die Oberfläche des Reibrads gerändelt. Der Durchmesser von Reibrad und Rolle sowie deren Achsabstand definieren hierbei die Kontaktpunkte sowie die tangentielle Ausrichtung des Geräts zum Profil.

Nachdem das Gerät auf ein Profil aufgesetzt und seine korrekte Ausrichtung sichergestellt ist, wird das Gyroskop 4 zunächst im Stillstand kalibriert. Dabei wird die auftretende Drift (konstanter Bias) kompensiert (Kalibrierung über eine eingebettete Funktion des MPU 9255). Wenn die Drehrate über einen Zeitraum von mindestens 3 Sekunden konstant um 0 °/s oszilliert, wird die Kalibrierung als abgeschlossen angenommen. Anschließend erfolgt der Start der Messung manuell über das Touchpad des Geräts und das manuelle Abfahren der Profilkontur mit dem Gerät kann durchgeführt werden (Abbildung 51 b)). Abschließend kann die Messung über das Touchpad des Geräts beendet werden.

7.1.2 Messung und Berechnung der Profilkrümmung

Während des Abfahrens der Profilkontur werden die Winkelgeschwindigkeit $\dot{\theta}_1$ und die Bogenlänge b mit einer Frequenz von 200 Hz gemessen und aufgezeichnet. Für jede aufgezeichnete inkrementelle Messung i , wie in Abbildung 51 c) dargestellt, wird die Änderung des Tangentenwinkels $\Delta\theta_{1i}$ mittels der Trapezregel gemäß Gleichung (21) berechnet, wobei Δt die Zeit zwischen zwei inkrementellen Messung ist.

$$\Delta\theta_{1i} = \frac{(\dot{\theta}_{1i} + \dot{\theta}_{1i-1})}{2} \cdot \Delta t \quad (21)$$

Die Krümmung k bzw. der Radius R und der Tangentenwinkel θ_1 können entlang der abgefahrenen Bogenlänge mit den Gleichungen (22) bis (25) beschrieben werden:

$$k(b_n) = \frac{1}{R(b_n)} = \frac{\Delta\theta_{1n}}{\Delta b_n} \quad (22)$$

$$R(b_n) = \frac{\Delta b_n}{\Delta\theta_{1n}} \quad (23)$$

$$\theta_1(b_n) = \sum_{i=1}^n \Delta\theta_{1i} \quad (24)$$

mit:
$$b_n = \sum_{i=1}^n \Delta b_i \quad (25)$$

Ausschlaggebend für die Mittelung des so erfassten Krümmungsverlaufs im Zuge der Messung sind die Messfrequenz und die Vorschubgeschwindigkeit beim manuellen Abfahren. Darüber hinaus beeinflussen der Durchmesser von Reibrad und Rolle sowie deren Achsabstand als konstruktive Parameter die Ermittlung der Änderung des Tangentenwinkels. Hierbei führt ein größerer Achsabstand zu einer stärkeren Glättung des Krümmungsverlaufs.

7.2 Optisches Krümmungsmesssystem

Als Grundlage für die Regelung mehrstufiger Drei-Rollen-Biegeprozesse wurde zudem ein optisches Messsystem für die genutzte Versuchsanlage entwickelt. Dieses erfasst sowohl die Krümmung unter Last als auch die Krümmung des entlasteten Profils im Aus- und Einlaufbereich der Versuchsanlage.

7.2.1 Aufbau und Funktionsweise

Abbildung 52 zeigt das entwickelte optische Messsystem und seinen Aufbau. Das System setzt sich aus drei Messköpfen zusammen, die über Pneumatikzylinder mit Führungssäulen gegen das Profil gedrückt werden. Jeder der Messköpfe ist mit einem 2D-Laserscanner und mindestens einem Reibrad ausgestattet. Die Reibräder dienen dazu, den Vorschub und die Bogenlänge des Profils in den jeweiligen Kontaktbereichen zu bestimmen, sowie einen annähernd konstanten Messabstand der 2D-Laserscanner zum Profil während der gesamten Messung zu gewährleisten. Die beiden äußeren Messköpfe sind über ein Drehgelenk mit den Pneumatikzylindern verbunden, sodass diese auch an das gebogene Profil gedrückt werden können (Abbildung 52 a)). Das System wurde mit Messköpfen sowohl im Ein- als auch im Auslaufbereich konzipiert, da die Maschine bei mehrstufigen Prozessen in beiden Vorschubrichtungen betrieben wird.

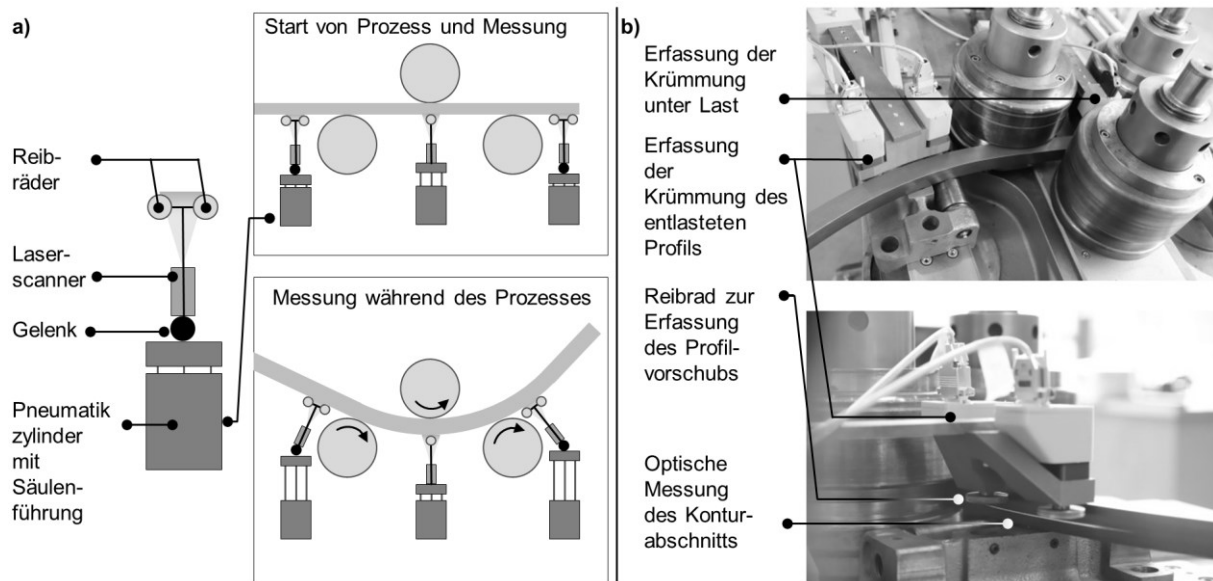


Abbildung 52 Aufbau des optischen Messsystems [KES23*]

Die 2D-Laserscanner (scanCONTROL 2600-100, Micro-Epsilon Messtechnik GmbH & Co. KG) haben eine Wellenlänge von 658 nm und erfassen 640 Messpunkte über der Messbereichsbreite. Der Abstand der Scanner zum geraden Profil ist durch die Ausleger mit den Reibrädern gegeben und beträgt 240 mm. Daraus ergibt sich eine Breite des Messbereichs von 100 mm. Die Breite des Messbereichs sowie die hohe Auflösung desselben waren ausschlaggebende Punkte für die Auswahl der Laserscanner. Durch die Breite des Messbereichs von 100 mm sollte hierbei sichergestellt werden, dass das Krümmungsmaximum sowohl in positiver als auch negativer Vorschubrichtung innerhalb des Messbereichs des mittleren Laserscanners liegt. Durch die Auflösung von 640 Punkten sollte darüber hinaus sichergestellt werden, dass das Krümmungsmaximum möglichst gut durch eine Messung der Krümmung unter Last genähert werden kann.

Bei den für die Reibräder verwendeten Drehgebern handelt es sich um Hall-Effekt-Absolutwertgeber (MAB12AH, Megatron Elektronik GmbH & Co. KG).

7.2.2 Messung eines Konturabschnitts und Radiusberechnung

Während des Prozesses erfassen die Laserscanner die Profilabschnitte innerhalb des Messbereichs des jeweiligen Scanners. Der Vorschub des Profils wird im Kontaktbereich des jeweiligen Messkopfs durch die Reibräder erfasst.

Alle Messungen erfolgen simultan und werden mit einer Frequenz von 100 Hz aufgezeichnet. Mit der gleichen Frequenz wird für jeden gemessenen Profilabschnitt die individuelle Krümmung mittels eines Levenberg-Marquardt-Algorithmus auf dem Industrie-PC der Biegemaschine berechnet und an die speicherprogrammierbare Steuerung (SPS) zurückgegeben. Aufgrund von Messfehlern, die in den Randbereichen des Messbereichs der äußeren Laserscanner auftreten, wurden diese bei der Berechnung des Radius nicht vollständig berücksichtigt. Dementsprechend wird nur ein Bereich von 80 mm um das Zentrum des gescannten Konturabschnitts für die Berechnung der Krümmung berücksichtigt. Generell ist, wie in den Ergebnissen der numerischen Untersuchungen gezeigt, bei der Messung einer konstanten Krümmung ein möglichst großer Messbereich zu verwenden. Hierdurch haben lokal auftretende Messfehler einen geringeren Einfluss auf das Messergebnis der Krümmung.

7.3 Untersuchung der Messgenauigkeiten

Zur Untersuchung der Genauigkeit der entwickelten Messsysteme wurden acht Profile (30x30 mm, Material: S235JRC+C) auf der mit dem optischen Messsystem ausgestatteten Versuchsanlage in einstufigen Prozessen gegeben. Der mittlere Profilver Schub betrug hierbei 1,6 m/min. Die Messung der Krümmung des entlasteten Profils erfolgte während des Prozesses mit dem optischen Messsystem am Auslauf der Biegemaschine. Nach dem jeweiligen Biegevorgang wurden zudem je drei Messungen mit dem mobilen Messgerät an dem, aus der Maschine auskragenden Profil durchgeführt. Als Referenz für die Genauigkeit der Messungen wurden die Profile abschließend aus der Maschine entnommen und jede Profilkontur mit einem 3D-Scanner mit strukturiertem Licht (GOM Atos III, Gesellschaft für optische Messtechnik mbH) mit einem Messvolumen von 500 x 500 x 500 mm³ gemessen. Eine Untersuchung der Messgenauigkeit für die Krümmung unter Last war durch einen Abgleich mit einer Referenz an dieser Stelle nicht möglich, da es sich bei der Krümmung unter Last um eine temporäre Größe handelt. Die Untersuchung der Messgenauigkeit des optischen Messsystems bezieht sich daher nur auf die Messung der Krümmung des entlasteten Profils.

Abbildung 53 zeigt die in den Referenzmessungen ermittelten Profilkonturen. Dabei ist zu beachten, dass diese eine größere Länge (bezogen auf die nummerierten geraden Enden in Abbildung 53) der Kontur aufweisen, da die Referenzmessung auch den Teil der jeweiligen Profilkontur erfasst, der sich zuvor noch in der Biegemaschine befand.

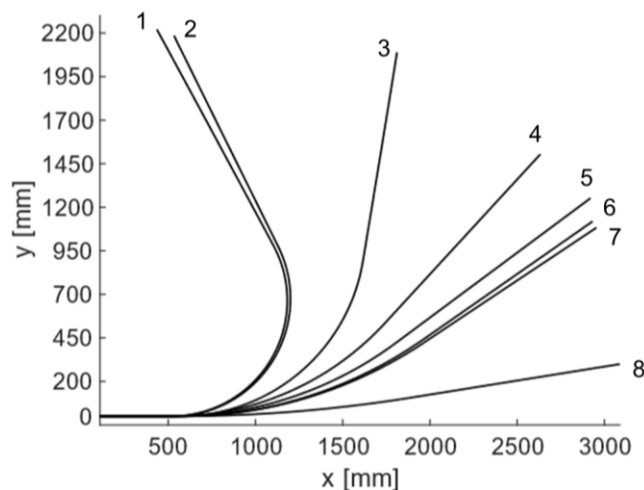


Abbildung 53 Profilkonturen der gebogenen Profile

Zum Vergleich der Messungen des mobilen Messgeräts und des optischen Messsystems mit der Referenzmessung, wurden die gemessene Krümmung sowie die Bogenlänge verwendet, um die Profilkontur für jede Messung zu rekonstruieren. Umgekehrt wurde die Krümmung entlang der mit dem 3D-Scanner gemessenen Kontur berechnet. Zum Vergleich der Messsysteme wurden dann

- der Biegewinkel,
- die maximale Konturabweichung und
- die Krümmung (im Profilbereich mit konstanter Krümmung)

herangezogen.

Sowohl die Berechnungsmethode als auch die Länge des betrachteten Konturabschnitts können einen Einfluss auf die berechnete Krümmung haben. Um die Vergleichbarkeit der für die verschiedenen Messsysteme berechneten Krümmungen zu gewährleisten, wurde für alle Krümmungsberechnungen der gleiche Levenberg-Marquardt-Algorithmus verwendet. Für das mobile Messgerät erfolgt dessen Anwendung auf die rekonstruierte Profilkontur der jeweiligen

Messung. Als Länge des Konturabschnitts wird bei der Berechnung für das mobile Messgerät und das Referenzmesssystem (GOM Atos) eine Sekantenlänge von 80 mm verwendet, welche die Größe des betrachteten Konturabschnitts definiert. Diese stimmt somit mit der beim optischen Messsystem berücksichtigten Messbereichsgröße überein.

Abbildung 54 zeigt exemplarisch den gemessenen Krümmungsverlauf eines der vermessenen Profile. Zur Bestimmung der Abweichung der mit den entwickelten Messsystemen gemessenen Radien wird der berechnete, mittlere Radius für jede Messung für den Profilbereich mit konstanter Krümmung herangezogen.

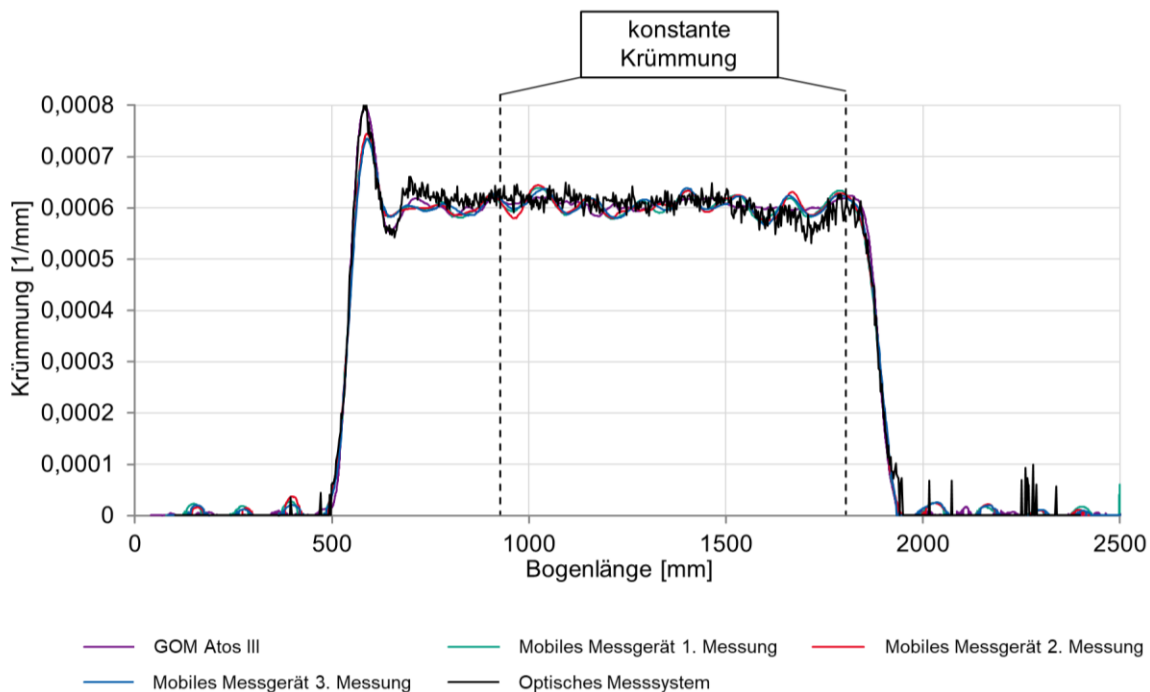


Abbildung 54 Krümmungsverlauf eines exemplarischen Profils [KES23*]

Die Bestimmung des Biegewinkels erfolgt anhand der geraden Enden der Profilkonturen, zur deren Beschreibung lineare Funktionen dienen. Die Berechnung des Biegewinkels erfolgt anhand der Steigungen der ermittelten Geradengleichungen.

Für die Untersuchung der Konturabweichung wird jeweils ein gerades Ende der mit den entwickelten Messsystemen ermittelten Konturen an dem korrespondierenden geraden Ende der Referenzkontur ausgerichtet. Um die Gesamtkonturabweichung zur Referenzkontur zu minimieren, wird in dieser Aus-

richtung eine Optimierung der Lage der Konturen zur Referenz durchgeführt und anschließend die maximale Krümmungsabweichung berechnet. Die vollständigen Ergebnisse der beschriebenen Messdatenauswertung sind dem Anhang zu entnehmen. Im Folgenden werden die Messergebnisse der entwickelten Messsysteme im Vergleich zur Referenzmessung diskutiert und die wesentlichen Fehlereinflüsse analysiert.

7.3.1 Analyse der Messergebnisse des mobilen Messgeräts

Abbildung 55 zeigt die Abweichungen des mit dem mobilen Messgerät ermittelten mittleren Radius zur Referenzmessung. Die auftretende Abweichung beträgt dabei bei allen Messungen weniger als 1,5 %. Bei den Profilen mit einem Radius von weniger als 2000 mm ist die Abweichung gar geringer als 0,5 %.

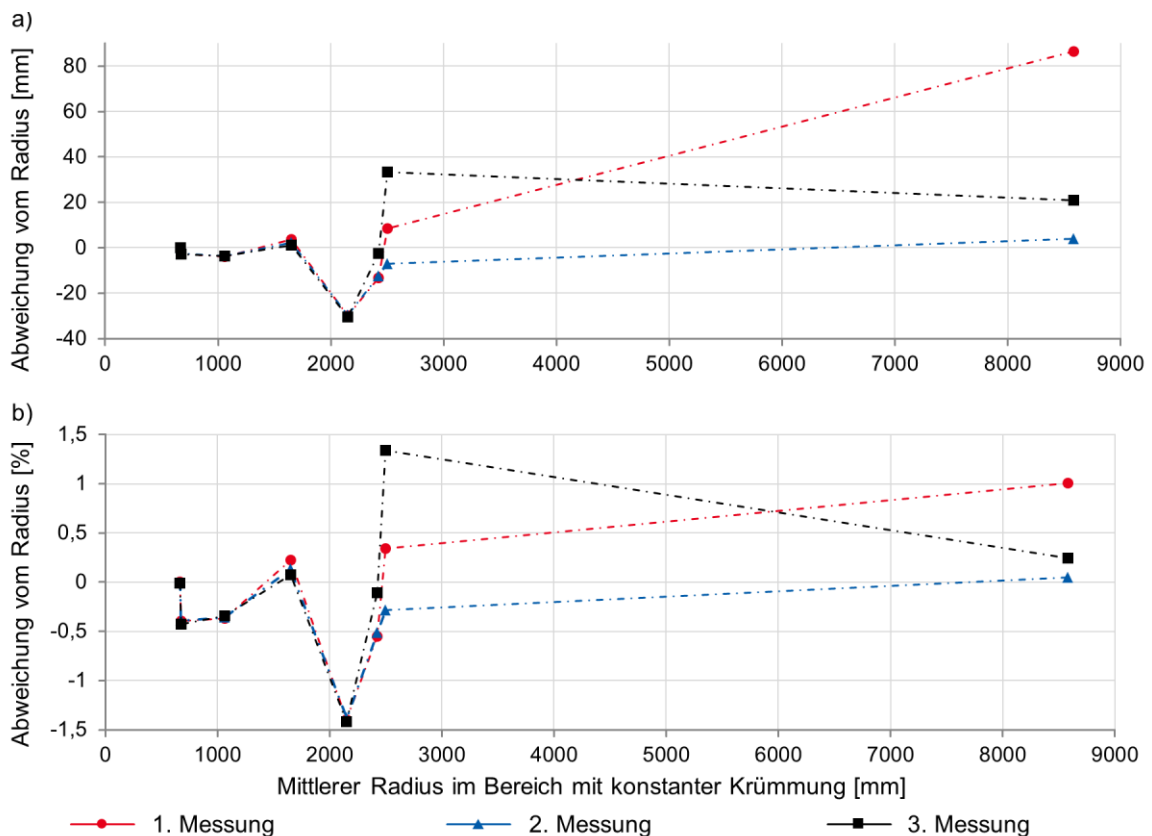


Abbildung 55 Abweichung des mittleren Radius (mobiles Messgerät)

Die vorliegenden Ergebnisse zeigen keine signifikante Abnahme der Messgenauigkeit mit zunehmendem Radius, jedoch eine erhöhte Streuung der ermittelten Radien.

Die ermittelten Radien werden von den Genauigkeiten der Messung der Bogenlänge und des Winkels, genauer gesagt der Winkelgeschwindigkeitsmessung, beeinflusst (siehe Kapitel 7.1.2 Gleichung (23)). Dabei verhält sich der Radius direkt proportional zur gemessenen Bogenlänge und indirekt proportional zum gemessenen Winkel. Im Folgenden werden die Messungen der Bogenlänge und der Winkelgeschwindigkeit getrennt analysiert, um die Einflussfaktoren auf die Radiusabweichung zu ermitteln und ein besseres Verständnis für die Genauigkeit des mobilen Messgeräts zu erhalten.

Einfluss der Bogenlängenmessung auf die Genauigkeit

Die Messung der inkrementellen Bogenlänge Δb ist abhängig vom Durchmesser des Reibrades und des durch den Drehgeber erfassten Drehwinkels. Ein Fehler im Durchmesser, der für die Berechnung der Bogenlänge verwendet wird, führt zu einer konstanten Abweichung vom berechneten Radius und zu einem Fehler in der gemessenen Gesamtbogenlänge. Dies wird an dieser Stelle als signifikanter Einfluss in den durchgeführten Messungen ausgeschlossen, da der Durchmesser eingangs gemessen und eine Kalibrierung der Bogenlängenmessung durchgeführt wurde. Ebenfalls ist der Einfluss der gerändelten Oberfläche auf den Durchmesser als nicht signifikant einzustufen.

Der Einfluss der Messgenauigkeit des Drehgebers wird als nicht signifikant angenommen, da es sich um einen optischen Drehgeber handelt. Ebenso ist dieser Fehler in Relation zum auftretenden Diskretisierungsfehler vernachlässigbar klein. Hinsichtlich des Diskretisierungsfehlers durch die begrenzte Anzahl an Inkrementen des Drehgebers ergaben Untersuchungen einen maximalen Fehler des Radius von weniger als 0,1 % in den durchgeführten Messungen [KES23*].

Einfluss der Winkelgeschwindigkeitsmessung und der Berechnung des Winkels auf die Genauigkeit

Da die Messung der Bogenlänge einen geringen Einfluss auf den berechneten Radius hat, wird als Haupteinflussfaktor der auftretenden Abweichungen die

Messung der Drehrate $\dot{\theta}_1$ und die inkrementelle Änderung des Tangentenwinkels $\Delta\theta_1$ angenommen. Dabei lässt sich der Gesamtfehler in

- Fehler, die vom MEMS-Gyroskop herrühren,
- Fehler, die durch mechanisches Spiel und Toleranzen verursacht werden, sowie
- Fehler, die durch die Integration der gemessenen Winkelgeschwindigkeit $\dot{\theta}_1$ mittels der Trapezregel entstehen,

unterteilen. Im Folgenden werden diese Fehler analysiert.

Die Fehler von MEMS-Gyroskopen können in konstanten Bias, thermomechanisches weißes Rauschen, Bias-Instabilität, Temperatureffekte und Kalibrierungsfehler eingeteilt werden [WOO07]. Tabelle 3 fasst diese Fehlerursachen zusammen.

Tabelle 3 Fehler von MEMS-Gyroskopen [WOO07]

| Fehler | Beschreibung | Auswirkung auf gemessenen Winkel |
|-------------------|---|--|
| Bias | Konstanter Bias der Drehrate | Der Winkelfehler wächst proportional zur Dauer der Messung |
| White noise | White noise mit Standardabweichung | Angle Random Walk, dessen Standardabweichung mit der Quadratwurzel der Zeit wächst |
| Temperatureffekte | Temperaturabhängiger Bias | Der Winkelfehler wächst proportional zur Dauer der Messung |
| Kalibrierung | Deterministische Fehler bei Skalenfaktoren, Ausrichtungen und Gyroskop-Linearitäten | Winkeldrift proportional zur Geschwindigkeit und Dauer der Bewegung |
| Bias Instabilität | Bias Schwankungen | Winkelzufallsbewegung zweiter Ordnung |

Während der konstante Bias, der sich in einem konstanten Drift der Winkelgeschwindigkeit widerspiegelt, durch die vor jeder Messung durchgeführte Kalibrierung kompensiert wird, akkumulieren sich die übrigen Fehler. Diese Akkumulation schlägt sich in den Abweichungen des gemessenen Biegewinkels nieder. Diese sind in Abbildung 56 dargestellt. Anzumerken ist hierbei, dass diese auch den Fehler beinhalten, der durch die Diskretisierung und Integration der Drehgeschwindigkeit mit Hilfe der Trapezregel entsteht.

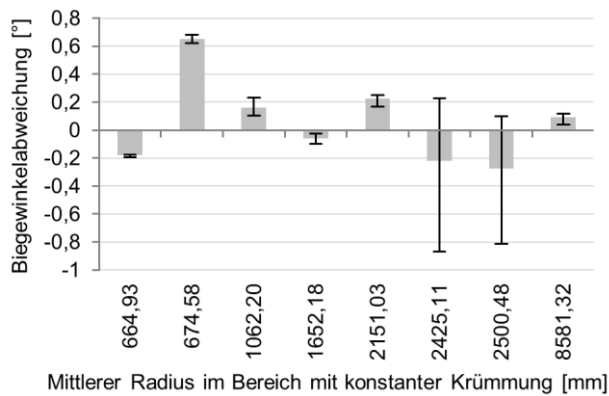


Abbildung 56 Abweichung des Biegewinkels [KES23*]

Die Abweichungen des Biegewinkels sind weitestgehend kohärent mit den Abweichungen des Radius im Bereich der konstanten Krümmung, auch wenn sich der Biegewinkel auf die Messung der gesamten Profilkontur bezieht. Die Fehler des MEMS-Gyroskops werden daher als wesentlicher Einfluss auf die Messgenauigkeit betrachtet.

Neben den Fehlern des Gyroskops beeinflussen Rundheitsfehler und eine Exzentrizität der Rolle und des Reibrades die Abweichungen des Radius. Bei größeren Radien können diese zu einer erhöhten Streuung führen. Rundheitsfehler und Exzentrizität bewirken hier eine Oszillation der Winkelgeschwindigkeit des Gerätes. Diese zeigt sich ebenso in einer Oszillation des berechneten Tangentenwinkels des Profils. Bei allen Messungen mit dem mobilen Messgerät kann eine solche Oszillation des berechneten Radius festgestellt werden (Abbildung 57).

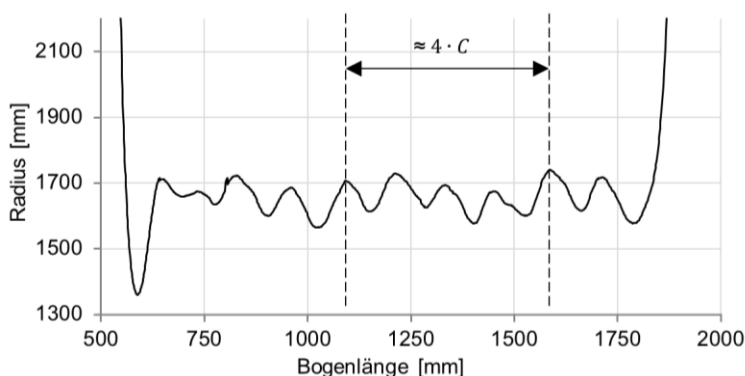


Abbildung 57 Oszillation des gemessenen Radius [KES23*]

Die Periodenlänge der Oszillation entspricht hierbei näherungsweise dem Umfang C des Reibrades und der Rolle. Daraus lässt sich ableiten, dass die

Hauptinflussfaktoren die vorliegenden Exzentrizitäten der Rolle und des Reibrads sind.

Aufgrund der indirekt proportionalen Abhängigkeit des Radius vom gemessenen Winkel führt die Oszillation zu einem größeren mittleren gemessenen Radius. Liegt eine Exzentrizität sowohl bei der Rolle als auch beim Reibrad vor, kann eine Phasenverschiebung zu einer Überlagerung der Schwingungen führen. Hierdurch kann eine Variation der Streuung der berechneten Radien zwischen verschiedenen Messungen verursacht werden. Um diesen Fehler und die Streuung abzuschätzen, wurde der theoretische Fehler unter Berücksichtigung der Abtastrate und der mittleren Vorschubgeschwindigkeit, die bei den durchgeführten Messungen vorlag, berechnet. Diese betrug bei den Messungen ungefähr 200 mm/s. Die Exzentrizität des Reibrads ist aufgrund der gerändelten Oberfläche nicht exakt zu bestimmen und wird mit 0,02 mm abgeschätzt. Für die Rolle kommt die vom Hersteller des Lagers angegebene Rundheitstoleranz von 0,009 mm als Schätzwert für die Exzentrizität zur Anwendung. Die berechnete Abweichung des mittleren Radius in Abhängigkeit der Phasenverschiebung für Messobjekte mit einem konstanten Radius ist in Abbildung 58 dargestellt.

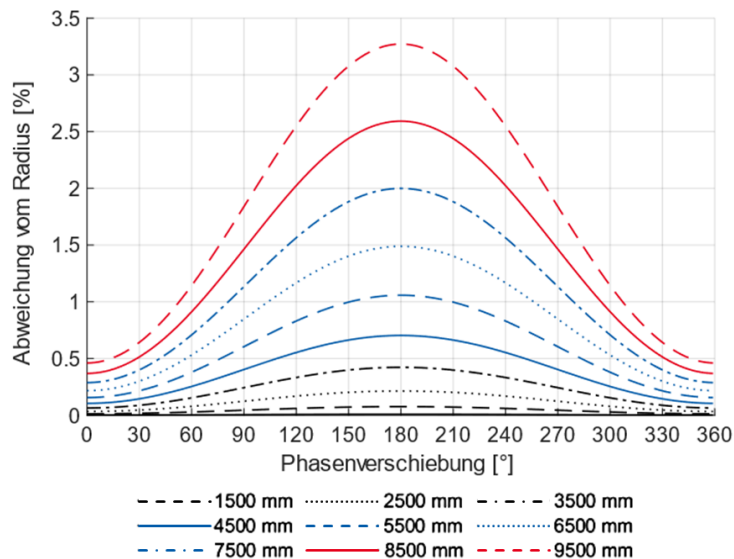


Abbildung 58 Theoretischer Fehler aufgrund der Exzentrizität des Reibrads und der Rolle [KES23*]

Betrachtet wird hierbei eine Umdrehung des Reibrades und der Rolle. Die berechneten Abweichungen des Radius zeigen einen gesteigerten Einfluss der

Phasenverschiebung mit zunehmendem Radius. Dies stimmt mit der beobachteten gesteigerten Streuung der Messergebnisse bei größeren Radien überein.

Neben der Phasenverschiebung kann auch die Oszillation des gemessenen Winkels relativ zur gemessenen Kontur die Streuung beeinflussen. Auch im Bereich des Profils mit einer konstanten Krümmung treten geringe lokale Abweichungen auf (siehe Abbildung 54). Je nach dem lokal vorliegenden Radius wirkt sich die beschriebene Oszillation des Tangentenwinkels unterschiedlich auf den gemessenen Radius aus. Grund hierfür ist die indirekt proportionale Abhängigkeit des berechneten Radius vom Winkel. Dies ist schematisch in Abbildung 59 dargestellt. Die gleiche Abweichung des gemessenen Winkels $\delta\theta$ bewirkt unterschiedliche Radiusabweichungen δR_1 und δR_2 in Abhängigkeit des jeweils lokal vorliegenden Radius.

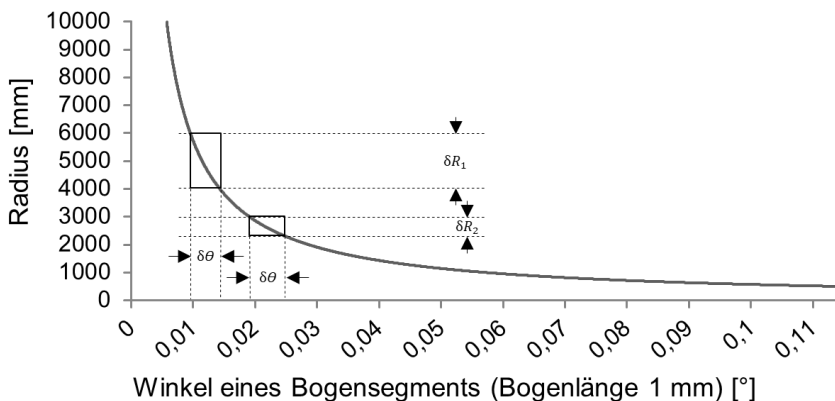


Abbildung 59 Indirekt proportionale Abhängigkeit des Radius vom gemessenen Tangentenwinkel [KES23*]

Konturabweichung

Im Hinblick auf die Genauigkeit hat die Konturabweichung nur eine begrenzte Aussagekraft, da diese stark von den Kontursegmenten und der Konturlänge des Profils abhängt. Sie umfasst jedoch alle Messfehler, sowohl bei der Radius- als auch bei der Bogenlängenmessung, die beim mobilen Messgerät mit der Radiusmessung einhergehen. Die Konturabweichung kann zum Vergleich der Gesamtgenauigkeit verschiedener Messsysteme herangezogen werden, insofern sich diese auf dasselbe Messobjekt beziehen.

Die berechneten maximalen Abweichungen der aus den Messergebnissen des mobilen Messgeräts rekonstruierten Kontur von der Referenzkontur sind in Abbildung 60 dargestellt. Die Abweichungen verhalten sich hierbei näherungsweise proportional zu den Abweichungen des Biegewinkels und der Länge der geraden Enden der Profile. Die Länge der geraden Enden beträgt bei allen gemessenen Konturen ca. 500 mm. Aufgrund der gewählten Vorgehensweise für den Vergleich der Konturen trägt die Biegewinkelabweichung somit mit einem linear steigenden Anteil zur Konturabweichung bei [KES23*].

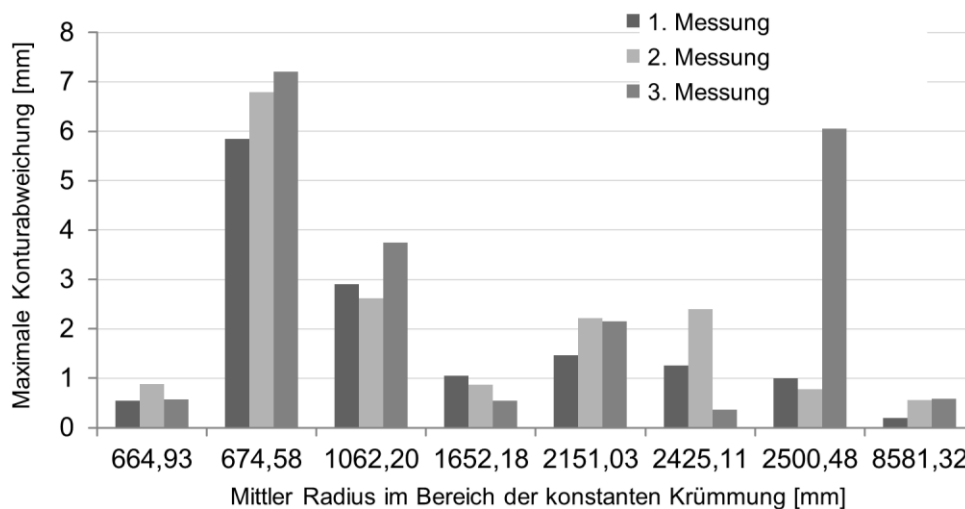


Abbildung 60 Maximale Konturabweichung der aus den Messergebnissen rekonstruierten Kontur (mobiles Messgerät) [KES23*]

7.3.2 Analyse der Messergebnisse des optischen Messsystems

Die Abweichungen des berechneten, gemittelten Radius liegen bei den durchgeführten Messungen unter 1,5 % (Abbildung 61). Aufgrund der Streuung der Abweichungen lässt sich auf Basis der vorliegenden Daten kein signifikanter Zusammenhang zwischen Genauigkeit und Radius ableiten.

Die ermittelten Radiuswerte werden durch die Fehler der Messung des jeweiligen Konturabschnitts mit dem Laserscanner, eine mögliche Fehlausrichtung des Scanners zum Profil, elastische Verformungen des Profils während der Messung und die Genauigkeit der Bogenlängenmessung beeinflusst.

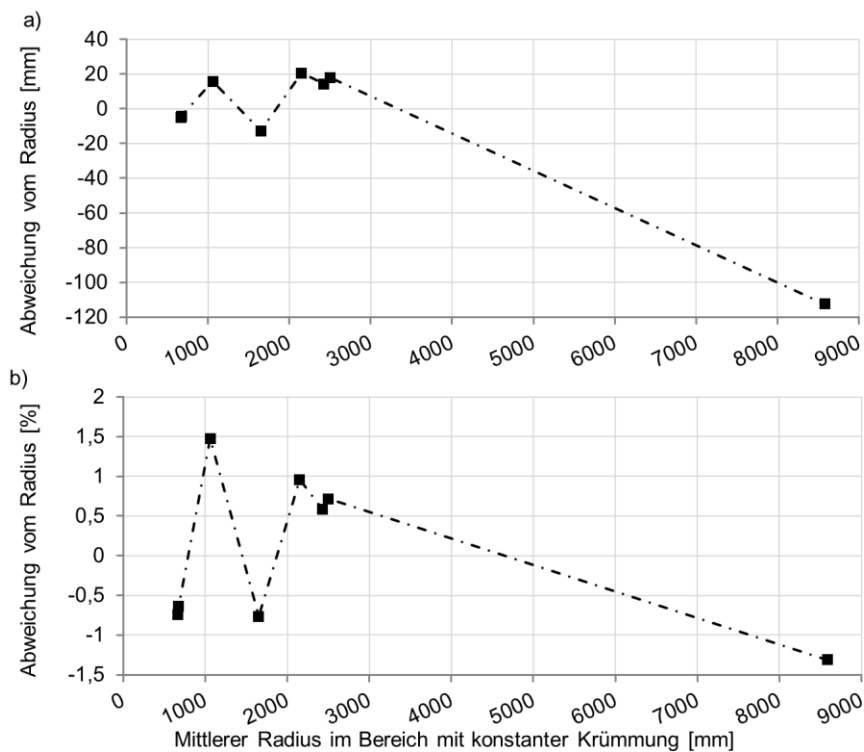


Abbildung 61 Abweichung des mittleren Radius (optisches Messsystem) [KES23*]

Da die Messung der Bogenlänge nur die Berechnung der verglichenen mittleren Radien beeinflusst, wird ihr Einfluss auf die Abweichungen als nicht signifikant angesehen. Eine elastische Verformung durch die von den Messköpfen auf die Profile ausgeübte Kraft wird ebenfalls als nicht relevant angesehen, da das hierdurch eingebrachte Moment im gemessenen Konturabschnitt vernachlässigbar klein ist. Eine Abweichung durch eine Fehlausrichtung wurde anhand von Berechnungen abgeschätzt [KES23*]. Die geschätzte Abweichung liegt unter 0,3 %.

Daher wird angenommen, dass Fehler bei der Messung der betrachteten Konturabschnitte mit dem Laserscanner den größten Einfluss auf die ermittelten Abweichungen des Radius haben. Im Folgenden werden die Ergebnisse der dazu durchgeführten Analyse vorgestellt.

Fehlereinflüsse des Laserscanners

Mögliche Fehlereinflüsse des Laserscanners sind Temperatureffekte, Fremdlicht, mechanische Schwingungen sowie der Reflexionsgrad, Farbunterschiede und die Rauheit der Oberfläche des Messobjekts [MIC14].

Die Temperatureinflüsse werden an dieser Stelle vernachlässigt, da der Laserscanner keinen großen Temperaturschwankungen ausgesetzt war. Hinsichtlich des Einflusses von Fremdlicht wirkte während der Messungen kein direkt einstrahlendes Licht von der Sonne oder anderen Lichtquellen auf den Aufbau ein. Darüber hinaus kann auf der Grundlage der vorliegenden Daten an dieser Stelle keine Aussage oder quantitative Abschätzung des Einflusses von Fremdlicht getroffen werden.

Im Vergleich zu den aus den anderen beiden Systemen gewonnenen Krümmungsverläufen, weisen die mit dem optischen Messsystem erfassten Krümmungsverläufe ein hochfrequentes Rauschen auf (siehe Abbildung 54). Darüber hinaus zeigen die Rohdaten des Laserscanners ein Rauschen der erfassten Konturabschnitte (Abbildung 62).

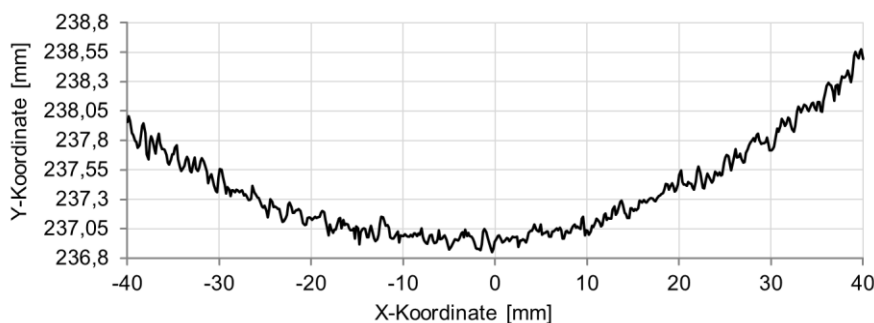


Abbildung 62 Exemplarisches Ergebnis der Messung eines Konturabschnitts mit dem optischen Messsystem [KES23*]

In einer Untersuchung der Varianz der Rohdaten konnte keine signifikante Korrelation mit dem gemessenen Radius oder den Radiusabweichungen festgestellt werden [KES23*]. Jedoch konnte ein Zusammenhang zwischen der Varianz der Rohdaten und während der Messung auftretenden mechanischen Schwingungen festgestellt werden. Derartige Schwingungen treten sowohl am Profil während des Biegevorgangs als auch am Messkopf auf und resultieren in Messunsicherheiten. Die Schwingungen können in Frequenz und Amplitude über den Prozess hinweg variieren. Dies ist bedingt durch verschiedene Einflussgrößen. Diese sind z.B. die Länge des aus der Maschine auskragenden Profils, die Abstützung des Profils außerhalb der Maschine, der Biegeradius und die Vorschubgeschwindigkeit.

Weitere Untersuchungen zeigten, dass darüber hinaus auch der Reflexionsgrad, Farbunterschiede und die Rauheit der Oberfläche des Profils die Varianz der Rohdaten beeinflussen [KES23*]. Eine weitere Differenzierung dieser Einflüsse war auf Basis der verfügbaren Daten nicht möglich. Farbunterschiede sind mit unterschiedlichen Eindringtiefen des Laserlichts in das Material verbunden [MIC14]. Diese können zu Messunsicherheiten führen, da die gleichen Belichtungsparameter des Laserscanners auf den gesamten Konturabschnitt angewendet werden. Obwohl die Oberfläche der untersuchten Profile gereinigt wurde, können Farbunterschiede auf der Oberfläche der Profile nicht ausgeschlossen werden.

Eine quantitative Abschätzung der durch diese Fehler der optischen Messung verursachten Abweichungen war an dieser Stelle nicht möglich, da die Einflüsse mit den vorliegenden Daten nicht separat untersucht werden konnten und stark vom Prozess und seiner Umgebung abhängig sind.

Auf Basis der vorliegenden Analyse werden jedoch die Dynamik des Messprozesses und die damit verbundenen Schwingungen sowie die Eigenschaften der Profiloberfläche als wesentliche Einflüsse auf die Genauigkeit des untersuchten Messaufbaus angesehen.

Biegewinkel- und Konturabweichung

Die Abweichungen des Biegewinkels stimmen überwiegend mit den Radiusabweichungen überein (Abbildung 63).

Die ermittelten Abweichungen geben aber auch mögliche Fehler der mit dem Reibrad ermittelten Bogenlänge wieder. So führt ein Fehler bei den inkrementellen Messungen der Bogenlänge zu einer falschen Gewichtung der ermittelten Radiuswerte bei der Berechnung des Gesamtbiegewinkels.

Analog zum mobilen Messgerät werden Konturabweichungen vorwiegend durch die Abweichung des Biegewinkels und der Länge des geraden Endes der Profile beeinflusst [KES23*].

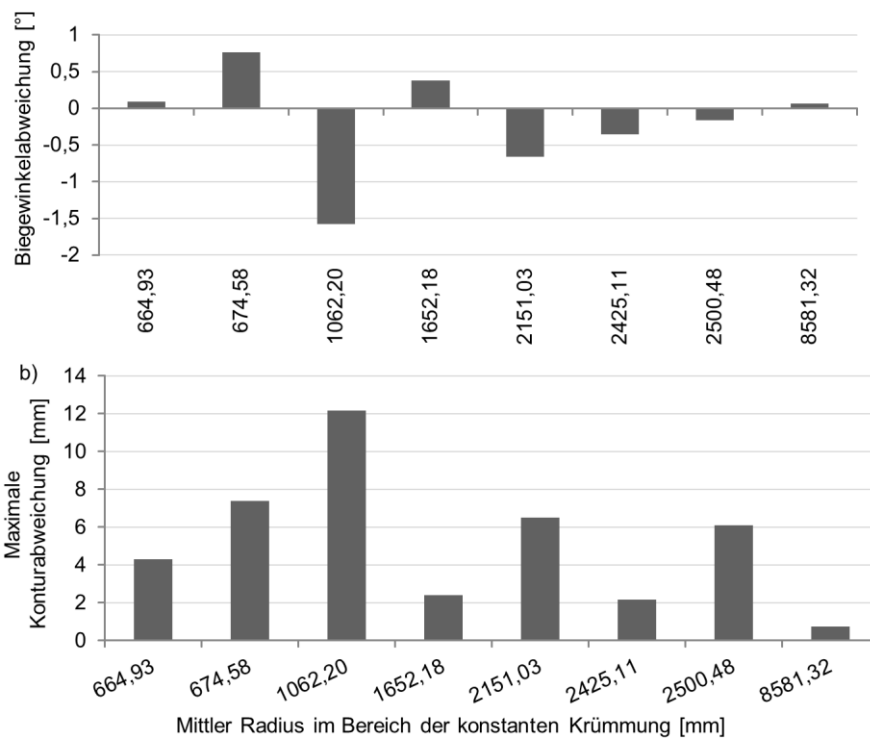


Abbildung 63 Abweichung des ermittelten Biegewinkels und Konturabweichung (optisches Messsystem) [KES23*]

7.4 Anwendungspotential der entwickelten Messsysteme

Beide vorgestellten Messsysteme zeigen gute Ergebnisse für einen größeren Bereich von Radien im Vergleich zur Genauigkeit bestehender Krümmungsmesssysteme. Im Vergleich erzielt das mobile Messgerät in allen Auswertungen der verfügbaren Messdaten eine höhere Genauigkeit als das optische Messsystem [KES23*].

Für eine industrielle Anwendung ist die Genauigkeit beider Systeme weiter zu verbessern, um auch enge Produkttoleranzen einhalten zu können.

Aufgrund des im Stand der Technik beschriebenen Mangels an Normen und Standards für die Toleranzen gebogener Profile, wird anhand industriell üblicher Toleranzen angenommen, dass die Messunsicherheit beider Systeme kleiner als 0,2 % sein müsste [KES23*]. In Anbetracht dessen werden im Folgenden Perspektiven für eine Erhöhung der Messgenauigkeit der entwickelten Systeme betrachtet und abschließend das Anwendungspotential bewertet.

7.4.1 Verbesserungsmöglichkeiten und Bewertung des Anwendungspotentials des mobilen Messgeräts

In der Untersuchung der Messgenauigkeit des mobilen Messgeräts konnten Fehlereinflüsse identifiziert sowie teils quantitativ abgeschätzt werden. Anhand dieser werden Perspektiven für eine Verbesserung der Messgenauigkeit diskutiert.

Die Fehler des Gyroskops können durch den Einsatz von Techniken der Sensorfusion reduziert werden. Das Rauschen des Gyroskops kann durch die Verwendung mehrerer Gyroskope und die Mittelung der einzelnen Winkelgeschwindigkeiten reduziert werden. Bedingung hierfür ist, dass das Rauschen der einzelnen Sensoren keine Korrelation aufweist. Ist dies nicht der Fall kann ein zusätzlicher Sensortyp, wie z. B. ein Magnetometer, mit dem Gyroskop gekoppelt werden. Neben der Sensorfusion kann auch die Verwendung hochwertigerer Sensoren die Genauigkeit erhöhen.

Messfehler die auf Rundheitsfehlern und Exzentrizitäten der Rolle und des Reibrads beruhen, können durch eine höhere Genauigkeit der entsprechenden mechanischen Teile oder durch einen größeren Achsabstand zwischen der Rolle und dem Reibrad verringert werden. Ein vergrößerter Achsabstand würde sich durch eine stärkere Mittelung des gemessenen Krümmungsverlaufs jedoch negativ auf die Eignung zur Messung nicht konstanter Krümmungen auswirken.

Durch den Einsatz eines Drehgebers mit einer höheren Auflösung kann der durch die Diskretisierung der gemessenen Bogenlänge verursachte Fehler reduziert werden.

Obwohl sich in den durchgeführten Untersuchungen einige der identifizierten Fehlereinflüsse gegenseitig aufheben können, wird davon ausgegangen, dass die vorgeschlagenen Maßnahmen zu einer signifikanten Verbesserung der Messgenauigkeit beitragen würden.

Neben den Verbesserungsperspektiven bietet das mobile Messgerät vielseitige Anwendungsmöglichkeiten. Zum einen ist es auf ein breites Spektrum von Profiltypen mit rechteckigen Querschnittsformen anwendbar, die einen großen Teil der industriell verarbeiteten Halbzeuge darstellen. Zum anderen kann es flexibel und unabhängig von der vorhandenen Peripherie eingesetzt werden.

Darüber hinaus ist eine Erweiterung der Funktionalität durch die Nutzung der anderen Achsen des Gyroskops möglich. So könnten bspw. auch unerwünschte Abweichungen der Profilkontur, wie eine auftretende Torsion, messtechnisch erfasst werden. Das Anwendungspotenzial des mobilen Messgeräts profitiert auch von wirtschaftlichen Faktoren. Ein wesentlicher Vorteil liegt dabei in der Verwendung kostengünstiger Sensoren, wie dem hier genutzten MEMS-Gyroskop. Im Vergleich zum optischen Messsystem sind hier deutlich geringere Kosten zu erwarten, was das mobile Messgerät für einen breiteren Anwenderkreis zugänglich macht.

7.4.2 Verbesserungsmöglichkeiten und Bewertung des Anwendungspotentials des optischen Messsystems

Anhand der Untersuchungsergebnisse wurden die Störgrößen des Laserscanners bei der optischen Erfassung der Profiloberfläche als Hauptfehlerquelle angenommen. Da eine kosten- und zeitintensive Vorbehandlung bzw. Vorbereitung der Oberflächen der Profile in einem industriellen Produktionsprozess nicht in Frage kommen, bieten die Reduzierung auftretender Vibrationen und eine zusätzliche Abschirmung von externen Lichtquellen für den aktuellen Aufbau die Möglichkeit, den Störgrößeneinfluss zu reduzieren.

Möglichkeiten zur Reduzierung der Vibrationen sind durch eine konstruktive Anpassung des Messsystems zu implementieren [KES23*]. Es ist jedoch zu beachten, dass Vibrationen nur bis zu einem gewissen Punkt reduziert werden können, da sie dem Prozess und der Biegemaschine inhärent sind.

Neben einer konstruktiven Anpassung des derzeitigen Aufbaus könnte die Verwendung alternativer optischer Sensoren die Genauigkeit verbessern. Das von Dirksen vorgeschlagene Messsystem verwendet beispielsweise einen konventionellen Lasertriangulationssensor, und für statische Messobjekte wurde eine Messunsicherheit von weniger als 0,2 % für den gemessenen Radius erreicht [DIR08]. Durch die Verwendung mehrerer Lasertriangulationssensoren könnte die Auswirkung von Farbunterschieden auf der Profiloberfläche reduziert werden.

Da die Auswirkungen der Störeinflüsse der optischen Messung anhand der verfügbaren Daten nicht quantitativ abgeschätzt werden konnten, kann die

Wirksamkeit der vorgeschlagenen Verbesserungen an dieser Stelle nicht bewertet werden.

Analog zum mobilen Messgerät kann das optische Messsystem bei einer Vielzahl von Profiltypen mit rechteckigen Querschnittsformen angewendet werden. Als stationäres System ist es in seiner Anwendbarkeit jedoch von den Schnittstellen und der Arbeitsweise einer vorhandenen Profilbiegemaschine eingeschränkt. Darüber hinaus ist das Anwendungspotential stark von der Einbindung in die Regelung und deren Leistungsfähigkeit abhängig.

8 Experimentelle Untersuchung der Regelung mehrstufiger Drei-Rollen-Biegeprozesse

Zur Untersuchung des in Kapitel 6 vorgestellten Produkt Controllers wurde auf Grundlage des entwickelten optischen Messsystem eine Online-Regelung der Krümmung unter Last auf der Versuchsanlage implementiert. Im Folgenden werden der innere Online-Regelkreis zur Regelung der Krümmung unter Last, der Versuchsaufbau und die für den Produkt Controller verwendeten Parameter vorgestellt. Der Produkt Controller schließt hierbei den äußeren Offline-Regelkreis (siehe Kapitel 5.3, Abbildung 37). Anschließend werden die Ergebnisse der experimentellen Untersuchung präsentiert und diskutiert.

8.1 Versuchsaufbau, -parameter und -durchführung

8.1.1 Messung und Online-Regelung der Krümmung unter Last

Vor der Implementierung der Online-Krümmungsregelung unter Last erfolgt zunächst eine Betrachtung des Einflusses der Messbereichsgröße auf die unter Last erfasste Krümmung. Da die genaue Lage des Krümmungsmaximums nicht bekannt ist, wird diese iterativ genähert. Hierzu werden über der Breite b_K des vom mittleren Laserscanner erfassten Konturabschnitts, ausgehend von der angewandten Messbereichsgröße b_M , n äquidistante Punkte definiert. Für jeden der definierten Punkte wird eine Krümmung berechnet. Dies ist in Abbildung 64 schematisch für $n = 3$ dargestellt.

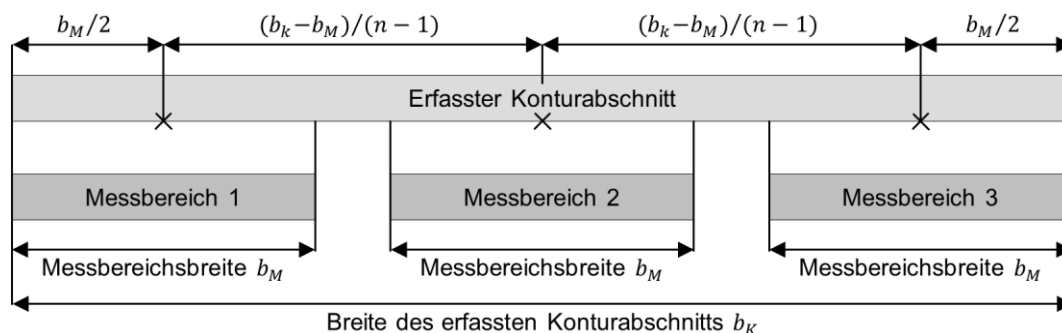


Abbildung 64 Iterative Bestimmung der Krümmung unter Last

Der größte der berechneten n Krümmungswerte wird hierbei als die Krümmung unter Last angenommen. Die Berechnung der Krümmung mit einem Levenberg-Marquardt-Algorithmus erfolgt auf dem Industrie-PC der Versuchsanlage. Die aufwendige, iterative Bestimmung mit der einhergehenden Rechenzeit führt für die im Versuchsaufbau genutzte Hardware zu einer Latenz im System. Um diese Latenz und damit auch die Auswirkungen auf die Regelung möglichst gering zu halten, wurde die Anzahl der äquidistanten Punkte n auf 40 begrenzt. Eine Analyse verschiedener Messbereichsgrößen bei in einstufigen Prozessen aufgezeichneten Datensätzen dient der Festlegung der Messbereichsgröße für die Online-Regelung. Fokus der Betrachtung sind hierbei das berechnete Krümmungsmaximum sowie dessen Position auf der Anlage.

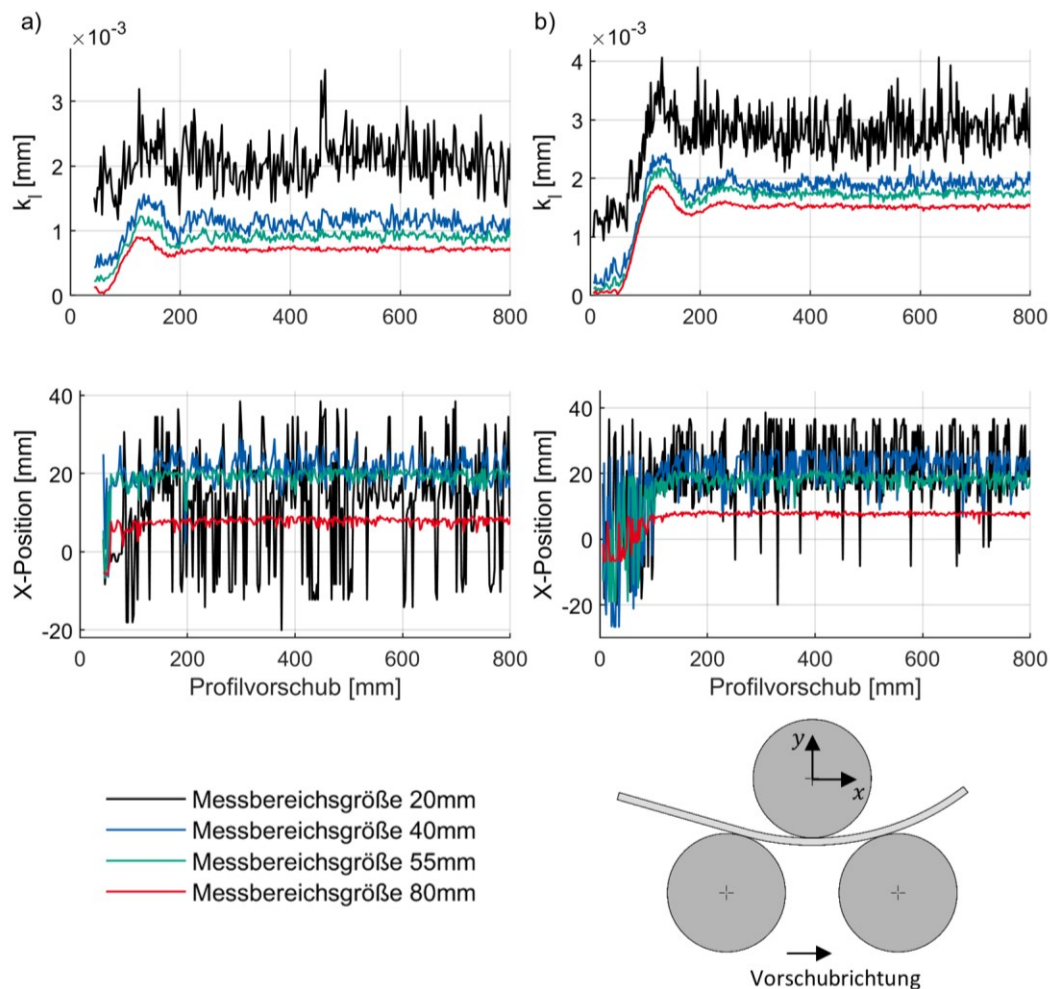


Abbildung 65 Untersuchung des Einflusses der Messbereichsgröße auf die bestimmte Krümmung unter Last: a) Zustellung der Mittelrolle 6,2 mm, b) Zustellung der Mittelrolle 11,2 mm

Abbildung 65 zeigt exemplarisch die Ergebnisse von zwei untersuchten Datensätzen.

Sie zeigen einerseits, dass mit einer abnehmenden Messbereichsgröße, analog zu den numerischen Untersuchungen, ein Konvergenzverhalten der bestimmten Krümmung unter Last zu beobachten ist. Andererseits nimmt der Einfluss von Fehlern der optischen Messung zu (siehe Kapitel 7.3.2, Abbildung 62). In den in Abbildung 65 gezeigten Daten dominiert dieser Effekt bei einer Messbereichsgröße von 20 mm die Datenaufzeichnung, was in einem gesteigerten Rauschen der bestimmten Krümmung unter Last sowie der Position des Maximums resultiert. Insbesondere bei geringen Krümmungen treten hierdurch höhere Fehler auf (vgl. Abbildung 65).

Unter der Annahme, dass die Güte der Näherung des Krümmungsmaximums in mehrstufigen Prozessen aufgrund der bereits vorliegenden Ausgangskrümmung zunimmt, wurde für die experimentellen Untersuchungen zur Regelung eine Messbereichsgröße von 55 mm verwendet. Dies ist ein Kompromiss hinsichtlich

- des auftretenden Rauschens,
- der Güte der Näherung des Krümmungsmaximums sowie
- der Auswirkung der Fehlereinflüsse der optischen Messung auf unterschiedliche Krümmungen.

Da eine exakte, quantitative Bestimmung der Genauigkeit der Krümmungsmessung unter Last aus Ermangelung an Referenzmessungen nicht untersucht werden konnte, soll die Analyse der Messunsicherheit für ein Profil im Bereich der konstanten Krümmung der groben Abschätzung der Fehlerdimension dienen. Für eine Messbereichsbreite von 80 mm konnte so für die konstante Krümmung eines entlasteten Profils eine Messunsicherheit von ca. 1,5 % festgestellt werden. Aufgrund der geringeren, in den Untersuchungen verwendeten Messbereichsbreite von 55 mm zur Bestimmung der Krümmung unter Last, ist hier von einer zusätzlich gesteigerten Fehlersensitivität auszugehen. Dabei wird angenommen, dass das beobachtete Rauschen der optisch erfassten Konturabschnitte (siehe Kapitel 7.3.2, Abbildung 62) bei einer reduzierten Messbereichsbreite einen gesteigerten Einfluss auf die bestimmte

Krümmung hat. In Anbetracht dessen wird von einer Messunsicherheit von über 1,5 % ausgegangen. Dies erhöht die Unsicherheit der Näherung des wahren Krümmungsmaximums, die der Bestimmung der Krümmung unter Last inhärent ist.

Aufgrund des Rauschens der ermittelten Krümmung unter Last (Abbildung 65) ist zudem eine Anpassung des Reglers gegenüber der numerischen Simulation vorgenommen worden (Abbildung 66). Die Vorgabe der Sollkrümmung unter Last $k_{l,soll}$ erfolgt als Sollkurve $k_{l,soll}(f)$ in Abhängigkeit des am mittleren Messkopfs gemessenen Profilver schubs f (siehe Kapitel 7.2.1). Die Sollkurve wird über dem Profilver schub integriert und der so generierte Verlauf als Sollkurve zur Regelung des Prozesses verwendet. Durch die Integration der Krümmung über den Vorschub ergibt sich ein Winkelverlauf, der die Einheit [rad] hat. Der Sollwert und die Regelgröße haben hierdurch bereits einen integralen Anteil. Ebenso haben ein Rauschen oder lokal auftretende Schwankungen der Krümmung unter Last durch Messfehler oder im Prozess auftretende Schwingungen hierdurch eine geringere Auswirkung auf den Regler.

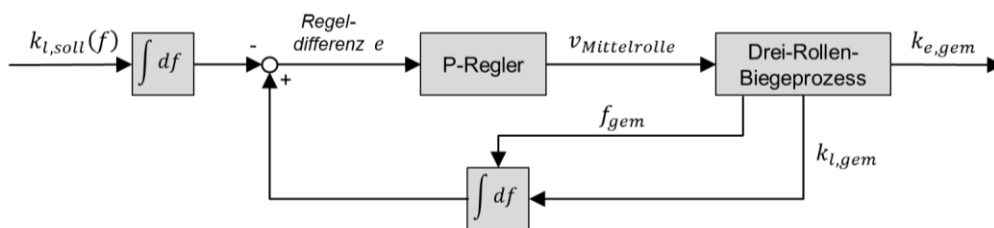


Abbildung 66 Regelung der Krümmung unter Last auf der Versuchsanlage

In der Regelung wird ein reiner, empirisch ausgelegter P-Regler verwendet. Durch die Verwendung dieses Regler-Typs werden lokal begrenzte Abweichungen von der Sollkrümmung in Kauf genommen. Dennoch konnten in den experimentellen Untersuchungen sehr gute Ergebnisse erzielt werden (siehe Kapitel 8.2, Tabelle 4). Abbildung 67 zeigt hierzu exemplarische Ergebnisse eines einstufigen, geregelten Prozesses. Aufgrund der gewählten Größe des Messbereichs kommt es, wie beschrieben, bei sehr kleinen Krümmungen zu erhöhten Abweichungen. So wurde durch die Fehler der optischen Messung auch am geraden Profil ohne eine Zustellung der Mittelrolle eine deutliche Krümmung gemessen (Abbildung 67 b)).

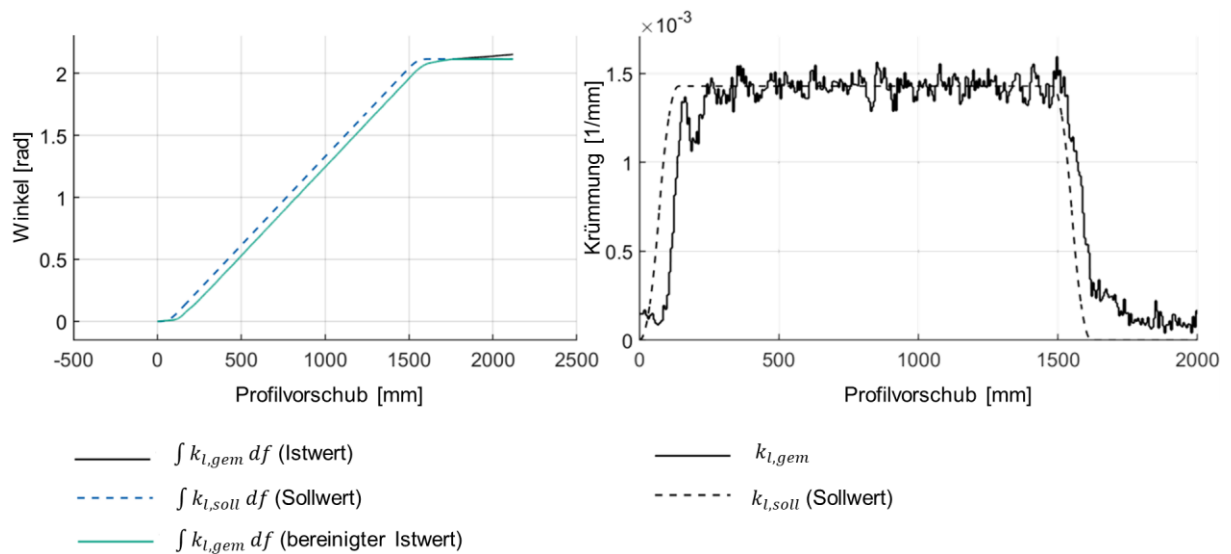


Abbildung 67 Online-Regelung auf der Versuchsanlage: a) Winkerverlauf, b) Krümmungsverlauf

Dies resultiert in der Regelung in einem Schleppfehler durch die Integration der fehlerhaft gemessenen Krümmung bei Prozessstart (Abbildung 67 a)). Ebenso kommt es zu einem Ansteigen des gemessenen Winkels, auch nachdem die Mittelrolle wieder auf ihrer Ausgangsposition ist und ein gerader Profilabschnitt im Messbereich liegt. Im Verlauf des in Abbildung 67 a) dargestellten bereinigten Istwerts wurde dieser Anstieg herausgerechnet. Korrespondierend zum Verlauf der unter Last gemessenen Krümmung zeigt Abbildung 68 den Krümmungs- und Biegewinkelverlauf des entlasteten Profils.

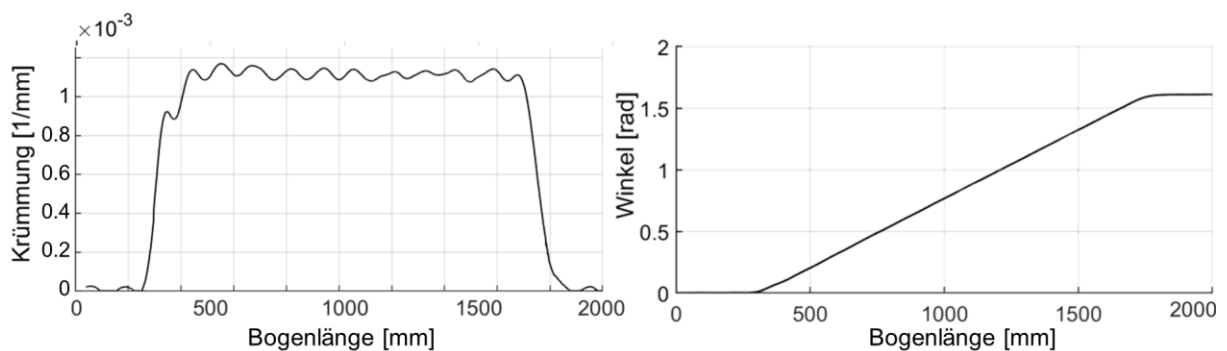


Abbildung 68 Krümmungs- und Biegewinkelverlauf des entlasteten Profils (mit mobilem Messgerät gemessen)

8.1.2 Versuchsdurchführung

Aufgrund der durch die iterative Bestimmung der Krümmung unter Last auftretenden Latenz wurde der Laserscanner am Einlauf der Anlage in den Versuchen nicht genutzt, um so den Rechenaufwand zu reduzieren. Aus diesem Grund wurde die Biegemaschine nur in eine Vorschubrichtung betrieben. Dies ist in Abbildung 69 schematisch für die ersten beiden Prozessstufen dargestellt.

Die experimentelle Untersuchung der Regelung mehrstufiger Prozesse erfolgte anhand von zwei verschiedenen Profilen. Zum einen diente ein kaltgezogenes Vierkantprofil 30 x 30 mm aus S235 JRC und zum andern ein warmgewalztes, längsnahtgeschweißtes Vierkantrrohr 40 x 40 x 3 mm aus S235 JRH als Versuchsmaterial. Bei der experimentellen Untersuchung mit dem längsnahtgeschweißten Profil lag die Naht oben. Die Profile wurden vor dem Prozess gereinigt um den Einfluss von Farbunterschieden der Profilloberfläche auf die optische Messung zu reduzieren.

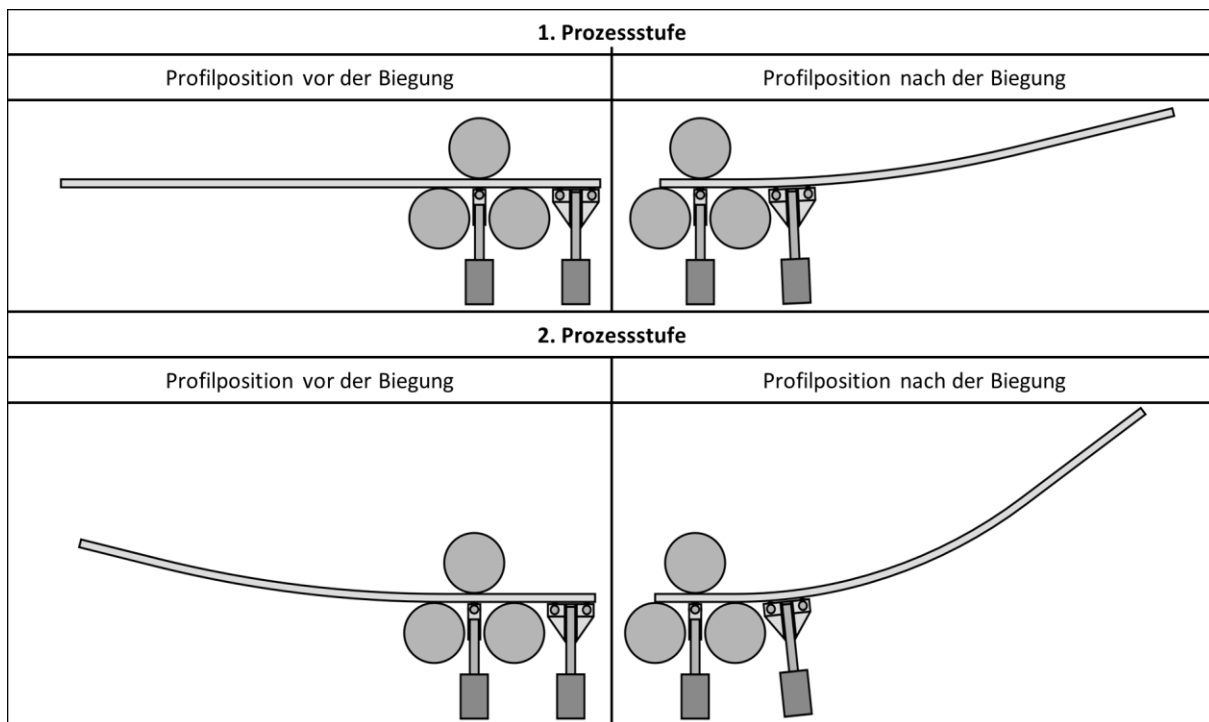


Abbildung 69 Betrieb der Versuchsanlage in eine Vorschubrichtung

Die Krümmung des entlasteten Profils wird sowohl mit dem optischen Messsystem als auch mit dem mobilen Messgerät gemessen. Zur Prognose der

Rückfederung mit dem in Kapitel 6 vorgestellten Produkt Controller werden die mittlere Krümmung unter Last und die Krümmung des entlasteten Profils für den Bereich des jeweiligen Krümmungsverlaufs bestimmt, in dem eine näherungsweise konstante Krümmung vorliegt. Aufgrund der höheren Messgenauigkeit des mobilen Messgeräts dient die damit am entlasteten Profil durchgeführte Konturmessung der Krümmungsbestimmung für die Prognose. In allen Versuchen wird der Prozess fortgeführt bis es zu einem Versagen des Produkt Controllers durch ein Überbiegen kommt.

8.1.3 Offline-Regelung durch den Produkt Controller

In den experimentellen Untersuchungen kamen für die Reduzierung des Stützabstands der Faktor $q = 0,5$ sowie der Faktor $w = 0,5$ für die Breite des Konfidenzbereichs zum Einsatz (Abbildung 70). Als Startwerte für die erste Prognose dienten in den ersten beiden Prozessstufen eine Sollkrümmung von $k_{l,soll} = \frac{1}{R_{e,soll}}$ und $k_{l,soll} = \frac{1}{0,9 \cdot R_{e,soll}}$ für die Regelung der Krümmung unter Last. Die so gewonnenen Datenpunkte der Rückfederungskurve werden als Startwerte für die Prognose der Rückfederung verwendet.

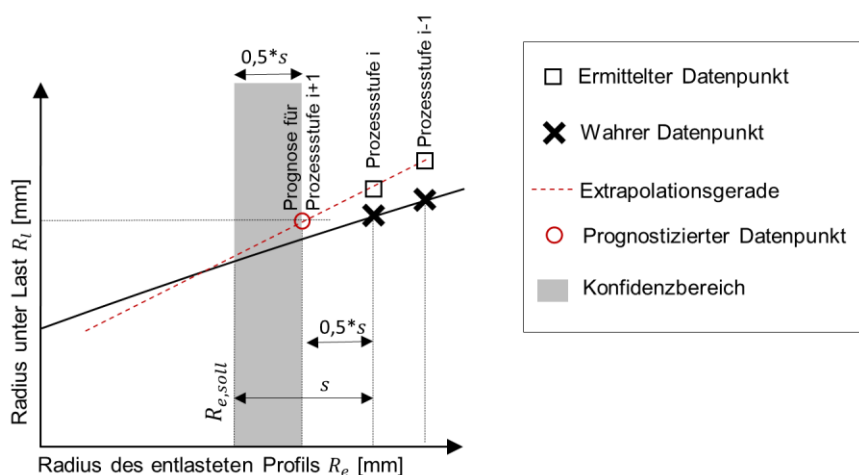


Abbildung 70 Parameter des Produkt Controllers in experimentellen Untersuchungen

Die Unsicherheit der Bestimmung der Krümmung unter Last führte vor allem in den ersten Prognosen zu Steigungen der Extrapolationsgeraden größer eins. Da dies physikalisch nicht möglich ist, wurde der Algorithmus des Produkt Controllers im Zuge der experimentellen Untersuchungen um eine Plausibili-

tätsprüfung erweitert. Ergibt sich aus einer Prognose eine Steigung von mehr als eins wird diese durch den Algorithmus auf den Wert eins gesetzt.

8.2 Experimentelle Untersuchung des entwickelten Produkt Controllers in mehrstufigen Prozessen

Zum Abschluss der Untersuchungen sollen experimentelle Untersuchungen der Analyse und Bewertung der implementierten Online- sowie der Offline-Regelung durch den Produkt Controller dienen.

Abbildung 71 zeigt hierzu exemplarisch die Datenpunkte sowie die letzte angewendete Prognose eines geregelten, vierstufigen Prozesses für einen Sollradius des entlasteten Profils von 700 mm, wobei der Prozess bei einem Radius des entlasteten Profils von 699,03 mm beendet wurde. Die Prognose der letzten Prozessstufe durch den Produkt Controller erfolgte hierbei für einen reduzierten Stützabstand und einen Zielradius von 703,72 mm.

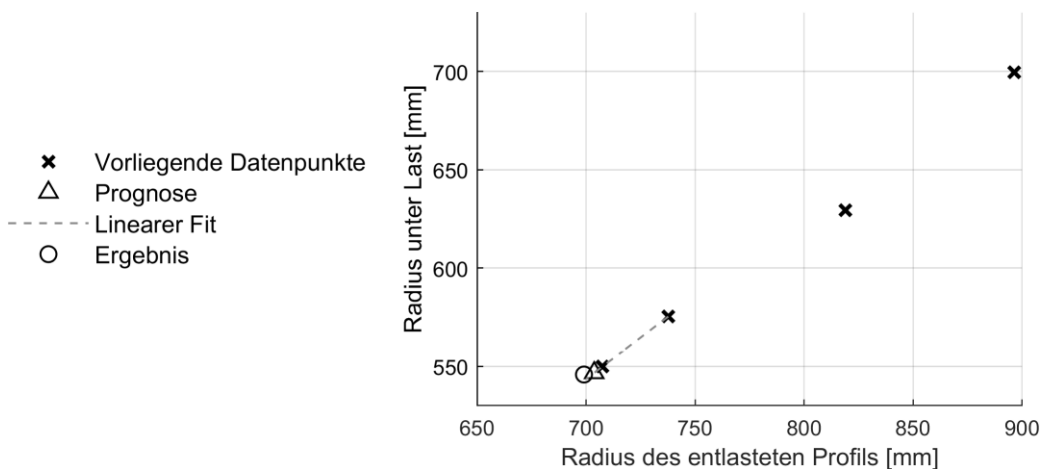


Abbildung 71 Datenpunkte eines geregelten mehrstufigen Prozesses und letzte angewendete Prognose (Sollradius=700 mm, gemessener Radius des entlasteten Profils 699,03)

Korrespondierend hierzu zeigt Abbildung 72 die Krümmungsverläufe in der letzten Prozessstufe.

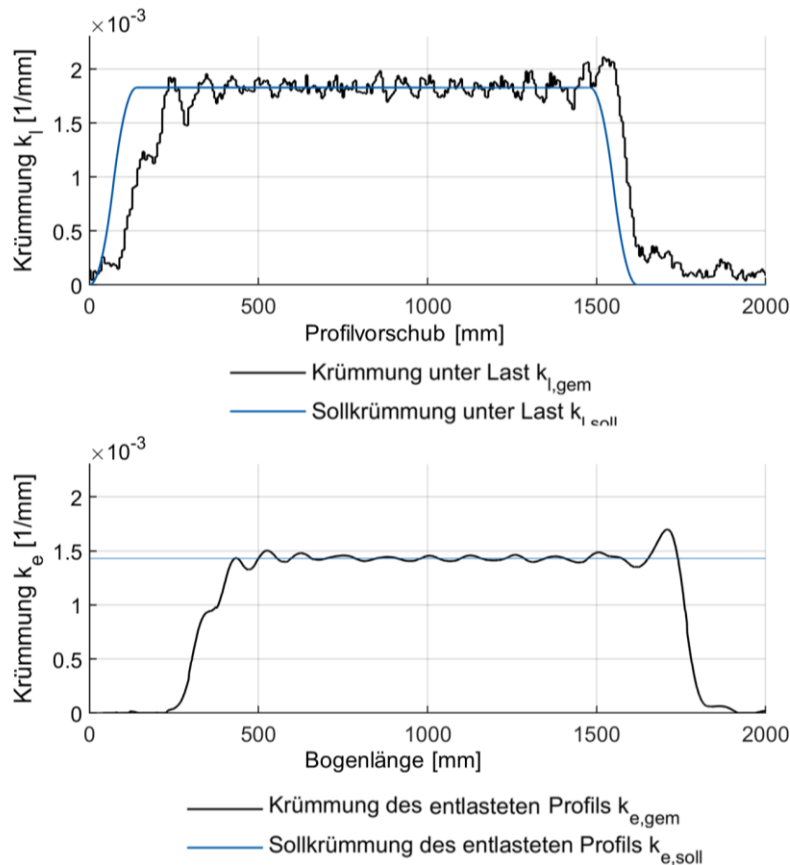


Abbildung 72 Krümmungsverläufe in der letzten Prozessstufe eines geregelten mehrstufigen Prozesses (Sollradius =700 mm, mit mobilem Messgerät gemessener mittlerer Radius des entlasteten Profils 699,03)

Wie zu erkennen ist, kann mit der Prozessregelung der Soll-Radius des entlasteten Profils im Bereich eines näherungsweisen konstanten Radius' bis auf geringe lokale Abweichungen erzielt werden.

Den Einfluss des Stützabstandes zeigen die Ergebnisse der durchgeführten geregelten, mehrstufigen Prozesse. Wie zu erwarten war, geht mit einem abnehmenden Stützabstand eine Zunahme der Prognosegenauigkeit des Produkt Controllers einher (Abbildung 73 a)).

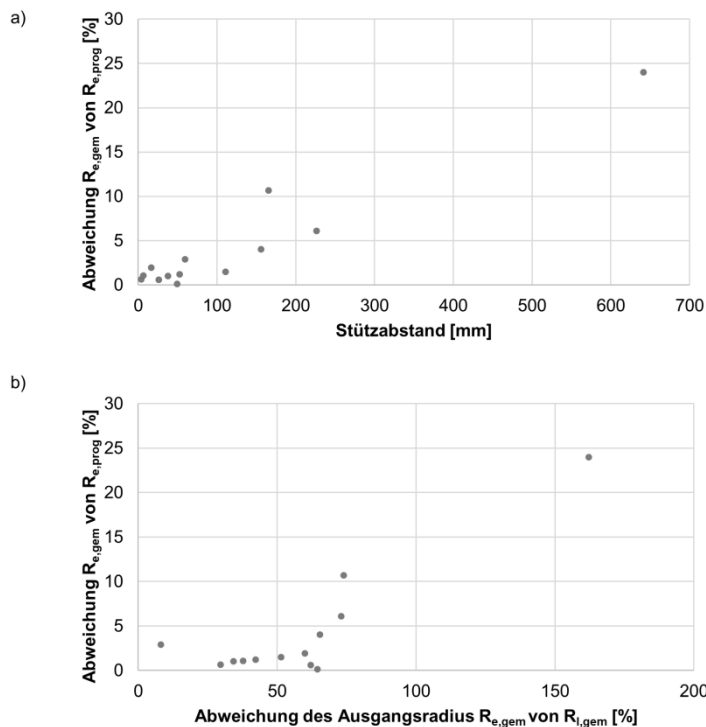


Abbildung 73 Erzielte Prognosegenauigkeit: a) in Abhängigkeit des Stützpunktabstands, b) in Abhängigkeit der Abweichung des Ausgangsradius zum Radius unter Last

Anzumerken ist dabei, dass bei sehr geringen Stützabständen die Messunsicherheit bei der Krümmungsbestimmung unter Last der dominierende Einflussfaktor der Prognosegenauigkeit ist und somit diesen Effekt begrenzt.

Ebenso nimmt die Prognosegenauigkeit, mit Ausnahme weniger Ausreißer, mit einer Abnahme der Abweichung des Ausgangsradius vom Radius unter Last zu (Abbildung 73 b)). Dies gibt implizit den Effekt des Stützpunktabstands wieder. Es stützt jedoch auch die Annahme, dass die Güte der Näherung des Krümmungsmaximums mit einer zunehmenden Ausgangskrümmung steigt, was in den numerischen Untersuchungen beobachtet werden konnte (Kapitel 5.4.2).

Die gewählten Startwerte des Produkt Controllers in Form der ersten beiden Prozessstufen beeinflussen die Gesamtzahl der Prozessstufen und somit die Wirtschaftlichkeit des Prozesses. Bei dem Vorliegen von Kenntnissen des Rückfederungsverhaltens eines Profilhalbzeugs, können diese genutzt werden um den Stützabstand für die erste Prognose zu reduzieren und so die Ge-

samtzahl der Prozessstufen zu mindern. Die Daten von bereits durchgeführten geregelten Prozessen, könnten so zu einer Steigerung der Wirtschaftlichkeit folgender Prozesse mit dem Profilhalbzeug genutzt werden. Auf Basis der aus den experimentellen Untersuchungen gewonnenen Datenpunkte kann so bspw. die Rückfederungskurve des verwendeten kaltgezogenen Vierkantprofils (30 x 30 mm, S235 JRC) durch eine nichtlineare Regression genähert werden. Zur Approximation der Rückfederungskurve diene hierbei der Ansatz nach Swift [SWI52], der üblicherweise zur Beschreibung von Fließkurven genutzt wird. Abbildung 74 zeigt hierzu die Datenpunkte, bei denen der Radius des entlasteten Profils mit dem mobilen Messgerät ermittelt wurde und die dazugehörige Approximation. Der Determinationskoeffizient der durchgeführten Regression beträgt hierbei 0,9929.

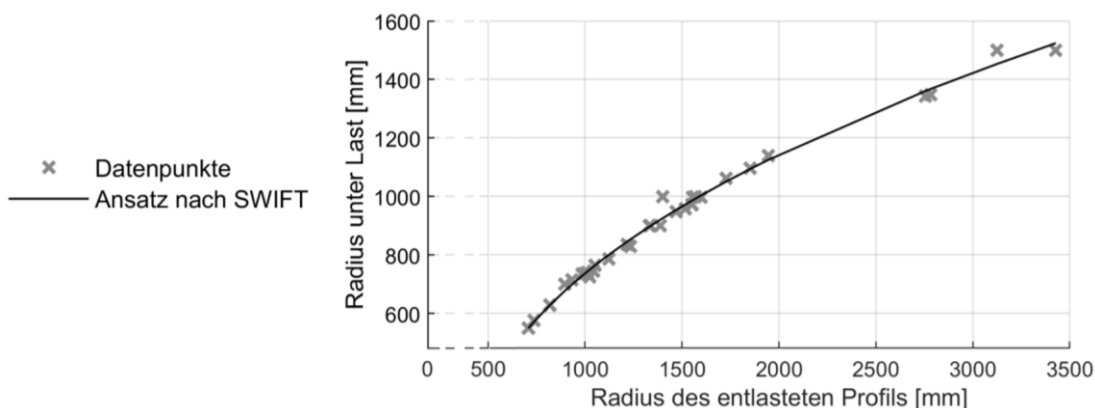


Abbildung 74 Experimentell ermittelte Datenpunkte der Rückfederungskurve (entlasteter Radius mit mobilem Messgerät bestimmt)

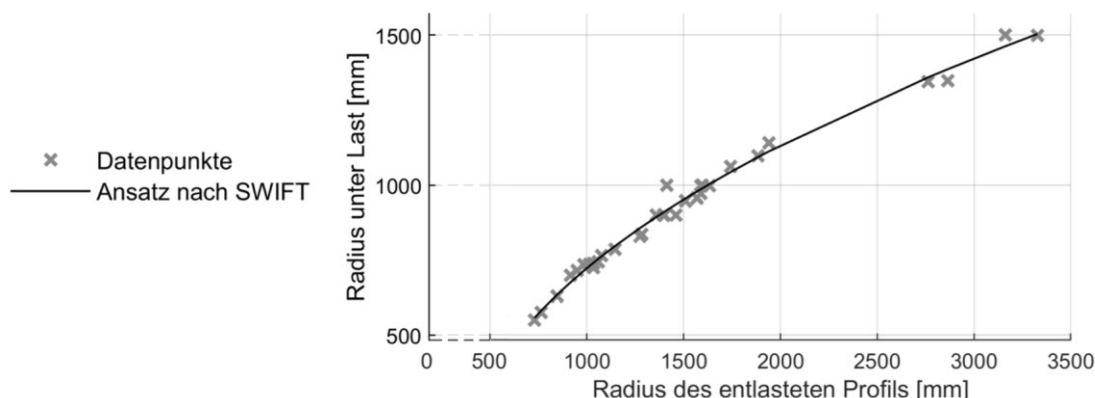


Abbildung 75 zeigt eine solche Auswertung für die Datenpunkte, bei denen der Radius des entlasteten Profils mit dem optischen Messsystem ermittelt wurde sowie die dazugehörige Approximation. Der Determinationskoeffizient der

durchgeführten Regression beträgt hierbei 0,9909. Dies deckt sich mit der höheren Messunsicherheit des optischen Messsystems im Vergleich zum mobilen Messgerät.

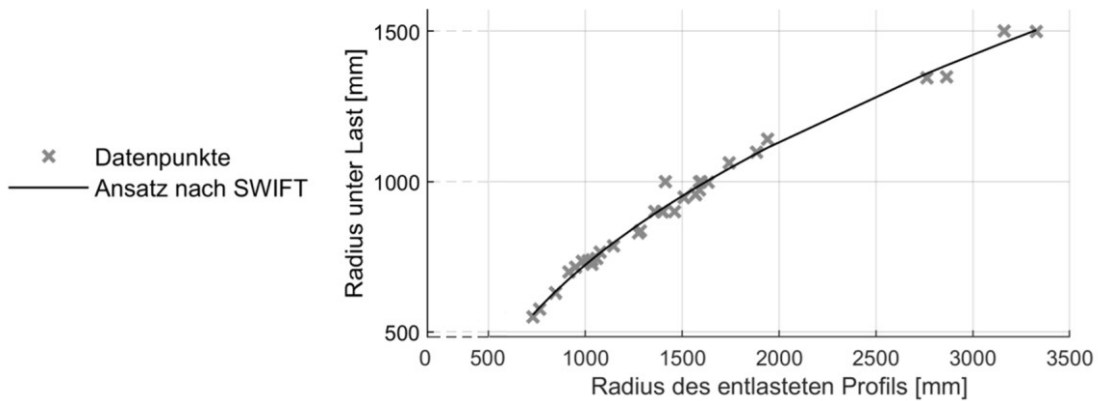


Abbildung 75 Experimentell ermittelte Datenpunkte der Rückfederungskurve (entlasteter Radius mit optischem Messsystem bestimmt)

Die Ergebnisse der durchgeführten experimentellen Untersuchungen des Produkt Controllers mit den angegebenen Parametern sind in Tabelle 4 zusammengefasst.

Tabelle 4 Ergebnisse der experimentellen Untersuchung des Produkt Controllers

| $R_{e,soil}$ [mm] | Profil | Prozessstufe | $R_{i,prog}$ [mm] | $R_{i,gem}$ [mm] | $R_{e,prog}$ [mm] | $R_{e,gem}$ [mm] | Abweichung von $R_{e,soil}$ [%] | Abweichung von $R_{e,prog}$ [%] | Stützabstand für Prognose [mm] |
|-------------------|-----------------------|--------------|-------------------|------------------|-------------------|------------------|---------------------------------|---------------------------------|--------------------------------|
| 700 | S235JRC+C 30x30 mm | 1 | 700,00 | 699,57 | - | 893,308 | 27,62 | - | - |
| | | 2 | 630,00 | 629,44 | - | 818,898 | 16,99 | - | - |
| | | 3 | 575,58 | 575,24 | 759,45 | 737,705 | 5,39 | -2,95 | 59,45 |
| | | 4 | 550,20 | 549,81 | 700,00 | 707,434 | 1,06 | 1,05 | 37,71 |
| | | 5 | 546,67 | 545,82 | 703,72 | 699,034 | -0,14 | -0,67 | 3,72 |
| 1000 | S235JRC+C 30x30 mm | 1 | 1000,00 | 999,82 | - | 1399,80 | 39,98 | - | - |
| | | 2 | 900,00 | 899,41 | - | 1330,10 | 33,01 | - | - |
| | | 3 | 765,09 | 764,64 | 1165,05 | 1052,20 | 5,22 | -10,73 | 165,05 |
| | | 4 | 739,33 | 739,91 | 1000,00 | 1012,70 | 1,27 | 1,25 | 52,20 |
| | | 5 | 735,91 | 735,71 | 1006,37 | 995,58 | -0,44 | -1,08 | 6,33 |
| 1500 | S235JRC+C 30x30 mm | 1 | 1500,00 | 1500,30 | - | 3125,00 | 108,33 | - | - |
| | | 2 | 1350,00 | 1348,00 | - | 2781,90 | 85,46 | - | - |
| | | 3 | 1063,30 | 1061,30 | 2140,97 | 1726,30 | 15,09 | -24,02 | 640,93 |
| | | 4 | 999,90 | 998,03 | 1500,00 | 1598,00 | 6,53 | 6,13 | 226,30 |
| | | 5 | 974,24 | 972,31 | 1549,00 | 1551,70 | 3,45 | 0,17 | 49,00 |
| | | 6 | 957,83 | 957,48 | 1525,83 | 1516,40 | 1,09 | -0,62 | 25,87 |
| | | 7 | 950,59 | 947,81 | 1500,00 | 1471,09 | -1,93 | -1,97 | 16,40 |
| 1000 | S235JRH 40x40x3 mm | 1 | 1000,00 | 999,39 | - | 1360,90 | 36,09 | - | - |
| | | 2 | 900,00 | 901,09 | - | 1311,80 | 31,18 | - | - |
| | | 3 | 794,42 | 793,60 | 1155,88 | 1110,90 | 11,09 | -4,05 | 155,92 |
| | | 4 | 734,24 | 734,09 | 1000,00 | 985,15 | -1,49 | -1,51 | 110,90 |

Neben den Datenpunkten der Rückfederungskurve und den Stützabständen, sind auch die Abweichung des entlasteten Radius $R_{e,gem}$ vom prognostizierten Radius $R_{e,prog}$ sowie vom Sollradius des entlasteten Profils $R_{e,soll}$ berücksichtigt. In Anbetracht der höheren Messunsicherheit für die Messung der Krümmung unter Last liefert der entwickelte Produkt Controller in der praktischen Anwendung zufriedenstellende Ergebnisse.

Die maximale Anzahl der Prozessstufen, die einen wesentlichen Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit des Drei-Rollen-Biegens hat, lag in den durchgeführten Versuchen bei sieben und die minimale bei vier. Dies stimmt mit der, in der industriellen Fertigung benötigten Anzahl von Prozessstufen überein. In Abschnitt 10.4 des Anhangs ist hierzu ein Beispiel eines mehrstufigen Prozesses aus der industriellen Fertigung aufgeführt. Die maximale Abweichung vom Sollradius des entlasteten Profils liegt in den Untersuchungen bei 1,93 % nach dem Versagen des Prozess Controllers durch ein Überbiegen. Wie bereits hierzu beschrieben enthielt der Produkt Controller keine Abbruchbedingung für das Erreichen eines Toleranzfeldes.

In den durchgeführten geregelten Prozessen, hätte mit dem Produkt Controller für die vorliegenden Sollradien des entlasteten Profils ein Toleranzfeld von $\pm 1,5$ % erzielt werden können. Die daraus resultierende Abbruchbedingung, hätte mit Ausnahme eines Versuchs zu einer reduzierten Prozessstufenanzahl geführt. Die entsprechenden Prozessstufen, in denen dies zum Beenden des Prozesses geführt hätte, sind in Tabelle 4 farblich hervorgehoben. In Anbetracht der derzeitigen Stufe der Digitalisierung des Drei-Rollen-Biegens lässt die entwickelte Prozessregelung damit sowohl eine deutliche Unterstützung des Bedienpersonals sowie eine Automatisierung einfacher Prozesse zu und trägt damit zu einer höheren Wirtschaftlichkeit bei Erhalt der Flexibilität dieses Verfahrens bei.

9 Zusammenfassung und Ausblick

Das Drei-Rollen-Biegen von Profilen zeichnet sich aufgrund seiner nicht werkzeuggebundenen Formgebung durch eine hohe Flexibilität aus. Im Vergleich zu anderen kinematischen Profilbiegeverfahren ermöglicht das Drei-Rollen-Biegen durch eine mehrstufige Umformung zudem eine wirtschaftliche Produktion kleinster Losgrößen. Hierbei ist die Wirtschaftlichkeit des Verfahrens in einem hohen Maß vom Fach- und Erfahrungswissen des maschinenführenden Personals abhängig. Die Aneignung dieses Wissens dauert oftmals mehrere Jahre. In Anbetracht eines Fachpersonalmangels stehen hierdurch vor allem kleine und mittelständische Unternehmen in der Rolle eines Lohnfertigers vor der Herausforderung die Wirtschaftlichkeit des Verfahrens zu wahren. Hierdurch steigt die Nachfrage nach Automatisierungslösungen für das Drei-Rollen-Biegen. Aufgrund der hohen Vielfalt an Produktvarianten und verarbeiteten Halbzeugen sowie der in der Regel geringen Losgrößen, konnten sich Automatisierungslösungen jedoch bis zum heutigen Tag nur bedingt industriell etablieren. Ein weiteres Hindernis für die Automatisierung des Drei-Rollen-Biegens stellt der Mangel an für den Prozess geeigneter Messtechnik zur Bestimmung des Biegeradius von Profilen dar.

Die vorliegende Arbeit hat sich mit dem übergeordneten Ziel einer Erhöhung des Automatisierungsgrads des Drei-Rollen-Biegens dieser beschriebenen Problematik angenommen. Im Rahmen der Arbeit wurden hierzu zum einen zwei Messsysteme zur Bestimmung der Krümmung bzw. des Radius von Profilen während und nach dem Prozess entwickelt. Zum anderen erfolgte die Entwicklung und Untersuchung einer Prozessregelung für mehrstufige Drei-Rollen-Biegeprozesse.

Zunächst wurde das Krümmungsverhalten des Profils beim Drei-Rollen-Biegen mit Hilfe von numerischen FEM-Simulationen analysiert. Gegenstand der Untersuchungen war die Lage und die Ausbildung des Krümmungsmaximums des Profils unter Last sowie die Krümmung des entlasteten Profils. Hierzu war auch der Einfluss der Größe des betrachteten Profilabschnitts bei

der Bestimmung der Krümmung Bestandteil der Untersuchungen. Insbesondere für die Krümmung unter Last konnte hierbei ein gesteigerter Einfluss auf die Güte der Näherung des Krümmungsmaximums festgestellt werden. Basierend auf den Untersuchungen zum Krümmungsverhalten konnte das Rückfederungsverhalten des Profils in ein- und mehrstufigen Prozesssimulationen untersucht werden. Ziel war es dabei den Einfluss von mehrstufigen Prozessen und den damit verbundenen Lastkollektiven auf das Rückfederungsverhalten im Vergleich zu einstufigen Prozessen zu bestimmen. In den durchgeführten Simulationen konnte hierzu keine signifikante Beeinflussung des Rückfederungsverhaltens in mehrstufigen Prozessen durch die bereits vorliegende Ausgangskrümmung festgestellt werden. Auf Basis der gewonnenen Erkenntnisse zum Rückfederungsverhalten wurde zudem ein Ansatz zur Prognose der Rückfederung in mehrstufigen Drei-Rollen-Biegeprozessen entwickelt. Die Basis der Prognose bilden hier, die aus zwei bereits durchgeführten Prozessstufen gewonnenen Daten zur Rückfederung des Profils. Die Untersuchung des entwickelten Ansatzes erfolgte in geregelten Prozesssimulationen anhand von dreistufigen Prozessen. Regelgröße war hierbei die Krümmung unter Last. Anhand der Ergebnisse zeigte sich ein signifikanter Einfluss der Näherungsgüte des Krümmungsmaximums auf die Genauigkeit der Prognose.

Um trotz der, mit der Näherung des Krümmungsmaximums verbundenen Unsicherheiten eine Regelung mehrstufiger Prozesse durch die Prognose der Rückfederung zu ermöglichen, wurde auf Basis des Prognoseansatzes ein erweiterter Produkt Controller entwickelt. Dieser dient in mehrstufigen Prozessen der Prognose der Rückfederung und kann durch eine geeignete Wahl seiner Parameter den Einfluss der Unsicherheiten reduzieren. Untersucht wurde der entwickelte Produkt Controller im Rahmen von Experimenten auf einer Drei-Rollen-Biegemaschine (BO229, Hersteller Herkules Wetzlar GmbH).

Basis für die experimentelle Untersuchung des Produkt Controllers bilden die im Rahmen der Arbeit entwickelten Messsysteme zur Bestimmung der Profilkrümmung. Dies ist zum einen ein mobiles Messgerät, mit dem die Krümmung des entlasteten Profils erfasst werden kann. Zum anderen ist dies ein optisches Messsystem, das auf der Versuchsanlage implementiert wurde. Dieses erfasst sowohl die Krümmung des entlasteten Profils am Auslauf der Maschine als auch die Krümmung unter Last durch 2D-Laserscanner. Beide Messsys-

teme wurden anhand der Krümmung von entlasteten Profilen auf ihre Genauigkeit für Radien zwischen 600 mm und 9000 mm untersucht. Hierbei konnte für beide Messsysteme eine Messunsicherheit von 1,5 % in den Untersuchungen festgestellt werden. Für Radien unter 2000 mm beträgt sie für das mobile Messgeräts hierbei gar nur 0,5 %. Für beide Messsysteme erfolgten darüber hinaus eine Analyse der Fehlereinflüsse sowie eine Ableitung von Optimierungsansätzen.

Zur Untersuchung des Produkt Controllers erfolgte mittels des optischen Messsystems die Implementierung einer Online-Regelung der Krümmung unter Last auf der Versuchsanlage. Die Offline-Regelung der Krümmung des entlasteten Profils erfolgte mit Hilfe des Produkt Controllers durch die Prognose der Rückfederung. Nach zwei durchgeführten Prozessstufen kann der Produkt Controllers die Rückfederung für die nächste Prozessstufe prognostizieren und hierdurch den Sollwert der Krümmung unter Last vorgeben. Für die erste Prognose wird hierbei ein entlasteter Radius, der größer als der gewünschte Sollradius des entlasteten Profils ist, verwendet. Nach jeder prognosebasiereten Prozessstufe erfolgt eine Bewertung der Prognose anhand vorgegebener Parameter durch den Produkt Controller. Basierend auf dieser Bewertung erfolgt die darauf folgende Prognose entweder für den Sollradius des entlasteten Profils oder für einen größeren Radius. Der Prozess wird fortgeführt bis der Sollradius des entlasteten Profils erreicht oder das Profil überbogen wird. In den durchgeführten experimentellen Untersuchungen konnte eine ermittelte Abweichung vom Sollradius des entlasteten Profils von weniger als 1,5 % mit Hilfe des Produkt Controllers erreicht werden.

Die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit zur Regelung mehrstufiger Prozesse sind in Anbetracht der vorliegenden Messunsicherheiten vielversprechend. Für die Zukunft lässt sich hieraus ein Forschungs- und Entwicklungsbedarf im Bereich der Krümmungsmessung beim Drei-Rollen-Biegen ableiten. Um den Automatisierungsgrad sowie die Wirtschaftlichkeit des Drei-Rollen-Biegens zu erhöhen sind zuverlässige Krümmungsmesssysteme ein Schlüsselfaktor. Die im Rahmen der Arbeit aufgezeigten Optimierungsperspektiven der entwickelten Messsysteme können hierfür als Anhaltspunkte genutzt werden.

10 Anhang

10.1 Abgleich des numerischen Modells mit Experimenten

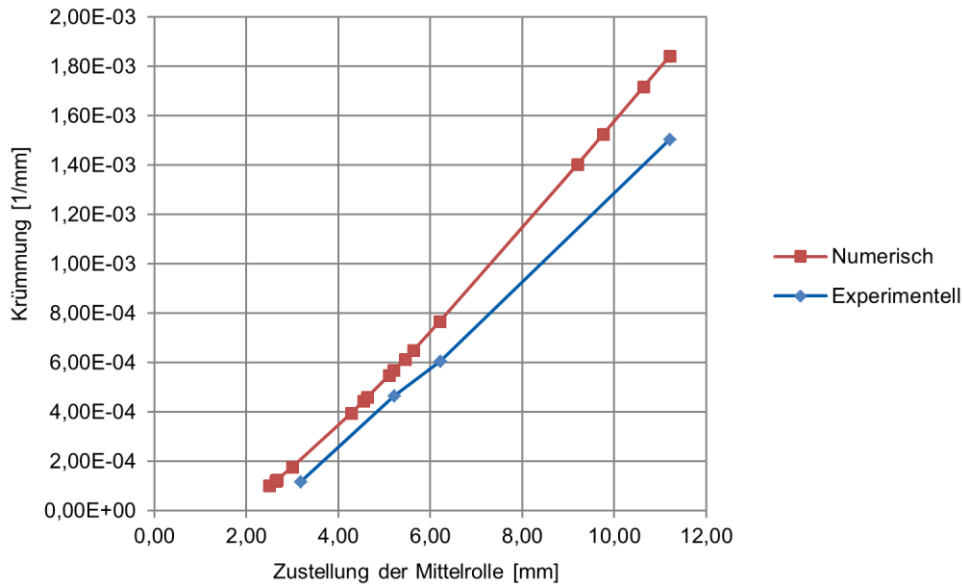


Abbildung 76 Abgleich des numerischen Modells mit Experimenten

Abbildung 76 zeigt die resultierende Krümmung in Abhängigkeit der Zustellung numerischer Prozesssimulationen mit dem verwendeten Modell in Abgleich zu durchgeführten Experimenten. Bei der Betrachtung der Abweichungen zwischen Experiment und numerischer Simulation ist zu berücksichtigen, dass in den Experimenten die initiale Null-Position der Mittelrolle manuell angefahren wurde. Diese wurde zu Beginn der Experimente ermittelt, in dem die Mittelrolle zugestellt wurde bis das Profil zwischen Mittelrolle und Seitenrolle geklemmt war und eine manuelle laterale Verschiebung des Profils nicht mehr möglich war. Hierdurch ist die absolute Zustellung in den Experimenten mit einer geschätzten Unsicherheit von 0,2 mm verbunden. Ebenso können bereits vorliegende Ausgangskrümmungen der verwendeten Halbzeuge das Ergebnis der durchgeführten Experimente beeinflusst haben.

10.2 Durchgeführte Prozesssimulationen

Tabelle 5 Durchgeführte ein- und mehrstufige Prozesssimulationen

| Nummer | ID | Anzahl der Prozessstufen | Zustellung und sich ausbildender konstanter Radius des entlasteten Profils | | | | | |
|--------|------|--------------------------|--|----------|----------------|---------|----------------|---------|
| | | | Prozessstufe 1 | | Prozessstufe 2 | | Prozessstufe 3 | |
| | | | Zustellung | Radius | Zustellung | Radius | Zustellung | Radius |
| 1 | 01EB | 1 | 2,50 | 9188,24 | | | | |
| 2 | 02EB | 1 | 2,63 | 7779,38 | | | | |
| 3 | 03EB | 1 | 2,65 | 7972,31 | | | | |
| 4 | 04EB | 1 | 2,66 | 7488,49 | | | | |
| 5 | 05EB | 1 | 3,00 | 5477,63 | | | | |
| 6 | 06EB | 1 | 3,18 | 4706,40 | | | | |
| 7 | 07EB | 1 | 4,00 | 2788,94 | | | | |
| 8 | 08EB | 1 | 4,28 | 2439,85 | | | | |
| 9 | 09EB | 1 | 4,55 | 1639,62 | | | | |
| 10 | 10EB | 1 | 4,63 | 1587,70 | | | | |
| 11 | 11EB | 1 | 5,10 | 1349,63 | | | | |
| 12 | 12EB | 1 | 5,22 | 1300,05 | | | | |
| 13 | 13EB | 1 | 5,45 | 1213,87 | | | | |
| 14 | 14EB | 1 | 5,63 | 1143,68 | | | | |
| 15 | 15EB | 1 | 6,21 | 979,20 | | | | |
| 16 | 16EB | 1 | 6,50 | 921,29 | | | | |
| 17 | 17EB | 1 | 7,00 | 828,66 | | | | |
| 18 | 18EB | 1 | 7,50 | 747,97 | | | | |
| 19 | 19EB | 1 | 8,00 | 685,49 | | | | |
| 20 | 20EB | 1 | 8,50 | 633,16 | | | | |
| 21 | 21EB | 1 | 9,20 | 573,59 | | | | |
| 22 | 22EB | 1 | 9,76 | 530,46 | | | | |
| 23 | 23EB | 1 | 10,63 | 480,59 | | | | |
| 24 | 24EB | 1 | 11,20 | 451,96 | | | | |
| 25 | 25EB | 1 | 1,70 | 61871,71 | | | | |
| 26 | 26EB | 1 | 1,80 | 41627,01 | | | | |
| 27 | 27EB | 1 | 1,90 | 29209,47 | | | | |
| 28 | 28EB | 1 | 2,00 | 22549,60 | | | | |
| 29 | 29EB | 1 | 2,10 | 17620,63 | | | | |
| 30 | 30EB | 1 | 2,20 | 15865,09 | | | | |
| 31 | 31EB | 1 | 2,30 | 12978,50 | | | | |
| 32 | 32EB | 1 | 2,40 | 11192,09 | | | | |
| 33 | 33EB | 1 | 10,00 | 599,57 | | | | |
| 34 | 01MB | 3 | 2,00 | 23563,15 | 5,00 | 1943,75 | 8,00 | 1288,01 |
| 35 | 02MB | 3 | 3,00 | 5676,85 | 6,00 | 1634,61 | 9,00 | 1108,39 |
| 36 | 03MB | 3 | 4,00 | 2855,02 | 7,00 | 1461,08 | 11,00 | 766,33 |

Tabelle 5 zeigt eine Liste der durchgeführten Prozesssimulationen. Hierbei sind die in Kapitel 5.4 beschriebenen geregelten Prozesssimulationen nicht enthalten.

10.3 Ergebnisse der Untersuchung der Messgenauigkeit der entwickelten Messsysteme

Tabelle 6 Mittlerer Radius im Bereich der konstanten Krümmung [mm]

| Profil | GOM Atos III | Optisches Messsystem | Mobiles Messgerät 1. Messung | Mobiles Messgerät 2. Messung | Mobiles Messgerät 3. Messung |
|--------|--------------|----------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| 1 | 664,93 | 660,00 | 664,94 | 664,91 | 664,87 |
| 2 | 674,58 | 670,32 | 671,91 | 671,95 | 671,69 |
| 3 | 1062,20 | 1077,91 | 1058,28 | 1058,42 | 1058,58 |
| 4 | 1652,18 | 1639,52 | 1655,91 | 1654,35 | 1653,42 |
| 5 | 2151,03 | 2171,66 | 2121,01 | 2121,37 | 2120,56 |
| 6 | 2425,11 | 2439,39 | 2411,74 | 2412,73 | 2422,54 |
| 7 | 2500,48 | 2518,42 | 2508,96 | 2493,44 | 2533,92 |
| 8 | 8581,32 | 8468,83 | 8667,65 | 8585,28 | 8602,18 |

Tabelle 7 Ermittelte Biegewinkel [°]

| Profil | GOM Atos III | Optisches Messsystem | Mobiles Messgerät 1. Messung | Mobiles Messgerät 2. Messung | Mobiles Messgerät 3. Messung |
|--------|--------------|----------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| 1 | 118,45 | 118,55 | 118,28 | 118,28 | 118,26 |
| 2 | 116,19 | 116,96 | 116,81 | 116,85 | 116,87 |
| 3 | 80,87 | 79,29 | 81,01 | 80,97 | 81,10 |
| 4 | 47,39 | 47,77 | 47,30 | 47,34 | 47,37 |
| 5 | 36,68 | 36,02 | 36,84 | 36,93 | 36,93 |
| 6 | 34,98 | 34,63 | 34,11 | 35,21 | 34,97 |
| 7 | 33,75 | 33,59 | 33,64 | 33,85 | 32,94 |
| 8 | 9,08 | 9,14 | 9,12 | 9,20 | 9,20 |

Tabelle 8 Maximale Konturabweichung in Bezug auf die Referenzmessung [mm]

| Profil | Optisches Messsystem | Mobiles Messgerät 1. Messung | Mobiles Messgerät 2. Messung | Mobiles Messgerät 3. Messung |
|--------|----------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| 1 | 4,28 | 0,55 | 0,88 | 0,58 |
| 2 | 7,39 | 5,85 | 6,79 | 7,20 |
| 3 | 12,15 | 2,90 | 2,61 | 3,75 |
| 4 | 2,40 | 1,04 | 0,87 | 0,54 |
| 5 | 6,49 | 1,46 | 2,22 | 2,15 |
| 6 | 2,16 | 1,26 | 2,39 | 0,36 |
| 7 | 6,08 | 1,00 | 0,78 | 6,06 |
| 8 | 0,74 | 0,19 | 0,55 | 0,59 |

10.4 Praxisbeispiel eines mehrstufigen Drei-Rollen-Biegeprozesses

Tabelle 9 zeigt die dokumentierten Prozessstufen eines mehrstufigen Drei-Rollen-Biegeprozesses aus der Produktion der Herkules Wetzlar GmbH. Der Radius des gebogenen Profils wurde hierbei durch eine Messung der Sekantenhöhe bestimmt. Hierbei wurde eine Messlatte mit einer Länge von 2000 mm verwendet und die Höhe der Sekante mit einem Gliedermaßstab gemessen.

Tabelle 9 Beispiel eines mehrstufigen Drei-Rollen-Biegeprozesses (Material: 20 x 20 mm, C45E; Sollradius 3040 mm; Biegemaschine: BO229)

| Prozess- stufe | Bauteil 1 | | Bauteil 2 | | Bauteil 3 | | Bauteil 4 | | Bauteil 5 | | Bauteil 6 | | Bauteil 7 | |
|-------------------|--------------------|---------------------------|--------------------|---------------------------|--------------------|---------------------------|--------------------|---------------------------|--------------------|---------------------------|--------------------|---------------------------|--------------------|---------------------------|
| | Zustellung [mm] | gemessener Radius [mm] | Zustellung [mm] | gemessener Radius [mm] | Zustellung [mm] | gemessener Radius [mm] | Zustellung [mm] | gemessener Radius [mm] | Zustellung [mm] | gemessener Radius [mm] | Zustellung [mm] | gemessener Radius [mm] | Zustellung [mm] | gemessener Radius [mm] |
| 1 | 3,00 | 12520,00 | 3,00 | 11925,76 | 3,00 | 11925,76 | 3,00 | 9641,38 | 3,00 | 8956,57 | 3,00 | 8800,43 | 3,00 | 12520,00 |
| 2 | 5,00 | 3798,34 | 5,00 | 3497,66 | 5,00 | 3386,76 | 5,00 | 3365,47 | 5,00 | 3344,47 | 5,00 | 3224,15 | 5,00 | 3408,33 |
| 3 | 5,60 | 3520,78 | 5,60 | 3323,75 | 5,60 | 3243,56 | 5,60 | 3167,42 | 5,60 | 3130,78 | 5,30 | 3148,98 | 5,60 | 3205,00 |
| 4 | 5,60 | 3205,00 | 5,80 | 3167,42 | 5,90 | 3060,19 | 5,60 | 3167,42 | 5,60 | 3060,19 | 5,40 | 3112,80 | 5,90 | 3026,18 |
| 5 | 5,90 | 3112,80 | 5,90 | 3026,18 | 5,90 | 2992,98 | 5,70 | 3026,18 | 5,60 | 3026,18 | 5,50 | 3060,19 | | |
| 6 | 6,00 | 3026,18 | | | | | | | | | 5,60 | 3026,18 | | |

11 Literaturverzeichnis

- [ADE93] Adelfhof, A.: Komponenten einer flexiblen Fertigung beim Profilrunden. Zugl.: Dortmund, Univ., Diss. : 1992. Als Ms. gedr. Aachen: Shaker, 1993.
- [ADE96] Adelfhof, A.: *Verfahren und Vorrichtung zum Feststellen von Radien bei Biegeteilen*. Adelfhof, Alois. Anmeldenr. 19602504, Deutschland. 10.04.1997. Deutschland. Veröffentlichungsnr. DE000019602504A1
- [ADE95] Adelfhof A.: *Meßverfahren und Vorrichtung zur Bestimmung von Radien gebogener Gegenstände*. Adelfhof Alois. Anmeldenr. 19536939, Deutschland. 17.04.1997. Deutschland. Veröffentlichungsnr. DE000019536939A1
- [AL-22] Al-Baradoni, N.; Groche, P.: Sensor-integrated structures in mechanical engineering: challenges and opportunities for mechanical joining processes. In: *Production Engineering* 16, 2-3, 2022, S. 423–434
- [ALL22] Allianz Arena München Stadion GmbH: Zahlen, Fakten & Informationen zur Allianz Arena. URL: <https://allianz-arena.com/de/die-arena/fakten-historie/allgemeine-informationen>. – Aktualisierungsdatum: 2022-10-09
- [ALL16] Allwood, J. M. et al.: Closed-loop control of product properties in metal forming. In: *CIRP Annals Volume 65 // 65*, Nr. 2, 2016, S. 573–596
- [ALU22] ALU-LINE Metallverarbeitungsgesellschaft mbH. URL: <https://www.alu-line.de/de/kompetenzen/>, zuletzt abgerufen am 16.07.22

- [ARN99] Arnet, H.: Profilbiegen mit kinematischer Gestalterzeugung - Bericht aus dem Lehrstuhl für Fertigungstechnologie. Zugl.: Erlangen, Nürnberg, Univ., Diss., 1999. Bamberg: Meisenbach Verlag, 1999.
- [AUD19] Audi AG: Der Audi Space Frame (ASF) - Audi R8 Coupé V10. URL: <https://www.audi-mediacyber.com/de/der-neue-audi-r8-dynamik-update-fuer-den-hochleistungssportwagen-11734/der-audi-space-frame-asf-11741>, zuletzt abgerufen am 22.10.22
- [BEH19] Behrens, B.-A. ; Groche, P. ; Krüger, J. ; Wulfsberg, J. P.: WGP-Standpunkt Industriearbeitsplatz 2025. URL: https://wgp.de/wp-content/uploads/FINAL_WGP_Standpunkt_2025.pdf, zuletzt abgerufen am 29.10.22
- [MIC14] Micro-Epsilon Messtechnik GmbH & Co. KG: Betriebsanleitung scanCONTROL 26xx. 2014
- [BOR22] Borgmann, F.; Kalbe, N.; Günter, A.: Resiliente und wandlungsfähige Produktion von morgen. In: Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 117, Nr. 3, 2022, S. 104–108
- [BUN22] Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK): Resilienz im Kontext von Industrie 4.0. URL: https://www.plattform-i40.de/IP/Redaktion/DE/Downloads/Publikation/Resilienz.pdf?__blob=publicationFile&v=8, zuletzt abgerufen am 31.10.22
- [CHA04] Chatti, S.: Production of profiles for lightweight structures. Université de Franche-Comté, Habilitation Thesis, 2004.
- [CHA03a] Chatti, S.; Dirksen, U.; Klaus, A.; Kleiner, M.: Contour Sensors for the manufacturing of curved profiles. In: Trends in the development of machinery and associated technology 2003 (Tagungsband), 2003, S. 153–156
- [CHA99] Chatti, S.; Finckenstein, E. v.; Kleiner, M.: Verfahrenskombination steigert Flexibilität beim Biege von Profilen. In: Maschinenmarkt 1999, Nr. 11, 1999, S. 26–30
- [CHA03b] Chatti, S.; Heller, B.; Ridane, N.; Kleiner, M.: Anpassungsfähig - Prozesskette zur Herstellung von Leichtbaustrukturen aus Tailor Rolled Blanks. In: Maschinenmarkt 2003, Nr. 7, 2003, S. 24–27

- [CHA97] Chatti, S.: Optimierung der Fertigungsgenauigkeit beim Profilbiegen - Berichte aus der Fertigungstechnik. Zugl.: Dortmund, Univ., Diss., 1997. Als Ms. gedr. Aachen: Shaker Verlag, 1997.
- [DAM22] Dambock, J.: Schnelles Tempo bei Eindämmung der Energiekosten. URL: <https://umformtechnik.net/draht/Inhalte/Aus-der-Branche/Schnelles-Tempo-bei-Eindaemmung-der-Energiekosten>, zuletzt abgerufen am 31.10.22
- [DEU16] DIN 50125:2016-12, Prüfung metallischer Werkstoffe - Zugproben
- [DEU03] DIN 8586:2003-09, Fertigungsverfahren Biegeumformen- Einordnung, Unterteilung, Begriffe
- [DEU19b] DIN EN 10025-2:2019-10, Warmgewalzte Erzeugnisse aus Baustählen – Teil 2: Technische Lieferbedingungen für unlegierte Baustähle; Deutsche Fassung EN 10025-2:2019
- [DEU19a] DIN EN 10058:2019-02, Warmgewalzte Flachstäbe aus Stahl und Breitflachstahl für allgemeine Verwendung - Maße, Formtoleranzen und Grenzabmaße; Deutsche Fassung EN 10058:2018
- [DEU18] DIN EN 10277:2018-09, Blankstahlerzeugnisse_ - Technische Lieferbedingungen; Deutsche Fassung EN 10277:2018
- [DEU20] DIN EN ISO 6892-1:2020-06, Metallische Werkstoffe - Zugversuch – Teil 1: Prüfverfahren bei Raumtemperatur (ISO 6892-1:2019); Deutsche Fassung EN ISO 6892-1:2019
- [DIR08] Dirksen, U.: Testumgebung für Prozessregelungen zum Drei-Rollen-Profilbiegen mit virtuellem und realem Biegeprozess. Zugl.: Dortmund, Techn. Univ., Diss, 2008. Aachen: Shaker Verlag, 2008.
- [DIR04] Dirksen, U.; Chatti, S.; Kleiner, M.: Measuring of the curvature distribution of bent profiles, Bd. 2. In: , S. 138–142
- [DIR06] Dirksen, U.; Hermes, M.; Kleiner, M.: Jedes Produkt ein Spezialfall. In: Blech Rohre Profile, Nr. 12, 2006, S. 14–17

- [DOM01] Domingo, A.; Serna, P.; Lázaro, C.: The Aesthetic of Visible Structures. In: IABSE Symposium Report, 2001.
- [DRÖ07] Dröder, K.; Kläger, O.; Martin, V.: Flexibles Walzprofilieren in der Prozesskette zur Herstellung innovativer Profilstrukturen für den Automobilbau. In: 5. Fachtagung Walzprofilieren, 2007.
- [MM06] Eins links, eins rechts. In: Maschinenmarkt, Nr. 49, 2006, S. 22–23. URL: <https://www.maschinenmarkt.vogel.de/eins-links-eins-rechts-a-6177/>, zuletzt abgerufen am 03.11.22
- [ENG12] Engel, B.; Kersten, S.: Bending Test for the Characterization of Freeform-Bending Processes. In: Metal Forming 2012 : Proceedings of the 14th International Conference on Metal forming, September 16 - 19, 2012, Krakow, Poland ; organizing universities: AGH University of Science and Technology. Weinheim : Wiley-VCH, 2012 (Steel research international, 83.2012,Sh).
- [ENG08] Engel, B.; Gerlach, C.; Cordes, S.: Biegemomentenabschätzung des Dornbiegeverfahrens. In: UTF-Science, Nr. 2, 2008, S. 1–8
- [ENG10] Engel, B.; Kersten, S.: Sensitivitätsanalyse beim Freiformbiegen von Rohrprofilen. In: Bauteile der Zukunft : Methoden und Prozesse ; Tagungsband ... des 30. EFB-Kolloquiums Blechverarbeitung 2010 am 2. und 3. März 2010 in Bad Boll. Hannover : EFB, 2010 (Tagungsband / Europäische Forschungsgesellschaft für Blechverarbeitung e.V, 31), S. 123–138
- [ENG11] Engel, B.; Kopfer, P.: Improving the curvature of bent profiles by adjusting the process kinematics of the Three-Roll-Pushbending Process. In: 4th DORP 2011 - Dortmunder Kolloquium zum Rohr- und Profilbiegen. Dortmund : Technische Universität Dortmund, 2011, S. 127–130
- [FIN95] Finckenstein, E. v.; Kleiner, M.: Berichte zum Forschungsvorhaben „Erhöhung der Flexibilität beim Profilrunden durch Entwicklung eines neuen Biegeverfahrens“. Dortmund, Universität Dortmund, Lehrstuhl für Umformende Fertigungsverfahren. Bericht. 1995

- [FUN83b] Funke, P.; Palkowski, H.: Einfluss der Fertigung auf die Profilkennwerte. In: Bänder Bleche Rohre 1983, Nr. 9, 1983, S. 242–244
- [FUN83a] Funke, P.; Palkowski, H.: Mechanische Kennwerte von Kaltprofilen. In: Bänder Bleche Rohre 1983, Nr. 5, 1983, S. 119–122
- [GAN07] Gantner, P.; Harrison, D. K.; Silva, A. K. de; Bauer, H.: The Development of a Simulation Model and the Determination of the Die Control Data for the Free-Bending Technique. In: Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture 221, Nr. 2, 2007, S. 163–171
- [GAN05] Gantner, P.; Bauer, H.; Harrison, David K.; Silva, A. K. de: Free-Bending - A new bending technique in the hydroforming process chain. In: Journal of Materials Processing Technology 167, 2-3, 2005, S. 302–308
- [GEN05] Gengnagel, C.: Membranbau. In: db Deutsche Bauzeitung 139, Nr. 2, 2005, S. 59–63
- [GER10] Gerlach, C.: Ein Beitrag zur Herstellung definierter Freiformbiegegeometrien bei Rohren und Profilen. Zugl.: Siegen, Univ., Diss., 2010. Aachen: Shaker, 2010.
- [GHI17] Ghiotti, A.; Simonetto, E.; Bruschi, S.; Bariani, P. F.: Springback measurement in three roll push bending process of hollow structural sections. In: CIRP Annals 66, Nr. 1, 2017, S. 289–292. URL: https://www.researchgate.net/publication/316766823_Springback_measurement_in_three_roll_push_bending_process_of_hollow_structural_sections
- [GRO14] Groche, Peter; Heß, Benjamin: Friction control for accurate cold forged parts. In: CIRP Annals 63, Nr. 1, 2014, S. 285–288
- [GRO18a*] Groche, P.; Hoppe, Florian; Kessler, T.; Kleemann, A.: Industrial Working Environment 2025. In: LIEWALD, Mathias (Hrsg.): New

developments in sheet metal forming 2018. Stuttgart, Deutschland : Institute for Metal Forming Technology, 2018, S. 125–136

- [GRO18b] Groche, P.; Moneke, M.; Wang, T.; Storbeck, M.: Designfreiheit im Bauwesen durch flexible Profiliertechnik. In: Festschrift Jörg Lange, 2018, S. 105–112
- [GRO18c] Groth, Sebastian; Engel, Bernd; Langhammer, Kay: Algorithm for the quantitative description of freeform bend tubes produced by the three-roll-push-bending process. In: Production Engineering 12, 3-4, 2018, S. 517–524
- [GRO17*] Groche, P.; Kessler, T.: Online-Konturvermessung beim Profilbiegen. In: wt Werkstattstechnik online 107, 11-12, 2017.
- [GRO19*] Groche, P.; Kessler, T.; Hohmann, J.; Huttel, D.: Produktdatenerfassung beim Profilbiegen - Umsetzung eines Handmessgeräts zur Konturvermessung von gebogenen Profilen. In: Industrie 4.0 Management 2019, 3/2019, 2019, S. 19–24
- [GRO20] Groche, P.: Resilienz in Produktionsunternehmen erhöhen. Editorial. In: wt Werkstattstechnik online, Nr. 10, 2020, S. 649. URL: <https://elibrary.vdi-verlag.de/10.37544/1436-4980-2020-10-1/titelei-inhaltsverzeichnis-jahrgang-110-2020-heft-10?page=1>
- [HÄN73] Hänert, M.: Umformen von Profilen mit Rechteckquerschnitt. In: Seewirtschaft 5, Nr. 6, 1973, S. 450–451
- [HAR82] Hardt, D. E.; Roberts, M. A.; Stelson, K. A.: Closed-Loop Shape Control of a Roll-Bending Process. In: Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control 104, Nr. 4, 1982, S. 317–322
- [HEL02] Heller, B.: Halbanalytische Prozess-Simulation des Freibiegens von Fein- und Grobblechen. Zugl.: Dortmund, Univ., Diss., 2002. Herzogenrath: Shaker, 2002.
- [HER22a] Herkules Wetzlar GmbH: Allgemeine Geschäftsbedingungen. URL: <https://www.herkules-biegetechnik.de/agb>, zuletzt abgerufen am 13.06.22
- [HER22b] Herkules Wetzlar GmbH: *Produktbeispiele*. 2022

- [HER08] Hermes, M.; Chatti, S.; Weinrich, A.; Tekkaya, A. E.: Three-Dimensional Bending of Profiles with Stress Superposition. In: International Journal of Material Forming 1, S1, 2008, S. 133–136
- [HER12] Hermes, M.: Neue Verfahren zum rollenbasierten 3D-Biegen von Profilen. Zugl.: Technische Universität Dortmund, Diss., 2011. Aachen: Shaker, 2012.
- [HEX22] Hexagon AB: Absolute Arm Portfolio - Produkt Broschüre
- [HOF12] Hoffmann, H. (Hrsg.); Neugebauer, R. (Hrsg.); Spur, G. (Hrsg.): Handbuch Umformen. 2., vollständig neu bearbeitete Auflage. München: Hanser, 2012.
- [HOL17] Holstein, V.; Hermes, M.: Vorschlag für einen Qualitätsstandard für Profilbiegebauteile, 2017. URL: www.utfscience.de
- [IFO22] ifo Institut – Leibniz-Institut für Wirtschaftsforschung an der Universität München e.V.: Fachkräftemangel steigt auf Allzeithoch. 02.08.2022. URL: <https://www.ifo.de/pressemitteilung/2022-08-02/fachkraeftemangel-steigt-auf-allzeithoch>, zuletzt abgerufen am 30.10.22
- [KAU13] Kaune, V.: Entstehung und Eigenschaften von UFG Gradientengefügen durch Spaltprofilieren und Spaltbiegen höherfester Stähle. Darmstadt, Technische Universität Darmstadt. Dissertation. 2013
- [KER13] Kersten, S.: Prozessmodelle zum Drei-Rollen-Schubbiegen von Rohrprofilen. Zugl.: Siegen, Univ., Diss., 2013. Aachen: Shaker, 2013.
- [KES23*] Kessler, T.; Groche, P.; Winnewisser, P.: Curvature measurement in profile bending - proposal and analysis of two application oriented measurement concepts. In: Measurement, Volume 217, 2023.
- [KES18*] Kessler, T.; Huttel, D.; Kilz, J.; Groche, P.: Profilbiegen 4.0 – Roadmap für die Automatisierung Profilbiegen 4.0 – Roadmap für die Automatisierung des Drei-Rollen-Profilbiegens. In: Peter Gro-

che (Hrsg.): 13. Umformtechnisches Kolloquium Darmstadt : Moderne Umformtechnik – flexibel, wandlungsfähig, resilient, 2018.

- [KES19*] Kessler, T.; Traub, T.; Groche, P.: Perspektiven der Automatisierung von Biegeprozessen. In: HIRT, Gerhard (Hrsg.): Ideen Form geben : 33. ASK Umformtechnik, 28.-29. März 2019, Eurogress Aachen :Tagungsband. 1. Auflage. Aachen : Verlagshaus Mainz GmbH, 2019.
- [KLA02] Klaus, A.: Verbesserung der Fertigungsgenauigkeit und der Prozesssicherheit des Rundens beim Strangpressen. Zugl.: Dortmund, Univ., Diss., 2002. Aachen: Shaker, 2002.
- [KLA06] Klaus, A.; Becker, D.; Kleiner, M.: Three-Dimensional Curved Profile Extrusion – First Results on the Influence of Gravity. In: Advanced Materials Research 10, 2006, S. 5–12
- [KLE91] Kleiner, M.: Prozesssimulation in der Umformtechnik. Habilitationsschrift, 1991.
- [KNE20] Kneifel, G.: Resiliente Produktion für die Zeit nach der Corona-Krise. Presseinformation. Frankfurt am Main, 05.05.2020. URL: https://wgp.de/wp-content/uploads/pm-Produktion-nach-Corona_2020-05-05.pdf, zuletzt abgerufen am 17.10.21
- [KOC20] Kockmann, N.: Entwurf und Betrieb eines Rohrreaktors mit enger Verweilzeitverteilung. In: Chemie Ingenieur Technik 92, Nr. 6, 2020, S. 685–691
- [KRE17] Krech, M.; Groche, P.: Robust force and torque measurements by integrated sensors in hollow shafts. In: Proceedings Sensor 2017 : AMA Service GmbH, Von-Münchhausen-Str. 49, 31515 Wunstorf, Germany, 2017, S. 511–515
- [LIE88] Liewald, M.: Entwicklung eines Foliensensors zur Konturerfassung von Biegeteilen. In: Blech Rohre Profile, Nr. 35, 1988, S. 118–120
- [LIP59] Lippmann, H.: Ebenes Hochkantbiegen eines schmalen Balkens unter Berücksichtigung der Verfestigung. In: Ingenieur-Archiv 27, Nr. 3, 1959, S. 153–168

- [LUD03] Ludwik, P.: Technologische Studie über Blechbiegung. In: Technische Blätter, Nr. 35, 1903, S. 133–158
- [LUN17] Lungwitz, C.: Karosserieentwicklung bei Audi - Innovation, Qualität und Präzision, zuletzt abgerufen am 16.10.22
- [MAR63] Marquardt, D. W.: An Algorithm for Least-Squares Estimation of Nonlinear Parameters. In: Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics 11, Nr. 2, 1963, S. 431–441
- [MER12] Merklein, M.; Vatter, P.; Plettke, R.; Grüner, M.: Einfluss der Fließkurve auf den Rohrbiegeradius. In: wt Werkstattstechnik - Online, Nr. 10, 2012, S. 689–695
- [MIC17] Sien, M.; Ming, S. L.; Franklin, K.: Assessment of the dynamic characteristics of the Helix Bridge at Marina Bay, Singapore. In: Structural Engineer, 2017. URL: https://www.researchgate.net/profile/michael-sien/publication/317276290_assessment_of_the_dynamic_characteristics_of_the_helix_bridge_at_marina_bay_singapore
- [MON21] Moneke, M.: Charakterisierung der prozessbedingten Eigenspannungen und Profildeformationen beim Trennen walzprofilierter Bauteile. Shaker Verlag. Dissertation. 2021
- [MÜL07] Müller, A.: Fliessformbiegen von rollgeformten Profilen. In: 5. Fachtagung Walzprofilieren, 2007, S. 187–222
- [MUR90] Murata, M.: Penetration Bending Method and Penetration Bending Machine Therefor. Nissin Seiki Kabushiki Kaisha. Anmeldenr. 52312890, Vereinigte Staaten von Amerika. 12.05.1992. USA. Veröffentlichungsnr. US000005111675A
- [NEB21] Nebeling, D.: Biegen von Profilen mit variablem Querschnitt (8. Dortmunder Kolloquium zur Rohr- und Profillumformung). 29.09.2021
- [NEU01] Neugebauer, R.; Drossel, W.-G.; Blau, P.: 3D-Freifformbiegen von Profilen. In: Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 96, 11-12, 2001, S. 611–615

- [NYH08a] Nyhuis, P. (Hrsg.): Wandlungsfähige Produktionssysteme - Heute die Industrie von morgen gestalten. Garbsen: PZH Produktionstechnisches Zentrum, 2008.
- [NYH08b] Nyhuis, P.; Heinen, T.; Reinhart, G.; Rimpau, C.; Abele, E.; Wörn, A.: Wandlungsfähige Produktionssysteme - Theoretischer Hintergrund zur Wandlungsfähigkeit von Produktionssystemen. In: wt Werkstattstechnik online 98, 2008, S. 85–91
- [PIP22] PIPE BENDING SYSTEMS GmbH & Co. KG: Tuboscan S 100 optical pipe measuring system - Optical pipe measuring within seconds. URL: <https://www.pipe-bending-systems.de/en/optical-pipe-measuring-system/tuboscan-s-100/>, zuletzt abgerufen am 24.04.22
- [SCH22] Schacherreiter, J.: Lieferketten in der Krise - Risikoverteilung und Haftung bei internationalen Warenkaufverträgen im Gefolge von Pandemie und Krieg. URL: https://www.deutscheranwaltspiegel.de/wp-content/uploads/sites/49/2022/06/DisputeResolution_02-2022_L.pdf#page=11, zuletzt abgerufen am 31.10.22
- [SPR99] Sprenger, A.: Adaptives Streckbiegen von Aluminium-Strangpreßprofilen. Zugl.: Erlangen, Nürnberg, Univ., Diss., 1998. Bamberg: Meisenbach, 1999.
- [STA21] Staupendahl, D.: 3D Profile Bending with Five Controlled Degrees of Freedom. Dissertation. 1. Auflage, 2021.
- [SWI52] Swift, H. W.: Plastic instability under plane stress. In: Journal of the Mechanics and Physics of Solids 1, Nr. 1, 1952, S. 1–18
- [TAP16] Taplick, C.: Kombiniertes Hochkant-Biegen und Spaltprofilieren. Shaker Verlag. Dissertation
- [THI09] Thiel, J.: Kosten-Optimierung der Rohrleitungsfertigung - Wirtschaftlich denken heißt fortschrittlich messen. In: Inspect 10, Nr. 11, 2009, S. 42–44
- [TRA18] Trautz, M.: Der verschwundene Ingenieur. In: Stahlbau 87, Nr. 7, 2018, S. 706–717

- [VAT14] Vatter, P.: Sensitivitätsanalyse des 3-Rollen-Schubbiegens auf Basis der Finite Elemente Methode. Zugl.: Erlangen-Nürnberg, Univ., Diss., 2014. Bamberg: Meisenbach Verlag, 2014.
- [VDO80] Vdovin, S. I.: Berechnung der Rückfederung des Werkstoffs beim Biegen von Profilen mit Hilfe einer EDV-Anlage. In: Kuznecno-stampovocnoe prizvodstvo 22, Nr. 7, 1980, S. 22–24
- [VOL99] Vollertsen, F.; Sprenger, A.; Kraus, J.; Arnet, H.: Extrusion, channel, and profile bending: a review. In: Journal of Materials Processing Technology 87, 1-3, 1999, S. 1–27
- [WAG20] Wagner, T.: Resiliente Produktion für die Zeit nach der Corona-Krise - Empfehlung der WGP. Empfehlung der WGP. URL: <https://industrie.de/coronavirus/resiliente-produktion-fuer-die-zeit-nach-der-corona-krise/#>, zuletzt abgerufen am 17.10.21
- [WER21] Werner, M. K.; Maier, D.; Scandola, L.; Volk, W.: Motion profile calculation for freeform bending with moveable die based on tool parameters. In: ESAFORM 2021, 2021.
- [WIE76] Wiebeck, E.; Metschkow, B.: Iterationsverfahren zur Berechnung der elastisch-plastischen Biegung von Profilen. In: Fertigungstechnik und Betrieb 26, Nr. 4, 1976, S. 218–221
- [WOO07] Woodman, O. J.: An introduction to inertial navigation. 2007
- [YAN18] Yang, D. Y.; Bambach, M.; Cao, J.; Duflou, J. R.; Groche, P.; Kuboki, T.; Sterzing, A.; Tekkaya, A. E.; Lee, C. W.: Flexibility in metal forming. In: CIRP Annals 67, Nr. 2, 2018, S. 743–765
- [YAN90] Yang, M.; Shima, S.; Watanabe, T.: Model-based Control for Three-Roll Bending Process of Channel Bar. In: Journal of Engineering for Industry 112, Nr. 4, 1990, S. 346–351
- [ZOR70] Zorn, H.: Mehrstempelpresse zur Profillumformung und deren Automatisierung auf der Grundlage einer elastisch-plastischen Berechnung der Profilbiegung. Dissertation. Rostock, 1970.