

Entwicklung einer simulationsgestützten Optimierung für das Biegen und Prägen von Stahlrohren

Dissertation

zur Erlangung des Grades des
Doktors der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)
der Naturwissenschaftlich-Technischen Fakultät
der Universität des Saarlandes

vorgelegt von

Ralf Derr, M. Sc.

Saarbrücken

2019

Tag des Kolloquiums: 16.12.2019

Dekan: Prof. Dr. Guido Kickelbick

Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. Stefan Diebels

Prof. Dr.-Ing. Dirk Bähre

Vorsitz: Prof. Dr.-Ing. Michael Vielhaber

Akad. Mitarbeiter: Dr.-Ing. Florian Schäfer

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Technische Mechanik (LTM) der Universität des Saarlandes unter der Leitung von Prof. Dr.-Ing. Stefan Diebels. Finanziell wurde diese Arbeit vom Zentralen Innovationsprogramm Mittelstand (ZIM; Fördernummer: ZF4163501US5) unterstützt. Die Arbeit entstand in Zusammenarbeit mit der Firma Brabant & Lehnert aus Wadern.

Ich möchte mich besonders bei meinem Doktorvater Prof. Dr.-Ing. Stefan Diebels für die langjährige Unterstützung und Förderung bedanken. Angefangen als studentische Hilfskraft durfte ich meine Bachelorarbeit, meine Masterarbeit und schließlich auch die Dissertation am Lehrstuhl durchführen. Während dieser langen Zeit habe ich stets sein Vertrauen und sein Interesse durch zahlreiche fachlichen Diskussionen erfahren dürfen, was mich in meiner persönlichen Entwicklung sehr voran gebracht hat.

Bei Prof. Dr.-Ing. Dirk Bähre möchte ich mich ebenfalls für die gute Zusammenarbeit in den letzten Jahren, im Rahmen der wissenschaftlichen Begleitung, und für die Übernahme des Zweitgutachtens bedanken. Die von Prof. Bähre gehaltene Vorlesung zum Thema Ur- und Umformverfahren war für die Anfertigung dieser Arbeit hilfreich gewesen.

Im Rahmen des ZIM-Projektes möchte ich mich bei allen Verantwortlichen von ZIM und bei allen Beteiligten des Projektpartners Brabant & Lehnert für die gute Zusammenarbeit bedanken. Hierbei möchte ich besonders Herrn Bernhard Lehnert meinen Dank für die gute Zusammenarbeit und Unterstützung aussprechen und möchte mich bei Herrn Jonas Bernardy für die Durchführung der Experimente bedanken.

Zudem möchte ich mich bei allen Mitarbeitern des Lehrstuhl für Technische Mechanik für das angenehme Arbeitsklima und die fachlichen Diskussionen bedanken. Ein besonderer Dank geht an PD Dr.-Ing. Dr. rer. nat. Anne Jung für die langjährige Betreuung und für die zahlreichen Ideen und produktiven Diskussionen, die meine Arbeitsweise sehr geprägt und verbessert haben. Ein weiterer Dank geht an Thomas Bleistein M. Sc., der mich seit meiner Zeit am Lehrstuhl begleitet und mir mit vielen wissenschaftlichen und freundschaftlichen Diskussionen half. Ein weiterer Dank geht an Dr.-Ing. Henning Seibert, der als ehemaliger Bürokollege, mich in den ersten Monaten als wissenschaftlicher Mitarbeiter und bei der Ausführung der Experimente unterstützte. Zudem möchte ich Dr.-Ing. Tobias Scheffer, Martin Reis M. Sc. und Christine Grill M. Sc. hervorheben,

zu denen sich auch über die Arbeit hinaus ein ganz persönliches Verhältnis aufgebaut hat.

Zuletzt geht mein persönlicher Dank an meine Familie und Freunde, die in den letzten Jahren viel Verständnis und Unterstützung für meine Arbeit hatten. Mein ganz besonderer Dank geht an meine Frau Lisa, die mich immer unterstützt und mir in vielen Lebenslagen den Rücken frei gehalten hat. Dadurch hat sie wesentlich zur Fertigstellung der Arbeit beigetragen.

Saarbrücken, September 2019

Ralf Derr

Zusammenfassung

Die steigenden Anforderungen im Automobilbereich wie beispielsweise der Leichtbau erschweren zunehmend die Kaltumformbarkeit von Abgasrohren. Damit kleine und mittlere Unternehmen weiterhin konkurrenzfähig bleiben können, müssen verstärkt Simulationen genutzt werden, um die Entwicklung neuer Werkzeuge zu beschleunigen und kostengünstiger zu gestalten.

Ziel der Arbeit ist der Aufbau eines simulationsgestützten Optimierungstools, das innerhalb kürzester Zeit Werkzeugeinstellungen für den Biegeprozess und den Prägeprozess nach benutzerdefinierten Anforderungen ermitteln kann.

Damit die Simulationen und die Optimierungen durch einfache Parametervariationen automatisiert ausgeführt werden, wird eine graphische Benutzeroberfläche entwickelt. Reale Umformprozesse werden zur Beurteilung und zur Validierung der Simulationsmodelle verwendet. Da herstellungsbedingte Werkstücktoleranzen den Umformprozess beeinflussen können und somit eine Vorhersage deutlich erschweren, werden verschiedene Werkstückeinflüsse auf das Simulationsergebnis analysiert.

Zur Optimierungsgrundlage werden verschiedene Werkzeugparameter variiert und ihr Einfluss auf die Umformung untersucht. Die Ergebnisse werden in prozessspezifische Datenbanken gespeichert und ermöglichen über die graphische Benutzeroberfläche die Optimierung der Werkzeuge für das Rohrbiegen und das Rohrprägen.

Abstract

Increasing requirements in the automotive sector, such as lightweight construction, increasingly complicate the cold forming of exhaust tubes. In order to keep small and medium-sized enterprises competitive, simulation-based solutions must be created to accelerate the development of new tools and make them more cost-effective.

The aim of the work is the development of a simulation-supported optimization tool which can determine tool settings for the bending process and the embossing process according to user-defined requirements within a very short time.

A graphical user interface is developed to automate simulations and optimizations by simple parameter variations. Real forming processes are used to evaluate and validate the simulation models. Since production-related workpiece tolerances can influence the forming process and thus make prediction considerably more difficult, various workpiece influences on the simulation result are analyzed.

As a basis for optimization, various tool parameters are varied and their influence on the forming process is investigated. The results are stored in process-specific databases and enable the optimization of tools for tube bending and tube embossing via the graphical user interface.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Motivation	1
1.2	Zielsetzung und Aufbau der Arbeit	3
2	Experiment	5
2.1	Umformtechnische Grundlagen	6
2.1.1	Werkstofftechnische Grundlagen	6
2.1.2	Formänderungsvermögen	8
2.1.3	Rückfederung	12
2.2	Rohrumformprozesse: Biegen und Prägen	14
2.2.1	Rohrbiegen	16
2.2.2	Rohrprägen	21
2.3	Prozessaufbau	27
2.3.1	Umformwerkstück	27
2.3.2	Umformwerkzeuge	31
2.4	Diskussion der Experimente	37
3	Numerische Modellierung	39
3.1	Nichtlineares Randwertproblem	40
3.2	Finite-Elemente-Methode	42
3.2.1	Elementformulierung	43
3.2.2	Zeitintegrationsverfahren	45
3.2.3	Umsetzung in Abaqus [®]	48
3.3	Aktueller Stand der numerischen Umsetzung von Rohrumformprozessen	52
3.4	Diskussion der numerischen Modellierung	56
4	Simulation	59
4.1	Graphische Benutzeroberfläche DTFS	60
4.2	Numerische Modellierung des Werkstücks	63

4.3	Numerische Darstellung des Prägeprozesses	68
4.3.1	Simulationsmodell des Prägeprozesses	68
4.3.2	Vergleich mit experimentellen Prägeergebnissen	72
4.3.3	Einfluss des Werkstücks auf den Prägeprozess	79
4.4	Numerische Darstellung des Biegeprozesses ohne Dorn	85
4.4.1	Simulationsmodell des Biegeprozesses	85
4.4.2	Vergleich mit experimentellen Biegeergebnissen	91
4.4.3	Einfluss des Werkstücks auf den Biegeprozess	97
4.5	Numerische Darstellung des Biegens und Prägens von Rohren	106
4.5.1	Simulationsmodell des Biegens und Prägens von Rohren	106
4.5.2	Vergleich mit experimentellen Biegeergebnissen und Prägeergebnissen	111
4.5.3	Einfluss des Werkstücks auf den Prägeprozess gebogener Rohre .	120
4.6	Diskussion der numerischen Umsetzung	129
5	Optimierung der Umformprozesse	133
5.1	Einstellparameter	134
5.2	Werkzeugeinfluss in den Umformprozessen	135
5.2.1	Einfluss der Prägwerkzeuge	137
5.2.2	Einfluss der Biegwerkzeuge	142
5.2.3	Einfluss der Prägwerkzeuge auf ein gebogenes Rohr	149
5.3	Grundlagen der Optimierung	155
5.3.1	Regressionsanalyse	155
5.3.2	Parameteroptimierung	156
5.4	Prozessoptimierung	158
5.4.1	Optimierungsablauf	158
5.4.2	Optimierungsbeispiele	162
5.5	Diskussion der Umformoptimierung	171
6	Zusammenfassung und Ausblick	175
6.1	Darstellung der erzielten Ergebnisse	175
6.2	Zukünftige Forschungsbereiche	178
	Literaturverzeichnis	180
	Anhang	195

1

Einleitung

1.1 Motivation

Die Automobilbranche gehört zu den wichtigsten Wirtschaftsbereichen in Deutschland. Kernpunkte in diesem Bereich sind die Themen Digitalisierung, Nachhaltigkeit, Effizienz und Kostenersparnis. Aus diesen Gründen ist in den letzten Jahren die Bedeutung des Leichtbautrends gestiegen. Das eingesparte Gewicht wirkt sich positiv auf den Verbrauch des Fahrzeugs aus und führt dadurch zu einem geringeren Emissionsausstoß und zu sinkenden Betriebskosten. Zudem bewirkt eine Gewichtseinsparung im Herstellprozess eine Reduzierung des Materialeinsatzes. Dazu werden beim Bau von Auspuffanlagen dünnwandige geschweißte Rohre aufgrund ihrer niedrigen Produktionskosten, kurzen Produktionsperioden und guten Reproduzierbarkeit bevorzugt eingesetzt [138]. Um trotz geringer Wandstärke noch die Anforderungen wie hohe Stabilität, Korrosions-, Temperatur- und Säurebeständigkeit zu gewährleisten, werden Edelstahlrohre verwendet [36, 38]. Die steigenden Anforderungen erschweren jedoch zunehmend die fehlerfreie Umformung der Rohre. Obwohl die stetige Reduzierung der Wandstärke die Umformproblematik erhöht, wird aufgrund der kurzen Standzeiten oftmals die reine Kaltumformung bevorzugt. Das Umformen dünnwandiger Stahlrohre im kalten Zustand hat jedoch Grenzen, was die Gewährleistung fehlerfreier Endprodukte immer komplexer gestaltet. Um die Anforderungen weiterhin ressourcenschonend und effizient erfüllen zu können, ist der Einsatz digitaler Technik notwendig.

Die Industrie 4.0 wird in den kommenden Jahren durch die Vernetzung von Fertigungsprozessen mit der digitalen Technik ein zentrales Thema sein und über den Erfolg von Unternehmen entscheiden. Die Entwicklung von simulationsgestützten Lösungen be-

schäftigt vorrangig Forschungseinrichtungen und Großunternehmen. Bei kleinen und mittleren Unternehmen, die den wesentlichen Anteil aller Unternehmen ausmachen, sind solche Technologien oftmals nur unzureichend vorhanden, wodurch der Entwicklungsprozess sehr zeit- und kostenintensiv ist. Zur Realisierung fehlerfreier Endprodukte ist somit oftmals ein Vorgehen nach dem „Trial-and-Error“-Prinzip durch erfahrene Mitarbeiter notwendig, weshalb das Ergebnis stark personenabhängig ist. Dabei können prozessbegleitende und prozessergänzende Simulationen unnötige Schleifen in der Entwicklung vermeiden. Simulationsmodelle und Optimierungsmodelle reduzieren den Einsatz eines manuellen Eingriffs und erleichtern somit die Arbeit der Experten durch automatisierte Abläufe und ein beschleunigtes Erreichen der notwendigen Ergebnisse. Zusätzlich ermöglichen Simulationen eine weitere Kontrollinstanz zur Sicherstellung eines funktionierenden Prozessablaufs durch eine frühzeitige Fehlererkennung.

Obwohl die Untersuchung von Prozessketten wie beispielsweise das Biegen und das Hydroumformen bereits in der Forschung behandelt wurden, ist die Technologie nur in wenigen Unternehmen vorhanden. Zu diesem Zweck müssen solche industriellen Probleme von kleinen und mittleren Unternehmen vermehrt durch die Forschungseinrichtungen aufgegriffen werden. Das Rohrprägen hat aufgrund der verhältnismäßig geringeren Anwendung und des geringeren Entwicklungspotenzials gegenüber der Hydroumformung in der Literatur bisher keine Bedeutung. Zur Weiterentwicklung der Werkzeuge sind Simulationen unerlässlich, da in kleinen und mittleren Unternehmen das Rohrprägen aufgrund niedrigerer Produktionskosten bevorzugt eingesetzt wird und die Kaltumformung an die Grenzen der Umformmöglichkeiten kommt. Um wettbewerbsfähig zu bleiben, muss der Einsatz der digitalen Technik den kleinen und mittleren Unternehmen verstärkt zugänglich gemacht werden und an die entsprechenden Anforderungen angepasst werden. Dazu gehören eine anwenderfreundliche Benutzung von Simulationen und die Automatisierung der numerischen Abläufe. Daher sollten Kooperationen zwischen Unternehmen und Forschungseinrichtungen stärker vorangebracht werden. Nur durch eine konsequente Berücksichtigung anwendungsspezifischer Probleme und dem Zusammenführen von Industrie und Forschung wird die Digitalisierung im Sinne der Industrie 4.0 gelingen und die Forschung sinnvoll zur gesellschaftlicher Weiterentwicklung genutzt werden.

1.2 Zielsetzung und Aufbau der Arbeit

Ziel der Arbeit ist eine simulationsgestützte Optimierung von Werkzeugen im Prozess des Rohrbiegens und des Rohrprägens. Experimentelle Umformerergebnisse an eigens aufgebauten Umformmaschinen, bilden die Grundlage der Arbeit. Auf Basis der Experimente erfolgt der Aufbau der entsprechenden Simulationsmodelle. Die Simulationsmodelle sollen über eine graphische Benutzeroberfläche nach Benutzervorgaben automatisiert erstellt, simuliert und ausgewertet werden können. Der Vergleich zwischen Experiment und Simulation erfolgt im Simulationsmodell standardmäßig mit Nennmaßen des Werkstücks und soll das Simulationsmodell validieren. Da reale Rohre chargenbedingte Toleranzen aufweisen, muss numerisch untersucht werden, inwiefern solche Abweichungen das Simulationsergebnis negativ beeinflussen können und somit eine Vorhersage der Umformerergebnisse erschweren. Zur Optimierung der Umformwerkzeuge müssen die jeweiligen Einflüsse durch eine Werkzeugvariation untersucht werden. Auf Basis dieser Ergebnisse soll über die entwickelte graphische Benutzeroberfläche eine Optimierung der einzelnen Werkzeuge nach benutzerdefinierten Anforderungen erfolgen. Zum Erreichen des Gesamtziels sind insgesamt sechs Kapitel in der Arbeit vorgesehen:

In **Kapitel 2** werden die wichtigsten umformtechnischen Grundlagen, die zum Verständnis der Arbeit notwendig sind, vorgestellt. Die beiden untersuchten Prozesse des Rohrbiegens und des Rohrprägens werden dargestellt, schematisch erläutert und die experimentellen Umsetzung der Prozesse anschließend beschrieben.

Kapitel 3 liefert die wesentlichen Aspekte zur numerischen Modellierung von Experimenten mit Hilfe der Finite-Elemente-Methode. Zu diesem Zweck werden die wichtigsten kontinuumsmechanischen Grundlagen zusammengefasst. Die kurze Einführung der Finite-Elemente-Methode wird durch eine Erklärung der räumlichen und zeitlichen Diskretisierung und der Problematik von Nichtlinearitäten in Simulationen ergänzt. Nach der allgemeinen Übersicht zur numerischen Modellierung werden die wichtigsten Einstellungen in der Simulationssoftware Abaqus[®] für die vorliegende Arbeit zusammengefasst. Abgeschlossen wird das Kapitel mit einem aktuellen Stand der numerischen Umsetzung der betrachteten Umformprozesse.

In **Kapitel 4** wird die graphische Benutzeroberfläche zur automatisierten Erstellung der Simulationsmodelle vorgestellt. Die einzelnen Simulationsmodelle der verschiedenen Umformprozesse werden erläutert und durch einen Vergleich mit den Experimenten aus Kapitel 2 validiert. Da das Werkstück in jeder Simulation standardmäßig mit Nennmaßen modelliert wird, kann es aufgrund von chargenbedingter Toleranzen beim Vergleich mit den Experimenten zu Abweichungen kommen. Der Einfluss dieser Werkstücktoleranzen wird ebenfalls für jeden Umformprozess numerisch untersucht.

In **Kapitel 5** werden die Einflüsse der Umformwerkzeuge numerisch untersucht und die Ergebnisse in einer anschließenden Optimierung verwendet. Die Untersuchung der Einflüsse erfolgt durch eine Parametervariation. Die Simulationsergebnisse werden in prozessspezifischen Datenbanken gespeichert und durch eine Regressionsanalyse in der Optimierung ausgewertet. Die Optimierung wird mittels zweier Umformbeispiele, ein einfacher Prägeprozess und eine Prozesskette aus Biegen und Prägen, demonstriert und erläutert.

In **Kapitel 6** erfolgen eine Zusammenfassung der wichtigsten Erkenntnisse und ein Ausblick auf zukünftige Fragestellungen basierend auf den Ergebnissen der Arbeit.

2

Experiment

Ziel des Kapitels ist die Beschreibung der experimentellen Umsetzung von Rohrumformprozessen, dabei werden insgesamt drei Teilaspekte diskutiert. Im ersten Teil werden die für die Arbeit notwendigen umformtechnischen Grundlagen eingeführt. Die Grundlagen umfassen die Einführung der Fließkurve, mit der das Formänderungsvermögen und die Rückfederung des Werkstücks anschaulich erklärt werden. Die Informationen grenzen nur einen Teil der umfangreichen Umformtheorie ein, weshalb für eine detaillierte Beschreibung auf die Literatur verwiesen wird [11, 34, 44, 56, 57, 71, 98]. Im zweiten Teil wird die allgemeine umformtechnische Theorie durch prozessspezifische Grundlagen ergänzt. Dazu werden die Verfahrensprinzipien der untersuchten Umformprozesse des Biegens und des Prägens von Rohren vorgestellt. Im dritten Teil erfolgt die Umsetzung der Theorie in die Praxis durch die Beschreibung des Aufbaus der experimentellen Prozesse. Neben dem Aufbau werden die Werkstückeigenschaften und die Randbedingungen im Umformprozess diskutiert. Durch die Experimente wird die Basis für die nachfolgende numerische Umsetzung der Umformprozesse gebildet.

2.1 Umformtechnische Grundlagen

2.1.1 Werkstofftechnische Grundlagen

Das Umformen gehört nach DIN 8580 [25] zu einer der sechs Hauptgruppen der Fertigungsverfahren. Umformungen werden verwendet, um die Form, die Oberfläche und die Werkstoffeigenschaften von festen Körpern gezielt plastisch zu verformen, ohne dabei die Masse oder den Stoffzusammenhalt zu verändern. Dazu kann das Werkstoffverhalten eines spezifischen Materials durch Zugversuche an genormten Proben charakterisiert werden. In Abbildung 2.1 ist beispielhaft das charakteristische Verhalten eines metallischen Werkstoffs unter einachsiger Belastung durch ein Spannungs-Dehnungs-Diagramm und durch eine Fließkurve abgebildet.

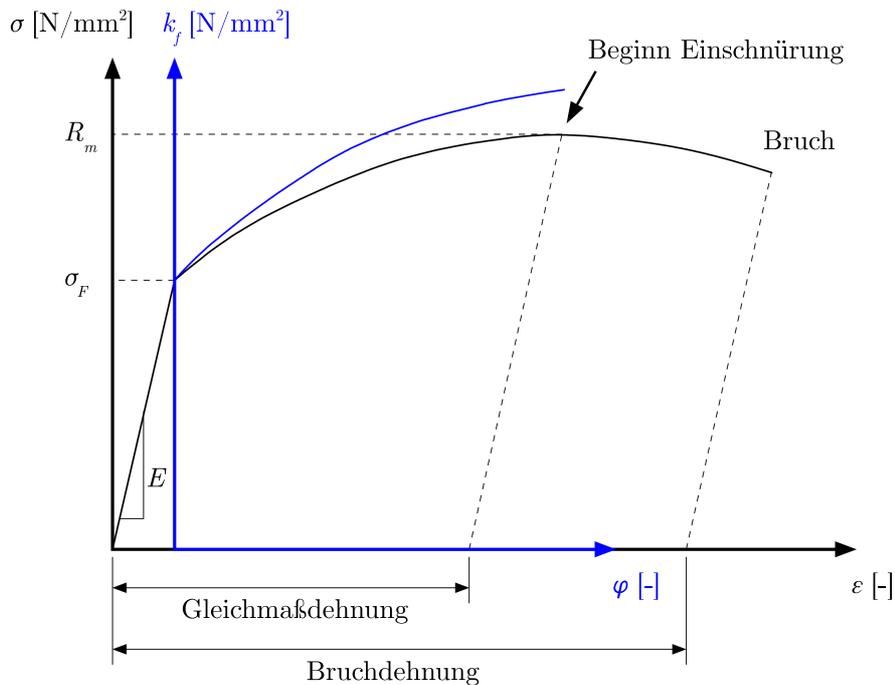


Abbildung 2.1: Schematische Darstellung eines technischen Spannungs-Dehnungs-Diagramms (schwarz) und der dazugehörigen Fließkurve (blau) (E : Elastizitätsmodul; σ_F : Fließspannung; R_m : Zugfestigkeit)

Die Dehnung

$$\varepsilon = \frac{L - L_0}{L_0} \quad (2.1)$$

im Spannungs-Dehnungs-Diagramm resultiert aus der Längenänderung ($L - L_0$) der untersuchten Probe bezogen auf die Ursprungslänge L_0 . Die resultierende Spannung in

der Probe

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \quad (2.2)$$

ist das Ergebnis der aufgebrachten Kraft F bezogen auf die Ausgangsquerschnittsfläche A_0 . Das Spannungs-Dehnungs-Diagramm wird in einen elastischen und einen plastischen Bereich unterteilt. Der elastische Bereich wird durch die Hookesche Gerade beschrieben. Bei Entlastung der Probe verschwindet die elastische Dehnung komplett. Beim Erreichen eines werkstoffspezifischen kritischen Spannungszustands erfährt der Werkstoff eine plastische Dehnung, die auch nach Entlastung der Probe erhalten bleibt. Der Übergang von elastischem zu plastischem Bereich wird durch die Fließspannung σ_F gekennzeichnet. Der plastische Bereich lässt sich in den Bereich der Gleichmaßdehnung und in den Bereich der Einschnürung unterteilen. Der Übergang zwischen beiden Bereichen bildet die Zugfestigkeit R_m , die im Spannungs-Dehnungs-Diagramm den Punkt der maximalen Spannung charakterisiert. Im Bereich der plastischen Gleichmaßdehnung erfährt der Werkstoff eine Verfestigung, was mikroskopisch durch das Wandern und den Aufstau von Versetzungen bedingt ist. Mit Erreichen der Zugfestigkeit beginnt sich die Probe lokal einzuschnüren, wodurch die plastische Dehnung nur noch im Bereich der Probeneinschnürung stattfindet. Da die Querschnittsminderung der Probe größer ist als die lokale Verfestigung, resultiert daraus ein Spannungsabfall im Diagramm. Beim Erreichen der Bruchdehnung bricht die Probe.

Das Spannungs-Dehnungs-Diagramm bildet die Grundlage für die in der Umformtechnik verwendete Fließkurve, die nur den plastischen Bereich der Gleichmaßdehnung abbildet (vgl. Abb. 2.1). In der Umformtechnik erfahren die meisten Werkstoffe eine große Formänderung, weshalb der elastische Anteil nur eine geringe Bedeutung bei der Beschreibung der Formänderung hat. Große Formänderungen bedeuten ein hohes Maß an Plastifizierung und können daher zur Schädigung oder zum Materialversagen führen, was aus umformtechnischer Sicht zu vermeiden ist. Somit ist zum Erreichen eines schädigungsfreien Endergebnisses das Formänderungsvermögen des Werkstücks entscheidend. Die Fließkurve wird durch den Umformgrad φ und die Fließspannung k_f dargestellt. Der Umformgrad

$$\varphi = \ln \left(\frac{L}{L_0} \right) \quad (2.3)$$

entspricht der logarithmischen Formänderung. Die Fließspannung

$$k_f = \frac{F}{A} \quad (2.4)$$

entspricht der wahren Spannung, da die Kraft F auf die aktuelle Querschnittsfläche A bezogen wird. Die Fließkurve stellt somit den Teil des Spannungs-Dehnungs-Diagramms dar, der für die Anwendung in der Umformtechnik benötigt wird.

2.1.2 Formänderungsvermögen

Das Formänderungsvermögen eines metallischen Werkstoffs beschreibt die Eigenschaft, bleibende Formänderungen ohne Auftreten von Schädigung zu ertragen. Da in Umformprozessen große Umformgrade am Werkstoff auftreten, ist eine Bestimmung des Formänderungsvermögens wichtig. Die Definition des Formänderungsvermögens eines Werkstoffs erfolgt über den maximal zulässigen Umformgrad φ_{max} in der Fließkurve. Die zugehörige Fließspannung

$$k_f = f(W, \varphi, \dot{\varphi}, \vartheta, \sigma_m) \quad (2.5)$$

ist abhängig von: [11, 35, 71]

- dem Werkstoff W ,
- dem Umformgrad φ ,
- der Umformgeschwindigkeit $\dot{\varphi}$,
- der Umformtemperatur ϑ und
- dem Spannungszustand σ_m (vgl. Abb. 2.2).

Einflussfaktoren - wie der Werkstoff und der Umformgrad - werden häufig durch die Anforderungen an das umgeformte Werkstück vorgegeben. Die Umformgeschwindigkeit und die Umformtemperatur sind Faktoren, die zur Erfüllung der Anforderungen eingestellt werden müssen. Der Spannungszustand ist abhängig von den bereits vollzogenen und noch geplanten Bearbeitungsschritten des Werkstücks. Die fünf Einflussfaktoren aus Gleichung 2.5 werden im Folgenden näher erläutert, weil diese eine entscheidende Rolle bei der Auslegung der in der Arbeit untersuchten Umformprozesse besitzen.

Einfluss des Werkstoffes

Für die Rohrumformung ist ein **gutes Formänderungsvermögen** entscheidend, was eine **hohe Duktilität** bei möglichst geringen Kräften und eine **hohe Festigkeit** voraussetzt [57]. Duktilität beschreibt die Werkstoffeigenschaft, große Formänderungen zu ertragen, ohne dabei zu schädigen. Die Festigkeit ist der Widerstand eines Körpers gegen plastische Verformung und Bruch.

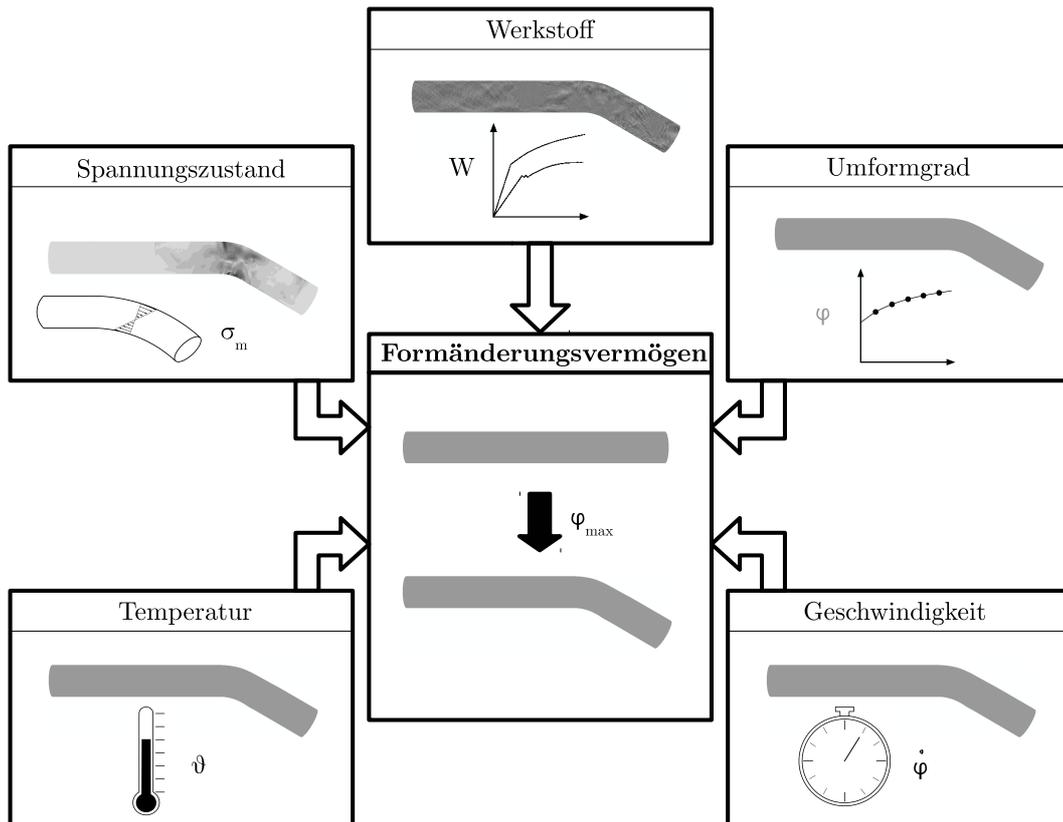


Abbildung 2.2: Das maximale Formänderungsvermögen φ_{max} in Abhängigkeit des Werkstoffes W , des Umformgrades φ , der Geschwindigkeit $\dot{\varphi}$, der Temperatur ϑ und des Spannungszustands σ_m

Eine Steigerung der Festigkeit führt jedoch zu einer Reduzierung der Duktilität und somit zu einem niedrigeren Formänderungsvermögen. Eine gute Umformbarkeit hingegen führt meist schnell zum Werkstoffversagen, da der Widerstand des Werkstoffs gegen plastische Verformung zu niedrig ist. Daher ist ein Kompromiss zwischen beiden Eigenschaften anzustreben. Das Formänderungsvermögen lässt sich durch die chemische Zusammensetzung, den Gefügebau und die Bearbeitungsschritte des Werkstoffs beeinflussen. Dabei können Schwankungen in der chemischen Zusammensetzung oder unterschiedliche Gefügestände bei gleicher Zusammensetzung das Formänderungsvermögen beeinflussen. Obwohl die Werte alle innerhalb eines herstellungsbedingten Toleranzbereiches liegen müssen, können die Toleranzen zu Abweichungen in der Fließkurve führen. Auch bei der Ermittlung von Fließkurven müssen Streuungen durch das eingesetzte Prüfverfahren, die Prüfvorrichtung und die Bedingungen während des Prüfens als mögliche Ursache für Abweichungen in den ermittelten Werten in Betracht gezogen werden [35]. Der eingesetzte Werkstoff hat einen großen Einfluss auf das Formänderungsvermögen und muss daher auf die Prozessanforderungen abgestimmt sein. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit werden zwei nichtrostende Edelmetalle, ein austenitischer Chrom-Nickel-Stahl 1.4301 und ein ferritischer Chrom-Stahl 1.4509, untersucht.

Beide Materialien werden bei der Herstellung von Abgasrohren im Automobilbereich eingesetzt. Die Materialien besitzen ein gutes Formänderungsvermögen und erfüllen die Anforderungen zur Festigkeit im Leichtbau, zur Korrosionsbeständigkeit und zur Temperaturbeständigkeit im Abgasbereich [8, 14, 36, 55]. Der Gitteraufbau und die Legierungselemente des Materials 1.4301 führen zu einer guten Kaltverformbarkeit, die aus einem guten Kompromiss von hoher Bruchdehnung zu relativ hoher Festigkeit resultiert. Das ferritische Material 1.4509 besitzt im Vergleich zum Material 1.4301 eine geringere Bruchdehnung und eine geringere Festigkeit. Dagegen ist das Material 1.4509 aufgrund der fehlenden Nickellegierung eine deutlich preiswertere Variante.

Einfluss der Werkstücktemperatur

Die Werkstücktemperatur beeinflusst sowohl das Formänderungsvermögen als auch die entsprechende Umsetzung des Umformprozesses. Im Wesentlichen wird zwischen einer **Kaltumformung** und einer **Warmumformung** unterschieden. Die Rekristallisationstemperatur bildet die Grenze zwischen der Kaltumformung und der Warmumformung und ist abhängig vom eingesetzten Werkstoff. Bei Stahl liegt die Rekristallisationstemperatur deutlich über Raumtemperatur, weshalb bei Raumtemperatur eine Kaltumformung stattfinden kann. Bei Umformtemperaturen über der Rekristallisationsgrenze wird von einer Warmumformung gesprochen. Bei einer Warmumformung erfolgt aufgrund von Erholungs- und Rekristallisationsvorgängen eine Gefügebildung, wodurch das Formänderungsvermögen des Werkstoffs erhöht und die Festigkeit bzw. die Fließspannung reduziert wird. Das Erwärmen der Probe erfordert einen hohen Energieaufwand und eine entsprechende Berücksichtigung der hohen Temperaturen im Prozessaufbau. Bei Temperaturen bis 300°C ist der Einfluss auf das Formänderungsvermögen und auf die Fließspannung minimal [15]. Da bei Kaltumformprozessen, wie im Rahmen der vorliegenden Arbeit untersucht, diese Temperaturen nicht erreicht werden, ist der Einfluss der Werkstücktemperatur zu vernachlässigen [100].

Einfluss des Umformgrades

Der Umformgrad bezeichnet die **gemittelte Gesamtformänderung** des Körpers. Der maximal zulässige Umformgrad φ_{max} definiert das Formänderungsvermögen. Bei der Gesamtformänderung wird zwischen elastischen und plastischen Formänderungen unterschieden. Die plastischen Formänderungen führen zu einer Verfestigung des Werkstoffes, wodurch größere Kräfte für eine weitere Umformung notwendig sind. Nach Entlastung des Werkstoffes bleiben diese plastischen Formänderungen im Werkstoff erhalten. Somit reduzieren bereits vollzogene Umformungen des Werkstoffes das Formänderungsvermögen für nachfolgende Umformungen.

Einfluss der Umformgeschwindigkeit

Die Umformgeschwindigkeit definiert die **zeitliche Änderung des Umformgrades** und hat nur einen geringen Einfluss auf das Formänderungsvermögen bei Raumtemperatur [35]. Bei Temperaturen über der Rekristallisationstemperatur kommt es im Werkstoffinneren zu Erholungs- und Rekristallisationsvorgängen. Die resultierende Änderung des Gefüges führt zu einer Entfestigung des Materials. Diese Vorgänge sind zeitabhängig und werden daher durch die Änderung der Umformgeschwindigkeit beeinflusst. Mit steigender Umformgeschwindigkeit reduziert sich die Zeit, die für die Erholungs- und Rekristallisationsvorgänge notwendig ist. Das Formänderungsvermögen ist somit bei einer Warmumformung geschwindigkeitsabhängig. In der vorliegenden Arbeit hat die Umformgeschwindigkeit keinen wesentlichen Einfluss auf das Formänderungsvermögen, da alle Umformprozesse im quasistatischen Bereich und bei Raumtemperatur stattfinden.

Einfluss Vordeformation und Spannungszustand

Der Spannungszustand im Werkstoff setzt sich zusammen aus **Anfangseigenstressen** und **induzierten Eigenspannungen** während der Umformung. Eigenspannungen entstehen aufgrund von zeitabhängigen Interaktionen von Temperatur, Deformation und herstellungsbedingter Mikrostruktur des Werkstoffes. Eigenspannungen haben eine inhomogene Verteilung und lassen sich nur mit viel Aufwand experimentell ermitteln. Zur Ermittlung der Eigenspannungsverteilung gibt es viele zerstörende und zerstörungsfreie Methoden. Da im Rahmen der Arbeit die Untersuchung von Eigenspannungen nur numerisch stattfindet, wird für eine detaillierte Übersicht auf die Literatur verwiesen [21, 122]. Die Herstellungsgeschichte des Rohres muss als möglicher Einflussfaktor im Umformprozess berücksichtigt werden, da die Herstellung Eigenspannungen zur Folge hat [5, 16]. Der Herstellprozess beinhaltet nichthomogene plastische Deformationen des Materials, das Schweißverfahren und nachträgliche Wärmebehandlungen [122]. Durch den Schweißprozess wird der Werkstoff im umliegenden Bereich auf sehr hohe Temperaturen gebracht, was bei der Abkühlung zu Eigenspannungen und somit zu einer lokalen Änderung des Materialverhaltens führt [59, 127]. In Umformprozessen wird daher die Schweißnaht an der Position mit der geringsten Zug- und Biegebeanspruchung platziert. Eigenspannungen können aber auch genutzt werden, um durch eine gezielte Behandlung der Werkstückoberflächen das Umformergebnis positiv zu beeinflussen [94, 95]. Dadurch werden lokale Materialeigenschaften an die Randbedingungen des Prozesses angepasst und somit eine Verbesserung des Ergebnisses erzielt. Das Formänderungsvermögen weist eine Abhängigkeit zur Spannungs- und Umformgeschichte auf [104]. Die Spannung lässt sich in einen hydrostatischen Anteil und in einen

deviatorischen Anteil aufteilen. Der Fließbeginn metallischer Werkstoffe ist eine Funktion des deviatorischen Anteils der Spannung, wohingegen der hydrostatische Anteil für das Umformvermögen verantwortlich ist. Nach Stenger [119] kann das Verhältnis von hydrostatischem Spannungsanteil zur Fließspannung als Maß für den Einfluss des Spannungszustands auf das Formänderungsvermögen genommen werden. Druckbeanspruchte Umformungen weisen im Vergleich zu zugbeanspruchten Umformungen ein höheres Formänderungsvermögen auf. Zudem kann durch eine Überlagerung von Druckspannungen das Formänderungsvermögen erhöht werden. In der Realität treten häufig komplexe Kombinationen von Beanspruchungsarten auf, wodurch eine Druckspannungseinleitung oft nicht problemlos möglich ist. Das Innenhochdruckumformen ist ein Beispiel, bei dem durch die Kombination von Innendruck und Druckspannungen eine höhere Formänderung erreicht werden kann [98]. Das Versagen des Werkstücks in Abhängigkeit unterschiedlicher Beanspruchungszustände kann durch ein Grenzformänderungsdiagramm angegeben werden [34, 71]. Der maximal zulässige Umformgrad φ_{max} in der Fließkurve definiert das größtmögliche Grenzformänderungsvermögen.

2.1.3 Rückfederung

Jeder Umformprozess hat bei der Entlastung eine Rückfederung des Materials zur Folge, die zu einer unerwünschten Konturabweichung führt. Während der Umformung führt die äußere Belastung des Werkstücks zu inhomogen verteilten Spannungen im Inneren des Körpers, die mit den äußeren Kräften im Gleichgewicht stehen. Die Rückfederung des Materials entsteht bei Entlastung des Werkstücks durch den reversiblen Deformationsanteil. Sie erfolgt soweit entgegen der Belastungsrichtung, bis die inneren Spannungen wieder im Gleichgewicht stehen [56]. Die resultierende Konturabweichung muss daher bereits vor der Umformung berücksichtigt werden und durch zusätzliche Maßnahmen kompensiert werden. Die Kompensation kann durch eine Erhöhung des Umformgrades, durch eine Überlagerung verschiedener Beanspruchungsarten oder durch eine nachträgliche Umformung realisiert werden [71]. Die Rückfederung ist abhängig

- vom Umformprozess,
- von der Werkstückgeometrie und
- von den Werkstoffeigenschaften.

Der **Umformprozess** definiert die Beanspruchung des Werkstücks und bestimmt dadurch die Art der Rückfederung. Die resultierende Spannung durch die Beanspruchung ist dabei abhängig von der **Werkstückgeometrie**. Der **Werkstoffeinfluss** auf

die Rückfederung lässt sich anschaulich anhand exemplarischer Spannungs-Dehnungs-Diagrammen verdeutlichen (vgl. Abb. 2.3).

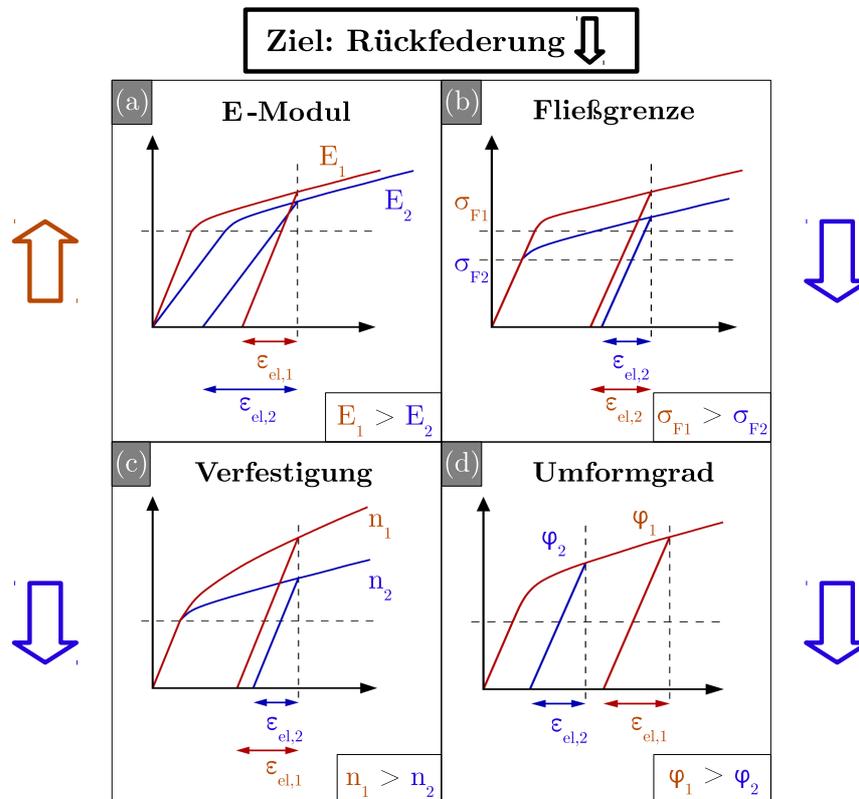


Abbildung 2.3: Reduzierung der Rückfederung veranschaulicht anhand des elastischen Dehnungsanteils ε_{el} in einem Spannungs-Dehnungs-Diagramm durch Änderung von Materialeigenschaften; Erhöhung des Elastizitätsmoduls E (a), früher eintretender Fließbeginn σ_F (b), geringerer Verfestigungsanstieg n (c), geringerer Umformgrad φ (d), in Anlehnung an [11]

Die Abbildung visualisiert, wie die Einflussfaktoren des Werkstoffs verändert werden müssen, damit eine Reduzierung der Rückfederung erzielt werden kann. Zu den Einflussfaktoren gehören:

- der Elastizitätsmodul E ,
- die Fließgrenze σ_F ,
- der Verfestigungsverlauf n und
- der Umformgrad φ .

Der **Elastizitätsmodul** E beschreibt die Steifigkeit des Materials im elastischen Bereich und beeinflusst somit bei gegebener Fließgrenze den elastischen Dehnungsanteil ε_{el} . Dadurch sinkt bei steigendem Elastizitätsmodul die Rückfederung, da die Kurve bei Entlastung stärker abfällt (vgl. Abb. 2.3 (a)). Im plastischen Bereich wird die Rückfederung von der **Fließgrenze** σ_F und von der **Verfestigung** n beeinflusst. Unter der

Voraussetzung des gleichen Elastizitätsmoduls und des gleichen Verfestigungsverlaufs, hat ein früherer Fließbeginn eine Verkürzung der elastischen Gerade zur Folge. Die Verkürzung führt zu einem geringen elastischen Dehnungsanteil und somit zu einer geringeren Rückfederung (vgl. Abb. 2.3 (b)). Ausgehend vom gleichen Fließbeginn, führt ein flacherer Verfestigungsverlauf ebenfalls zur einer Verkürzung der Entlastungsgerade und damit zu einer geringeren Rückfederung (vgl. Abb. 2.3 (c)). Neben den Materialcharakteristiken ist auch das Eintreten der Entlastung und somit die bereits erfolgte **Umformung** entscheidend für die Rückfederung. Bei einer vorzeitigen Entlastung ist der Rückfederungsanteil geringer (vgl. Abb. 2.3 (d)). Ein Werkstoffwechsel im Umformprozess führt somit zu einer Änderung der Rückfederung und bedarf einer Anpassung der Kompensation.

2.2 Rohrumformprozesse: Biegen und Prägen

Die Einteilung der Umformverfahren erfolgt durch DIN 8580 [25] nach drei Kriterien:

- Einsatztemperatur während der Umformung,
- Werkstückdimensionen und
- Beanspruchungsart.

Bei der **Einsatztemperatur** wird zwischen einer Kaltumformung und einer Warmumformung unterschieden (vgl. Kap. 2.1.2). Das Umformen von Stahlrohren erfolgt aus Kostengründen meist bei Raumtemperatur, weshalb von einer Kaltumformung gesprochen wird. Der Vorteil der Kaltumformung ist die hohe Form- und Maßgenauigkeit und der fehlende Energiebedarf zur Erwärmung der Probe [57]. Eine Warmumformung ist dann notwendig, wenn die zur Umformung notwendigen Kräfte reduziert werden müssen oder das Formänderungsvermögen des Materials erhöht werden soll. Im Rahmen der **Werkstückdimensionen** wird zwischen einer Blechumformung und einer Massivumformung unterschieden. Die Blechumformung bezieht sich auf die Umformung von dünnen Blechen, wodurch die Dicke des Bauteils viel geringer gegenüber den beiden übrigen Abmaßen ist. Bei einer mathematischen Beschreibung wird das Werkstück näherungsweise als zweidimensionaler Körper behandelt. Bei der Massivumformung sind die ursprünglichen Abmaße des Werkstücks in den drei Raumrichtungen verhältnismäßig ähnlich und die Umformung erfolgt dabei in allen drei Raumrichtungen. Die Rohrumformung stellt einen eigenständigen Bereich dar, da diese sowohl Eigenschaften der Blechumformung als auch der Massivumformung aufweist. Die Umformprozesse werden nach der **Beanspruchungsart** eingeteilt und durch die DIN 8582 [26] definiert. Entscheidend für die Einteilung ist der Spannungszustand des Werkstückes aufgrund

der Umformart (Zug, Zug-Druck, Druck, Biegung und Schub). Auf Basis der genannten Kriterien wird für die vorliegende Arbeit folgende Einteilung gemacht:

- Kaltumformung
- Rohrumformung
- Biegeprozess: Biegeumformung / Prägeprozess: Druckumformung.

Im Folgenden werden die beiden Umformverfahren des Rohrbiegens und des Rohrprägens näher vorgestellt und auf die Besonderheiten bei der Anwendung an Rohren eingegangen. Die beiden Rohrumformprozesse werden im Automobilbereich bei der Herstellung von Abgasrohren benötigt. Durch die Umformung wird das Rohr an die gegebenen Montagebedingungen am Fahrzeug angepasst. Die Richtungsänderung der Rohrmittellinie wird durch das Rohrbiegen realisiert. Engstellen unter dem Fahrzeug - beispielsweise durch kreuzende Bauteile - erfordern zusätzlich lokale Querschnittsänderungen am Rohr. Die Änderung des Rohrquerschnitts erfolgt durch das Rohrprägen. Besondere Gegebenheiten bei der Montage erfordern zusätzlich das Prägen von gebogenen Rohren im Biegebereich (vgl. Abb. 2.4).

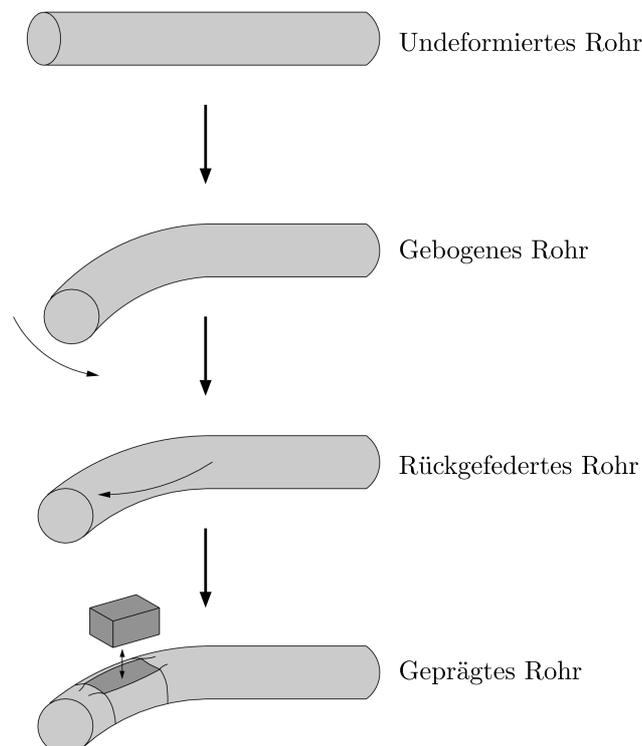


Abbildung 2.4: Schematischer Umformablauf des Biegens mit anschließendem Prägen

Der Einfluss der Biegeumformung muss dann im Prägeprozess berücksichtigt werden. Aufgrund dieser Abhängigkeit wird zuerst der Biegeprozess und anschließend der Prägeprozess vorgestellt.

2.2.1 Rohrbiegen

Die Biegeumformung ist definiert durch die DIN 8586 [28], weil die Plastifizierung des Werkstoffs maßgeblich durch eine Biegebeanspruchung herbeigeführt wird. Eine Möglichkeit zur Unterscheidung von Biegeverfahren ist die Angriffsart der äußeren Kräfte bzw. Momente nach Sachs und Voegli [109]. Dazu werden drei Basisverfahren unterschieden:

- das Rundbiegen,
- das Gesenkbiegen und
- das Biegen durch ein reines Moment.

Die Unterteilung der Basisverfahren bezieht sich jedoch auf die Verwendung von Blechwerkstücken. Eine Unterscheidung nach der Kraftangriffsart speziell für die Rohrumformung wurde von Franz [43] mit der Unterteilung durch

- das Biegen mittels eines reinen Momentes (reines Biegen),
- das Biegen durch Moment und Querkraft und
- das Biegen durch Moment und überlagerte Spannungen

vorgenommen. In der Praxis besitzt das Rundbiegeverfahren, welches sich dem Biegen durch Moment und Querkraft zuordnen lässt, das größte Potenzial. Zum Biegen von Rohren mit kleinem **Biegefaktor** - Biegeradius zu Rohraußendurchmesser - und großem **Wanddickenfaktor** - Rohraußendurchmesser zu Wandstärke - hat sich speziell das Rotationszugbiegen durchgesetzt [33, 38, 99, 106]. Das Rotationszugbiegen ist in der Lage, die steigenden Anforderungen im Automobilbereich an den Rohrumformprozess zu realisieren [41, 82, 90] und eignet sich zur Umsetzung der Anforderungen in der vorliegenden Arbeit. Im Folgenden wird das Verfahrensprinzip des Rotationszugbiegens schematisch erläutert.

Verfahrensprinzip und Aufbau

Der grundlegende Aufbau des Rotationszugbiegens besteht aus

- einer Biegeschablone,
- einer Klemmbacke und
- einer Gleitschiene (vgl. Abb. 2.5).

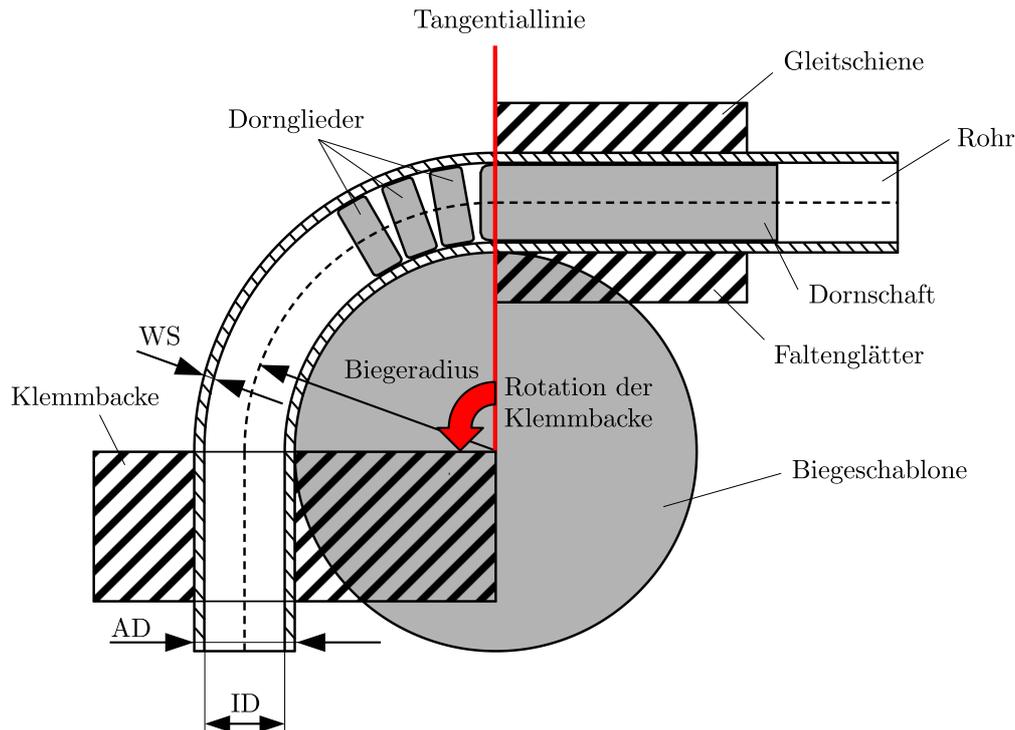


Abbildung 2.5: Schematische Darstellung des Biegeaufbaus mit einer Werkzeugübersicht (AD: Außendurchmesser; ID: Innendurchmesser; WS: Wandstärke)

Die **Biegeschablone** wird am Innenradius des Rohres platziert. Der Radius der Biegeschablone definiert den mittleren Krümmungsradius oder auch Biegeradius des Rohres. Der Biegeradius ist somit der Mittelwert von Rohrrinnenradius und Rohraußenradius am gebogenen Rohr. Die Linie vom Mittelpunkt der Biegeschablone durch den Scheitelpunkt, auf dem das Rohr platziert ist, wird als **Tangentiellinie** bezeichnet. Während des Biegevorgangs beginnt das Rohr um den Bereich der Tangentiellinie zu plastifizieren, weshalb die Tangentiellinie den Beginn der Biegezone definiert. Hinter der Tangentiellinie wird die **Klemmbacke** positioniert, die mit der Biegeschablone verbunden ist und im geschlossenen Zustand das Rohr klemmt. Durch die Rotation der Biegeschablone wird das geklemmte Rohr um die Biegeschablone gezogen. Dadurch wird das Rohr vor der Tangentiellinie in Richtung Außenradius gedrückt. Aus diesem Grund wird vor der Tangentiellinie am Außenradius die **Gleitschiene** positioniert, um das Rohr zu stützen. Die Gleitschiene übt eine Radialkraft auf das Rohr aus und stellt somit einen Widerstand im Bewegungsablauf dar. Wird der Widerstand zu groß, wird der Materialfluss im Biegebereich gestört. Eine zu geringe Kraft kann jedoch einen Spalt zwischen Rohr und Gleitschiene entstehen lassen, wodurch das Rohr nicht mehr ausreichend gestützt wird. Für Rohre mit großen Biegefaktor und kleinem Wanddickenfaktor sind die Klemmbacke, die Biegeschablone und die Gleitschiene ausreichend, um ein fehlerfreies Endergebnis zu realisieren.

Bei Rohren mit kleinem Biegefaktor und großem Wanddickenfaktor sind jedoch aufgrund der höheren Fehleranfälligkeit weitere Werkzeuge notwendig, um ein fehlerfreies Ergebnis zu garantieren. Erfährt das Rohr während der Umformung eine exzessive Stauchung im Innenbogen und eine exzessive Streckung im Außenbogen, führt dies zu ungewollten Umformfehlern. Um diese Umformfehler zu verhindern, werden

- ein Faltenglätter und
- ein Biegedorn

im Aufbau ergänzt. Durch den **Faltenglätter** können Umformfehler - wie Faltenbildung oder Rillenbildung - aufgrund einer exzessiven Stauchung im Innenbogen verhindert werden. Der Faltenglätter wird vor der Tangentiallinie platziert, um das Rohr optimal am Innenradius zu unterstützen. Dadurch werden eine Starrkörperbewegung und ein unkontrollierter Materialfluss nach außen verhindert [60, 121]. Damit er seinen Zweck erfüllt, muss dieser geeignet an der Tangentiallinie positioniert werden. Eine Positionierung der Faltenglätterspitze zu weit hinter der Tangentiallinie lässt die Biegekräfte auf den Faltenglätter statt auf die Biegeschablone wirken und kann dadurch die Spitze beschädigen. Eine Positionierung der Faltenglätterspitze zu weit vor der Tangentiallinie führt zu einem Spalt zwischen Biegeschablone und Faltenglätter und ermöglicht, dass Rohrmaterial in den vorhandenen Spalt fließt. Der gestörte Materialfluss kann einen Faltenwurf im Innenbogen verursachen. Die Streckung im Außenbogen führt zu einer Ovalisierung des Rohrquerschnitts im Biegebereich und dadurch im Extremfall zu einem Einfall der Geometrie am Außenbogen. Zur Verhinderung des Rohreinfalls bzw. zur Reduzierung der Ovalisierung wird im Rohrinnein ein **Biegedorn** verwendet [37]. Die genaue Form des verwendeten Biegedorns ist dabei abhängig vom Anforderungsprofil [43]. Im Allgemeinen muss die Dornform einen Rohreinfall verhindern und einen ausreichenden Materialfluss entlang des Dorns garantieren. Jeder Biegedorn besitzt einen ortsfesten Dornschaft an der Tangentiallinie, da dort die größte Umformarbeit stattfindet und der Beginn der Biegezone und der Ovalisierung ist [60](vgl. Abb. 2.5). Mit sinkendem Biegefaktor und steigendem Wanddickenfaktor wird zusätzlich eine Unterstützung des Innendurchmessers im Biegebereich notwendig. So werden zusätzlich bewegliche Dornglieder am Schaft befestigt (vgl. Abb. 2.6), die dem Biegebereich folgen und diesen während des Biegevorgangs von Innen stützen.



Abbildung 2.6: Biegedorn mit Schaft (rechts) und zwei unterschiedlichen Dorngliedern (links)

Eine falsche Positionierung und Dimensionierung des Dorns kann ebenfalls zu Umformfehlern - wie einer extremen Materialausdünnung oder einem Faltenwurf - führen. Neben der Verhinderung von Umformfehlern muss nach der eigentlichen Umformung zusätzlich eine Konturabweichung bei der Rückfederung berücksichtigt werden. Durch das Lösen der Klemmbacke erfolgt die Rückfederung des Rohres entgegen der ursprünglichen Belastungsrichtung. Dadurch wird der effektive Biegewinkel gegenüber dem Einstellwinkel reduziert. Die Kompensation des Rückfederungsanteils erfolgt durch ein Überbiegen des Rohres.

Zielgrößen

Die wichtigsten Zielgrößen für das Rohrbiegen sind

- der Biegewinkel,
- die Ovalisierung des Rohrquerschnitts (Rohrhöhe, Rohrbreite, Rohrtiefe) und
- die minimale/maximale Wandstärke (vgl. Abb. 2.7).

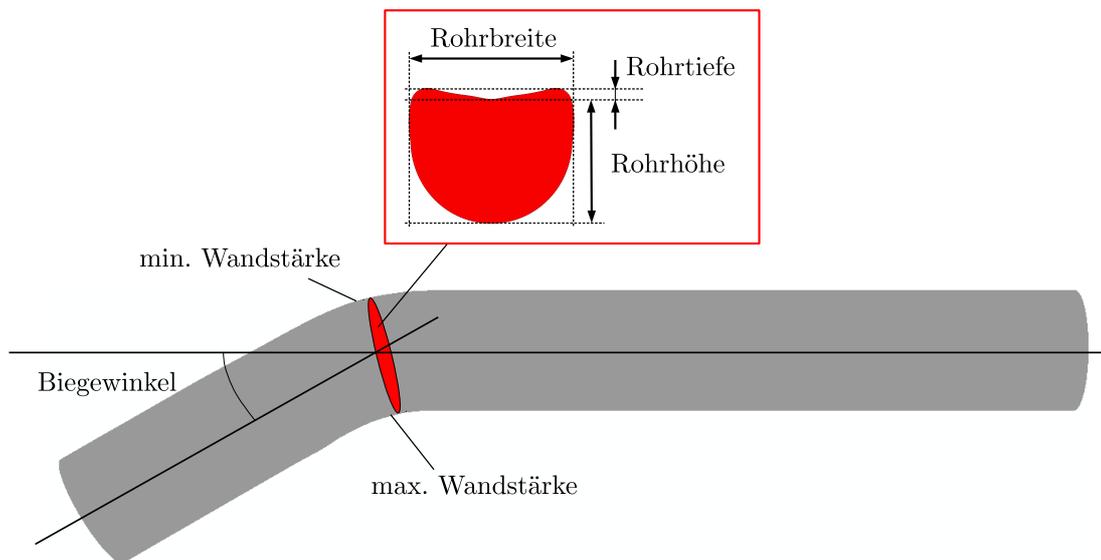


Abbildung 2.7: Relevanten Zielgrößen des gebogenen Rohres

Ziel des Rohrbiegens ist das Realisieren eines Rohrbogens mit definiertem Biegeradius und Biegewinkel. Der Biegeradius wird mittels Radius der Biegeschablone und der **Biegewinkel** über den entsprechenden Rotationswinkel der Biegeschablone festgelegt. Durch die Streckung des Materials im Außenbogen erfährt das Rohr im Biegebereich eine Ovalisierung. Die **Ovalisierung** ist definiert über die Differenz von Rohrbreite zu Rohrhöhe. Die Rohrtiefe beschreibt den Einfall der Rohrgeometrie am Außenbogen, was die Folge einer zu starken Ovalisierung ist. Die Entstehung der Rohrtiefe lässt

sich durch den Einsatz eines geeigneten Biegedorns komplett verhindern. Aufgrund der Materialausdünnung am Außenbogen und der Materialanhäufung im Innenbogen müssen die **Wandstärkenextrema** nach dem Biegeprozess untersucht werden.

Typische Biegeumformfehler

Umformfehler treten in der Regel durch ungeeignete Maschineneinstellungen auf. Typische Umformfehler (vgl. Abb. 2.8) sind

- ein Faltenwurf im Innenbogen,
- ein Einfall der Rohrgeometrie am Außenbogen,
- eine Materialausdünnung am Außenbogen / eine Materialanhäufung im Innenbogen,
- eine Konturabweichung durch Rückfederung und
- eine Rohrschädigung.

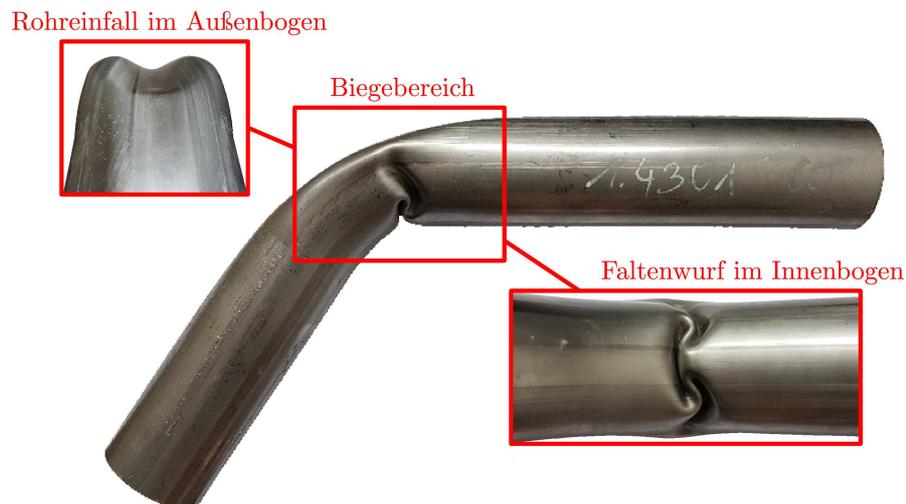


Abbildung 2.8: Typische Biegefehler aufgrund ungeeigneter Maschineneinstellungen

Ein **Faltenwurf** im Innenbogen ist häufig die Ursache falscher Werkzeugeinstellungen. Das Zusammenspiel von Gleitschiene, Faltenglätter und Biegedorn an der Tangentiallinie ist einer der wichtigsten Faktoren bei der Auslegung des Biegeprozesses und die Hauptursache für Fehler. Der **Einfall der Rohrgeometrie** im Außenbogen wird mit steigendem Wanddickenfaktor und sinkendem Biegefaktor zunehmend problematisch und muss durch einen Biegedorn verhindert werden. Eine zu starke **Materialausdünnung** ist die Folge einer falschen Dimensionierung des Biegedorns. Die **Konturabweichung durch die Rückfederung** muss im Vorfeld berücksichtigt werden und somit

geeignet kompensiert werden. Eine **Schädigung des Materials** entsteht bei einem unzureichenden Materialfluss entlang des Dorns oder bei einer falschen Schweißnahtpositionierung. Ist die Reibung zwischen Rohr und Biegedorn zu groß, können sich die Dornlieder im Rohr festhaken und das Material schädigen (vgl. Abb. 2.9).



Abbildung 2.9: Riss im Rohrbogen aufgrund falscher Dorneinstellungen

Eine zu große Reibung erhöht zusätzlich die benötigte Kraft im Biegeprozess [34, 71]. Obwohl die Reibung nur bedingt kontrollierbar ist, müssen die Einflussfaktoren sorgfältig, beispielsweise durch die Verwendung von Schmiermitteln, berücksichtigt werden. Die Schweißnaht muss möglichst in der neutralen Faser positioniert werden, damit der Einfluss auf die Umformung und die Gefahr einer Materialschädigung am geringsten sind. Die neutrale Faser kennzeichnet den Übergang von druckbeanspruchter Zone zu zugbeanspruchter Zone und ist damit ein schmales Gebiet, in dem das Rohr weder eine Stauchung noch eine Streckung erfährt.

2.2.2 Rohrprägen

Das Prägen bezeichnet eine Druckumformung und lässt sich nach DIN 8583 [27] den Eindrückverfahren zuordnen [118]. Aufgrund der bisher geringen Verwendung des reinen Rohrprägens existiert keine eindeutige Definition des Prozesses. Regionale Bezeichnungen - wie Dallen - oder ähnliche Prozesse - wie die Vorformung des Innenhochdruckprozesses - erschweren zusätzlich eine einheitliche Definition. Die meisten Eindrückverfahren werden an flachen Werkstücken definiert, wodurch die Probleme bei der Anwendung an gekrümmten Oberflächen in der Norm nicht explizit genannt werden. Im Allgemeinen bewirkt das Prägen durch ein geometrieabbildendes Werkzeug (Prägestempel) das Eindrücken einer Werkstückoberfläche [44, 107, 118]. Im speziellen Fall des Rohrprägens wird das Eindrücken der Werkstückoberfläche verwendet, um den Rohrquerschnitt gezielt in einem begrenzten Bereich zu ändern.

Dazu wird zwischen

- einer lokal begrenzten Querschnittsänderung und
- einer globalen Querschnittsänderung

unterschieden. Globale Querschnittsänderungen sind notwendig, wenn die Querschnittsform über größere Abschnitte geändert werden soll (vgl. Abb. 2.10).

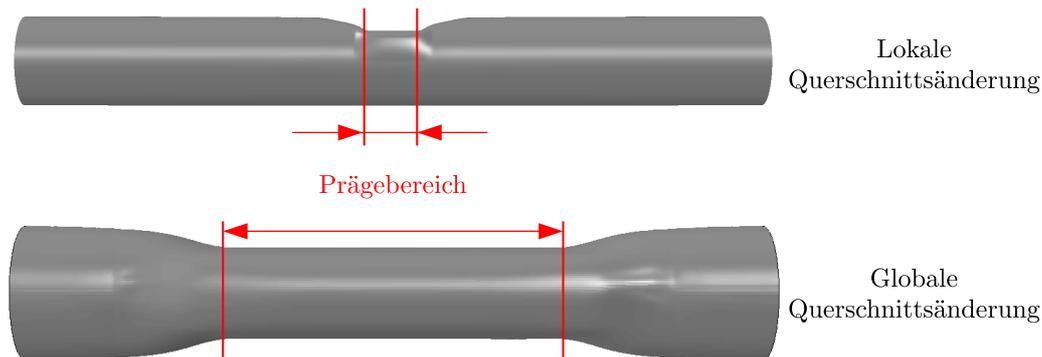


Abbildung 2.10: Unterschiedliche Prägeergebnisse bei einer lokalen und einer globalen Querschnittsänderung

Dadurch entsteht notwendigerweise ein großer Materialfluss. Da im Rahmen der Arbeit nur die lokale Querschnittsänderung untersucht wird, wird die globale Querschnittsänderung im Folgenden nicht weiter thematisiert. Zum Verständnis der Arbeit wird im folgenden Abschnitt das Verfahrensprinzip der lokal begrenzten Querschnittsänderung schematisch erläutert.

Verfahrensprinzip und Aufbau

Das Rohrprägen verändert gezielt den Rohrquerschnitt durch die Verwendung

- einer Rohrklemmung und
- eines Prägestempels (vgl. Abb. 2.11).

Die **Rohrklemmung** unterbindet während der Umformung eine Starrkörperbewegung des Rohres und verhindert einen unkontrollierten Materialfluss nach außen. Durch den Einsatz gezielter Freiräume kann zusätzlich der Materialfluss gesteuert werden. Zu wenig Freiraum um die Prägefläche führt bei großen Deformationen zu einem Materialfluss ins Rohrinne. Dies ist durch einen unerwünschten Einfall der Rohrgeometrie im Prägebereich erkennbar. Vordeformationen am Rohr durch beispielsweise einen Biegeprozess führen zu einer notwendigen Anpassung der Rohrklemmung, da die vorhandenen Eigenspannungen, die Verfestigung des Werkstoffs und der ovalisierte Querschnitt im

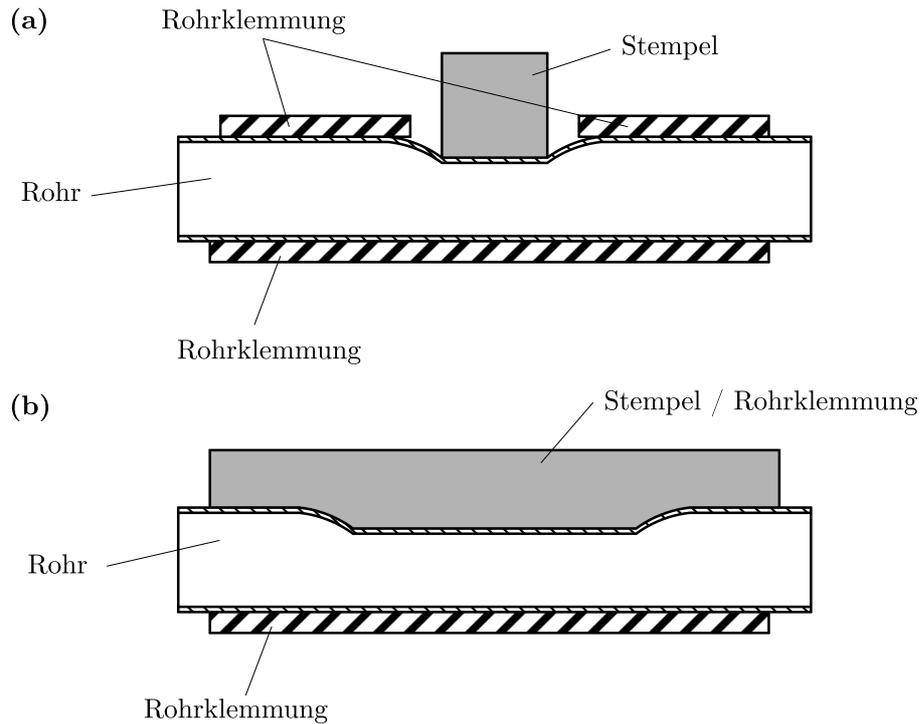


Abbildung 2.11: Schematische Darstellung des Prägeaufbaus mit einer Werkzeugübersicht: Prägen mit einem separaten Stempelwerkzeug (a); Prägen mit einem in die Rohrklammer integrierten Stempel (b)

Biegebereich den Materialfluss beeinflussen. Die Querschnittsminderung wird durch einen **Prägestempel** realisiert. Die Ausbildung der finalen Prägefläche ist stark von der Geometrie des Stempels und vom gewählten Stempelhub abhängig. Damit die gewünschte Querschnittsminderung realisiert werden kann, müssen der Stempel und die Rohrklammer aufeinander abgestimmt sein. Für eine **lokal begrenzte Querschnittsänderung** werden sowohl der Stempel als auch die Rohrklammer als eigenständige Werkzeuge eingesetzt (vgl. Abb. 2.11 (a)). Eine Integration des Prägestempels in die Rohrklammer erfolgt bei globalen Querschnittsänderungen, um den großen Materialfluss besser lenken zu können (vgl. Abb. 2.11 (b)). Da die Rohrklammer das komplette Rohr umfasst, ist eine Öffnung für den Stempel notwendig. Bei der Öffnung, die mindestens die gleichen Maße haben muss wie die Stempelfläche, müssen ein hubabhängiger Freiraum und ein Übergang zum ungeprägten Bereich beachtet werden (vgl. Abb. 2.12). Mit steigendem Stempelhub nimmt der Materialfluss des Rohres zur Seite hin zu. Der Fluss muss durch einen ausreichenden Freiraum um die Prägefläche herum berücksichtigt werden. Der Übergangsbereich in Rohrlängsrichtung garantiert einen weichen Übergang zwischen geklemmten Rohrbereich und Prägefläche. Ohne ausreichenden Platz kann das Material im Übergang Falten werfen und somit schädigen. Die Stempellänge in Längsrichtung des Rohres ist abhängig von den notwendigen Abmaßen der Querschnittsminderung. Dabei hat die Stempelbreite mindestens die Länge

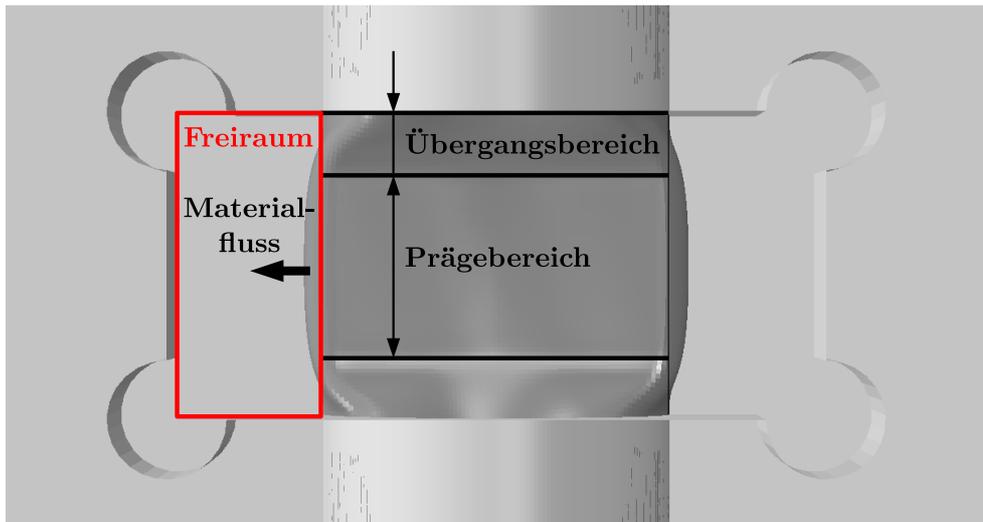


Abbildung 2.12: Übersicht der Raumverteilung im Prägebereich

des Rohraußendurchmessers. Damit ein weicher Übergang zum ungeprägten Bereich geschaffen wird, ist zusätzlich eine Kantenverrundung am Stempel notwendig. Die Auswahl des Stempels wird in der Industrie durch die Forderung nach einer planen Prägefläche erschwert.

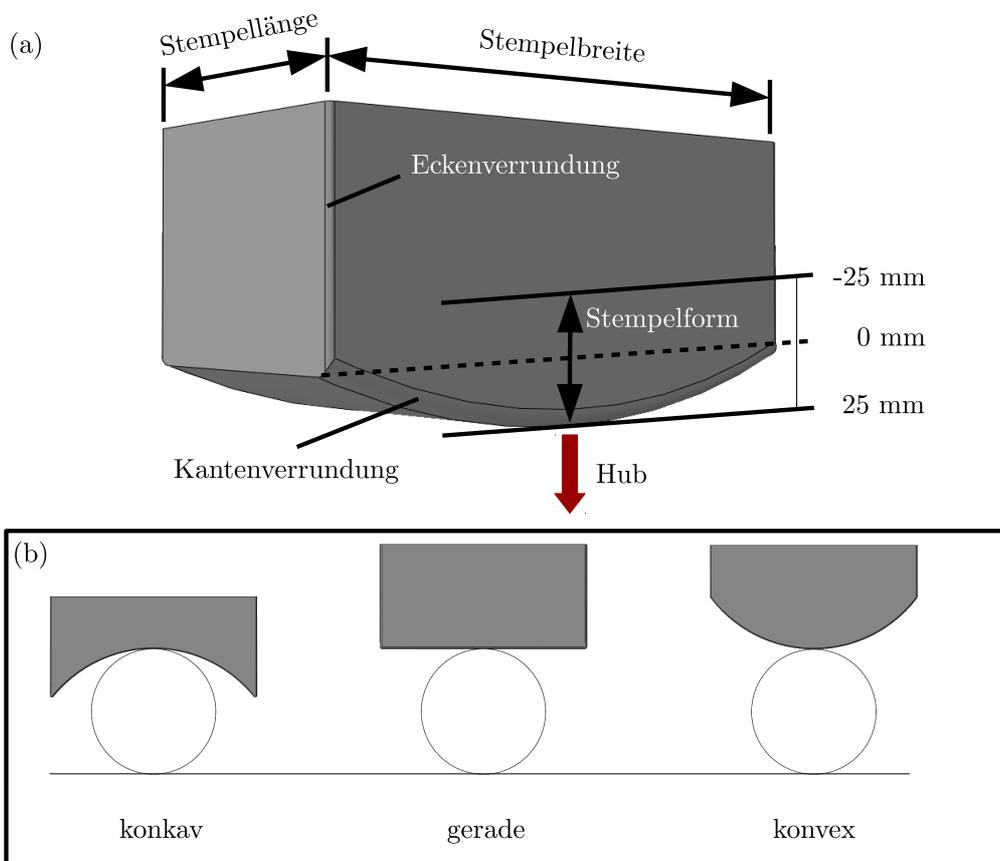


Abbildung 2.13: Variationsmöglichkeiten beim Prägestempel (a) und die drei Hauptstempel-formen (b)

Die Form des Stempels in Breitenrichtung des Rohres besitzt eine wesentliche Rolle (vgl. Abb. 2.13), da aus der konvexen Rohroberfläche eine möglichst plane Prägefläche realisiert werden soll. Um den Materialfluss geeignet zu lenken, muss je nach Prägeanforderungen die Stempelfläche gekrümmt werden (vgl. Abb. 2.13 (b)).

Zielgrößen

Die wichtigsten Zielgrößen für das Rohrprägen sind

- die Prägehöhe,
- die Prägebreite,
- die Prägetiefe und
- die Länge des Prägebereichs (vgl. Abb. 2.14).

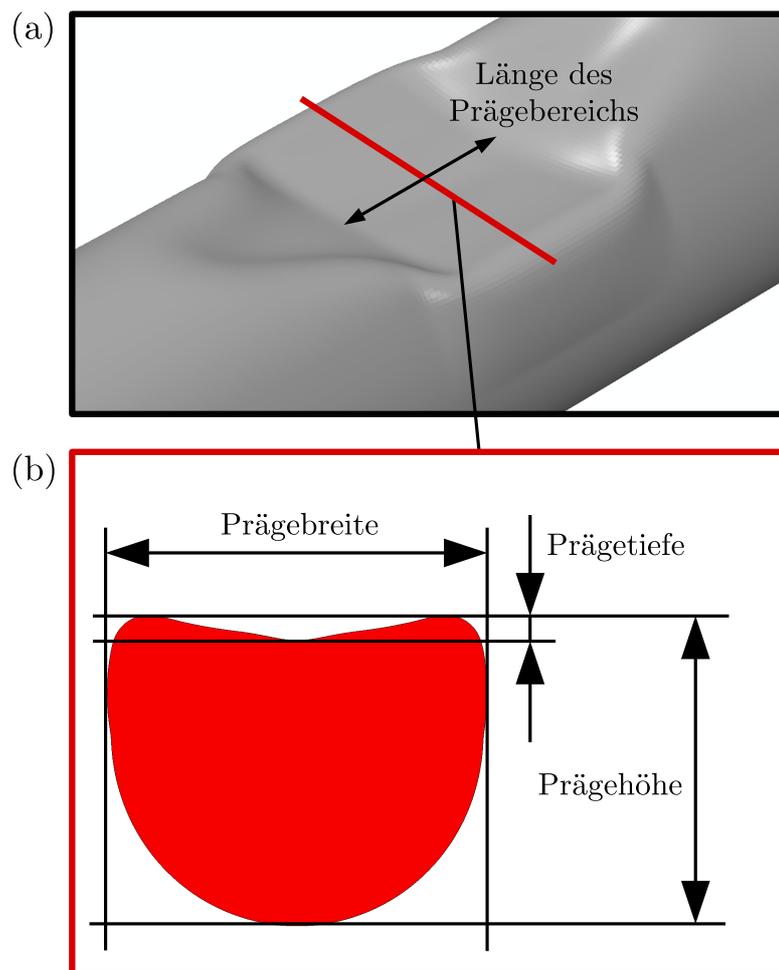


Abbildung 2.14: Relevanten Zielgrößen des geprägten Rohres: relevante Auswerteposition (a) und geometrische Ergebnisparameter (b)

Ziel des Prägeprozesses ist eine gezielte Querschnittsreduzierung und somit das Erreichen einer definierten **Prägehöhe**. Die geforderte Prägehöhe ist definiert durch die Differenz von Rohraußendurchmesser und effektiven Stempelhub. Je kleiner die Rohrhöhe sein muss, desto größer muss der Stempelhub eingestellt werden. Ein großer Stempelhub bewirkt jedoch eine Verbreiterung des Querschnitts senkrecht zum Hub, die durch die **Prägebreite** definiert wird. Der Einfall der Rohrgeometrie wird über die **Rohrtiefe** definiert und resultiert aus dem Übergang von konvexer Rohroberfläche zu planer Rohroberfläche. Die Prägetiefe ist der horizontale Abstand zwischen dem höchsten und dem tiefsten Punkt der Prägefläche. In der Industrie ist ein Einfall der Rohrgeometrie in der Prägefläche aufgrund der Optik unerwünscht, wodurch die Prägetiefe ein Fehlermaß darstellt. Die **Länge des Prägebereichs** in Längsrichtung wird durch die Stempellänge realisiert.

Typische Prägeumformfehler

Die Prägeumformung führt zu einer starken Deformation in einem lokal begrenzten Bereich. Der Materialfluss und die Ausbildung des Rohrquerschnitts sind stark von den Prägewerkzeugen abhängig. Falsche Prägewerkzeuge oder unzureichender Freiraum um die Prägestelle führen zu Umformfehlern. Typische Umformfehler sind

- ein Einfall der Rohrgeometrie,
- eine starke Verbreiterung des Rohres,
- eine Konturabweichung wegen Rückfederung und
- ein Faltenwurf (vgl. Abb. 2.15).

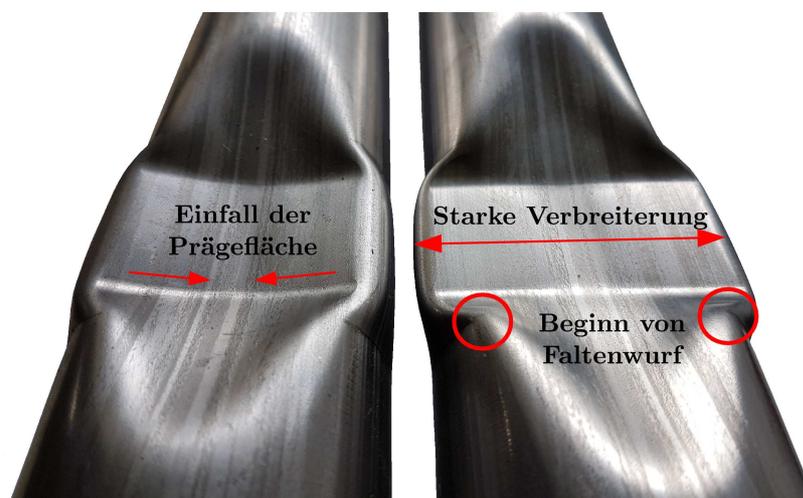


Abbildung 2.15: Typische Prägefehler aufgrund falscher Werkzeugeinstellungen; Rohreinfall (links), starke Verbreiterung und Beginn eines Faltenwurfs (rechts)

Der **Einfall der Rohrgeometrie** ist aufgrund der gekrümmten Rohroberfläche nur mit geeigneten Werkzeugen zu verhindern. Die Forderung nach einer möglichst planen Fläche nach dem Prägen ist bei großen Verfahrenswegen schwer zu realisieren. Zusätzlich steigt mit größer werdendem Hub der Materialfluss nach außen, wodurch der Querschnitt eine **starke Verbreiterung** erfährt. Die Verhinderung des Rohreinfalls und die gleichzeitige Begrenzung der Prägebreite stellen ein großes Problem dar. Die Rückfederung beim Zurückfahren des Stempels führt zu **Konturabweichungen** in der finalen Querschnittsform. Hat das Rohr während des Prägens im Übergang nicht genügend Freiraum oder keinen ausreichenden Übergangsbereich, kann das zu **Umformfehler** - wie z.B. Faltenwurf - führen. Bei gebogenen Rohren besitzt der Übergangsbereich eine noch größere Bedeutung. Der gebogene Bereich ist bereits verfestigt und hat Eigenspannungen, die die Form im Übergangsbereich beeinflussen können. Ein Prägen in gebogenen Abschnitten ist somit stark von der vorherigen Umformung abhängig und muss daher besonders berücksichtigt werden. Zusätzlich ist die Positionierung der Schweißnaht ein wichtiger Faktor zur Verhinderung von Umformfehlern. Beim Prägen wird dazu die Schweißnaht gegenüber der Krafteinleitungsstelle positioniert.

2.3 Prozessaufbau

2.3.1 Umformwerkstück

In dieser Arbeit werden geschweißte Stahlrohre (von Fischer Edelstahlrohre GmbH, Achern-Fautenbach) mit einem Nennaußendurchmesser von 60 mm, einer Nennwandstärke von 1,2 mm und einer Nennlänge von 500 mm gemäß den technischen Lieferbedingungen nach DIN EN 10296-2 [29] untersucht (vgl. Abb. 2.16).

Die Stahlrohre sind aus zwei verschiedenen Edelstählen, dem Material 1.4301 und dem Material 1.4509, gefertigt. Die entsprechenden Materialparameter der zwei Materialien wurden durch Zugversuche ermittelt. Die Zugproben werden dazu in axialer Rohrrichtung aus der schweißnahtfreien Zone mittels Laser ausgeschnitten (vgl. Abb. 2.17).

Die Größe der Proben unterliegt der Norm DIN EN ISO 527-2-1BA [31]. Insgesamt werden fünf Proben jedes Materials untersucht. Die Zugproben werden mit Hilfe einer Universalprüfmaschine Elektro Puls E10000 Linear-Torsion der Firma Instron (Norwood, Massachusetts, USA) geprüft. Die Versuchsdurchführung erfolgt mit einer Dehnrates von $0,00029 \text{ s}^{-1}$ bis zum Versagen der Probe. Während der Versuche werden der Maschinenweg und die Kräfte kontinuierlich gemessen. Zusätzlich erfolgt eine Aufzeichnung der Proben mittels eines Vier-Kamerasystems, wodurch eine dreidimensionale Auswertung der lokalen Dehnungen auf Basis der Digitalen Bildkorrelation (engl. Digital Image Correlation, DIC) möglich ist. Die DIC erfolgt durch die kommerzielle Software

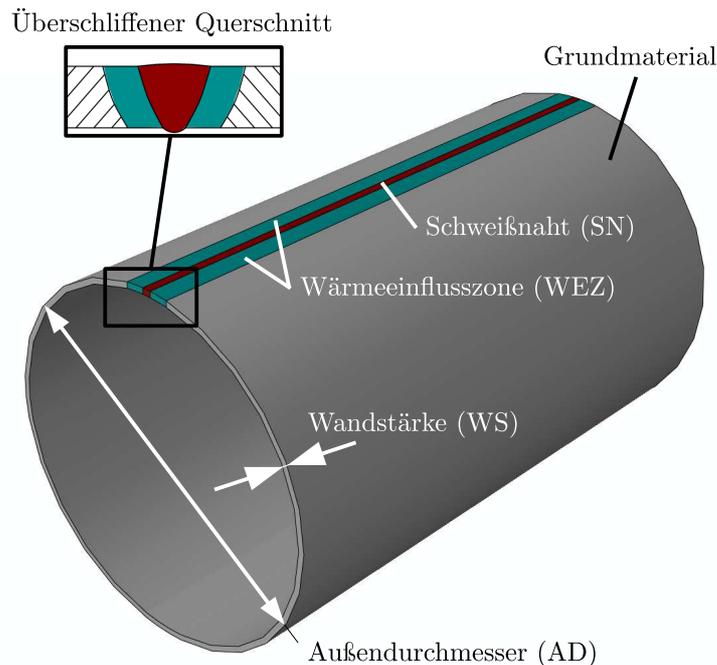


Abbildung 2.16: Schematische Darstellung eines geschweißten Rohres. Der vergrößerte Ausschnitt zeigt den überschleifenen Querschnitt der Schweißzone mit den verschiedenen Bereichen.



Abbildung 2.17: Lasergeschnittene Zugproben aus dem schweißnahtfreien Abschnitt des Rohres

ISTRA4D[®] (Dantec Dynamics A/S, Skovlunde, Denmark). Die Auswertung durch die DIC liefert eine lokale Dehnungsverteilung des deformierten Gebietes. Die aktuelle Querschnittsfläche der Probe kann somit zu jedem Zeitschritt bestimmt werden. Die wahre Spannung wird dann über die aktuelle Querschnittsfläche ermittelt. Tabelle 2.1 zeigt die charakteristischen Materialparameter der zwei untersuchten Materialien und Abbildung 2.18 zeigt die entsprechenden Fließkurven. Das Material 1.4301 weist eine deutlich höhere Duktilität auf als das Material 1.4509, was für eine bessere Umformbarkeit spricht. Die höhere Duktilität ergibt sich aus dem mehr als doppelt so großen maximalen Formänderungsvermögen und der fast dreifach so hohen Zugfestigkeit des Werkstoffs.

Tabelle 2.1: Die charakteristischen Materialkennwerte für die Materialien 1.4301 und 1.4509

Material	E-Modul [GPa]	Fließgrenze [MPa]	Zugfestigkeit [MPa]	max. plast. Dehnung [-]
1.4301	200	431	1191	0,564
1.4509	220	394	585	0,234

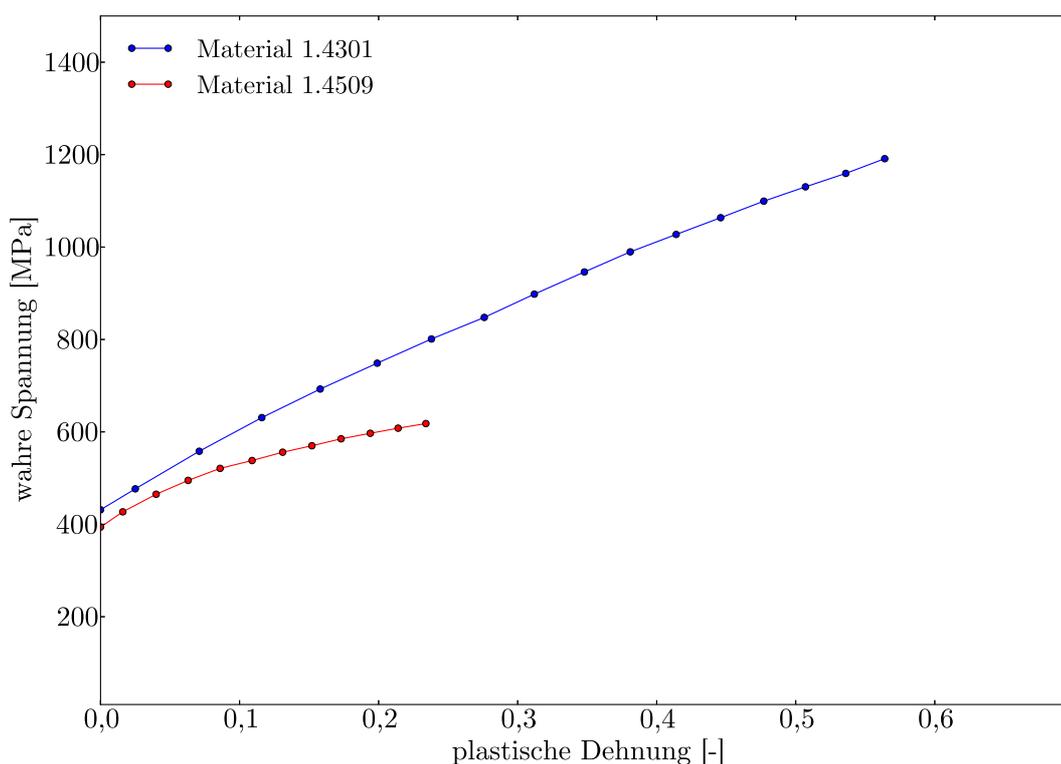


Abbildung 2.18: Experimentell ermittelte Fließkurven für die Materialien 1.4301 und 1.4509

Da die Schweißnaht je nach Positionierung im Umformprozess einen Einfluss auf das Umformergebnis haben kann, werden im Rahmen der vorliegenden Arbeit mittels Mikrohärteprüfung die Abmaße der Schweißzone ermittelt. Die Schweißzone besteht aus der Schweißnaht und einer umliegenden Wärmeinflusszone (vgl. Abb. 2.16), deren Größe abhängig vom Material und vom Schweißverfahren ist [4, 137]. Innerhalb der Schweißzone herrscht eine inhomogene Verteilung der Materialeigenschaften. Die Abgrenzungen der einzelnen Bereiche können über die Mikrohärte mittels Vickers-Mikroindenter (Walter Uhl, technische Mikroskopie GmbH & Co. KG, ABlar) ermittelt werden. Die Vickershärte wird über die Diagonale des Eindruckbereichs und der dazugehörigen Kraft errechnet [65]. Die Eindrücke erfolgen unter einer Kraft von 490,3 mN, einer Geschwindigkeit von $40 \mu\text{m s}^{-1}$ und einer Verweilzeit von 10 s. Damit das Rohr nicht im

Gesamten eingedrückt wird, sondern nur das Material, wurde das Rohr von innen mit einem Harz gefüllt. Die Eindringtiefe darf zudem maximal ein Zehntel der Wandstärke betragen, da sonst Einflüsse durch die Füllung gemessen werden können. Ausgehend von der Schweißnaht werden die Eindrücke in 1 mm-Schritten in Umfangsrichtung des Rohres bis zum Erreichen des Grundmaterials vollzogen (vgl. Abb. 2.19). Das Messen in Umfangsrichtung wird fünf mal in 10 mm-Schritten entlang der axialen Richtung wiederholt und daraus die Mittelwerte gebildet.

Die Mikrohärtigkeit steigt vom Grundmaterial zur Schweißnaht hin an und weist im Zentrum der Schweißnaht das Maximum auf (vgl. Abb. 2.20). Durch den gradierten Verlauf der Mikrohärtigkeit wird die inhomogene Verteilung der Materialeigenschaften in der Wärmeeinflusszone deutlich. Die Abmaße der Schweißzone und auch die Auswirkungen des Schweißprozesses auf die Mikrohärtigkeit sind beim Material 1.4301 größer als für das Material 1.4509. Im Rahmen der folgenden Experimente wird die Schweißzone immer so positioniert, dass der Einfluss auf das Umformergebnis minimal ist. Eine explizite Berücksichtigung der Schweißnaht in den Simulationen findet im Weiteren nicht statt, da diese eine umfangreichere Charakterisierung der Eigenschaften erfordert und nicht Ziel dieser Arbeit ist.

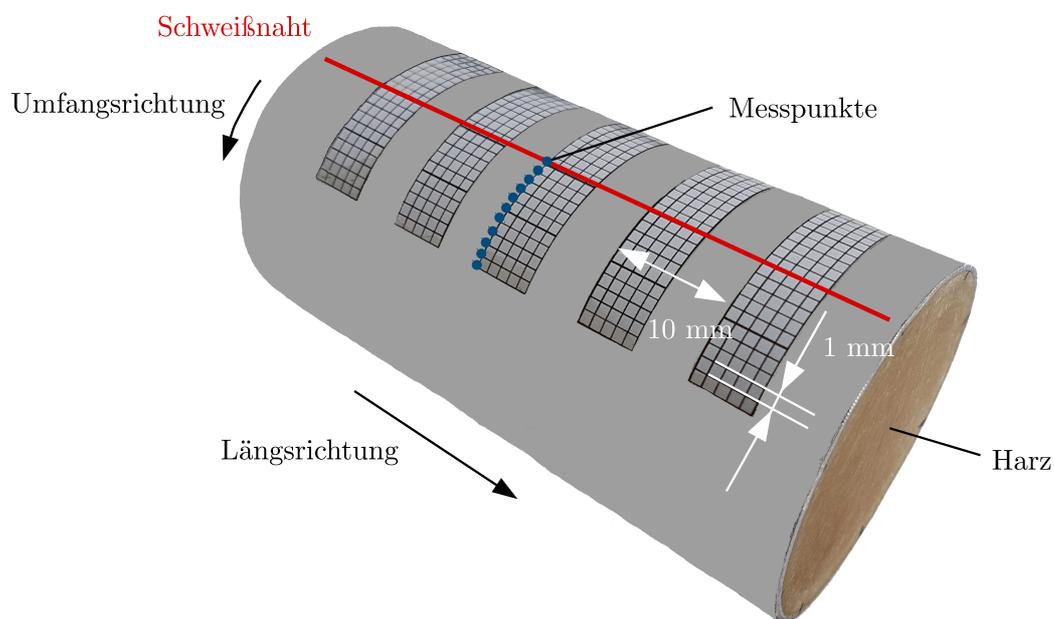


Abbildung 2.19: Eindruckpositionen entlang der Schweißnaht des Rohres

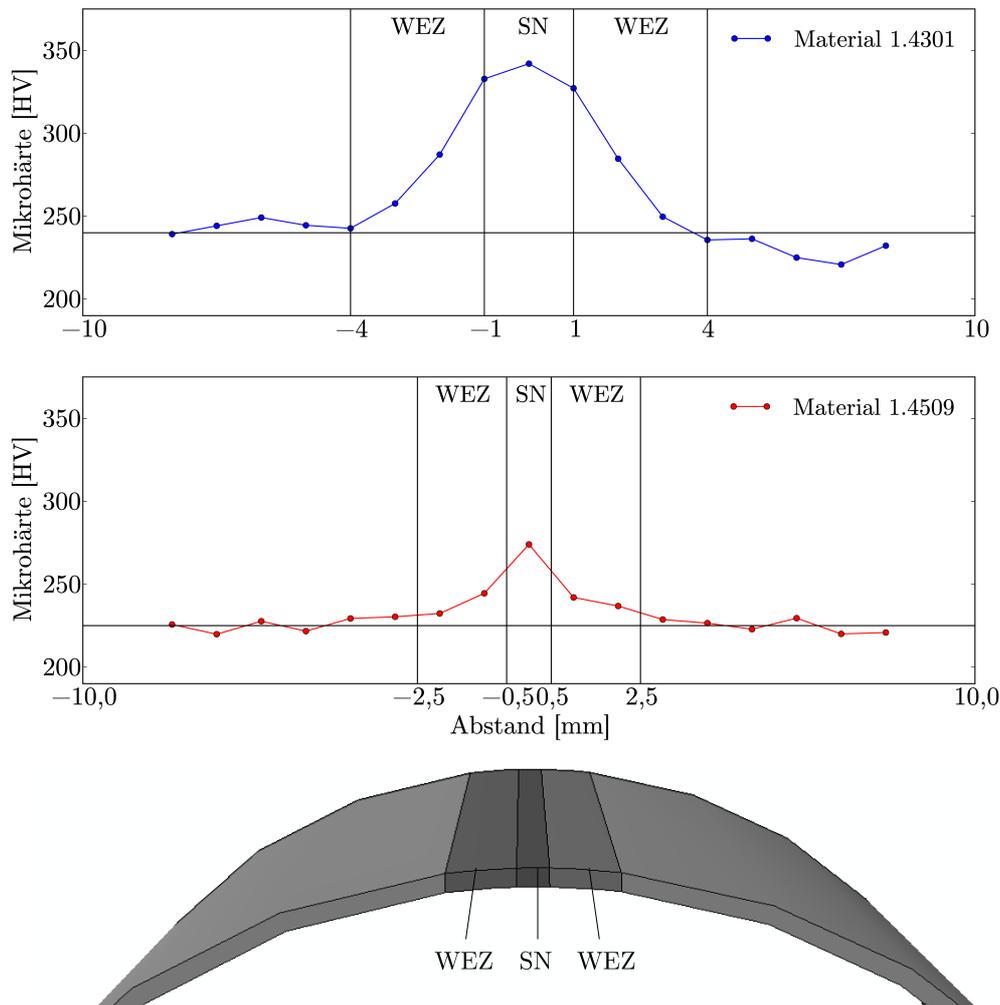


Abbildung 2.20: Mikrohärteverteilung entlang der Schweißzone des Materials 1.4301 (oben) und des Materials 1.4509 (unten) (SN: Schweißnaht; WEZ: Wärmeinflusszone)

2.3.2 Umformwerkzeuge

Im Folgenden werden die realen Versuchsaufbauten zum Biegen und Prägen von Stahlrohren vorgestellt, die die Basis für die nachfolgende Simulationen bilden. Dazu werden die Aufbauten der jeweiligen Einzelprozesse und die des kombinierten Prozesses erläutert. Die Errichtung und auch die Durchführung der Versuche erfolgte durch die Firma Brabant & Lehnert GmbH (Wadern, Deutschland) im engen Austausch mit dem Lehrstuhl für Technische Mechanik. Der größte Teil der Versuchsdurchführungen wurde gemeinsam unternommen, lediglich ein kleiner Teil wurde nach festdefinierten Vorgaben in Eigenleistung durch Brabant & Lehnert durchgeführt. Die anschließende Auswertung der umgeformten Rohre wurde definiert und mittels digitalisierter Umformergebnisse realisiert.

Prägen gerader Rohre

Der Aufbau des einfachen Prägeprozesses an geraden Rohren erfolgt mit Hilfe einer hydraulischen Presse (Schuler AG, Göppingen) und besteht aus

- einer Rohrklemmung und
- einem Prägestempel (vgl. Abb. 2.21).

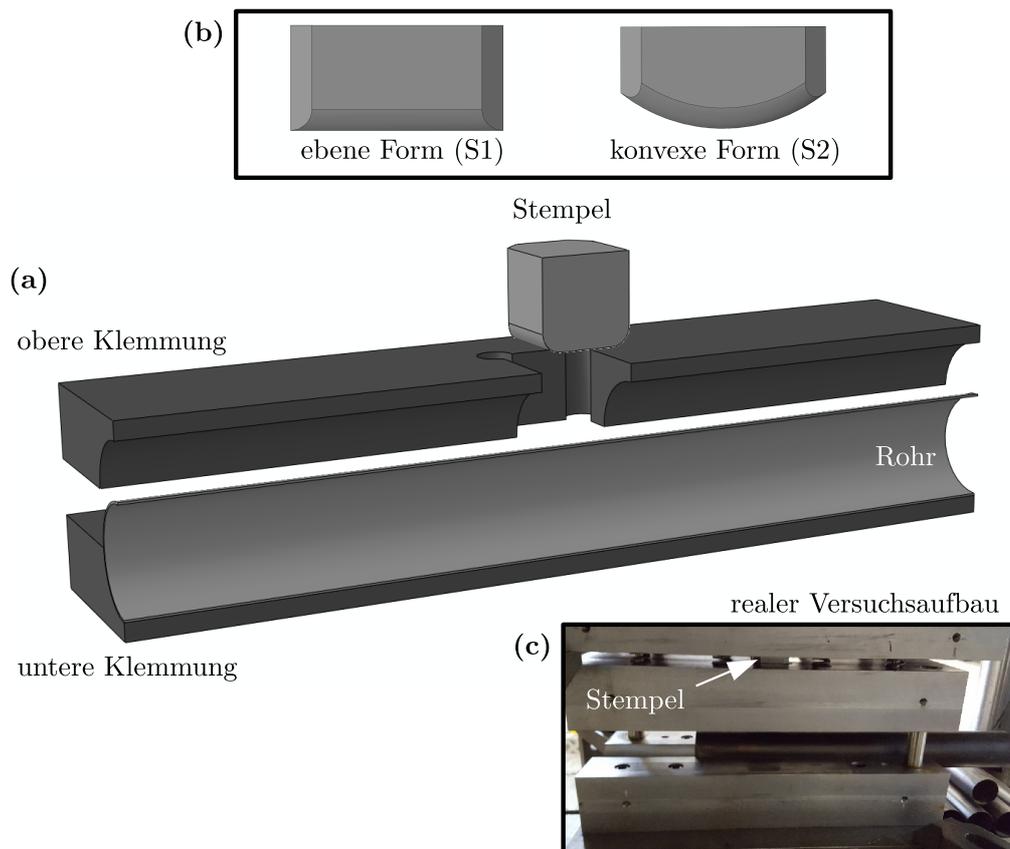


Abbildung 2.21: Schematische Darstellung der Werkzeuge für den realen Prägeprozess zur besseren Visualisierung (a), die im Experiment verwendeten Stempelformen (b) (dargestellte Flächen in Rohrbreitenrichtung) und der reale Versuchsaufbau (c)

Die **Rohrklemmung** besteht aus zwei Blöcken mit jeweils einer Halbrohraussparung, die je einen Nenninnenradius von 30 mm aufweisen (vgl. Abb. 2.21 (a)). Das Rohr wird im unteren Block platziert und durch Hinabfahren des oberen Blocks geklemmt. Die obere Klemme besitzt eine mittig gelegene Öffnung für den Prägestempel. Die Öffnung hat eine Länge von 52 mm in Rohrlängsrichtung und eine Breite von 110 mm. Die Stempelöffnung ist breiter als das Rohr, wodurch in der oberen Klemme ein zusätzlicher Freiraum um das Rohr existiert. Der Freiraum um die Prägestelle ist entscheidend für den Materialfluss nach außen und somit zum Erhalt eines fehlerfreien Umformergebnisses.

Beim Versuchsaufbau werden zwei unterschiedliche **Stempeltypen** mit einer ebenen Prägefläche (S1) und einer konvex gekrümmten Prägefläche (S2) verwendet (vgl. Abb. 2.21 (b)). Die Stempel haben eine Länge von 50 mm, eine Breite von 100 mm und eine Kantenverrundung von 10 mm. Die Ecken werden mit einer Fase von 10 mm versehen. Für den konvexen Stempel werden die Außenkanten der Prägefläche (im Querschnitt die äußeren Punkte) um 25 mm nach oben verschoben, sodass bei gleichbleibender Höhe der Mittellinie eine konvexe Verrundung der Prägefläche entsteht.

Der Stempelhub und die Klemmung des Rohres erfolgen kraftgesteuert. Der maximale Stempelhub von 19 mm wird durch Unterlegscheiben begrenzt, wodurch der effektive Stempelhub eingestellt wird. Die Umformgeschwindigkeit beträgt dabei 5 mm s^{-1} . Die Positionierung des Rohres in der Klemmung erfolgt ohne zusätzliche Schmierung.

Biegen gerader Rohre

Das Rohrbiegen wird mit Hilfe des Rotationszugbiegens realisiert. Die Biegemaschine besteht aus

- einer Biegeschablone,
- einer Klemmbacke,
- einer Gleitschiene,
- einem Faltenglätter und
- einem zufahrbaren Biegedorn mit drei Gliedern (vgl. Abb. 2.22).

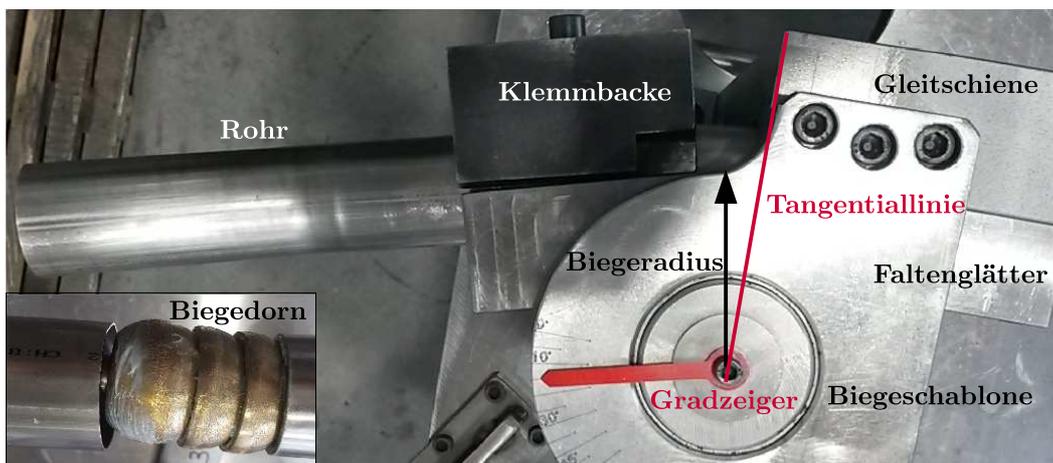


Abbildung 2.22: Werkzeuge für den realen Biegeprozess

Durch die **Biegeschablone** wird der Biegeradius auf 110 mm festgelegt und die Position der **Tangentiallinie** definiert. Hinter der Tangentiallinie ist die **Klemmbacke**

platziert, die aus zwei Blöcken mit jeweils einer Halbrohraussparung mit Radius 30 mm besteht. Ein Zusammenfahren der Blöcke führt zum Klemmen des Rohres. Die Länge der Klemmbacke beträgt 100 mm und die Rohrlänge hinter der Tangentiallinie beträgt 135 mm. Die Klemmbacke ist fest mit der Biegeschablone verbunden und rotiert mit dieser während des Biegeprozesses um den Mittelpunkt der Biegeschablone. Vor der Tangentiallinie sind die **Gleitschiene** und der **Faltenglätter** ortsfest platziert. Beide Werkzeuge bestehen aus jeweils einem Block (Länge 100 mm) mit einer Halbrohraussparung (Nenninnenradius 30 mm). Fertigungsbedingt existiert ein Spalt von knapp 3 mm zwischen Faltenglätterspitze und Tangentiallinie (vgl. Abb. 2.23). Voruntersuchungen haben gezeigt, dass ein Spalt von knapp 3 mm keinen problematischen Einfluss auf das Umformergebnis hat. Der optional einsetzbare **Biegedorn** (im Folgenden: BL-Dorn) besteht aus einem ortsfesten Schaft und drei beweglichen Gliedern. Durch den Biegedorn soll während der Umformung der Rohreinfall am Außenbogen verhindert werden, was aufgrund eines Biegefaktors von 1,83 und eines Wanddickenfaktors von 50 im Rahmen der Arbeit notwendig ist. Die Schaftspitze wird an der Tangentiallinie platziert, sodass dort der Innendurchmesser des Rohres gestützt wird (vgl. Abb. 2.24). Die beweglichen Dornglieder befinden sich dadurch im Biegebereich und können der Abflachung des Außenbogens entgegenwirken. Nach dem Biegeprozess erfolgt ein Dornrückzug, der entstandene Gliederabdrücke im Material glättet.

Zur Durchführung von Mehrfachbiegungen wird die Rohrklammung nach dem Biegeprozess gelöst und das Rohr um den gewünschten Betrag aus der Maschine gezogen. Zur erneuten Montage der Rohrklammung muss das Rohr mindestens um die Länge der Klemmbacke verschoben werden. Zusätzlich kann das Rohr um einen beliebigen Winkel

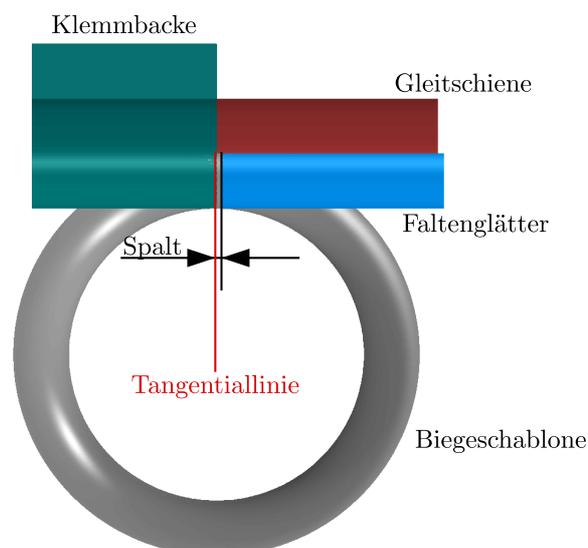


Abbildung 2.23: Schematische Zeichnung des fertigungsbedingten Spalts zwischen Faltenglätterspitze und Tangentiallinie

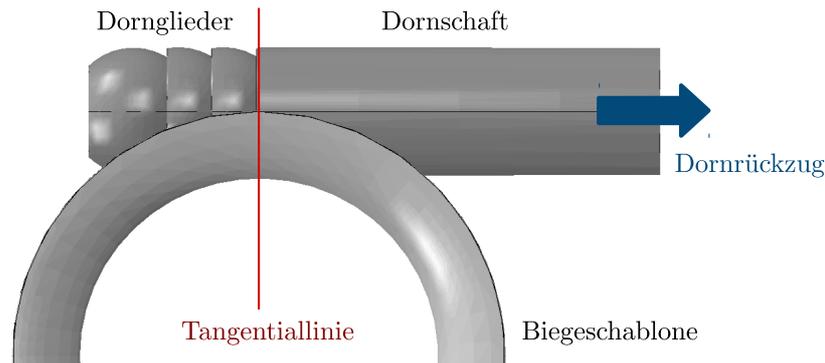


Abbildung 2.24: Schematische Zeichnung der Dornpositionierung in Bezug zur Tangentiallinie und die Richtung des Dornrückzugs

rotiert werden. Durch die gegebene Rohrlänge von 500 mm sind mit den angegebenen Werkzeugeinstellungen zwei Biegungen pro Rohr möglich.

Die Randbedingungen beinhalten eine kraftgesteuerte Rotation der Biegeschablone mit einer Umformgeschwindigkeit von 10° s^{-1} . Der effektive Biegewinkel wird über eine Winkelanzeige geregelt (vgl. Abb. 2.22). Für jeden Biegeversuch wurden der Faltenglätter und der Biegedorn mit einem Öl-Fettgemisch geschmiert, um die Reibung zu reduzieren. Die Oberfläche der Klemmbacke ist rau, um die Klemmwirkung zu verstärken.

Prägen gebogener Rohre

Die Kombination aus Biegen und Prägen von Rohren ist ein **zweistufiger Prozess**. Im ersten Schritt wird das Rohr, wie im vorherigen Abschnitt beschrieben, durch Vorgabe eines Biegeradius und eines Biegewinkels gebogen. Im zweiten Schritt wird das gebogene Rohr von der Seite an drei verschiedenen Positionen geprägt. Der Prägeprozess wird analog zum einfachen Prägeprozess mit einer Presse durchgeführt und besteht aus

- einer Rohrklammung und
- drei Prägestempel.

Zum Prägen eines gebogenen Rohres musste eine **adaptive Rohrklammung** entwickelt werden. Die adaptive Rohrklammung besteht aus einem festen geraden Klemmstück, einem austauschbaren winkelabhängigen Klemmstück und einem verstellbaren geraden Klemmstück (vgl. Abb. 2.25). Der austauschbare Teil des Werkzeugs ermöglicht die Klammung von Rohren mit unterschiedlichen Biegewinkeln. Im Rahmen der Arbeit können vier Biegewinkel 15° , 30° , 45° und 60° untersucht werden. Der Biegeradius wird auf 110 mm festgelegt. Das Rohr wird in der unteren Klemmvorrichtung platziert und wie beim einfachen Prägen durch das Hinabfahren der oberen Klemmvorrichtung geklemmt. Zur Untersuchung positionsabhängiger Biegeeffekte wird das Rohr im geraden Bereich (1) im Übergangsbereich (2) und im gebogenen Bereich (3) geprägt (vgl.

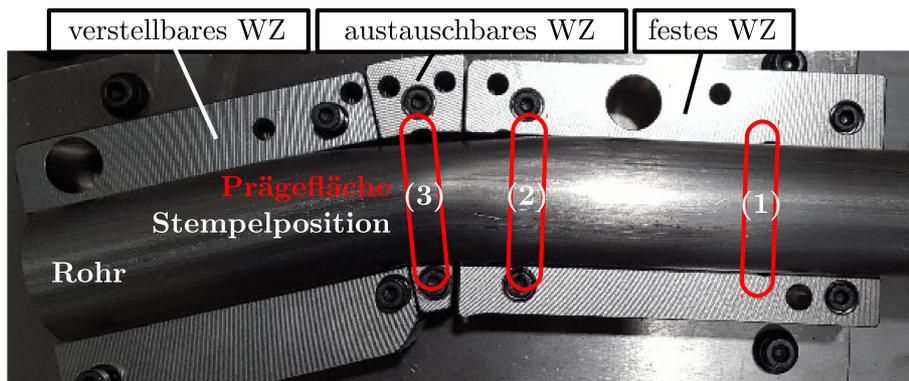


Abbildung 2.25: Werkzeuge (WZ) für den realen Prägeprozess gebogener Rohre mit Stempelpositionen (rot) im geraden Bereich (1), im Übergangsbereich (2) und im Biegebereich (3)

Abb. 2.25). Dazu wird die Stempelausrichtung im Biegebereich an den Biegewinkel angepasst, sodass alle Prägeflächen senkrecht zur Biegelinie sind. Die Stempelposition im Biegebereich wird durch den halben Biegewinkel festgelegt. Für das Prägen gebogener Rohre wird die Stempellänge auf 10 mm reduziert, da die ursprüngliche Länge von 50 mm bei einer 15° Biegung zu einer Überlagerung der Prägestellen führt. Die Breite der Stempel beträgt 62 mm mit einer Eckenverrundung von 5 mm, einer Kantenverrundung von 1 mm und einer ebenen Stempelfläche. Die Stempelöffnungen besitzen jeweils eine Länge von 12 mm und eine Breite von 64 mm. Die Regelung des Stempelhubes, die Umformgeschwindigkeit und die Rohrklemmung sind analog zum Prägeprozess gerader Rohre.

Auswertung Umformergebnisse

Die experimentell ermittelten Umformergebnisse werden mittels eines 3D-optischen Messverfahrens digitalisiert. Zu diesem Zweck wird das Rohr mit einem 3D-Sensor (Comet L3D, Carl Zeiss Optotechnik GmbH, Neubeuern) basierend auf einer Streifenlichtprojektion und einer BLUE-LED Technologie erfasst und als zusammenhängende Punktwolke gespeichert. Das Rohr wird mit einer matten Farbe lackiert, um Werkstückreflektionen durch externe Lichtquellen zu reduzieren und somit ein besseres Messergebnis zu erhalten. Das lackierte Werkstück wird auf einem Drehtisch platziert und durch eine vollständige Rotation von allen Seiten durch den Sensor erfasst. Die digitalisierte Punktwolke wird durch die Software INSPECTplus (Carl Zeiss Optotechnik GmbH, Neubeuern) zu einem dreidimensionalen CAD-Modell zusammengefügt. Dadurch ermöglicht die Software die Vermessung relevanter Geometrieabschnitte und bietet einen Soll-Ist-Vergleich mittels einer Best-Fit-Funktion. Die Best-Fit-Funktion optimiert Positions- und Lageabweichungen durch das Verschieben und Rotieren des Werkstücks. Dies wird zum Beispiel bei der Winkelvermessung des Rohres verwendet.

Dazu werden zwei Zylinder mit dem Außendurchmesser des Rohres erstellt und bestmöglich an das jeweilige Ende des Rohres angefitzt. Durch die Mittellinien der beiden Zylinder lässt sich der Biegewinkel ermitteln. Vor der Versuchsdurchführung wurde die Vermessung der relevanten Geometrieabschnitte in den Umformergebnissen definiert und sowohl für die experimentellen Ergebnisse als auch für die Simulationsergebnisse gleichermaßen durchgeführt.

2.4 Diskussion der Experimente

In diesem Kapitel wurden die realen Aufbauten der Umformprozesse mit den experimentellen Bedingungen vorgestellt. Diese sind die Grundlage für die Entwicklung der Simulationsmodelle im folgenden Kapitel. Die entstandenen experimentellen Ergebnisse werden für die Validierung der entsprechenden Simulationsergebnisse verwendet. Insgesamt werden drei Teilaspekte betrachtet:

- Umformtechnische Grundlagen: Zum Verständnis der Rohrumformprozesse wurden die **Fließkurve**, das **Formänderungsvermögen** und die **Rückfederung** näher erläutert.
- Rohrumformprozesse: Biegen und Prägen
 - **Biegen**: Der grundlegende Aufbau des Rotationszugbiegens wird durch den Biegefaktor und den Wanddickenfaktor bestimmt. Die wesentlichen Faktoren eines gebogenen Rohres sind der Biegeradius, der Biegewinkel und der Rohrquerschnitt. Das größte Problem beim Biegen sind unerwünschte Veränderungen in der Rohrgeometrie.
 - **Prägen**: Die Herausforderung beim Prägen ist das Lenken des Materialflusses durch das Zusammenspiel von Stempel und Rohrklemmung. Durch den Materialfluss muss von einer anfänglich konvex gekrümmten Rohroberfläche eine ebene Prägefläche erreicht werden. Die größte Schwierigkeit beim Prägen ist die Verhinderung eines ungewollten Rohreinfalls.
- Experimentelle Grundlage
 - Im Experiment werden **geschweißte Stahlrohre** des Materials 1.4301 und 1.4509 verwendet. Die Materialparameter wurden in Zugversuchen charakterisiert. Das Material 1.4301 sollte aufgrund des Fließkurvenverlaufs besser als das Material 1.4509 für die Umformung geeignet sein. Da die Schweißnaht eine besondere Rolle einnimmt und während des Umformprozesses zu

Umformfehlern führen kann, wurden die Abmaße der Schweißzone durch eine Mikroindentation ermittelt. Beim Material 1.4301 ergab sich eine breitere Schweißzone als beim Material 1.4509. Durch eine geeignete Positionierung wird der Einfluss im Experiment minimal gehalten. In der Simulation findet keine explizite Berücksichtigung der Schweißzone statt.

- Der **Prägeprozess** erfolgt durch einen separaten Prägestempel, der nicht in die Rohrklemmung integriert ist. In den Experimenten werden zwei unterschiedliche Stempelformen mit einer ebenen und konvexen Prägefläche untersucht. Für die Stempelöffnung wurde eine Aussparung in der oberen Klemmhälfte berücksichtigt. In der unteren Klemmhälfte wird das Rohr vollständig umschlossen und ermöglicht somit in diesem Bereich keinen Materialfluss nach außen.
- Der **Biegeprozess** wird durch das Rotationszugbiegen realisiert. Ein dreigliedriger Biegedorn kann bei Bedarf verwendet werden. Die Besonderheit des Versuchsstandes ist die ortsfeste Gleitschiene vor der Tangentiallinie, die für einen festen Rohraußendurchmesser konzipiert wurde. Zudem muss eine fertigungsbedingte Lücke zwischen Falten glätter und Tangentiallinie berücksichtigt werden.
- Das **Prägen gebogener Rohre** erfolgt in zwei Umformschritten. Durch den Biegeprozess werden der Biegeradius und der Biegewinkel definiert. Der Biegeprozess muss mit einem Biegedorn durchgeführt werden, um einen Rohreinfall zu verhindern und die Ovalisierung zu reduzieren. Die Klemmvorrichtung des Prägens kann durch einen adaptiven Aufbau an unterschiedliche Rohrwinkel angepasst werden. Das Prägen eines gebogenen Rohres findet an drei unterschiedlichen Positionen von der Seite statt, um den Einfluss des Biegeprozesses auf den Prägeprozess zu untersuchen. Aufgrund der Positionsauswahl muss die Stempellänge reduziert werden, sodass keine Überschneidungen der Prägeflächen stattfinden.

3

Numerische Modellierung

Das Kapitel zur numerischen Modellierung von Umformprozessen ist in drei Abschnitte unterteilt. Im ersten Abschnitt werden die kontinuumsmechanischen Grundlagen erläutert, mit denen das mechanische Umformverhalten eines Körpers unter der Einwirkung äußerer Kräfte beschrieben werden kann. Da zur numerischen Modellierung die kommerzielle Software Abaqus[®] verwendet wird, werden nur die wesentlichen Grundlagen zum Aufstellen des Randwertproblems beschrieben. Für weitere Details zur Kontinuumsmechaniktheorie wird auf die umfangreiche Literatur verwiesen, z.B. [1, 13, 53, 58]. Der zweite Abschnitt thematisiert die numerische Umsetzung der Kontinuumsmechanik mit Hilfe der Finite-Elemente-Methode. Dazu werden die wichtigsten Aspekte der numerischen Modellierung erläutert und die entsprechende Umsetzung in Abaqus[®] thematisiert. Detaillierte Informationen zur Finite-Elemente-Methode lassen sich in der Literatur, unter anderem in [9, 108, 117, 142, 143], nachlesen, und die Details zur Abaqus[®] Umsetzung sind in der Abaqus[®] Theorie [23] näher erläutert. Im dritten Abschnitt wird eine aktuelle Übersicht der bisherigen Finite-Elemente-Umsetzungen von Rohrumformprozessen vorgestellt. Alle drei Abschnitte bilden die Grundlage zur Abbildung der Experimente aus Kapitel 2 in Simulationen.

3.1 Nichtlineares Randwertproblem

Umformprozesse stellen mechanische quasistatische oder dynamische Probleme dar, bei deren Modellierung Nichtlinearitäten berücksichtigt werden müssen:

- Geometrische Nichtlinearität
- Materielle Nichtlinearität
- Nichtlinearitäten in den Randbedingungen.

Die **geometrische Nichtlinearität** entsteht bei großen Formänderungen in der Geometrie. Weitere Ursachen sind Instabilitäten durch ein Knicken des Körpers oder durch einen Faltenwurf während des Umformprozesses. Die **materielle Nichtlinearität** entsteht durch das elastisch-plastische Materialverhalten der Rohre. **Nichtlinearitäten in den Randbedingungen** entstehen durch eine Änderung der Belastung aufgrund von Deformationen oder die Änderung von Kontaktbedingungen zwischen Werkzeug und Werkstück. In der Kontinuumsmechanik wird das Umformverhalten eines Körpers durch ein gekoppeltes System aus

- Kinematik,
- Werkstoffgesetz und
- Bilanzgleichungen

beschrieben. Diese Beziehungen bilden zusammen ein Randwertproblem, das durch die Vorgabe von Kräften und Verschiebungen am materiellen Körper gelöst wird. Dadurch können die Bewegung bzw. Verschiebung des Körpers bestimmt werden. Auf Basis der Verschiebung lassen sich dann die Verzerrungen und Spannungen berechnen.

Die **Kinematik** beschreibt die Bewegung und die Deformation eines materiellen Körpers \mathfrak{B} , wodurch die zeitliche Änderung der Betrachtungskonfiguration berücksichtigt werden muss (vgl. Abb. 3.1). Ein materieller Körper besteht aus unendlich vielen materiellen Punkten, die unter Vernachlässigung der atomaren Struktur, die kleinste darstellbare Größe beschreiben und deswegen Träger der physikalischen Eigenschaften sind. Bei Umformsimulationen sind die Referenzkonfiguration (i.d.R. undeformierter Zustand) des materiellen Körpers und die Momentankonfiguration (i.d.R. deformierter Zustand) des materiellen Körpers notwendig. Die Momentankonfiguration ergibt sich aus der Wirkung der angreifenden Kräfte. Jeder materielle Punkt X in der Referenzkonfiguration zum Zeitpunkt $t = t_0$ lässt sich eindeutig über einen Ortsvektor \mathbf{X} definieren (vgl. Abb. 3.1).

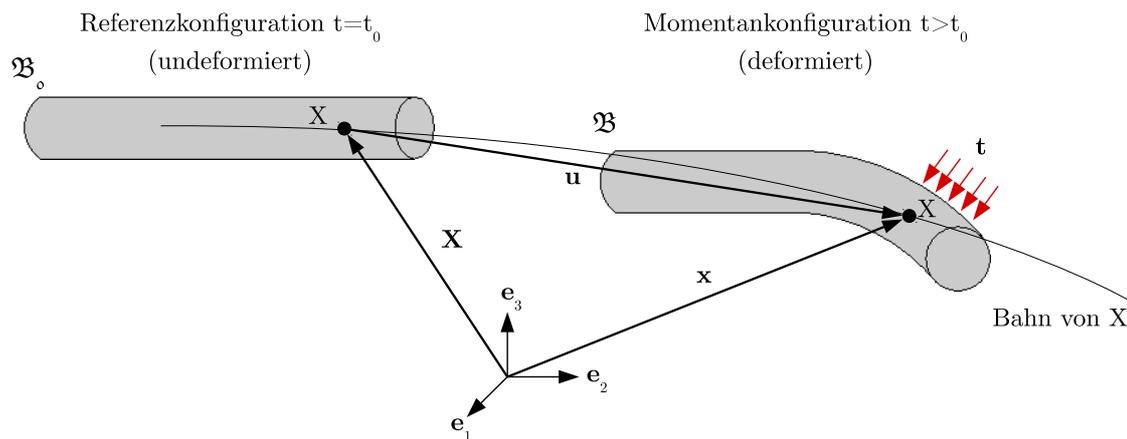


Abbildung 3.1: Referenz- und Momentankonfiguration eines materiellen Körpers

Die Bewegung des materiellen Punktes aus der Referenzkonfiguration entlang seiner Bahn in die Momentankonfiguration $t > t_0$ kann eindeutig mit Hilfe einer Bewegungsfunktion

$$\mathbf{x} = \boldsymbol{\chi}(\mathbf{X}, t) \quad (3.1)$$

beschrieben werden. Dabei stellt \mathbf{x} den Ortsvektor von X zum Zeitpunkt t dar. Da die Bewegungsfunktion eine bijektive Funktion darstellt, sind die Referenzkonfiguration und die Momentankonfiguration ein-eindeutig miteinander verknüpft, wodurch die inverse Bewegungsfunktion

$$\mathbf{X} = \boldsymbol{\chi}^{-1}(\mathbf{x}, t) \quad (3.2)$$

existiert. Die reine Verschiebung eines materiellen Punktes X aus der Referenzkonfiguration in die Momentankonfiguration berechnet sich aus der Differenz der jeweiligen Ortsvektoren

$$\mathbf{u} = \mathbf{x}(\mathbf{X}, t) - \mathbf{X}. \quad (3.3)$$

Mit Hilfe der Verschiebung lassen sich die Deformation und somit die Verzerrung des Körpers berechnen. Das **Werkstoffgesetz** beschreibt die materialabhängige Beziehung zwischen Verzerrungen und Spannungen. Dazu wird zwischen der Berechnung der Elastizität und der Plastizität unterschieden (vgl. Abb. 2.1). Die **Erhaltungsaussage für den Impuls** ist eine materialunabhängige axiomatisch eingeführte Bilanzaussage und bildet die Grundlage zur numerischen Berechnung. Die lokale Form der Impulsbilanz

[1, 24, 142] ist definiert über

$$\operatorname{div}\mathbf{T} + \mathbf{f} = \rho\ddot{\mathbf{x}}. \quad (3.4)$$

Darin beschreibt $\ddot{\mathbf{x}}$ die Beschleunigung, ρ die Dichte, \mathbf{f} ist die Volumenkraft, \mathbf{T} ist die Cauchy-Spannung und $\operatorname{div}\mathbf{T}$ ist der volumenspezifische Kraftvektor. Die lokale Form der Impulsbilanz hat unter bestimmten Annahmen (Stetigkeit und hinreichend stetige Differenzierbarkeit der Feldgröße) für jeden materiellen Punkt des Körpers Gültigkeit. Unter Vernachlässigung des dynamischen Anteils (quasistatischer Prozess) und der Volumenkraftdichte vereinfacht sich die Impulsbilanz zur Gleichgewichtsbedingung

$$\operatorname{div}\mathbf{T} = \mathbf{0}. \quad (3.5)$$

Aus dem gekoppelten System der Kinematik, des Werkstoffgesetzes und der lokalen Form der Impulsbilanz lässt sich durch geeignete Randbedingungen das Verschiebungsfeld \mathbf{u} berechnen. Dazu müssen die zugehörigen Verschiebungs- und Spannungsrandbedingungen vorgegeben werden. Die Lösung dieser Gleichungen ist das Verschiebungsfeld \mathbf{u} , das aus der Belastung des Körpers (Volumenkräfte \mathbf{f} und Randlasten \mathbf{t}) resultiert. Die Vorgehensweise wurde an dieser Stelle nur kurz erläutert und soll die grundsätzliche Beschreibung solcher nichtlinearen Randwertprobleme aufzeigen. Das komplette Vorgehen benötigt eine detaillierte Beschreibung der Kontinuumsmechanik, die in verschiedenen Werken [1, 13, 53, 58] nachzulesen ist.

3.2 Finite-Elemente-Methode

Die Finite-Elemente-Methode ist ein numerisches Näherungsverfahren zur Lösung von Differentialgleichungen. Zur Finite-Elemente-Berechnung wird die schwache Formulierung der lokalen Impulsbilanz benötigt. Dadurch wird eine Näherungslösung des Problems auf Basis einer integralen Form ermittelt. Da eine detaillierte Herleitung der schwachen Form für das Verständnis der vorliegenden Arbeit zu weit führt, wird an dieser Stelle auf die umfangreiche Literatur verwiesen [13, 115, 117, 143]. Zur Lösung des Problems erfolgen zuerst eine räumliche und dann eine zeitliche Diskretisierung. Die räumliche Diskretisierung bezeichnet die Zerlegung des kontinuierlichen Körpers in materialgebundene Finite Elemente und führt durch die Zerlegung des Lösungsgebietes zu einer Approximation auf Elementebene und zu einer Approximation des kontinuierlichen Verschiebungsfeldes. Die diskrete Systemgleichung bzw. die schwache Form der

Impulsbilanz in der räumlich diskretisierten Formulierung ist in folgender Form

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}}^i + \mathbf{F}_{in}(\mathbf{u}^i) = \mathbf{F}_{ex} \quad (3.6)$$

gegeben [9, 130, 142]. Darin beschreibt \mathbf{M} die Massenmatrix, $\mathbf{F}_{in}(\mathbf{u}^i)$ ist der Elementvektor der inneren Kräfte und der Vektor \mathbf{F}_{ex} fasst die äußeren Kräfte zusammen.

3.2.1 Elementformulierung

Bei Rohrumformprozessen werden zur räumlichen Diskretisierung des betrachteten Körpers in der Regel Volumenelemente oder Flächenelemente verwendet. Der Einsatz von Volumenelementen erfolgt meist bei massiven oder dickwandigen Bauteilen. Bei dünnwandigen Bauteilen, wie sie im Rahmen der Arbeit verwendet werden, wäre die Dickenauflösung deutlich geringer als die Abmessungen in der Bauteilebene, was gegen einen Einsatz von Volumenelementen spricht. Zudem steigt mit größer werdenden Anzahl an Elementen die Rechendauer deutlich an. Volumenelemente benötigen in der praktischen Anwendung etwa 8-mal so viel Rechenzeit wie äquivalente Flächenelemente [69]. Flächenelemente werden häufig in dünnwandigen Bauteilen wie beispielsweise bei Blechen eingesetzt. In der Finite-Elemente-Methode werden dafür Schalenelemente für große Deformationen verwendet, die auf Basis eines zusätzlichen Freiheitsgrades die Dickenänderung berücksichtigen können [63]. Mit ausreichender Diskretisierung können dadurch vergleichbare Ergebnisse zu den Volumenelementen erreicht werden [6, 64, 100]. Im Rahmen der Arbeit werden dreidimensionale Schalenelemente für große Deformationen verwendet, da dünnwandige Rohre untersucht werden und die entwickelten Simulationsmodelle eine geringe Simulationsdauer aufweisen sollen. Die geometrische Darstellung des Elements erfolgt durch Interpolationsfunktionen, die die Anzahl der Knotenpunkte definieren (vgl. Abb. 3.2).

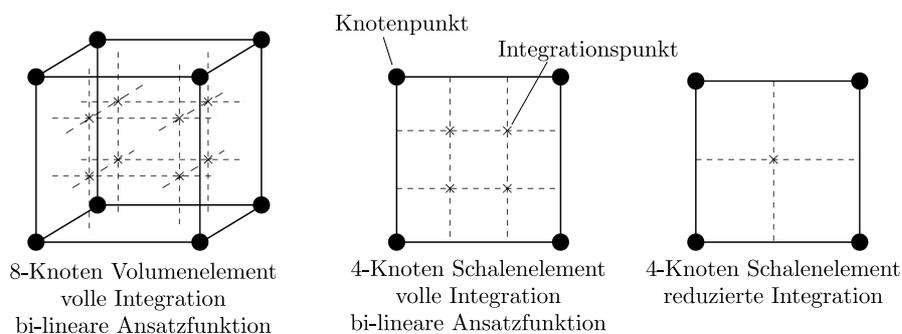


Abbildung 3.2: Volumenelemente und Schalenelemente mit Knotenpunkte und Integrationspunkte

Aus Rechenzeitgründen werden in der Umformung meist lineare Schalenelemente eingesetzt, die bi-lineare Ansatzfunktionen verwenden. Eine wichtige Elementklasse sind isoparametrische Elemente, die für die Geometrie und für die Verschiebungen die gleichen Interpolationsfunktionen anwenden. Die Funktionsgrößen werden über das Element integriert, was numerisch durch die Auswahl entsprechender Integrationspunkte erfolgt. Bei bi-linearen Schalenelementen erfolgt die numerische Integration auf Basis von vier Integrationspunkten. Die Approximation der Geometrie erfolgt bei einem kontinuumsbasierten Schalenelement ausgehend von der Diskretisierung der Schalenreferenzfläche und einem Mittelflächen-Direktor-Ansatz [61]. Somit findet die numerische Integration nicht nur in der Referenzebene statt, sondern auch in weiteren Schichten, wodurch die Dickenrichtung mitberücksichtigt werden kann. Dadurch vervielfacht sich mit steigender Schichtanzahl der Rechenaufwand. Durch die Verwendung einer reduzierten Integration wird die Anzahl der Integrationspunkte auf einen pro Fläche reduziert, wodurch die Rechendauer sinkt und locking-Effekte (shear locking und volumetric locking) vermieden werden. Elemente erster Ordnung mit voller Integration haben das Problem von *shear locking*. *Shear locking* führt bei einer Biegebelastung zu einer zu hohen Elementsteifigkeit, da die entsprechenden Deformationsmoden durch die Ansätze nicht korrekt abgebildet werden können. Der Grund für dieses Problem liegt in den Elementkanten, die sich durch die lineare Ordnung nicht krümmen können. Auch bei voll integrierten quadratischen Elementen kann es zu *shear locking* kommen, wenn die Biegebelastung zu groß wird. Bei einer reduzierten Integration wird der Wert des Volumenintegrals nur anhand der Stützwerte im Mittelpunkt des Elements ermittelt. Lineare Elemente mit reduzierter Integration neigen dazu, eine zu geringe Steifigkeit aufzuweisen. Die reduzierte Integration führt bei der Berechnung der Elementsteifigkeitsmatrix zu einem Rangdefizit und wird somit nicht mehr exakt gelöst. Das entsprechende numerische Problem wird als *hourglassing* bezeichnet und kann zu unphysikalischen Lösungen führen. *Hourglassing* bedeutet, dass beim Biegen des Elements aufgrund eines einzelnen Integrationspunktes keine Dehnungsenergie erzeugt wird und das Element somit der Belastung nicht entgegen wirken kann. Im Gegensatz zu *shear locking*, gibt es bei *hourglassing* Stabilisierungsmethoden, um das Problem zu minimieren. Abaqus[®] stellt eine Reihe geeigneter Elementformulierungen, Integrationsmethoden und Stabilisierungsmethoden zur Verfügung. Details dazu können dem Abaqus[®]-Handbuch [23] entnommen werden.

3.2.2 Zeitintegrationsverfahren

In Finite-Elemente-Berechnungen werden die nichtlinearen Probleme inkrementell durch Zeitschritte Δt berechnet. Durch die updated-Lagrange-Formulierung wird somit die Referenzkonfiguration für jeden Zeitschritt aktualisiert, sodass die Referenzkonfiguration immer eine benachbarte Lage zur Momentankonfiguration darstellt [114, 126]. Die räumlich diskretisierte Systemgleichung aus Gleichung 3.6 ist kontinuierlich in der Zeit definiert. Deshalb muss noch eine Diskretisierung in der Zeit stattfinden, sodass die Auswertung der Verschiebung zu bestimmten Zeitpunkten $t_{n+1} = t_n + \Delta t$ erfolgen kann

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}}_{n+1}^i + \mathbf{F}_{in}(\mathbf{u}_{n+1}^i) = \mathbf{F}_{ex}. \quad (3.7)$$

Zur Lösung von zeitabhängigen Problemen wird zwischen dem expliziten und dem impliziten Zeitintegrationsverfahren unterschieden [23, 130]. Bei einem impliziten Zeitintegrationsverfahren ist die Lösung zum Zeitpunkt t_{n+1} abhängig vom Zeitschritt t_{n+1} und dem Zeitschritt t_n . Dadurch muss in jedem Zeitschritt ein meist nichtlineares Gleichungssystem gelöst werden, wodurch der numerische Aufwand größer ist als bei einem expliziten Zeitintegrationsverfahren. Das explizite Zeitintegrationsverfahren zeichnet sich dadurch aus, dass die Lösung zum Zeitpunkt t_{n+1} nur vom vorherigen Zeitschritt t_n abhängt. Am Beispiel des Euler-Verfahrens lässt sich der Unterschied gut verdeutlichen:

$$\begin{aligned} \text{explizit: } u_{n+1} &= u_n + \Delta t f(t_n, u_n) \\ \text{implizit: } u_{n+1} &= u_n + \Delta t f(t_{n+1}, u_{n+1}). \end{aligned} \quad (3.8)$$

Während zeitabhängige Probleme mit beiden Verfahren behandelt werden können, sind statische Probleme mit einem impliziten Verfahren zu berechnen [126].

In Abaqus[®] werden dynamische Probleme, die mit hohen Beschleunigungen und somit kleinen Zeitschrittweiten verbunden sind, üblicherweise mit einer expliziten Lösungsmethode (Abaqus[®]/Explicit) berechnet (vgl. Abb. 3.3). Strukturprobleme sind meist statische Probleme, die mit einer impliziten Lösungsmethode (Abaqus[®]/Standard) gelöst werden. Eine Metallumformung wird in Abaqus[®] oft als quasistatischer Prozess betrachtet, da die auftretenden Beschleunigungen nicht groß genug sind, um dynamische Effekte betrachten zu müssen. Daher ist die Auswahl der geeigneten Lösungsmethode von weiteren Gesichtspunkten, wie der Kontaktberechnung oder dem Deformationsgrad, abhängig. Mit steigender Anzahl an Nichtlinearitäten im Modell wird die explizite Lösungsmethode bevorzugt.

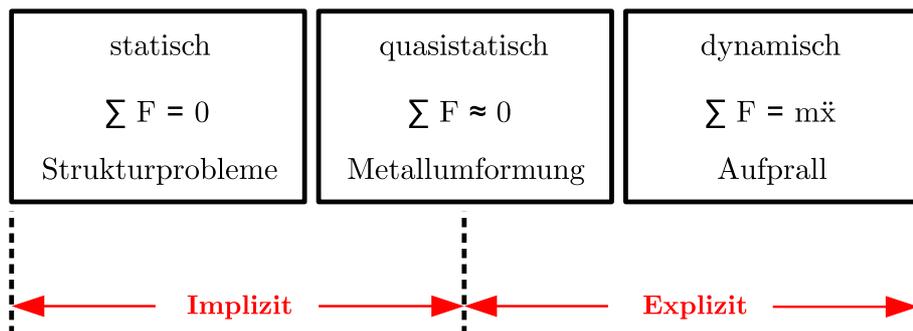


Abbildung 3.3: Auswahl des Zeitintegrationsverfahrens in Abhängigkeit des zu lösenden Problems, in Anlehnung an [23]

Implizites Verfahren bei quasistatischen Problemen

Zur Lösung des quasistatischen nichtlinearen Problems werden im Allgemeinen Iterationsverfahren verwendet, wofür eine Linearisierung der Modellgleichungen erforderlich ist. Ein häufig verwendetes iteratives Lösungsverfahren ist das Newton-Raphson-Verfahren [13, 130]. Ausgehend vom statischen Gleichgewicht des nichtlinearen Problems

$$\mathbf{F}_{in}(\mathbf{u}) = \mathbf{F}_{ex} \quad (3.9)$$

soll eine numerische Lösung ermittelt werden. Ziel des Verfahrens ist die Minimierung des Residuums

$$\mathbf{R} = \mathbf{F}_{ex} - \mathbf{F}_{in}(\mathbf{u}) \neq \mathbf{0}, \quad (3.10)$$

die die Abweichung vom exakten Wert der Gleichgewichtsbedingung darstellt. Das Newton-Raphson-Verfahren basiert auf der Taylor-Reihenentwicklung vom Vektor der inneren Kräfte

$$\mathbf{F}_{in}(\mathbf{u}_{n+1}) \approx \mathbf{F}_{in}(\mathbf{u}_n) + \underbrace{\frac{\partial \mathbf{F}_{in}}{\partial \mathbf{u}}}_{=: \mathbf{K}_T(\mathbf{u})} \bigg|_{\mathbf{u}_n} \Delta \mathbf{u} \quad (3.11)$$

mit dem Verschiebungsincrement

$$\Delta \mathbf{u} = \mathbf{u}_{n+1}^i - \mathbf{u}_n, \quad i: \text{Iterationszähler}. \quad (3.12)$$

Der Term $\mathbf{K}_T(\mathbf{u}) \Delta \mathbf{u}$ entspricht der Linearisierung des Vektors der inneren Kräfte, wobei \mathbf{K}_T die Tangentensteifigkeitsmatrix bezeichnet. Durch die Forderung einer maximal

erlaubten Toleranz für das Residuum zum Zeitpunkt t_{n+1}

$$\|\mathbf{R}(\mathbf{u}_{n+1})\| = \|\mathbf{F}_{ex} - \mathbf{F}_{in}(\mathbf{u}_{n+1})\| \leq \text{Toleranz} \quad (3.13)$$

lässt sich über die bekannten Randbedingungen das Verschiebungskrement

$$\Delta \mathbf{u} = \mathbf{K}_T^{-1}(\mathbf{u}_n) \mathbf{R}(\mathbf{u}_n) \quad (3.14)$$

berechnen. Nach jedem Inkrement findet durch das Update

$$\mathbf{u}_{n+1}^{i+1} = \mathbf{u}_{n+1}^i + \Delta \mathbf{u} \quad (3.15)$$

eine Gleichgewichtsprüfung statt. Befindet sich das Residuum $\mathbf{R}(\mathbf{u}_{n+1}^{i+1})$ nicht innerhalb der erlaubten Fehlertoleranz, müssen weitere Iterationen durchgeführt werden, bis der Toleranzwert erreicht ist. Bei Divergenz des Newton-Verfahrens müssen die Lastschritte zwischen zwei benachbarten Gleichgewichtszuständen verkleinert werden.

Explizites Verfahren bei dynamischen Problemen

Beim expliziten Verfahren werden auch die dynamischen Komponenten (vgl. Gl. 3.6) berücksichtigt. In den meisten Fällen wird zur zeitlichen Diskretisierung der Beschleunigung das zentrale Differenzenverfahren verwendet. Zur Anwendung des zentralen Differenzenverfahren wird die Bewegungsgleichung nach der Beschleunigung zum Zeitpunkt t_n

$$\ddot{\mathbf{u}}_n = \mathbf{M}^{-1}(\mathbf{F}_n^{ex} - \mathbf{F}_n^{in}(\mathbf{u}_n)) \quad (3.16)$$

umgestellt. Die Masse der Struktur wird durch die Massenmatrix \mathbf{M} berücksichtigt. Zur Reduzierung der Rechenzeit wird zur Berechnung eine diagonalisierte Massenmatrix (lumped mass matrix) verwendet. Die Diagonalisierung konzentriert die Masse auf die Elementknoten. Dadurch ergibt sich eine Entkopplung der Gleichungen, wodurch der Zeitaufwand im Differenzenverfahren pro Schritt deutlich reduziert wird. Die Massenkonstanz wird durch spezielle Quadraturformeln weiterhin erfüllt [9, 130]. Die vorkommenden Ableitungen werden mit Hilfe einer Differenzenapproximation

$$\ddot{\mathbf{u}}_n = \frac{\mathbf{u}_{n+1} - 2\mathbf{u}_n + \mathbf{u}_{n-1}}{\Delta t^2} \quad (3.17)$$

angenähert. Die Verschiebung \mathbf{u}_{n+1} zum Zeitpunkt t_{n+1} lässt sich durch Einsetzen von Gleichung 3.17 in die Bewegungsgleichung (vgl. Gl. 3.16) mit den entsprechenden An-

fangsbedingungen ermitteln.

Das Stabilitätskriterium stellt dabei die größte Beschränkung in der Anwendung dar [23, 114]. Es existiert eine kritische maximale Zeitschrittweite Δt_{krit} , bei deren Überschreitung die Lösung instabil wird. Die kritische Zeitschrittweite wird durch das CFL-Kriterium [22]

$$\Delta t_{krit} = \min \left(\frac{l_e}{c_d} \right) \quad (3.18)$$

aus der charakteristischen Elementlänge l_e und der longitudinalen Wellenausbreitungsgeschwindigkeit c_d im Material berechnet. Die Deformation des Körpers wird im expliziten Löser durch eine Wellenausbreitung berechnet. Die charakteristische Länge bezeichnet den geringsten Abstand innerhalb eines Elements. Bei der Verwendung von Schalenelementen in Verbindung ergibt sich eine charakteristische Länge l_e von

$$l_e = \frac{A}{\max(l_1, l_2, l_3, l_4)} \quad (3.19)$$

und eine Wellenausbreitungsgeschwindigkeit c_d im linear-elastischen Medium von

$$c_d = \sqrt{\left(\frac{E}{\rho(1 - \nu^2)} \right)}. \quad (3.20)$$

Ein Prozess wird als quasistatisch angenommen, wenn für die Geschwindigkeit v_A eines Körpers gilt

$$v_A < 0,01 c_d. \quad (3.21)$$

Die Wellenausbreitungsgeschwindigkeit von Metallen beträgt ungefähr 5000 m s^{-1} [23]. Bei einer quasistatischen Berechnung sind die Trägheitseffekte und auch die kinetische Energie E_{kin} des deformierbaren Materials vernachlässigbar klein. In Abaqus[®]/Explicit darf die kinetische Energie während des Prozesses maximal einen Anteil von 1% bis 5% der inneren Energie besitzen.

3.2.3 Umsetzung in Abaqus[®]

Bisher wurden grundlegende Aussagen bezüglich der Finite-Elemente-Methode wiedergegeben. Im Folgenden wird eine kurze Übersicht zu den wesentlichen Punkten bei der Umsetzung in Abaqus[®] erläutert. Weitere Details können in der umfangreichen Abaqus[®]-Theorie [23] nachgelesen werden.

Elementauswahl

Zur numerischen Modellierung des Werkstücks in Abaqus[®] werden 4-Knoten-Schalenelemente des Typs $S4R$ mit reduzierter Integrationsordnung verwendet.

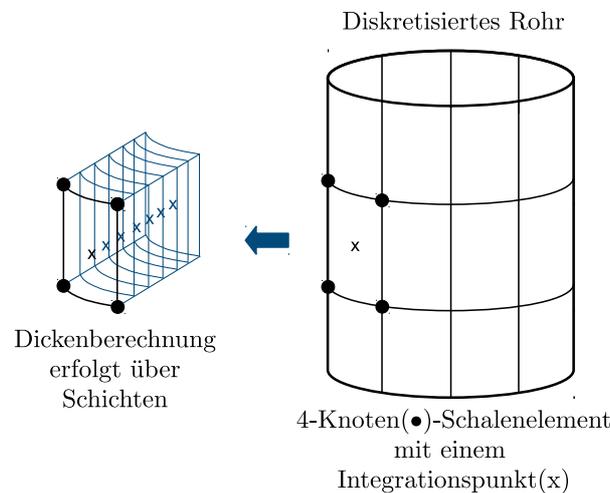


Abbildung 3.4: Referenzschale im diskretisierten Rohr und die zusätzlichen Schichten zur Dickenberechnung in Abaqus[®]

In Abbildung 3.4 ist ein diskretisiertes Rohr dargestellt, das mit den verwendeten Schalenelementen modelliert wurde. Jedes Schalenelement besitzt mehrere Schichten zur Berechnung der Dickenänderung. Die wesentlichen Informationen des Elementtyps sind im Folgenden aufgelistet:

- Kontinuumsbasierte Schalenelemente, die eine Dickenberechnung ermöglichen
- Lineare Interpolationsfunktion
- Sieben Schichten zur Dickenberechnung mit jeweils einem Integrationspunkt im Mittelpunkt des Elements
- Abaqus[®] interne *hourglass*-Kontrolle zur Verhinderung von *hourglassing* (zusätzlich: feine Diskretisierung)

Vergleich zwischen Implizit und Explizit

Folgende Unterschiede ergeben sich durch die Unterscheidung von expliziter und impliziter Integration in Abaqus[®] :

- Abaqus[®]/Explicit: explizit dynamische Berechnung
 - Anwendung: Umformprozess
 - Vorteil: Nichtlinearitäten stellen keine Rechenprobleme dar

- Nachteil: Kritische netzabhängige Zeitschrittweite; Trägheitseffekte führen zu Schwingungen bei Berechnung der Rückfederung
- Abaqus[®]/Standard: implizit quasistatische Berechnung
 - Anwendung: Rückfederung
 - Vorteil: große Schrittweiten wählbar (physikalisch sinnvoll); schnelle Gleichgewichtsermittlung bei Berechnung der Rückfederung
 - Nachteil: Nichtlinearitäten müssen gesondert berücksichtigt werden und führen häufig zu Konvergenzproblemen

Kontakt

Umformvorgänge besitzen durch den Kontakt zwischen Werkzeugen und Werkstück in der Regel komplexe Randbedingungen. Die Kontaktbedingungen müssen in jedem Zeitschritt überprüft werden, wozu die Kontakterkennung und die Kontaktumsetzung numerisch gelöst werden müssen. Der Kontakt zwischen Rohr und Umformwerkzeuge wird durch den Abaqus[®]-internen *general contact* definiert:

- Kontaktmodellierung:

Das verwendete *Master-Slave*-Verfahren ist ein Knoten-zu-Oberflächen-Algorithmus. Der Körper, der im Kontakt als Master definiert wird, liefert Informationen zur Flächengeometrie und der Slave liefert Informationen zur Lage der einzelnen Knotenpunkte (vgl. Abb. 3.5).

- Kontakterkennung:

Der Kontakteintritt wird über die maximal erlaubte Durchdringung der Master-Oberfläche durch die Slave-Knoten ermittelt. Die numerische Korrektur dieser unphysikalischen Eindringung erfolgt durch die *Penalty*-Methode [130], die in Abhängigkeit der Eindringtiefe die Kontaktkräfte berechnet. Das Lösen der beiden Kontaktpartner wird über die maximal erlaubte Separationskraft bestimmt.

- Kontaktentwicklung:

Die Kontaktformulierung ermöglicht den Slave-Knoten auf der Master-Oberfläche zu gleiten und sich während des Kontaktes zu trennen. Dazu werden die Normalkraft und die Tangentialkraft berechnet. Das reale Reibverhalten ist vor allem durch den Einsatz von Schmiermitteln komplex. Im Rahmen von Simulationen wird dieses komplexe Reibverhalten durch das Coulombsche Reibgesetz vereinfacht dargestellt, wobei ein konstanter Reibwert angenommen wird.

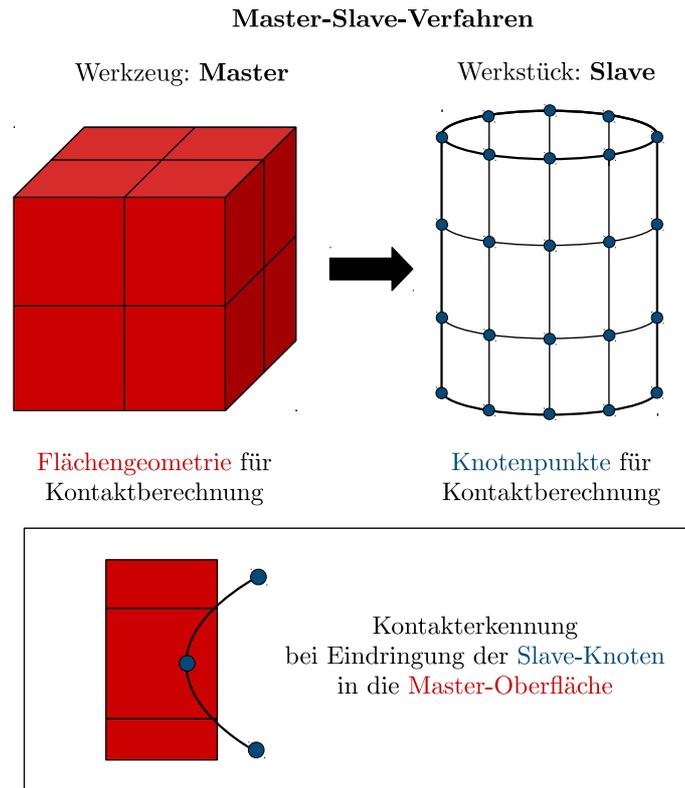


Abbildung 3.5: Schematische Darstellung des Master-Slave-Verfahrens in Abaqus®

Materialdefinition

In Abaqus® wird zur numerischen Modellierung des Werkstücks ein elastisch-plastisches Materialmodell mit isotroper Verfestigung verwendet. Folgende Angaben sind dazu notwendig:

- Elastizität:
 - Elastizitätsmodul E
 - Querdehnzahl ν
- Plastizität:
 - Die initiale Fließgrenze und die nachfolgende Verfestigung werden durch eine tabellarische Angabe des verwendeten Fließkurvenverlaufs definiert (vgl. Abb. 3.6).
 - Beim Erreichen der maximal definierten Formänderung wird bei weiterer Belastung die Fließkurve durch Abaqus® ideal plastisch erweitert.

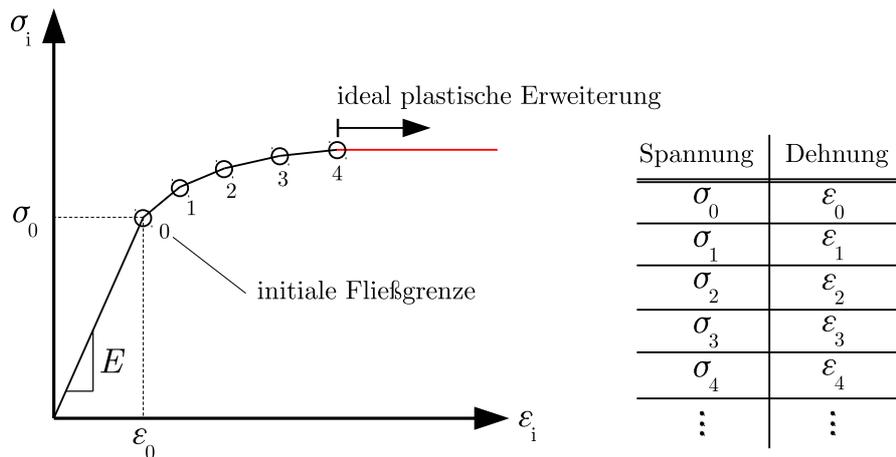


Abbildung 3.6: Definition eines elastisch-plastischen Materials in Abaqus®

3.3 Aktueller Stand der numerischen Umsetzung von Rohrumformprozessen

In den letzten Jahren ist das fehlerfreie Umformen von Rohren durch die steigenden Anforderungen an die Umformprozesse wie beispielsweise durch die Leichtbauweise deutlich anspruchsvoller geworden. Das bisher angewandte empirische Wissen bezüglich der Ermittlung geeigneter Werkzeugparameter ist dadurch kosten- und arbeitsintensiver geworden. Vor allem die Prozesskette aus Biegen und Prägen ist bei komplexen Geometrien mittels Kaltumformprozess nur noch mit großem Aufwand fehlerfrei realisierbar, da die Prozesse an ihre Grenzen stoßen. Bei einer Rohrumformung ist zusätzlich die hohle Querschnittsform eine Herausforderung, weil nicht nur der Materialfluss nach außen kontrolliert werden muss, sondern auch der Materialfluss nach innen. Mit steigendem Deformationsgrad müssen dadurch unerwünschte Querschnittsänderungen durch zusätzliche Maßnahmen verhindert werden. Eines der Kernprobleme bei der Rohrumformung ist neben der Vermeidung von Materialschädigungen die Verhinderung von Konturabweichungen im Rohrquerschnitt. Dadurch ist der Bedarf an prozessbegleitenden und ergänzenden Simulationen zur Realisierung der Anforderungen deutlich angestiegen. Dabei ist die Qualität der Vorhersage abhängig vom Aufbau des entsprechenden Simulationsmodells und entscheidend für den späteren Nutzen.

Die Prozesskette aus Biegen und Prägen, wie sie in dieser Arbeit untersucht wird, wurde bisher in dieser Form noch nicht in einer Simulation umgesetzt. Es existieren viele Arbeiten zur numerischen Umsetzung des Rohrbiegens und zur Vorformoperation des Hydroumformens, die dem Rohrprägen im Ablauf ähneln. Der reine Rohrprägeprozess ist relativ wenig verbreitet und hat erst durch die steigenden Anforderungen an das umgeformte Rohr und den gleichzeitigen Preiskampf an Bedeutung gewonnen. Das

Rohrprägen stellt eine Alternative zur Hydroumformung dar. Die Hydroumformung benötigt aufgrund komplexer Rohrgeometrien in der Regel eine Vorformung des Rohrquerschnitts [52]. Dadurch werden Quetschungen beim anschließenden Einklemmen des Rohres verhindert, die Reibungsbedingungen während der Hydroumformung verbessert und eine gleichmäßigere Wandstärkenverteilung erreicht [73]. Der vorgeformte Rohrquerschnitt muss dann in der anschließenden Hydroumformung an die finale Kontur angepasst werden. Aufgrund des ähnlichen Prozessablaufs zum Rohrprägen wird die numerische Umsetzung der Vorformoperation näher betrachtet. Die beiden Prozesse unterscheiden sich somit im Ablauf zum Erreichen der finalen Rohrgeometrie. Eine detailliertere Beschreibung der Grundlagen und des Prozessablaufs zur Hydroumformung kann in der umfangreichen Literatur nachgelesen werden [71, 73, 98, 112].

Biegeprozess

Die numerische Umsetzung des Rohrbiegens wurde umfangreich in einem EFB (Europäische Forschungsgesellschaft für Blechverarbeitung e.V.)-Forschungsbericht von Neugebauer und Laux diskutiert [100]. Hierbei wurden die grundlegenden numerischen Einstellparameter diskutiert und der Einfluss auf den Biegeprozess untersucht. Weitere Arbeiten beschäftigten sich mit dem Problem der geeigneten Auswahl des Elementtyps zur numerischen Modellierung des Rohres [6, 40, 141]. Die Auswahl zwischen Kontinuuselementen und Schalenelementen ist eine entscheidende Frage bei der Auslegung des Simulationsmodells, da sie die Genauigkeit der Ergebnisse und die entsprechende Rechendauer wesentlich beeinflusst.

Viele Arbeiten zur numerischen Umsetzung des Rohrbiegeprozesses in der Literatur thematisieren die Vorhersage von Umformfehlern. Li et al. [81, 84, 86] untersuchten in mehreren Arbeiten die Auswirkungen von Werkzeugeinstellungen und Umformparametern auf die Faltenbildung. Auf Basis analytischer Gleichungen und numerischer Simulationen wurde eine energie-basierte Vorhersage zur Faltenbildung entwickelt [82, 87]. Andere Arbeiten stellten per Simulationen einen starken Einfluss des Biegefaktors, des Wanddickenfaktors und des Biegedorns auf die Faltenbildung [89, 132] fest. Zudem wurde der Einfluss einer an den Rohraußendurchmesser anpassbaren Klemmbacke [128] und einer zusätzlichen Druckunterstützung durch die Biegewerkzeuge [85] auf den Faltenwurf untersucht.

Kernprobleme des Rohrbiegens sind unter anderem Querschnittsänderungen des Rohres im Biegebereich durch Ovalisierung und Materialausdünnung. Speziell bei kleinen Biegeradien entwickelt sich die Ovalisierung schnell zu einem unerwünschten Umformfehler [79, 83]. Die Auswahl und die Positionierung des richtigen Biegedorns mittels numerischer Vorhersage spielt eine entscheidende Rolle, um Fehler zu minimieren und die Kosten und den Entwicklungsaufwand zu reduzieren [110]. Die numerische Modellie-

Die Biegeformung des Biegedorns ist sehr anspruchsvoll, weil dieser meistens aufgrund der komplexen Struktur vereinfacht dargestellt wird und trotzdem das Verhalten während der Umformung realitätsnah abbilden muss. Die Form und die Positionierung des Biegedorns spielen eine wesentliche Rolle bei der Verformung des Rohrquerschnitts im Biegebereich und führen bei falscher Auslegung zu einer starken Materialausdünnung und zu Biegefehlern [39, 66, 80, 97]. Bei der Ausbildung des Rohrquerschnitts im Biegebereich konnte die Reibung zwischen dem Rohr und den Werkzeugen als ein wichtiger Einflussfaktor ausgemacht werden [133].

Neben der Ovalisierung führt auch die Materialrückfederung zu einer Konturabweichung des Rohres. Zhan et al. [139] ermittelten analytische Gleichungen zur Bestimmung der Rückfederung unter Berücksichtigung verschiedener Prozessparameter. Dabei zeigte die Rückfederung eine Abhängigkeit vom Biegewinkel, vom Biegeradius, von der Rohrgeometrie und von den Materialkennwerten [47, 116].

Aufgrund des hohen Aufwands und der Komplexität zur Erzeugung eines funktionierenden FE-Modells für Rohrumformprozesse bilden nur wenige bisherige Simulationsmodelle die Modellierung der Schweißzone ab [67, 91, 92, 105, 106]. Die Berücksichtigung der Schweißzone erfordert im Vorhinein eine aufwändige experimentelle Materialcharakterisierung der unterschiedlichen Bereiche sowie eine möglichst genaue numerische Abbildung der gradierten Materialeigenschaften.

Prägeprozess

Der Biegeprozess stellt oftmals eine Vorformoperation zum Prägen dar [3, 72, 93, 98, 135]. Die Biegezone besitzt eine Ovalität, eine ungleichmäßige Wandstärke, Eigenspannungen und lokale Verfestigungen, was die weitere Umformbarkeit einschränkt. Zum Erreichen eines geforderten Toleranzbereiches für das fertige Bauteil müssen daher beide Umformprozesse aufeinander abgestimmt sein [3, 49, 68, 135]. Daher wurden einzelne Parameter im kombinierten Prozess des Biegens und der Hydroumformung optimiert, um ein fehlerfreies Endergebnis zu erhalten [10, 74].

Zum Erreichen der finalen Geometrie durch die Hydroumformung wird ein Werkzeug benötigt, dessen Innenform der geforderten Kontur entspricht und das Rohr komplett einschließt. Eine vorherige Vorformung verhindert, dass durch das Zufahren der Werkzeuge beim Hydroumformen eine Quetschung des Rohres stattfindet. Die finale Kontur wird durch eine komplett geschlossene Werkzeugform in Kombination mit Innendruck realisiert. Dabei entscheidet die Vorform unter anderem über eine mögliche Rissbildung [41, 88], das Knicken der Kontur [101], die Wanddickenverteilung [20, 49], den notwendigen Innendruck [73], die Konturgenauigkeit [76] und auch über die Rückfederung [19]. Dabei hat die Werkzeugform auch einen wesentlichen Einfluss auf das Hydroumformergebnis. Die zusätzliche Querschnittsdeformation durch das Schließen der Werkzeugform

[54, 62, 140] und auch der notwendige Freiraum für den Materialfluss [77, 120], der in der folgenden Hydroumformung wieder korrigiert werden muss, gehören dazu.

Eine Vorformung im Biegebereich erfordert eine Anpassung der Umformwerkzeuge, da es im Biegebereich zu signifikanten geometrischen Abweichungen kommen kann. Dadurch ist der Materialfluss bei der Vorformung bereits sehr fehleranfällig. Der Effekt der Vorformoperationen wurde in verschiedenen Arbeiten aufgezeigt [2, 17, 68, 124]. Trana [124] zeigte, dass die Auswahl des Biegedorns einen großen Einfluss auf die anschließende Querschnittsänderung hat. Zudem musste bei großen Deformationen zum Erreichen der finalen Geometrie eine Vorformung des Rohrquerschnitts durchgeführt werden. Der Rohrquerschnitt wurde dazu lokal durch einen ebenen Stempel vorgeformt. Durch das Vorformen konnte das Quetschen des Rohres beim nachfolgenden Zusammenfahren der Werkzeuge erfolgreich verhindert werden. Kim et al. [68] optimierten den Hydroumformprozess bei gegebener Vordeformation des Rohrquerschnitts. Cai et al. [17] ermittelten mittels eines Optimierungsprozesses eine geeignete Vorform zur Reduzierung der Materialausdünnung und zum Erreichen einer geeigneten Materialverteilung. Dazu wurden mittels Regressionsanalyse die Form und der notwendige Hub des Stempels optimiert. Anspruchsvolle Rohrgeometrien konnten somit nur durch eine geeignete Vordeformation realisiert werden. Han et al. [50, 140] untersuchten den Einfluss des Biegeprozesses und der Schweißnahtposition auf die Rückfederung und die Wandstärkenverteilung im Hydroumformprozess. Vor allem die Schweißnaht führte bei falscher Positionierung zu einer Rissbildung, was die Sonderstellung der Schweißnaht in der Prozesskette verdeutlicht.

Die Auswahl geeigneter Umformwerkzeuge ist beim Rohrprägen essentiell, weil kein Innendruck verwendet wird und die finale Rohrgeometrie ohne weitere Umformung erreicht werden muss. Mit steigender Querschnittsminderung des Rohres kann eine plane Prägefläche nur mit geeigneten Werkzeugeinstellungen realisiert werden. Xi et al. [131] untersuchten den Einfluss des Hydropressens auf die Rohrgeometrie. Zu diesem Zweck wurden Stempel mit ebener Form und Stempel mit konvex gekrümmter Form verwendet, um das Rohr beidseitig zu pressen. Das konventionelle Eindrücken des Rohres ohne zusätzlichen Innendruck führte vor allem bei steigendem Hub zu einem Einfall der Rohroberfläche und dadurch zu einem unerwünschten Rohrquerschnitt. Erst durch die Hinzunahme des Innendrucks konnte das Einknicken des Rohres verhindert werden. Yuan et al. [136] pressten das Rohr mit einem quadratischen Klemmquerschnitt, der in zwei Werkzeuge unterteilt wurde. Die untere Klemme diente als Rohrhalterung und die Obere als Stempel. Das Ergebnis zeigte leicht eingefallene Mantelflächen, die durch das anschließende Hydroumformen geglättet wurden. Weitere Arbeiten [2, 49, 62] verdeutlichen ebenfalls die Notwendigkeit des Innendrucks beim Vorformen zur Verhinderung eines unerwünschten Rohrquerschnitts.

Die vorliegende Arbeit soll einen ersten Grundstein zur numerischen Umsetzung der Prozesskette aus Rohrbiegen und Rohrprägen mit anschließender Optimierung legen. Fokussiert wird auf eine industrielle Anwendung, wodurch Fehlerquellen wie chargenbedingte Toleranzen des Werkstücks zusätzlich untersucht werden müssen.

3.4 Diskussion der numerischen Modellierung

In diesem Kapitel wurden die entsprechenden Werkzeuge zur numerischen Abbildung der Experimente aus Kapitel 2 erläutert. Die Simulationsmodelle im folgenden Kapitel wurden mittels dieser Grundlagen entwickelt. Dazu wurden drei Teilbereiche betrachtet:

- Nichtlineares Randwertproblem:
 - **Nichtlinearitäten** durch große Formänderungen, elastisch-plastisches Materialverhalten und Änderungen in der Belastung oder im Kontakt zwischen zwei Körpern müssen bei der Formulierung der kontinuumsmechanischen Beziehungen berücksichtigt werden.
 - Zur Berechnung von Randwertproblemen der Kontinuumsmechanik wurden die **kinematische Beziehungen**, das **Werkstoffgesetz** und die **lokale Form der Impulsbilanz** benötigt.
- Finite-Elemente-Methode
 - Die **schwache Form der Impulsbilanz** wird räumlich und zeitlich diskretisiert. Für die **räumliche Diskretisierung** sind die Elementauswahl und die Elementanzahl entscheidend. Bei der **zeitliche Diskretisierung** wird je nach Anwendung zwischen einer impliziten und einer expliziten Integrationsmethode unterschieden.
 - Bei der **Umsetzung in Abaqus[®]** werden lineare Schalenelemente mit reduzierter Integration eingesetzt. Für die Umformung wird eine explizite Berechnungsmethode verwendet, wohingegen die Rückfederung des Materials durch eine implizite Berechnungsmethode simuliert wird. Beim Werkstoffverhalten wird ein elastisch-plastisches Materialgesetz mit isotroper Verfestigung angewandt. In der Simulation werden sowohl der Kontakt als auch die Reibung zwischen den Körpern berücksichtigt.

- Aktueller Stand der numerischen Umsetzung
 - Die numerische Umsetzung von **Rohrbiegeprozessen** ist in der Literatur bereits vielfach untersucht worden und stellt dennoch für viele Klein- und Mittelunternehmen nicht den Stand der Technik dar.
 - Die numerische Umsetzung von **Rohrprägeprozessen** wurde noch nicht untersucht. Lediglich ähnliche Prozessabläufe, wie die Vorformoperation des Hydroumformens, sind in der Literatur vertreten.

4

Simulation

In diesem Kapitel werden die realen Umformprozesse aus Kapitel 2 mit Hilfe der Finite-Elemente-Methode (vgl. Kap. 3) in Simulationen nachgebildet und sowohl experimentell als auch numerisch untersucht. Grundlage der numerischen Untersuchungen ist eine eigens entwickelte graphische Benutzeroberfläche, mit der alle Simulationen automatisch umgesetzt werden können. Zu diesem Zweck werden alle Funktionen der graphischen Benutzeroberfläche und die entsprechende Kommunikationsstruktur im Hintergrund vorgestellt. Die numerische Modellierung des Werkstücks nimmt innerhalb der Simulationen eine wesentliche Rolle ein, da das Werkstück mittels der Elementanzahl über die Simulationsdauer und die Ergebnisgenauigkeit entscheidet. Zusätzlich soll geklärt werden, inwiefern in den verschiedenen Umformprozessen chargenbedingte Werkstücktoleranzen eine Ursache für Ergebnisabweichungen darstellen. Da die Validierung der Simulationsmodelle und somit der Vergleich mit den experimentellen Ergebnissen mit Nennmaßen des Werkstücks stattfindet, muss geklärt werden, welche Werkstücktoleranzen das Ergebnis negativ beeinflussen können. Für die drei Umformprozesse aus Kapitel 2 werden somit jeweils eine Netzstudie durchgeführt, das Simulationsmodell durch einen Vergleich mit den Experimenten validiert und der Einfluss verschiedener Werkstücktoleranzen auf das Umformergebnis untersucht. Die Ergebnisse aus diesem Kapitel stellen die Grundlage für die Optimierung des gekoppelten Prozesses im nachfolgenden Kapitel dar.

4.1 Graphische Benutzeroberfläche DTFS

Die Simulation von Rohrumformprozessen erfolgt automatisiert über die entwickelte graphische Benutzeroberfläche *Derr Tube Forming Simulator* (DTFS). Die graphische Benutzeroberfläche ermöglicht auf Basis benutzerdefinierter Einstellungen

- den Aufbau des Simulationsmodells,
- die Durchführung der Simulation,
- die Auswertung des Simulationsergebnisses und
- die Optimierung der Werkzeugeinstellungen.

Die Kommunikationsstruktur der graphischen Benutzeroberfläche basiert auf unterschiedlichen Python[®]-Skripten (vgl. Abb. 4.1). Die Darstellung der graphischen Benutzeroberfläche und die Verarbeitung der Benutzereinstellungen erfolgt über das Masterskript. Durch das Masterskript werden spezifische Python[®]-Skripte zur Simulation, zur Auswertung und zur Optimierung aufgerufen und gesteuert. Mittels der spezifischen Python[®]-Skripte erfolgt die Kommunikation mit der Simulationssoftware Abaqus[®]. Alle notwendigen Informationen aus den Simulationen werden dazu in Abaqus[®] ausgelesen und Python[®]-intern verarbeitet.

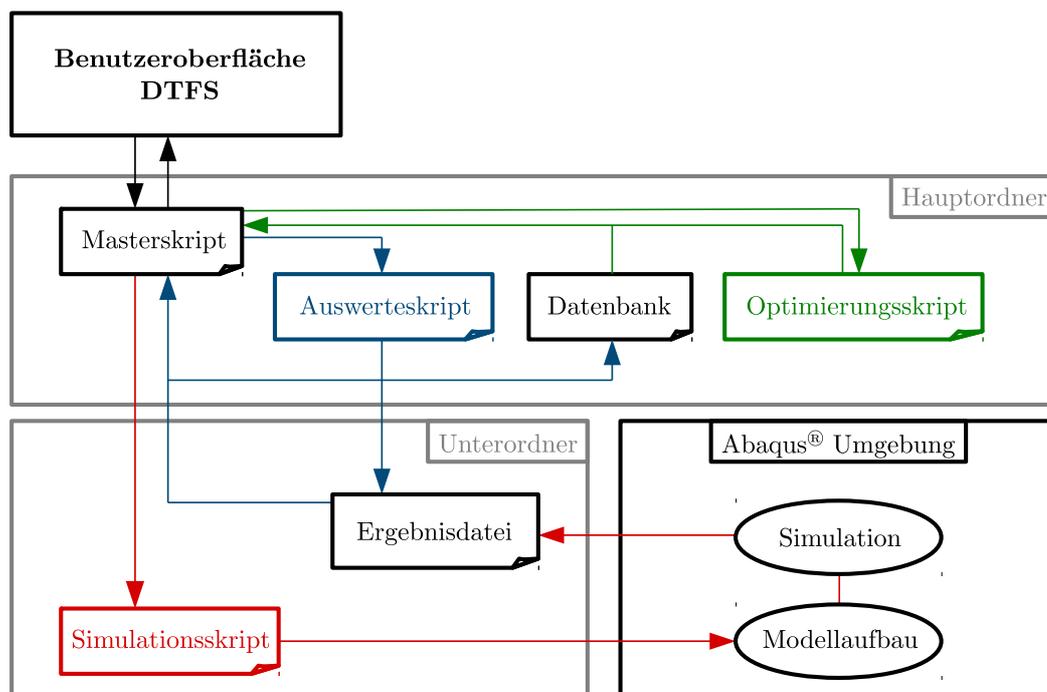


Abbildung 4.1: Kommunikationsstruktur der graphischen Benutzeroberfläche: das Masterskript wird im Hauptordner ausgeführt; jede Simulation wird in einem Unterordner ausgeführt

Die graphische Benutzeroberfläche ist in drei Bereiche unterteilt. **Der erste Bereich der graphischen Benutzeroberfläche** beinhaltet die Einstellparameter zum Aufbau des Simulationsmodells für die ausgewählte Rohrumformung. Die Auswahl umfasst sechs Rohrumformprozesse: (vgl. Abb. 4.2)

- das Prägen (1),
- das zweifache Prägen (2),
- das Biegen (3),
- das zweifache Biegen (4),
- das Biegen mit anschließendem Prägen (5) und
- das zweifache Biegen mit anschließendem Prägen (6).

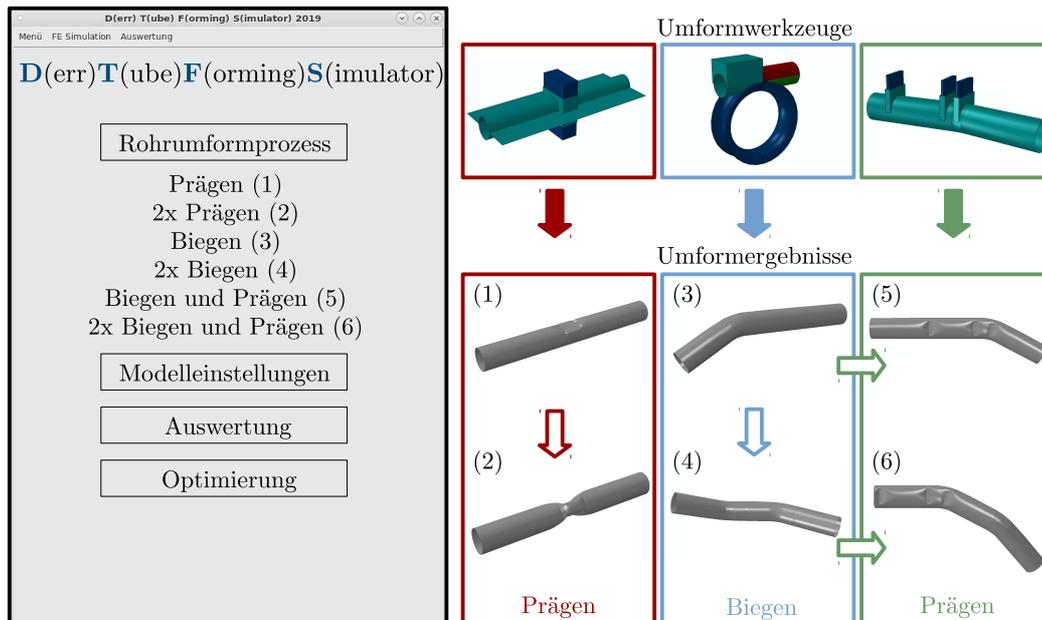


Abbildung 4.2: Die graphische Benutzeroberfläche "DTFS" mit allen Funktionen und Simulationsmodellen

Damit im jeweiligen Simulationsmodell alle Randbedingungen des Experiments abgebildet werden können, stehen ausgewählte Einstellparameter aus den Experimenten zur Verfügung. Die Einstellparameter der Werkzeuge und die des Werkstücks werden im Laufe des Kapitels näher erläutert. Alle Eingabeparameter besitzen beim Starten der graphischen Benutzeroberfläche Standardwerte, die durch den Benutzer modifiziert werden können. Die Benutzereingabe wird dabei auf Korrektheit überprüft. Dazu gehört die Überprüfung des Datentyps durch die Unterscheidung zwischen Buchstaben und Zahlen und die Einhaltung des zulässigen Einstellbereichs der einzelnen Parameter. Bei einer falschen Angabe wird der Benutzer auf die entsprechende Stelle

visuell hingewiesen. Bei korrekter Eingabe wird durch das Masterskript das Python[®]-Skript zur Erzeugung des Simulationsmodells aufgerufen. Das Simulationskript öffnet im Hintergrund die Simulationssoftware Abaqus[®], um das entsprechende Simulationsmodell mit den definierten Einstellungen schrittweise zu erzeugen. Dazu werden alle notwendigen Einstellungen in Abaqus[®] sukzessive durch entsprechende Python[®]-Befehle umgesetzt. Am Ende wird eine *input*-Datei von Abaqus[®] in einen extra angelegten Unterordner geschrieben, die alle Daten zum Starten der Simulation beinhaltet. **Der zweite Bereich der graphischen Benutzeroberfläche** ermöglicht die automatisierte Auswertung der Simulationsergebnisse. Die Auswertung umfasst prozessabhängige Geometrieparameter des Werkstücks. Dazu wird durch das Masterskript ein prozessspezifisches Auswerteskript gestartet, das in Abaqus[®] alle notwendigen Daten in der Ergebnisdatei ausliest. Die gesammelten Daten werden anschließend in Python[®] automatisiert ausgewertet und die Ergebnisse in der Benutzeroberfläche visualisiert. Zusätzlich werden die Ergebnisse in einer prozessspezifischen Datenbank, die für die Werkzeugoptimierung benötigt wird, gespeichert. **Der dritte Bereich der graphischen Benutzeroberfläche** umfasst die Optimierung der Werkzeugparameter, deren Einfluss auf den jeweiligen Umformprozess am größten ist. Der Variationsbereich der Einflussgrößen und die Anforderungen an die Zielgrößen sind durch den Benutzer einstellbar. Die Optimierung erfolgt komplett innerhalb der Python[®]-Umgebung in zwei Schritten. Im ersten Schritt werden die vorhandenen Prozessergebnisse in der prozessspezifischen Datenbank ausgewertet und mittels einer Regressionsanalyse ein Zusammenhang zwischen Einflussgrößen und Zielgrößen ermittelt. Die Qualität der Optimierung ist dadurch abhängig von den bereits berechneten und in der Datenbank vorhandenen Simulationsergebnissen. Im zweiten Schritt werden die ermittelten Zusammenhänge der Regressionsanalyse verwendet, um eine Zielfunktion zu definieren. Durch eine Optimierung der Zielfunktion mittels *SLSQP* (Sequential Least Square Programming)-Algorithmus werden Einflussgrößen ermittelt, die die Optimierungsvorgaben erfüllen. Der genaue Optimierungsablauf wird in Kapitel 5 diskutiert. Die Ausgabe der optimierten Einflussgrößen und die entsprechend vorhergesagten Zielgrößen erfolgt in der graphischen Benutzeroberfläche. Die drei Bereiche der graphischen Benutzeroberfläche bilden die Grundlage für die Realisierung aller nachfolgenden numerischen Ergebnisse.

4.2 Numerische Modellierung des Werkstücks

Aufbau

In der graphischen Benutzeroberfläche erfolgt die numerische Modellierung des Werkstücks über die Definition

- der Rohrgeometrie,
- des verwendeten Materials,
- der Anfangseigenstressen,
- der Reibung und
- der Diskretisierung (vgl. Abb. 4.3).



Abbildung 4.3: Einstellparameter zur numerischen Modellierung des Werkstücks in der graphischen Benutzeroberfläche "DTFS"

Die **Rohrgeometrie** umfasst den Außendurchmesser, die Wandstärke, die Länge und die Querschnittsform (vgl. Kap. 2.3.1). Innerhalb der Simulation wird dem untersuchten Rohr standardmäßig ein Nennaußendurchmesser von 60 mm, eine Nennwandstärke von 1,2 mm und eine Nennlänge von 500 mm zugewiesen. Der Querschnitt des Rohres wird standardmäßig kreisförmig dargestellt. Bei der Herstellung von Rohren gibt es

produktionsbedingte Toleranzen, die nach DIN EN ISO 1127 [30] zu Abweichungen in den Geometriewerten und im Rohrquerschnitt führen. Die Toleranzgrenzen der Rohre betragen nach DIN EN ISO 1127 [30] im **Außendurchmesser** $60 \text{ mm} \pm 0,3 \text{ mm}$, in der **Wandstärke** $1,2 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$ und in der **Länge** $500 \text{ mm} \pm 2 \text{ mm}$. Die Längentoleranz des Rohres von $\pm 2 \text{ mm}$ ist bei einer Nennlänge von 500 mm vernachlässigbar und hat daher keinen Einfluss auf die Umformvorgänge, sodass diese nicht explizit untersucht werden. Im Rahmen der Außendurchmessertoleranz von $60 \text{ mm} \pm 0,3 \text{ mm}$ ist zudem eine Ovalität des Rohrquerschnitts möglich. Die Ovalität wird über die Differenz von Rohrbreite zu Rohrhöhe definiert.

Die **Materialauswahl** umfasst die beiden Edelstähle 1.4301 und 1.4509, deren Materialkennwerte in Zugversuchen ermittelt wurden (vgl. Tab. 2.1). Wird für die Simulation jedoch keine eigene Materialcharakterisierung durchgeführt, so muss in der Regel auf Materialkennwerte aus der Literatur zurückgegriffen werden. Es werden beispielhaft jeweils eine Fließkurve für das Material 1.4301 [35] und für das Material 1.4509 [96] aus der Literatur entnommen, um die Auswirkungen eines solchen Wechsels von Materialkennwerten beurteilen zu können (vgl. Abb. 4.4).

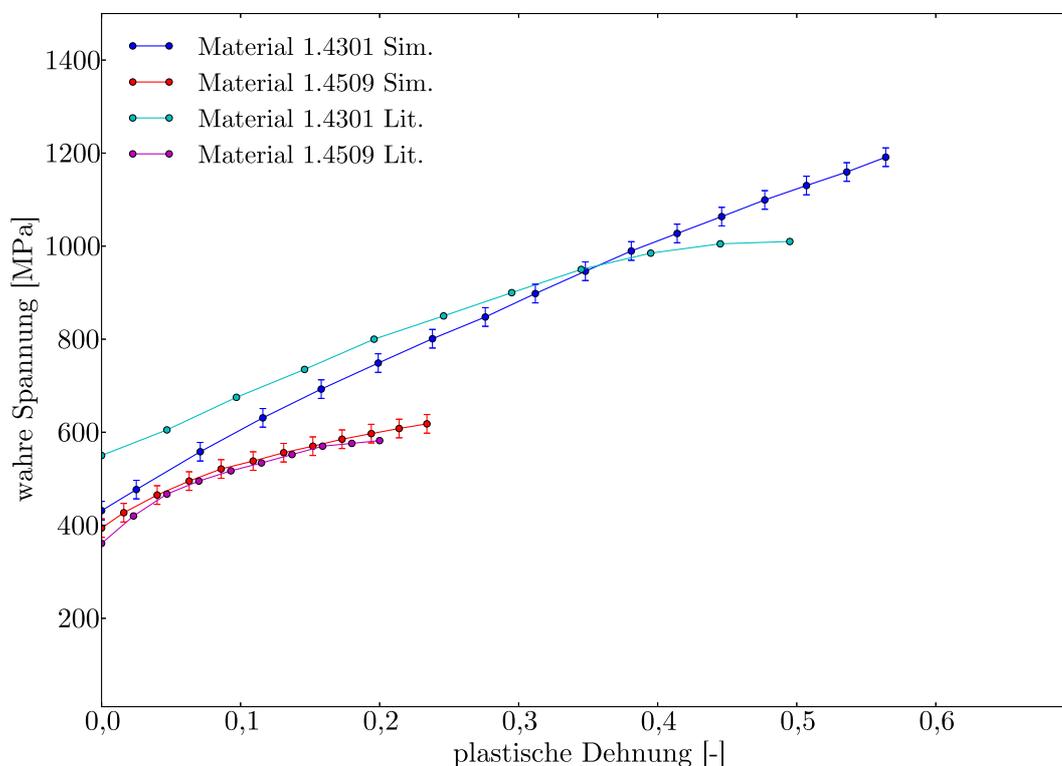


Abbildung 4.4: Experimentell ermittelte Fließkurven (Sim.) mit entsprechender Streuung um den Mittelwert und Fließkurven aus der Literatur (Lit.) [35, 96]

Grundsätzlich existieren Schwankungen in den Daten, die z.B. aus unterschiedlichen Rohrchargen oder aus experimentellen Bedingungen resultieren. Die experimentell ermittelten Fließkurven aus der vorliegenden Arbeit stellen Mittelwerte dar und unterliegen somit ebenfalls einem gewissen Maß an Streuung. Die Streuung der Messdaten wird in Abbildung 4.4 durch Fehlerbalken visualisiert. Der Kurvenverlauf des Materials 1.4509 aus der Literatur weist einen ähnlichen Verlauf zur experimentell ermittelten Kurve des Materials 1.4509 auf und liegt dadurch im Bereich der Streuung. Da beide Kurven in einem Streubereich liegen, sind ähnliche Umformergebnisse zu erwarten. Der Kurvenverlauf des Material 1.4301 aus der Literatur liegt nicht im Streubereich der experimentell ermittelten Fließkurve 1.4301. Daher können die unterschiedlichen Materialkennwerte nicht mehr nur auf Materialtoleranzen zurückgeführt werden. Neben Materialtoleranzen können auch die Methoden und die Versuchsbedingungen zur Charakterisierung eines Materials bei gleichem Materialtyp zu unterschiedlichen Kurvenverläufen führen. Während die Fließkurve des Materials 1.4509 aus der Literatur ebenfalls durch Zugversuche ermittelt wurde, ist die Kurve des Materials 1.4301 aus der Literatur durch Druckversuche charakterisiert worden. Obwohl beide Versuchsarten geeignet sind und die Kurvenverläufe auch jeweils im Toleranzbereich des Materials liegen, sind für das Material 1.4301 Unterschiede im Ergebnis zu erwarten. Inwiefern unterschiedliche Materialkennwerte zu Abweichungen im simulierten Umformergebnis führen und dadurch eine verlässliche Vorhersage erschweren, wird noch im Laufe des Kapitels geklärt.

Herstellungsbedingte **Anfangseigenstressen** werden zwar im Simulationsmodell standardmäßig nicht berücksichtigt, jedoch wird der Einfluss auf das Umformergebnis numerisch untersucht. Anfangseigenstressen entstehen durch den Herstellungsprozess des Rohres, z.B. den Schweißprozess oder durch andere bereits vollzogene Vorformoperationen und müssen daher als Quelle von Ergebnisabweichungen berücksichtigt werden. Die Bestimmung der Anfangseigenstressen ist schwierig, da sie nicht konstant und homogen entlang des Rohres verteilt sind. Dadurch ist eine numerische Berücksichtigung der Anfangseigenstressen nicht eindeutig realisierbar. Die Anfangseigenstressen werden im Rahmen der Arbeit nicht experimentell ermittelt, sondern es wird eine Funktion in Abaqus[®] zur Erzeugung einer künstlichen Anfangseigenstressverteilung verwendet. Die Anfangseigenstressverteilung kann durch Vorgabe der Zugspannungswerte und der Druckspannungswerte begrenzt werden. Wird ein Spannungswert über der Fließgrenze des jeweiligen Materials vorgegeben, so erfolgt bereits eine plastische Verformung des Materials. Obwohl dieses Vorgehen die Untersuchung des Einflusses von Anfangseigenstressen ermöglicht, ersetzt es nicht die Bestimmung der realen Anfangseigenstressen.

Reibung entsteht bei einer Relativbewegung zweier in Kontakt stehender Körper [71]. So erhöht die Reibung die benötigte Kraft in Umformprozessen und ist ein wichtiger Faktor bei der Durchführung von Umformprozessen [34]. Obwohl die Reibung nur bedingt kontrollierbar ist, müssen die Einflussfaktoren sorgfältig berücksichtigt werden. Die Auswahl des Umformprozesses ist maßgeblich verantwortlich für den Umformablauf und somit für die Reibungsentstehung. Darauf aufbauend erfolgen die entsprechende Materialauswahl und die benötigte Oberflächenbeschaffenheit. Die Verwendung von Schmiermitteln kann dabei eine entscheidende Rolle besitzen, da sie die Reibung reduziert. Bei der numerischen Umsetzung der Reibung ist die Auswahl eines passenden Reibungskoeffizienten problematisch. Die Oberflächenbeschaffenheit der Bauteile und der Einsatz von Schmiermitteln erschweren die Definition eines einheitlichen Reibungskoeffizienten. Durch Vorgabe eines konstanten Wertes werden die realen Reibungsbedingungen während der Umformung nur vereinfacht dargestellt. Da die experimentelle Ermittlung von Reibwerten aus den genannten Gründen nicht eindeutig und nur schwer zu erfassen ist, werden typische Werte aus der Literatur zur numerischen Umsetzung verwendet [81, 100]. Die Reibungskoeffizienten können über die Benutzeroberfläche variiert werden, um den Einfluss in den Umformprozessen zu bewerten.

Die **Diskretisierung** des Rohres ist abhängig von der Modellierung des Rohres im Simulationsmodell und entscheidet über die Ergebnisgenauigkeit und die Simulationsdauer. Zur numerischen Modellierung in Abaqus[®] wird das Rohr mit 4-Knoten Schalenelementen des Typs *S4R* mit reduzierter Integrationsordnung vernetzt (vgl. Kap. 3.2.3). Die Diskretisierung des Rohres erfolgt durch die Vorgabe der Knotenpunkte entlang des Rohrumfanges. Über den bekannten Rohraußendurchmesser wird die Kantenlänge der Elemente entlang des Umfangs ermittelt und für die Diskretisierung entlang der Rohrlänge übernommen. Dadurch ergeben sich quadratische Viereckselemente, die ringweise entlang des Rohres verteilt sind. Zur Ermittlung der notwendigen Elementanzahl wird jeweils eine Netzstudie für den Prägeprozess und für den Biegeprozess durchgeführt. Durch die Netzstudien wird eine gemeinsame Diskretisierung des Rohres von ca. 156.250 Elementen ermittelt, die ein Kompromiss zwischen Ergebnisgenauigkeit und benötigter Berechnungsdauer darstellt. Eine detaillierte Beschreibung der beiden Netzstudien erfolgt bei der Vorstellung der entsprechenden Simulationsmodellen.

Auswertung

Die Auswertung des umgeformten Rohres erfolgt über die graphische Benutzeroberfläche, wobei für jeden Umformprozess ein eigenes Auswerteskript verwendet wird. Die Ablaufstruktur in den Auswerteskripten ist dabei für jeden Prozess ähnlich. Die Auswertung der Ergebnisse wird über ein Python[®]-Skript realisiert, das auf die Er-

gebnisdateien der Simulationen zugreift und skriptintern die Daten verarbeitet. Die Auswertung basiert auf der ringweisen Verteilung der Knoten entlang des Rohres, wodurch die Position jedes Knotens im undeformierten Zustand bekannt ist. Durch die Auswertung jeder Knotenverschiebung lassen sich die Positionen im deformierten Zustand bestimmen. Dies ermöglicht beispielsweise die Ermittlung der geometrischen Abmaße im lokalen Prägebereich und auch die Bestimmung der Rohrmittellinie für den Biegewinkel. Da jeder Umformprozess eine Rückfederung beinhaltet, wird der deformierte Zustand vor und nach der Rückfederung bestimmt. Die Wandstärkenextrema werden bereits in Abaqus[®] intern ausgewertet und können somit direkt übernommen werden. Zur Überprüfung, ob das Simulationsergebnis Umformfehler aufweist, werden die in Abaqus[®] ermittelten Energiewerte verwendet. Diese Informationen werden in allen Auswerteskripten standardmäßig ausgewertet und unterscheiden sich anschließend nur in der Verarbeitung. Alle Simulationen werden mit Einstellparametern und entsprechenden Ergebniswerten in einer prozessspezifischen Datenbank gespeichert. Im Rahmen der Arbeit werden alle Ergebnisse bis auf die zweite Nachkommastelle ausgewertet.

Anwendung

Im Folgenden werden die Simulationsmodelle der Rohrumformprozesse

- des Prägens gerader Rohre,
- des Biegens gerader Rohre und
- des Prägens gebogener Rohre

der Reihe nach diskutiert. Die numerische Umsetzung der genannten Umformprozesse erfolgt jeweils in drei Abschnitten (vgl. Abb. 4.5). Im ersten Abschnitt werden die Simulationsmodelle mit den entsprechenden Einstellparameter und den notwendigen Randbedingungen vorgestellt. Im zweiten Abschnitt erfolgt die Validierung des Modells durch einen Vergleich der Simulationsergebnissen mit den dazugehörigen Experimenten aus Kapitel 2. Dabei besitzt das verwendete Werkstück in der Simulation Nennmaße bzw. wird mit den numerischen Standardwerten modelliert. Im dritten Abschnitt werden chargenbedingte Toleranzen im Werkstück berücksichtigt und der Einfluss der vorgestellten Werkstückvariationen auf den jeweiligen Umformprozess numerisch untersucht.

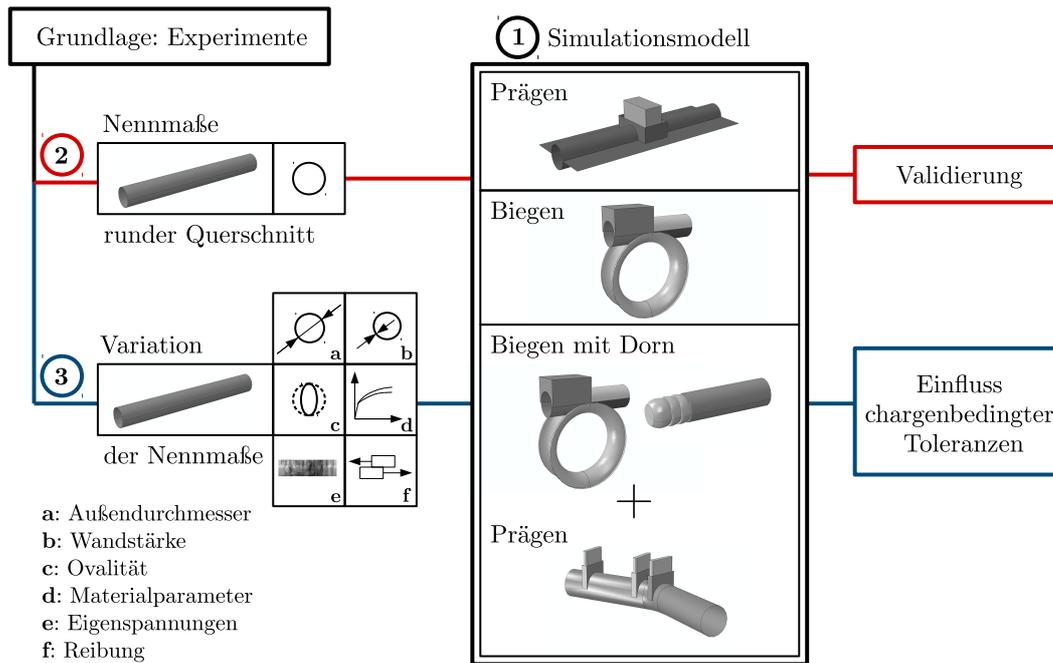


Abbildung 4.5: Numerische Untersuchung der Experimente: Aufbau der Simulationsmodelle (Schritt 1), Validierung des Simulationsmodells mit Nennmaßen des Rohres (Schritt 2); die Untersuchung chargenbedingter Toleranzen durch Variation verschiedener Rohrparameter (Schritt 3)

4.3 Numerische Darstellung des Prägeprozesses

4.3.1 Simulationsmodell des Prägeprozesses

Einstellparameter

Die Einstellparameter des Prägeprozesses umfassen die Geometrie des Prägestempels und die der Rohrklammung (vgl. Abb. 4.6). Im Experiment werden zwei Stempelgeometrien mit einer ebenen Prägefläche (S1) und einer konvex gekrümmten Prägefläche (S2) verwendet, die in der graphischen Benutzeroberfläche ausgewählt werden können (vgl. Abb. 2.21 (b)). Neben den beiden Stempel aus dem Experiment lassen sich auch beliebige Stempelformen generieren. Jede Stempelform besitzt eine Symmetrie in Längsrichtung und eine Symmetrie in Breitenrichtung. Die Längsrichtung des Stempels stimmt mit der Richtung der Rohrmittellinie überein. Die Schnittlinie der beiden Symmetrieebenen steht immer senkrecht auf der Rohrmittellinie und definiert zudem die Belastungsrichtung. Die **Stempelform** in Breitenrichtung wird über einen Wert definiert, der den relativen Höhenunterschied zwischen Mittellinie und Außenkante der Prägefläche festlegt (vgl. Abb. 2.13 (a)). Ein negativer Wert der Höhe bedeutet eine Verlagerung der Mittellinie ins Stempelinnere, wodurch eine konkav gekrümmte Fläche entsteht. Ein positiver Wert führt zu einer konvex gekrümmten Fläche und bei

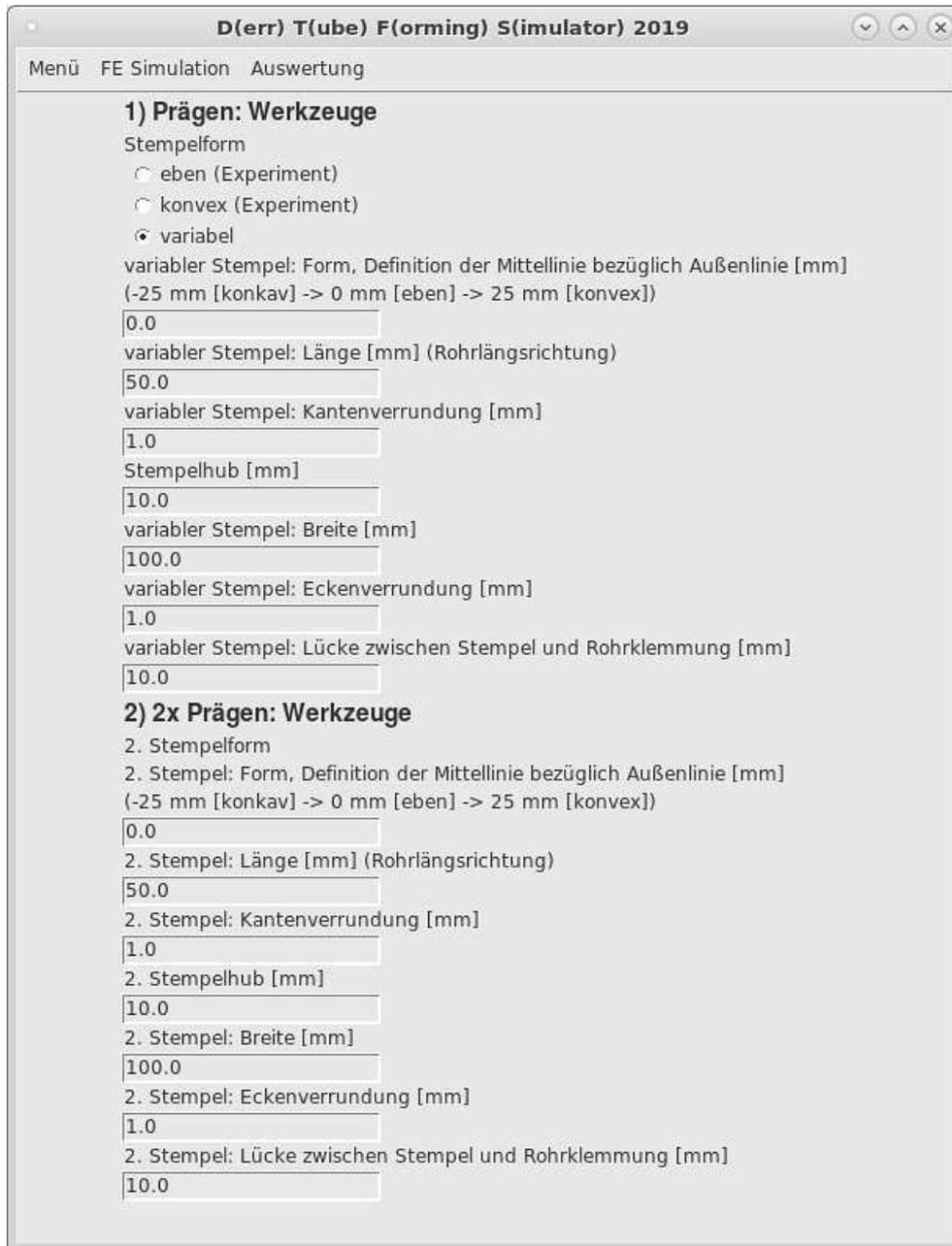


Abbildung 4.6: Einstellmöglichkeiten für den Prägeprozess und die dazugehörigen Standardwerte in der graphischen Benutzeroberfläche "DTFS"

einem Wert von 0 mm wird eine ebene Stempelform festgelegt. Der maximal mögliche Variationsbetrag von ± 25 mm entspricht der halben Stempelhöhe. Die Stempelhöhe besitzt somit einen festen Wert von 50 mm. Die Grundfläche zum Prägen wird über die **Stempellänge** in Rohrlängsrichtung und die **Stempelbreite** senkrecht zur Rohrlängsrichtung festgelegt. Die Stempelbreite ist in der Regel größer als der Rohraußendurchmesser, damit das Rohr über die gesamte Breite geprägt wird. Durch die **Kantenverrundung** werden weiche Übergänge von geprägter Fläche zu ungeprägter Fläche geschaffen. Mit steigendem Wert werden nicht nur die Kanten abgerundet,

sondern die Stempelform in Rohrlängsrichtung modifiziert. Zusätzlich zur Stempelgeometrie wird der Verfahrweg in Belastungsrichtung durch den **Stempelhub** definiert. Der Verfahrweg des Stempels lässt sich bis zu einem Hub von 15 mm realisieren. In der Rohrklemmung wird dafür eine Öffnung mit den Maßen der Stempelgrundfläche berücksichtigt. Da im Experiment die Öffnung größer als die Stempelgrundfläche ist, kann eine zusätzliche Erweiterung der Öffnung definiert werden. Die **Rohrklemmung** wird in der graphischen Benutzeroberfläche durch den Innendurchmesser definiert. Dadurch können Werkstückvariationen berücksichtigt oder zusätzlicher Freiraum um das Rohr geschaffen werden. Eine Änderung des Klemmquerschnitts ist aufgrund der Vielzahl an Möglichkeiten nicht vorgesehen. Die Reibung zwischen Rohr und Prägwerkzeugen wird standardmäßig mit einem Reibungskoeffizienten von 0,1 berücksichtigt.

Der einfache Prägeprozess kann durch einen zweiten Prägestempel erweitert werden. Der zweite Stempel ist gegenüber dem ersten Stempel positioniert. Dadurch kann das Rohr von zwei Seiten gleichzeitig geprägt werden. Die Stempelgeometrie kann analog und unabhängig zum ersten Stempel modifiziert werden.

Aufbau

Zur Simulation des Rohrprägens werden zwei Simulationsmodelle in Abaqus[®] benötigt, ein explizit berechnetes Modell zur Simulation des Prägevorgangs und ein implizit berechnetes Modell für die Rückfederung (vgl. Abb. 4.7). Dadurch wird zuerst das explizite Modell berechnet und das Simulationsergebnis als Anfangszustand im impliziten Modell verwendet.

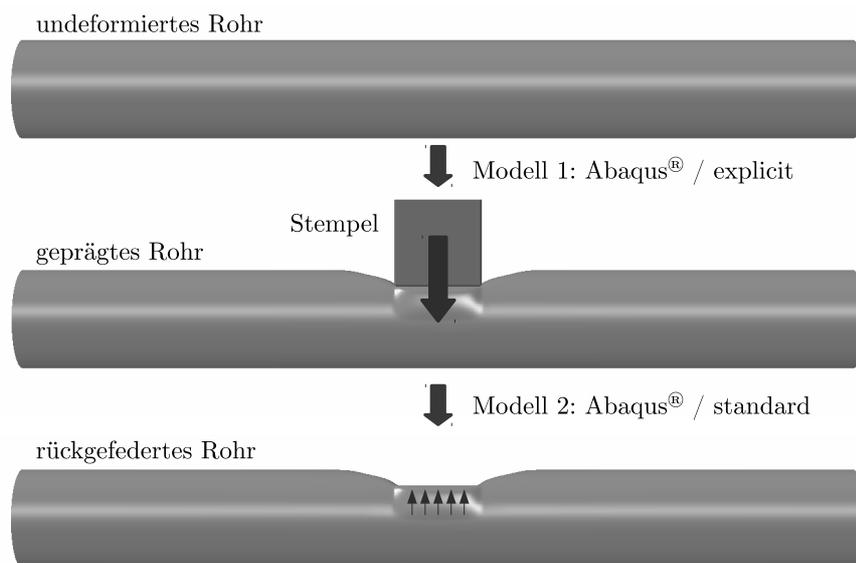


Abbildung 4.7: Ablauf des Prägeprozesses durch die unterschiedlichen Simulationsmodelle in Abaqus[®]

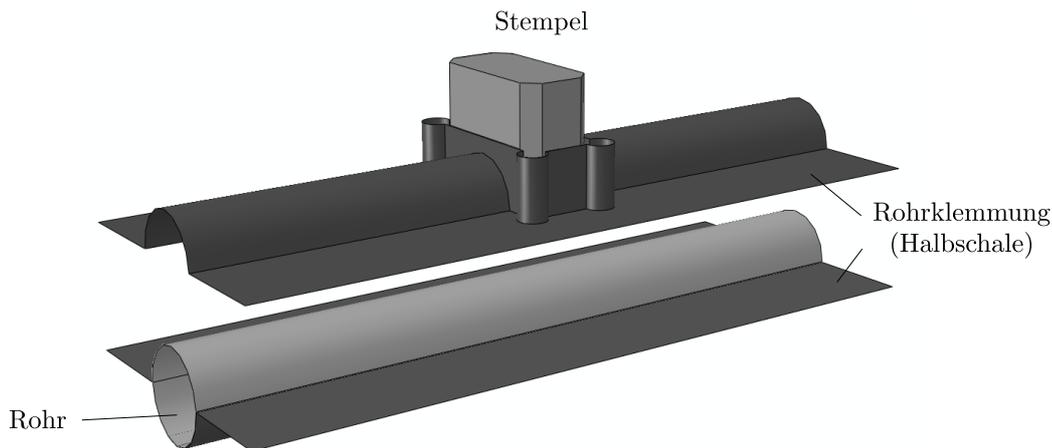


Abbildung 4.8: Werkzeuge des einfachen Prägeprozesses im Simulationsmodell

Im **expliziten Modell** werden beide Prägewerkzeuge - der Prägestempel und die Rohr­klemmung (vgl. Abb. 4.8) - verwendet. Beide Prägewerkzeuge sind diskretisierte Starrkörper, deren Oberfläche mit 4-Knoten bi-linearen Viereckselementen des Typs *R3D4* vernetzt werden. Die Rohr­klemmung besteht aus zwei Halbschalen, die einen Nenninnenradius von jeweils 30 mm besitzen und zusammengefahren das Rohr klemmen. Im Gegensatz zum Experiment ist die Klemmung von Beginn an geschlossen und fixiert, sodass die Klemmung im Simulationsmodell nicht gelöst werden kann. Zu Beginn liegt das Rohr kräftefrei ohne Vordeformationen in der Rohr­klemmung. Die Öffnung für den Prägestempel ist wie im Experiment an der oberen Hälfte der Rohr­klemmung realisiert und der Prägestempel wird direkt über dem Rohr platziert. Um den Bewegungsablauf besser kontrollieren zu können, ist im Rahmen der Simulation das Prägen durch den Stempel verschiebungsgesteuert. Im Vergleich zu einer kraftgesteuerten Umformung ergeben sich keine Unterschiede in den Ergebnissen. Die Randbedingungen des Stempels ermöglichen nur ein Verfahren in Belastungsrichtung, wodurch die restlichen Freiheitsgrade gesperrt sind. Die Simulationszeit wird so definiert, dass mit einer Verfahrensgeschwindigkeit von 1 m s^{-1} eine quasistatische Berechnung gewährleistet ist. Eine entsprechende Prüfung findet nach der Berechnung durch eine Energieauswertung statt (vgl. Kap. 3.2.2). Die Umformgeschwindigkeit in der Simulation ist somit um einen Faktor 200 schneller als im Experiment.

Im Experiment erfolgt die **Rückfederung** der Prägestelle durch das Herausfahren des Stempels. Im implizit statischen Modell müssen zur Berechnung der Rückfederung jedoch alle Prägewerkzeuge entfernt werden, um die Anzahl von problematischen Nichtlinearitäten bei der Simulation zu reduzieren. Aufgrund fehlender Werkzeuge im Modell muss zur Verhinderung einer unerwünschten Starrkörperbewegung das Rohr an den Außenkanten fixiert werden. Die Prägestelle wird aufgrund der Rohrlänge nicht durch

die Randbedingungen beeinflusst.

Der Aufbau des Simulationsmodells des **doppelseitigen Prägens** ist analog zum einfachen Prägen. Das explizite Modell wird durch einen zweiten Prägestempel ergänzt und eine entsprechende Öffnung wird an der unteren Hälfte der Rohrklemmung eingefügt.

Auswertung

Die Auswertung des Prägeprozesses beinhaltet die Bestimmung

- der Prägehöhe,
- der Prägebreite,
- der Prägetiefe,
- die Rückfederung und
- der minimalen / maximalen Wandstärke (vgl. Abb. 2.14).

Im Auswerteskript werden zur Bestimmung der Zielgrößen die ringweise Anordnung der Knoten entlang des Rohres und die Ausrichtung des Koordinatensystems in Belastungsrichtung ausgenutzt. Die Ermittlung der Prägehöhe erfolgt somit durch den horizontalen Abstand zwischen dem höchsten und dem tiefsten Punkt im geprägten Rohrbereich. Der vertikale Abstand zwischen den beiden äußeren Punkten liefert die Prägebreite. Die Prägetiefe wird innerhalb der Prägefläche durch den horizontalen Abstand der höchsten Stelle zur tiefsten Stelle ermittelt. Damit nur die Prägefläche zur Auswertung der Prägetiefe verwendet wird, sind zusätzliche Kontrollen im Auswerteskript notwendig. Für die Rückfederung wird der Zustand der Prägefläche am höchsten Punkt nach dem Prägen mit dem Zustand nach der Rückfederung verglichen. Die minimale und die maximale Wandstärke werden in Abaqus[®] als zusätzliche Parameter ausgegeben.

Die Auswertung des beidseitigen Prägens in der Simulation erfolgt analog zum einfachen Prägen, wobei die Prägetiefe jeweils für beide Seiten getrennt ausgewertet wird.

4.3.2 Vergleich mit experimentellen Prägeergebnissen

Durch den Vergleich der experimentellen Ergebnisse und der numerischen Ergebnisse wird das Simulationsmodell validiert. Zur Validierung des Simulationsmodells sind zwei Schritte notwendig. Im ersten Schritt erfolgt eine **Netzstudie**, um eine Elementanzahl des Werkstücks zu ermitteln, ab der bei weiterer Erhöhung keine wesentlichen Änderungen im Ergebnis mehr auftreten. Die ermittelte Elementanzahl wird dann für

die nachfolgenden Simulationen verwendet. Im zweiten Schritt erfolgt der **Vergleich** der Simulationsergebnisse mit den experimentell ermittelten Resultaten. Dazu werden für die numerische Modellierung des Rohres Nennmaße verwendet. Für beide Schritte werden die experimentell ermittelten Materialdaten der Edelmärkte 1.4301 und 1.4509 (vgl. Abb. 2.18) und die beiden Stempelformen mit ebener Fläche (S1) und konvexer Fläche (S2) (vgl. Abb. 2.21 (b)) verwendet. Der Stempelhub wird fertigungsbedingt auf 5,8 mm, 10,2 mm und 14,6 mm festgelegt. Für die Netzstudie und die Validierung werden die Zielgrößen der Prägehöhe, der Prägebreite und der Prägetiefe verwendet.

Netzstudie

Die Netzstudie des einfachen Prägens wird jeweils für beide Materialien - 1.4301 und 1.4509 - und für beide Stempelformen - eben und konvex - bei einem Stempelhub von 10,2 mm durchgeführt. Dann wird die Diskretisierung schrittweise erhöht, bis die Simulationsergebnisse keine wesentliche Änderung mehr aufweisen. Im Rahmen der Arbeit wird die Genauigkeitsgrenze auf 0,1 mm festgelegt. Dazu wird die Elementanzahl entlang des Rohrquerschnitts von 50 aufsteigend in 20er-Schritten erhöht und die resultierende Kantenlänge in Längsrichtung des Rohres übernommen. In Abbildung 4.9 wird anhand des ebenen Stempels (S1) das Ergebnis der Netzstudie visualisiert.

Die Prägehöhe (vgl. Abb. 4.9 (oben)) besitzt für beide Materialien einen ansteigenden Kurvenverlauf, der ab einem Wert von ca. 156.000 Elementen abflacht und in ein Plateau übergeht. Der Anstieg im Plateau bis zum letzten Wert beträgt lediglich 0,06 mm (1.4301) bzw. 0,07 mm (1.4509) bei einem gleichzeitig 2,5-fachen Anstieg der Elementanzahl. Die Prägebreite (vgl. Abb. 4.9 (mitte)) weist am Anfang der Kurve einen starken Anstieg auf und fällt dann leicht ab. Ab einer Elementanzahl von ca. 117.000 beträgt die Ergebnisänderung weniger als 0,03 mm und ist somit minimal. Die Prägetiefe (vgl. Abb. 4.9 (unten)) hat bei einer geringen Elementanzahl einen hohen Wert und fällt mit Verfeinerung des Netzes deutlich ab. Ab einem Wert von ca. 144.000 Elementen beträgt bei einer weiteren Verfeinerung des Netzes die maximale Differenz nur noch 0,05 mm. Für die konvexe Stempelfläche (S2) war bei allen drei Zielgrößen eine geringe Elementanzahl notwendig als bei der ebenen Stempelfläche (S1), um einen Kompromiss zwischen Genauigkeit und Simulationsdauer zu erreichen. Die größte ermittelte **Elementanzahl von 156.250** führt zu einer maximalen Abweichung von 0,07 mm in der Prägehöhe und wird daher im Folgenden für alle Prägesimulationen verwendet.

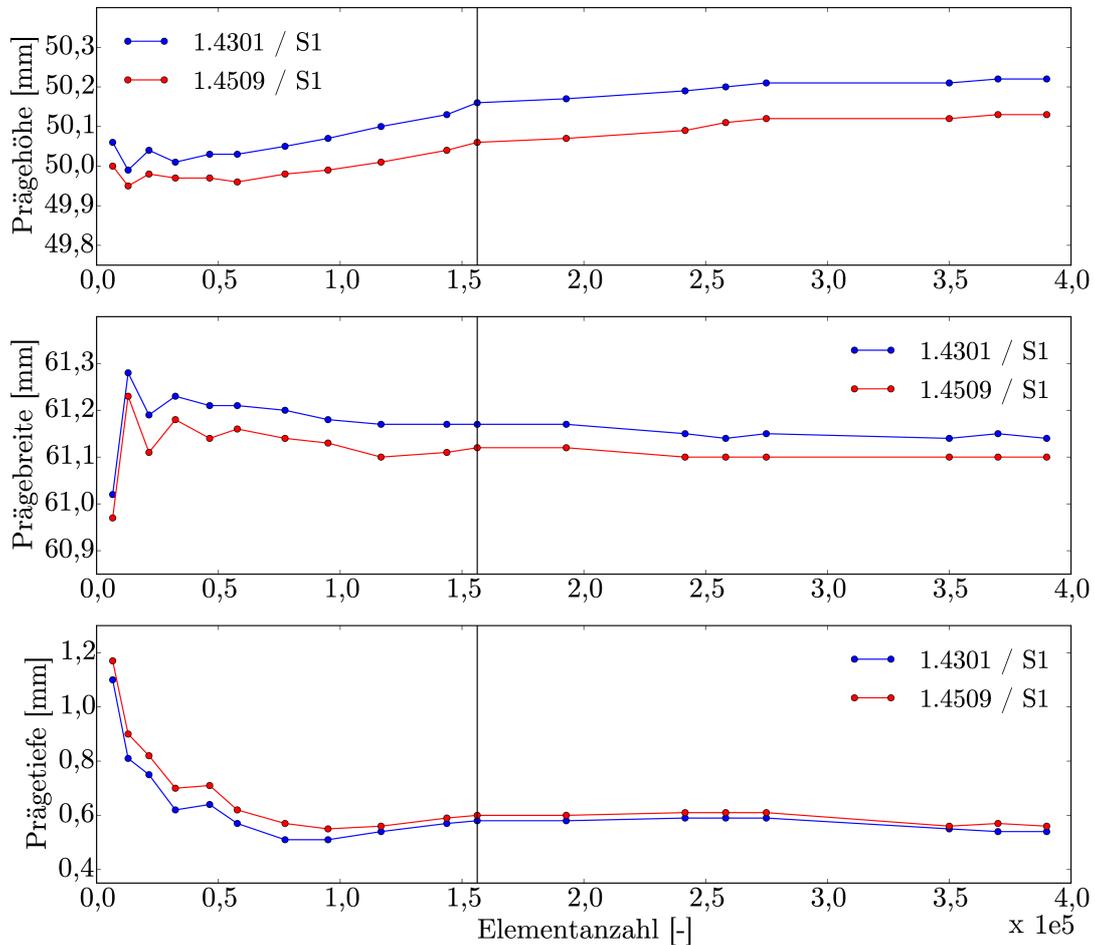


Abbildung 4.9: Auswertung der Netzstudie für den Prägeprozess bei der Verwendung eines ebenen Stempels (S1) für die Materialien 1.4301 und 1.4509; Linie bei der notwendigen Elementanzahl von 156.250

Vergleich

Für den Vergleich der Simulationsergebnisse mit den experimentellen Ergebnissen wird die Allgmeintoleranz ISO 2768 -m [32] verwendet, um eine Bewertung des Vergleiches zu ermöglichen. Dadurch werden folgende Toleranzgrenzen für die experimentellen Zielgrößen festgelegt:

- Prägehöhe: $\pm 0,3$ mm
- Prägebreite: $\pm 0,3$ mm
- Prägetiefe: $\pm 0,1$ mm.

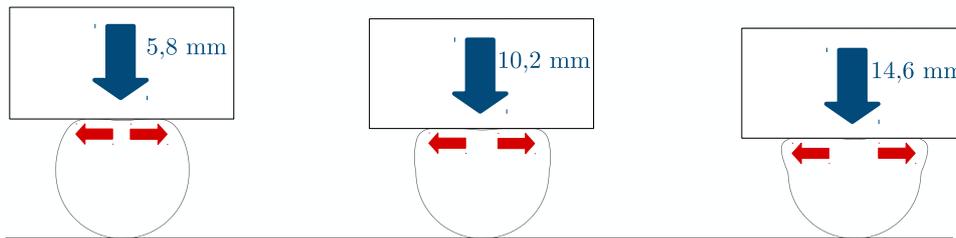
Tabelle 4.1: Simulationsergebnisse des Prägens in Relation zu den Experimenten (grau) für die Materialien 1.4301 und 1.4509 (S1: ebene Stempelform, S2: konvexe Stempelform; grün/gelb/rot: aufsteigender Stempelhub; rote Zahl: Wert außerhalb des Toleranzbereiches)

			S1 (eben)			S2 (konvex)		
1.4301	Experiment	Hub	Höhe	Breite	Tiefe	Höhe	Breite	Tiefe
		[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
		5,8	54,24	60,32	0,60	55,18	60,23	1,60
		10,2	50,37	61,49	0,59	52,19	60,62	2,54
	14,6	45,49	66,93	0,62	49,44	61,58	3,25	
	Simulation	Hub	Δ Höhe	Δ Breite	Δ Tiefe	Δ Höhe	Δ Breite	Δ Tiefe
		[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
5,8		0,25	0,00	-0,02	0,25	0,06	0,22	
10,2		-0,21	-0,32	-0,01	-0,04	-0,20	0,37	
14,6	0,34	-1,14	-0,06	-0,43	-0,14	0,76		
1.4509	Experiment	Hub	Höhe	Breite	Tiefe	Höhe	Breite	Tiefe
		[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
		5,8	54,16	60,39	0,52	55,11	60,31	1,61
		10,2	50,33	61,43	0,54	52,06	60,66	2,51
	14,6	45,32	66,74	0,51	49,17	61,70	3,50	
	Simulation	Hub	Δ Höhe	Δ Breite	Δ Tiefe	Δ Höhe	Δ Breite	Δ Tiefe
		[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
5,8		0,26	-0,11	0,11	0,30	-0,05	0,31	
10,2		-0,27	-0,31	0,06	0,09	-0,29	0,50	
14,6	0,41	-1,14	0,05	-0,17	-0,36	0,66		

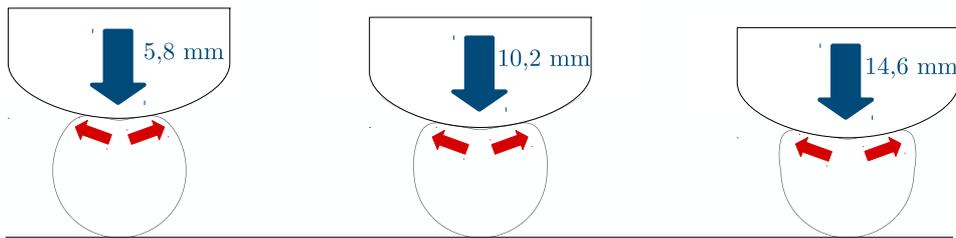
Im Experiment wurde jede untersuchte Einstellung zur Gewährleistung einer Statistik dreimal durchgeführt und der Mittelwert der drei Ergebnisse für den Vergleich mit den Simulationen verwendet. Die Allgmeintoleranz wird erfüllt, wenn die Simulationsergebnisse innerhalb der Toleranzgrenzen um den experimentellen Mittelwert liegen. Drei Aspekte lassen sich anhand der Ergebnistabelle 4.1 diskutieren:

- Prägecharakteristiken durch die beiden Stempel (S1 / S2)
- Unterschied zwischen den Materialien (1.4301 / 1.4509)
- Vergleich zwischen Experiment und Simulation.

Ebene Stempelform (S1)



Konvexe Stempelform (S2)



Stempelhub

Materialfluss

Abbildung 4.10: Resultierender Materialfluss in Breitenrichtung des Rohres aufgrund unterschiedlicher Stempelformen

Die unterschiedlichen **Prägecharakteristiken** entstehen durch die Verwendung unterschiedlicher Stempelformen (vgl. Abb. 4.10). Bei der Verringerung des Rohrquerschnitts ist die Prägehöhe die primäre Zielgröße. Bei einem Außendurchmesser von 60 mm und einem Verfahrensweg von beispielsweise 5,8 mm liegt der Erwartungswert für die Prägehöhe bei knapp 54,2 mm. Der Wert ergibt sich aus der Differenz von Außendurchmesser und Stempelhub, wobei zusätzlich die Rückfederung entgegen der Belastungsrichtung berücksichtigt werden muss. Der Stempel drückt zu Beginn die konvexe Oberfläche des Rohres ein, wobei die Umformcharakteristik für beide Stempel unterschiedlich ist.

Die ebene Stempelfläche (S1) führt zu einer Prägehöhe, die dem Erwartungswert entspricht, wodurch die effektive Querschnittsminderung dem Stempelhub entspricht. Die Rückfederung führt zu einer leichten Abweichung vom Erwartungswert. Das Eindringen der Oberfläche bewirkt einen Materialfluss entlang des Stempels nach außen. Dadurch steigt mit größer werdendem Hub der Materialfluss und somit die Prägebreite. Die Prägetiefe entsteht zu Beginn der Umformung durch das Eindringen der konvexen Oberfläche. Die leicht eingefallene Oberfläche bleibt dann relativ konstant über die Prägeumformung bestehen.

Die konvexe Stempelfläche (S2) führt zu einer Prägehöhe, die mit steigendem Hub immer weiter vom Erwartungswert abweicht. Der Grund liegt im Materialfluss des Rohres, welcher sich entlang der Stempelfläche entgegen der Belastungsrichtung nach oben drückt. Dadurch entspricht die effektive Querschnittsminderung zwar in der Mit-

te der Prägefläche dem Stempelhub, wird jedoch nach außen hin immer kleiner. Diese Differenz zwischen Mitte und Außenkante wird durch die steigende Prägetiefe deutlich, da die Prägefläche immer konkaver wird. Somit bildet die geprägte Fläche quasi eine Gegenform zum verwendeten Stempel. Durch den Materialfluss entlang des Stempels nach oben steigt die Prägebreite deutlich weniger an als beim ebenen Stempel.

Die Verwendung unterschiedlicher **Materialien** führt zu Veränderungen in den Prägeergebnissen. Die Fließkurvenverläufe der Materialien 1.4301 und 1.4509 ließen die Annahme zu, dass das Material 1.4301 geeigneter für die Umformung ist als das Material 1.4509 (vgl. Kap. 2.3.1). Die Prägeergebnisse können diese Annahme auf den ersten Blick nicht bestätigen. Die Ergebnisse liegen relativ dicht beieinander und zeigen lediglich bei einem großen Hub von 14,6 mm Abweichungen von bis zu 0,3 mm. Nur bei der Prägetiefe ist die Differenz mit über 0,1 mm außerhalb der Toleranzgrenzen, was aber in Anbetracht einer zu großen Prägetiefe von 3,25 mm nebensächlich ist. Bei der Verwendung des Materials 1.4509 wird bei großem Hub die maximal zulässige Fließspannung erreicht, wodurch die verwendete Fließkurve die entstandenen Deformationen nicht mehr abbilden kann. Die maximal zulässige Fließspannung tritt an den Ecken der Prägefläche im Übergang zum ungeprägten Rohrbereich auf (vgl. Abb. 4.11), wodurch das Deformationsverhalten in den Ecken verfälscht wird.

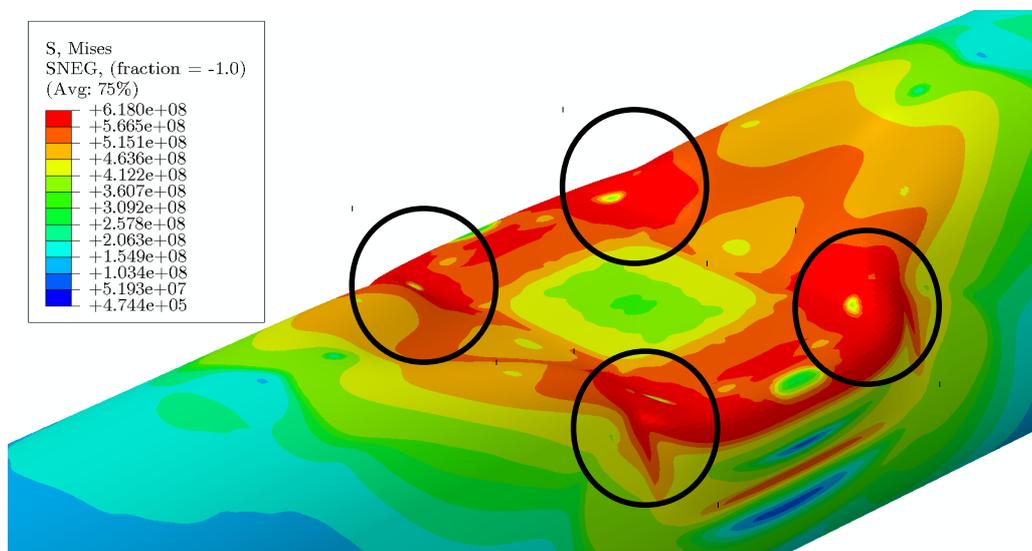


Abbildung 4.11: Maximal zulässige Spannungswerte im Prägebereich (durch Kreis markiert) für das Material 1.4509

Das Material 1.4509 erweist sich für große Stempelhübe und dadurch für große lokale Deformationen als ungeeignet. Obwohl nur die Ecken der Prägefläche davon betroffen sind, kann das Simulationsmodell das Verhalten ohne eine Erweiterung des Materialverhaltens durch Schädigungen nicht optimal abbilden. Aus diesem Grund werden die Werkstückeinflüsse nur am Material 1.4301 überprüft, sodass keine Einflüsse des Materials zu Verfälschungen führen.

Zur Validierung des Simulationsmodells erfolgt der **Vergleich zwischen Experiment und Simulation**. Die Simulation kann die experimentellen Mittelwerte im Wesentlichen sehr gut abbilden (vgl. Abb. 4.12). Mit steigendem Hub (14,6 mm) werden die Abweichungen zwar größer, dennoch können die Simulationsergebnisse die experimentellen Ergebnisse weiterhin gut eingrenzen. Zusätzlich weicht die Prägertiefe bei der Verwendung eines konvexen Stempels stärker vom Experiment ab, als bei einem ebenen Stempel. Um zu verstehen, woher diese Abweichungen stammen, sind folgende Punkte zu berücksichtigen:

- Die experimentellen Ergebnisse bilden einen Mittelwert.
- Die Randbedingungen im Simulationsmodell sind vereinfacht.
- Das Rohr wird mit Nennmaßen / Standardwerten in der Simulation verwendet.

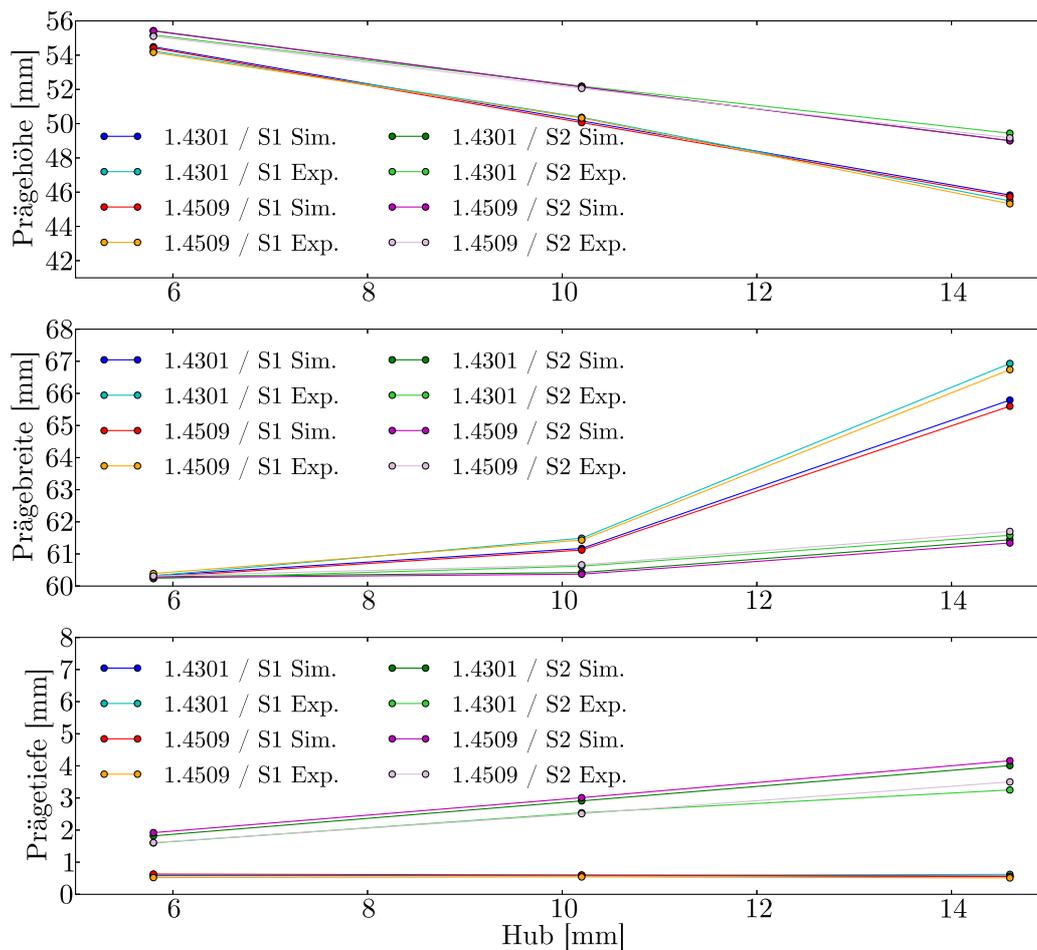


Abbildung 4.12: Vergleich der Prägeergebnisse zwischen Experiment und Simulation (S1: ebene Stempelform; S2: konvexe Stempelform)

Die experimentellen Ergebnisse sind **gemittelte Werte** und unterliegen Streuungen im Bereich von $\pm 0,1$ mm. Diese Streuungen können somit die Abweichungen zu den Simulationsergebnissen noch verändern.

Die **Randbedingungen** in der Simulation können die Realität nicht komplett abbilden, da einzelne Vereinfachung im Simulationsmodell getroffen werden. Eine Vereinfachung stellt beispielsweise die komplett fixierte Rohrklemmung in der Simulation dar. Im Experiment wird die Rohrklemmung kraftgesteuert geschlossen und kann somit bei zu starkem Druck geöffnet werden. Im Fall eines ebenen Stempels und eines Hubs von 14,6 mm entstand ein zu starker Materialfluss des Rohres nach außen, wodurch die obere Rohrklemmung im Experiment angehoben wurde. Aufgrund der fehlenden Möglichkeit, diese Situation in der Simulation nachzubilden, entstehen die Abweichungen in der Prägebreite bei einem Hub von 14,6 mm. Um das Werkzeugverhalten in der Simulation vollständig darstellen zu können, wäre eine kraftgesteuerte Klemmung des Rohres notwendig. Die kraftgesteuerte Klemmung hätte jedoch eine Erhöhung der Rechendauer zur Folge. Dennoch konnte eine Simulation mit einer kraftgesteuerten Rohrklemmung die Abweichung von 1,14 mm auf 0,43 mm reduzieren, wodurch das Experiment wieder besser durch die Simulation abgebildet werden kann. In der Realität ist ein lokales Eindrücken des Rohres mit solch großem Hub eher die Ausnahme und würde aufgrund des hohen Materialflusses durch eine Anpassung des Stempels oder der Rohrklemmung gelöst werden. Aus diesem Grund ist eine allgemeine Anpassung der Randbedingungen nicht notwendig.

Bisher erfolgte die numerische Umsetzung der Prägeprozesse mit **Nennwerten** der Rohrgeometrie und ohne die Berücksichtigung von herstellungsbedingten Eigenspannungen. Obwohl die Simulationen bereits realitätsnahe Ergebnisse liefern, muss im Folgenden untersucht werden, inwiefern Werkstücktoleranzen das Prägeergebnis beeinflussen und somit die Abweichungen der Simulationen zu den Experimenten vergrößern.

4.3.3 Einfluss des Werkstücks auf den Prägeprozess

In Kapitel 4.2 wurde die Problematik von herstellungsbedingten Toleranzen des Werkstücks thematisiert, deren Auswirkungen auf den Prägeprozess im Folgenden numerisch untersucht werden. Damit die Auswirkungen auf den Prägeprozess eingeordnet werden können, werden die Abweichungen auf die Ergebnisse der Nennwerte aus dem vorherigen Abschnitt bezogen. Die absoluten Werte können im Anhang nachgelesen werden. Weiterhin werden jeweils drei unterschiedliche Hübe mit dem ebenen Stempel (S1) und mit dem konvexen Stempel (S2) untersucht. Eine allgemeine Tendenz liegt genau dann vor, wenn mindestens zwei von drei Ergebnissen den gleichen Trend aufweisen. Dazu wird folgende Einteilung für alle Ergebniswerte festgelegt:

Änderung der Zielgröße um

- 0,0 mm - 0,1 mm: kein Einfluss (\rightarrow)
- 0,1 mm - 0,3 mm: leichter Einfluss (\uparrow / \downarrow)
- $> 0,3$ mm: starker Einfluss (\uparrow / \downarrow).

Die allgemeine Tendenz wird als *nicht eindeutig (n.e.)* gekennzeichnet, wenn bei einer Werkstücktoleranz mit steigendem Hub zwei gegenläufige Tendenzen festgestellt werden. Im Folgenden werden die Einflüsse

- Außendurchmesser,
- Wandstärke,
- Ovalität,
- Materialparameter,
- Anfangseigenstressungen und
- Reibung

diskutiert und die wichtigsten Ergebnisse zusammengefasst. Am Ende werden die Tendenzen aller Werkstückeinflüsse noch einmal in einer Übersichtstabelle dargestellt.

Außendurchmesser

- Nenngröße: 60,0 mm
- Toleranzgrößen: 59,7 mm / 60,3 mm (Außendurchmesser \downarrow / \uparrow)

Eine Verringerung des Außendurchmessers (**Außendurchmesser** \downarrow) führt zu einem Freiraum zwischen Rohr und Rohrklemmung. Zusätzlich sind die anfängliche Rohrhöhe und die Rohrbreite bereits jeweils um 0,3 mm reduziert. Bei beiden Stempel (S1 / S2) ist kein Einfluss auf die Prägehöhe zu erkennen, da der Stempelhub unabhängig vom Rohrquerschnitt verfährt und somit auch die effektive Querschnittsminderung um 0,3 mm reduziert ist. Während die Prägehöhe unbeeinflusst bleibt, wird die Prägebreite leicht reduziert. Bei einem Hub von 14,6 mm bewirkt der ebene Stempel (S1) sogar eine starke Abnahme um 0,54 mm. Der zusätzliche Freiraum entlang des Rohres ermöglicht einen Materialfluss nach außen im gesamten Querschnitt, bevor die lokale Deformation dominiert. Die Prägetiefe bleibt mit Verwendung eines ebenen Stempels (S1) unbeeinflusst. Für den konvexen Stempel (S2) hingegen ist bei niedrigem Hub eine

starke Abnahme und im Allgemeinen eine leichte Abnahme zu registrieren. Die Vergrößerung des Außendurchmessers (**Außendurchmesser** ↑) muss durch eine Anpassung des Klemminnendurchmessers und somit der Randbedingungen berücksichtigt werden. Durch die Anpassung der Randbedingungen besitzen Rohr und Klemmung erneut die gleichen Durchmesser, wodurch weder eine anfängliche Stauchung des Rohres noch ein Spalt entsteht. Durch die Vergrößerung des Außendurchmessers ist die anfängliche Rohrhöhe und die Rohrbreite um jeweils 0,3 mm erhöht. Ähnlich wie bei der Verringerung des Außendurchmessers wird bei beiden Stempel (S1 / S2) die Prägehöhe nicht beeinflusst. Die Prägebreite wird hingegen bei beide Stempel (S1 / S2) stark erhöht, was an der anfänglichen Vergrößerung der Rohrbreite liegt. Die Prägetiefen bleiben mit beiden Stempelformen von der Querschnittsänderung unbeeinflusst.

Zusammenfassung:

Chargenbedingte Toleranzen im **Außendurchmesser** haben einen großen Einfluss auf die Prägebreite. Der Einfluss auf die Prägetiefe ist abhängig von der Stempelform. Die Prägehöhe hingegen bleibt unbeeinflusst.

Wandstärke

- Nenngröße: 1,2 mm
- Toleranzgrößen: 1,1 mm / 1,3 mm (Wandstärke ↓ / ↑)

Die Variation der Wandstärke (**Wandstärke** ↑/↓) benötigt keine Anpassung der Randbedingungen im Simulationsmodell. In beiden Variationsfälle und mit beiden Stempeltypen ist kein Einfluss auf die Zielgrößen erkennbar.

Zusammenfassung:

Eine Variation der **Wandstärke** hat keinen Einfluss auf das Prägeergebnis.

Ovalität

- Nenngröße: 60,0 mm - 60,0 mm (Rohrhöhe - Rohrbreite)
- Toleranzgrößen: 60,0 mm - 59,7 mm / 59,7 mm - 60,0 mm (Ovalität hoch / breit)

Das ovalisierte Rohr mit einer reduzierten Rohrbreite (**Ovalität hoch**) weist zur Seite hin einen Spalt auf und besitzt eine stärkere konkave Oberflächenkrümmung in Be-

lastungsrichtung. Bei der Verwendung eines ebenen Stempels (S1) führt dies zu einer leichten Erhöhung der Prägehöhe und zu einer leichten Reduzierung der Prägebreite. Die Prägetiefe hingegen bleibt unbeeinflusst. Im Gegensatz dazu führt beim konvexen Stempel (S2) die Ovalisierung nur zu einer Reduzierung der Prägetiefe. Bei einer Drehung des Rohres um 90° (**Ovalität breit**) besitzt das Rohr zu Beginn eine reduzierte Rohrhöhe und weist damit in Belastungsrichtung einen Spalt in beide Richtungen auf. Dadurch liegt das Rohr zu Beginn der Umformung nicht vollständig auf und wird somit zuerst in die Rohrklemmung gedrückt, bevor die eigentliche Deformation an der Rohroberfläche stattfindet. Während der Einfluss der Ovalisierung mit der Verwendung eines ebenen Stempels (S1) nicht vorhanden ist, führt der konvexe Stempel (S2) zu einer leichten Reduzierung von Prägehöhe und Prägetiefe. Somit ist die Ausrichtung der Ovalität entscheidend für den Einfluss auf das Prägeergebnis. Während die Prägetiefe beim geraden Stempel (S1) und die Prägebreite beim konvexen Stempel (S2) nahezu unverändert bleiben, sind die übrigen Werte abhängig von der Ausrichtung der Ovalität. Obwohl auf den ersten Blick eine Ovalität unerwünscht ist, weisen die betrachteten Prägeergebnisse größtenteils eine leichte Verbesserung auf. Die Verbesserungen machen sich vor allem durch eine geringere Prägetiefe und eine geringere Verbreiterung des Rohres bemerkbar. Dadurch erscheint bei den betrachteten Fällen die numerische Umsetzung eines ideal runden Rohrquerschnitts als schlechteste Variante für das Prägen. Um diese Tendenzen zu bestätigen, müssen weitere Untersuchungen vorgenommen werden.

Zusammenfassung:

Der Einfluss der **Ovalität** auf das Prägeergebnis ist abhängig von der Ausrichtung des Rohres und der verwendeten Stempelform. Da nur einzelne Zielgrößen beeinflusst werden, ist keine allgemeine Tendenz erkennbar.

Materialparameter

- Nenngröße: 1.4301 / 1.4509 (experimentell ermittelt)
- Toleranzgrößen: 1.4301 / 1.4509 (Literatur)

Die Fließkurve für das Material 1.4301 aus der Literatur (**1.4301 Literatur**) liegt bei kleinen Deformationen und sehr große Deformationen außerhalb des Streubereichs der experimentell ermittelten Fließkurve (vgl. Abb. 4.4). Dieser Unterschied hat nur einen sehr geringen Einfluss auf das Prägeergebnis. Lediglich bei der Verwendung eines ebenen Stempels (S1) wird die Prägebreite leicht reduziert. Die Ergebnisse des kon-

vexen Stempels (S2) zeigen keine Veränderung durch den Wechsel der Fließkurven. Die Fließkurve für das Material 1.4509 aus der Literatur (**1.4509 Literatur**) liegt hingegen fast vollständig im Streubereich der experimentell ermittelten Fließkurve. Die Änderung der Fließkurve hat für das Material 1.4509 aufgrund der hohen Ähnlichkeit unabhängig vom Prägestempel keinen Einfluss auf das Prägeergebnis.

Zusammenfassung:

Der Einsatz unterschiedlicher **Materialparameter** zur numerischen Abbildung desselben Materials hat nahezu keinen Einfluss auf das Prägeergebnis.

Anfangseigenstressungen

- Nenngröße: Keine Eigenstressungen
- Toleranzgrößen: Eigenstressungen unter / über Fließgrenze (Eigenstressungen ↓ / ↑)

Anfangseigenstressungen, die betragsmäßig unter der Fließgrenze liegen (**Eigenstressungen** ↓), führen zu elastischen Vordeformationen des Rohres. Diese Anfangseigenstressungen haben keinen Einfluss auf die Prägeergebnisse. Anfangseigenstressungen, die die Fließgrenze überschreiten (**Eigenstressungen** ↑), führen zusätzlich zu plastischen Vordeformationen des Rohres. Diese Anfangseigenstressungen haben bei Verwendung eines ebenen Stempels (S1) eine leichte Reduzierung der Prägetiefe und bei der Verwendung eines konvexen Stempels (S2) eine starke Reduzierung der Prägetiefe zur Folge. Die Prägehöhe und die Prägebreite bleiben unbeeinflusst.

Zusammenfassung:

Eine inhomogene **Anfangseigenstressungsverteilung**, deren Spannungen die Fließgrenze überschreiten, führen zu einer Reduzierung der Prägetiefe. Die Prägehöhe und die Prägebreite bleiben unbeeinflusst.

Reibung

- Nenngröße: 0,1 (Klemmung) / 0,1 (Stempel)
- Toleranzgrößen: 0,3 (Reibung Klemmung ↑) / 0,3 (Reibung Stempel ↑)

Eine Erhöhung des Reibungskoeffizienten zwischen Rohr und Rohrklemmung (**Reibung Klemmung** ↑) hat eine vernachlässigbare Wirkung auf das Umformergebnis. Der Grund liegt in der niedrigen Relativbewegung zwischen den beiden Bauteilen während des Prägens. Eine Erhöhung des Reibungskoeffizienten zwischen Rohr und Stempel (**Reibung Stempel** ↑) hat hingegen bei der Verwendung eines konvexen Stempels (S2) einen Einfluss auf die Prägertiefe. Die erhöhte Reibung zwischen den beiden Bauteilen reduziert durch eine geringere Relativbewegung den Einfall in der Prägefläche. Bei der Verwendung eines ebenen Stempels (S1) ändert sich die Prägertiefe nicht. Die Prägehöhe und die Prägebreite bleiben unabhängig vom Stempel unbeeinflusst.

Zusammenfassung:

Eine Variation des **Reibungskoeffizienten** zwischen Rohr und Klemmung hat keinen Einfluss auf das Prägergebnis. Eine Variation des Reibungskoeffizienten zwischen Rohr und Stempel hat einen geringen stempelabhängigen Einfluss auf die Prägertiefe. Die Prägehöhe und die Prägebreite bleiben dabei unbeeinflusst.

Übersicht

Chargenbedingte Geometrietoleranzen, herstellungsbedingte Eigenspannungen oder unterschiedliche Materialkennwerten können das Umformergebnis beeinflussen. Diese Toleranzen sind somit Fehlerquellen, die zu Abweichungen zwischen Simulation und Experiment bzw. zwischen simulierter Ergebnisvorhersage und gefordertem Sollwert führen. Daher müssen chargenbedingte Toleranzen im Experiment gemessen, in der realen Maschine berücksichtigt und die Auswirkungen durch prozessbegleitende Simulationen vorhergesagt werden. Die Simulationen geben somit eine erste Aussage bezüglich der Sensibilität des Prozessaufbaus gegenüber Werkstücktoleranzen.

Die Zusammenfassung des Einflusses der einzelnen Werkstücktoleranzen auf den Prägeprozess ist in Tabelle 4.2 dargestellt. Abweichungen im Rohrquerschnitt durch eine Variation des Außendurchmessers oder durch eine Ovalität haben den größten Einfluss auf das Prägergebnis. Die Wandstärkenänderung, die Verwendung unterschiedlicher Fließkurvenverläufe für die betrachteten Materialien und die Reibung haben nahezu keinen Einfluss auf das Prägergebnis. Die Anfangseigenspannungsverteilung führt zu einer Beeinflussung der Prägertiefe. Obwohl bisher nur einzelne Werkstücktoleranzen untersucht wurden, zeigen die Ergebnisse anschaulich, welchen Einfluss der Anfangszustand des Rohres auf das Prägergebnis besitzt. In Kombination können sich die Auswirkungen im schlimmsten Fall verstärken, wodurch eine zusätzliche Vorhersage des kombinierten Einflusses mittels Simulationen notwendig wird.

Tabelle 4.2: Auflistung aller Werkstückeinflüsse auf den Prägeprozess (\uparrow / \downarrow : Variation größer / kleiner als Nenngröße; grün/rot: positiver/negativer Einfluss; \rightarrow : kein Einfluss; \uparrow / \downarrow : maximal mögliche Änderung im Bereich von $\pm 0,3$ mm; $\uparrow\uparrow / \downarrow\downarrow$: maximal mögliche Änderung $> 0,3$ mm)

Variationsparameter	Stempel S1 (eben)			Stempel S2 (konvex)		
	Höhe	Breite	Tiefe	Höhe	Breite	Tiefe
Außendurchmesser \downarrow	\rightarrow	\downarrow	\rightarrow	\rightarrow	\downarrow	\downarrow
Außendurchmesser \uparrow	\rightarrow	\uparrow	\rightarrow	\rightarrow	\uparrow	\rightarrow
Wandstärke \downarrow	\rightarrow	\rightarrow	\rightarrow	\rightarrow	\rightarrow	\rightarrow
Wandstärke \uparrow	\rightarrow	\rightarrow	\rightarrow	\rightarrow	\rightarrow	\rightarrow
Ovalität hoch	\uparrow	\downarrow	\rightarrow	\rightarrow	\rightarrow	\downarrow
Ovalität breit	\rightarrow	\rightarrow	\rightarrow	\downarrow	\rightarrow	\downarrow
1.4301 Literatur	\rightarrow	\downarrow	\rightarrow	\rightarrow	\rightarrow	\rightarrow
1.4509 Literatur	\rightarrow	\rightarrow	\rightarrow	\rightarrow	\rightarrow	\rightarrow
Eigenspannungen \downarrow	\rightarrow	\rightarrow	\rightarrow	\rightarrow	\rightarrow	\rightarrow
Eigenspannungen \uparrow	\rightarrow	\rightarrow	\downarrow	\rightarrow	\rightarrow	$\downarrow\downarrow$
Reibung Stempel \uparrow	\rightarrow	\rightarrow	\rightarrow	\rightarrow	\rightarrow	\downarrow
Reibung Klemmung \uparrow	\rightarrow	\rightarrow	\rightarrow	\rightarrow	\rightarrow	\rightarrow

Rückblickend ist die Darstellung der experimentellen Versuchsbedingungen in einem Simulationsmodell mit vielen Schwierigkeiten verbunden. Dennoch konnte der Aufbau des entsprechenden Simulationsmodells auf Basis von geometrischen Nennmaßen und die vereinfachte Darstellung experimenteller Bedingungen wie Eigenspannungen oder Reibung den Lösungsbereich sehr gut eingrenzen.

4.4 Numerische Darstellung des Biegeprozesses ohne Dorn

4.4.1 Simulationsmodell des Biegeprozesses

Einstellparameter

Der Grundaufbau des Simulationsmodells besteht analog zum Experiment aus vier Biegewerkzeugen: Biegeschablone, Klemmbacke, Gleitschiene und Faltenglätter (vgl. Abb. 2.22). Dazu wurden die notwendigen Einstellungen zum Aufbau des numerischen Mo-

dells parametrisiert und die Parameter in die graphische Benutzeroberfläche integriert (vgl. Abb. 4.13).



Abbildung 4.13: Einstellmöglichkeiten für den Biegeprozess und die dazugehörigen Standardwerte in der graphischen Benutzeroberfläche "DTFS"

Die Biegeschablone wird durch den **Biegeradius** definiert. Die daran befestigte Klemmbacke hinter der Tangentiallinie kann in ihrer **Länge** verändert werden. Die Klemmung des Rohres erfolgt durch die Festlegung des Reibungskoeffizienten zwischen Rohr und Klemmbacke auf 0,6. Die Rotation von Biegeschablone und Klemmbacke zum Biegen des Rohres wird über den **Einstellwinkel** definiert. Der Einstellwinkel erlaubt eine Rotation bis 60° . Analog zum Experiment sind in der Simulation die Gleitschiene und der Falten glätter vor der Tangentiallinie fest positioniert, aber in ihrer **Länge** veränderbar. Bei der numerischen Umsetzung kann zudem **Druck** von der Gleitschiene auf das Rohr ausgeübt werden und der Falten glätter kann durch die Definition eines **Anstellwinkels** in seiner Position geändert werden. Da bei der experimentellen Umsetzung eine fertigungsbedingte Lücke zwischen Tangentiallinie und Falten glätter existiert, wird diese ebenfalls im Simulationsmodell berücksichtigt. Für die Reibungskoeffizienten zwischen dem Rohr und den jeweiligen Werkzeugen werden Standardwerte festgelegt und können

gegebenenfalls durch den Benutzer verändert werden.

Zur numerischen Umsetzung des mehrfachen Biegens eines Rohres ist die Definition des Abstands und des Rotationswinkels zwischen den beiden Biegestellen notwendig. Für den zweiten Biegeprozess lassen sich der Biegeradius und der Einstellwinkel neu definieren. Die restlichen Biegeeinstellungen werden aus dem ersten Biegeprozess übernommen.

Aufbau

Für die Berechnung des Rohrbiegens wird ein explizit berechnetes Modell in Abaqus® erzeugt. Zur Berechnung der Rückfederung wird ein implizit berechnetes Modell verwendet (vgl. Abb. 4.14).

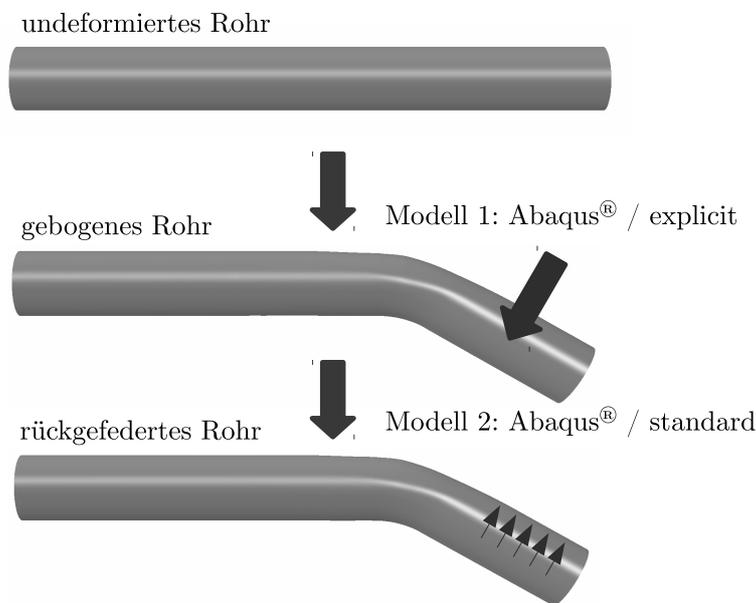


Abbildung 4.14: Ablauf des Biegeprozesses durch die unterschiedlichen Simulationsmodelle in Abaqus®

Das **explizite Simulationsmodell** des Rotationszugbiegens besteht standardmäßig aus der Klemmbacke, der Biegeschablone, der Gleitschiene und dem Faltenglätter (vgl. Abb. 4.15), während der Biegedorn hinzugeschaltet werden kann. Die Werkzeuge sind diskretisierte Starrkörper, die mit 4-Knoten bi-linearen Viereckselementen des Typs *R3D4* vernetzt werden. Die Gleitschiene und der Faltenglätter werden jeweils als gerade Halbschalen mit einem Innenradius von jeweils 30 mm dargestellt. Die Biegeschablone wird ebenfalls vereinfacht als kreisförmige Halbschale mit benutzerdefinierten Biegeradius abgebildet. Die Klemmbacke besteht ähnlich wie im Experiment aus einem Block mit entsprechender Aussparung zum Klemmen des Rohres. Der Innendurchmesser beträgt standardmäßig 60 mm. Die Rohrklemmung ist im Simulationsmodell geschlossen

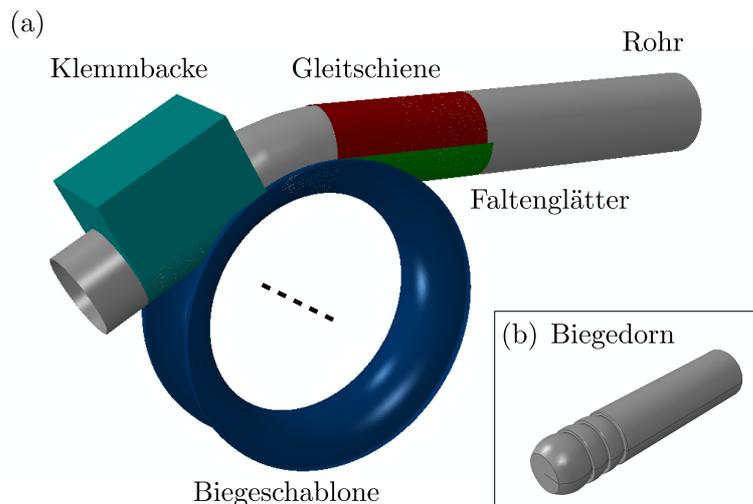


Abbildung 4.15: Simulationsmodell des Biegens: Grundwerkzeuge (a) und Biegedorn (b)

und fixiert. Zur Klemmung des Rohres wird der Reibungskoeffizient zwischen Rohr und Klemmbacke auf 0,6 gesetzt, was eine Relativbewegung verhindert. Die Realisierung der Klemmung über den Reibungskoeffizient ist aus numerischer Sicht sinnvoll, da sie die Berechnungsdauer deutlich reduziert, ohne den experimentellen Prozessablauf wesentlich zu verändern. Das Rohr wird über die Klemmbacke gebogen, die an der rotierenden Biegeschablone befestigt ist. Die Rotation der Biegeschablone um den Mittelpunkt erfolgt im Gegensatz zum Experiment verschiebungsgesteuert. Das verschiebungsgesteuerte Biegen ermöglicht ein genaueres Einstellen des Winkels in der Simulation und reduziert gegenüber einer kraftgesteuerten Rotation die Berechnungsdauer. Der Reibungskoeffizient zwischen Rohr und Gleitschiene beträgt 0,3 und für den Faltenglätter und die Biegeschablone 0,1. Zur Gewährleistung einer quasistatischen Berechnung wird die Simulationszeit so definiert, dass die Umformgeschwindigkeit 300° s^{-1} beträgt. Dadurch ist die Umformgeschwindigkeit 30-mal schneller als im Experiment. Zur Berechnung der **Rückfederung** wird im zweiten Modell der finale Zustand des ersten Simulationsmodells verwendet und alle Biegewerkzeuge werden entfernt. Um eine Starrkörperbewegung während der Rückfederung zu verhindern, wird das Rohr am ungebogenen Ende fixiert. Durch das Entfernen der Werkzeuge kann das Rohr entgegen der Biegerichtung zurückfedern. Im Experiment erfolgt die Rückfederung ebenfalls durch das Lösen der Klemmbacke.

Zur Simulation eines **mehrfachen Biegeprozesses** müssen pro zusätzlicher Biegung drei weitere Simulationsmodelle verwendet werden (vgl. Abb. 4.16).

Das erste Simulationsmodell dient der **Neupositionierung** des Rohres für den zweiten Biegeprozess. Dazu wird das Rohr um den entsprechenden Betrag aus der Biegemaschine verschoben und rotiert. Der Mindestabstand zwischen den beiden Biegestellen ist die Länge der Klemmbacke, da das Rohr erneut in einem ungebogenen Bereich geklemmt

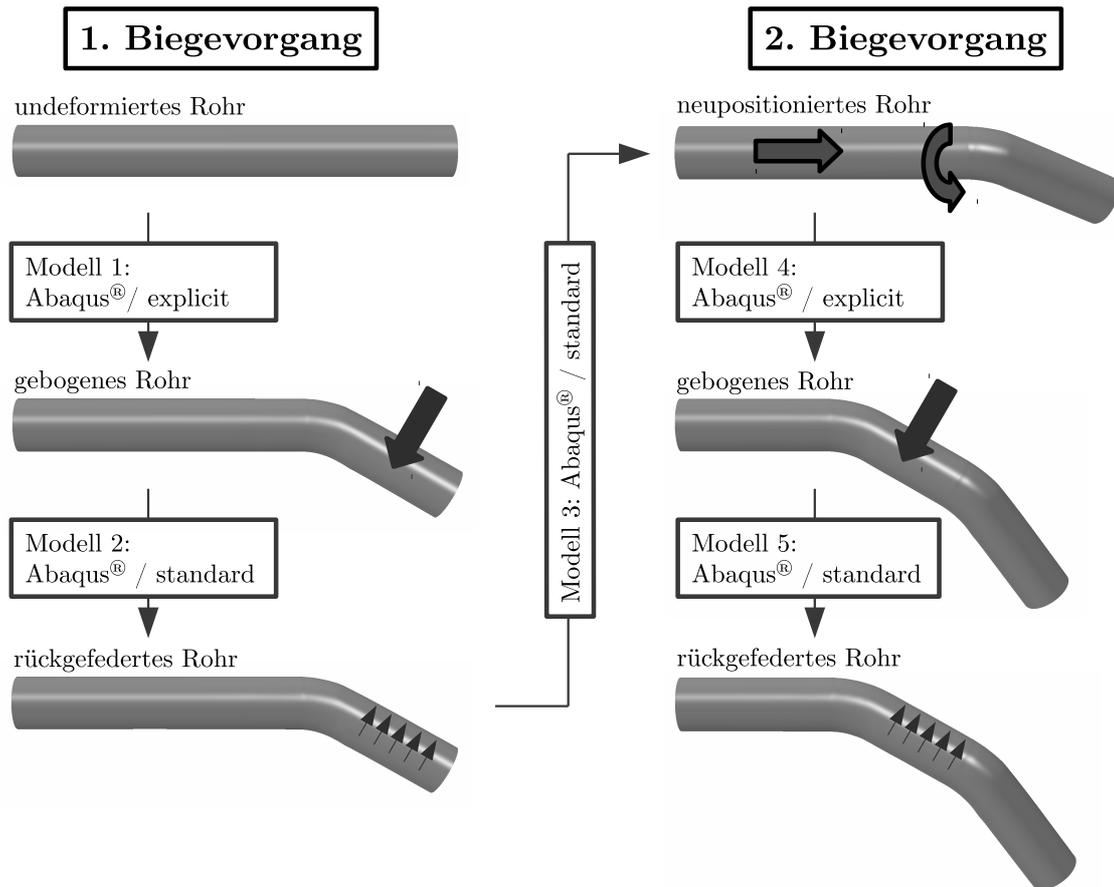


Abbildung 4.16: Ablauf des mehrfachen Biegeprozesses durch die unterschiedlichen Simulationsmodelle in Abaqus[®]

werden muss. Das zweite Simulationsmodell ist analog zum Simulationsmodell des ersten **Biegeprozesses** aufgebaut und beinhaltet somit alle Biegewerkzeuge zum Biegen des neupositionierten Rohres. Die Randbedingungen und die Werkzeugeinstellungen werden dafür aus dem ersten Biegevorgang übernommen. Lediglich der Biegeradius und der Biegewinkel können neu eingestellt werden. Im dritten Simulationsmodell wird die **Rückfederung** der zweiten Biegestelle berechnet.

Auswertung

Die Auswertung umfasst neun verschiedene Parameter:

- der Biegewinkel vor / nach der Rückfederung,
- die Rückfederung,
- die Rohrgeometrie (Ovalität, Rohrhöhe, Rohrbreite, Rohrtiefe) und
- die minimale / maximale Wandstärke.

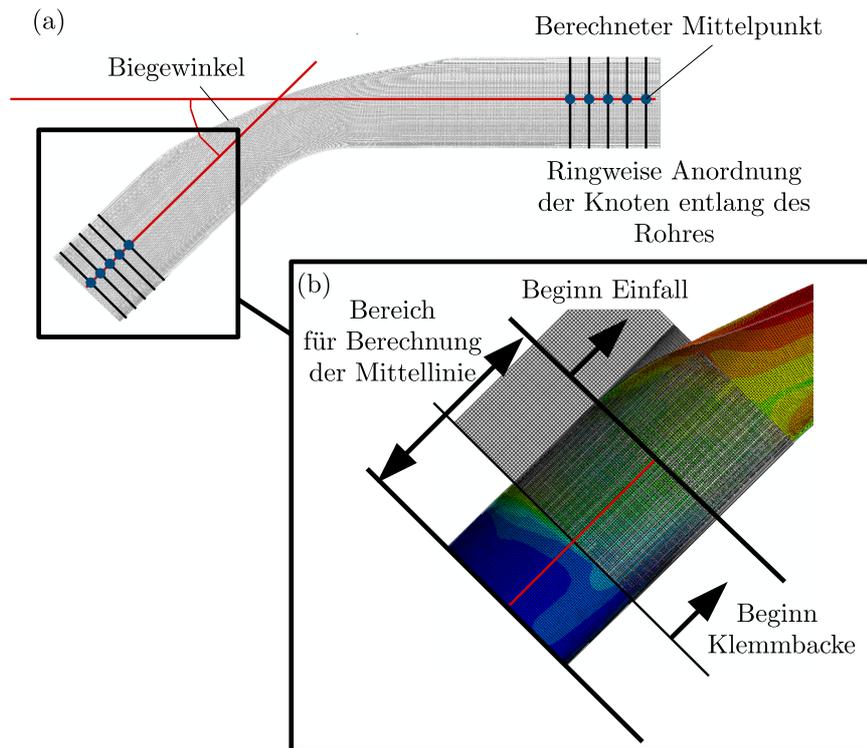


Abbildung 4.17: Ermittlung des Biegewinkels durch die Mittellinien an den Rohrenden (a); relevanter Bereich für die Mittellinienberechnung (b)

Zur Bestimmung des Biegewinkels innerhalb der digitalisierten experimentellen Ergebnissen wird eine Best-Fit Funktion verwendet. Ein Zylinder wird jeweils um die Enden des digitalisierten Rohres gelegt. Über die verlängerten Mittellinien werden der Schnittwinkel und somit der Biegewinkel ermittelt. Die Simulationsergebnisse werden ähnlich ausgewertet. Die ringweise Anordnung der Elemente entlang des Rohres ermöglicht die Bestimmung der geometrischen Abmaße und die Bestimmung des Mittellinienverlaufs. Zur Berechnung der Mittellinie werden die letzten 100 Knotenringe an den beiden Rohrenden verwendet (vgl. Abb. 4.17). Die 100 Knotenringe erfassen dabei genau den Bereich, der durch keine wesentliche Querschnittsänderung betroffen ist. Durch eine Verlängerung der Mittellinien ergibt sich ein Schnittwinkel, der den Biegewinkel kennzeichnet. Da die Auswertung der digitalisierten experimentellen Ergebnisse mit einer anderen Software erfolgte, wurden beide Auswertungsmethoden miteinander verglichen. Der Vergleich ergab bei vier unterschiedlichen Biegewinkeln eine maximale Abweichung von weniger als 0,2%. Die Winkelmessung erfolgt in der Simulation vor und nach der Rückfederung, um den Betrag der Rückfederung zu ermitteln. Die Auswertung der minimalen Rohrhöhe, der maximalen Rohrbreite und der maximalen Rohrtiefe im Biegebereich findet analog zur Auswertung des Rohrprägens statt (vgl. Kap. 4.3.1). Zusätzlich wird die größte Ovalität im Biegebereich bestimmt, die sich aus der Differenz von Rohrbreite zu Rohrhöhe berechnet. Da in diesem Teil

des Kapitels das Biegen ohne Dorn untersucht wird, ist die Entstehung einer Rohrtiefe zu erwarten, was somit als Vergleichsmöglichkeit zwischen Experiment und Simulation dient. Da das Biegen zu einer Materialanhäufung im Innenbogen und zu einer Materialausdünnung im Außenbogen führt, werden nach dem Biegeprozess die Wandstärkenextrema ausgewertet. Die Auswertung des doppelten Biegens wird analog zum einfachen Biegen jeweils in beiden gebogenen Bereichen vollzogen.

4.4.2 Vergleich mit experimentellen Biegeergebnissen

Durch den Vergleich der Biegeergebnisse zwischen Experiment und Simulation wird das Simulationsmodell validiert. Die Validierung des Simulationsmodells verläuft in zwei Schritten durch eine **Netzstudie** und den **Vergleich** mit dem Experiment. Die Biegeexperimente werden mit den Materialien 1.4301 und 1.4509 durchgeführt. Die Biegeschablone hat einen festen Biegeradius von 110 mm und der Einstellwinkel wird zwischen 15° , 30° , 45° und 60° variiert. Der Biegefaktor beträgt standardmäßig 1,83 und der Wanddickenfaktor 50. Für den Vergleich mit den Experimenten werden alle Simulationen mit Nennmaßen ausgeführt. Der Biegewinkel, die Rückfederung und die geometrischen Werte der Rohrhöhe, der Rohrbreite und der Rohrtiefe werden dazu als Zielgrößen verwendet. Zusätzlich werden die Wandstärkenextrema sowohl im Experiment als auch in der Simulation aufgrund der besonderen Relevanz untersucht.

Netzstudie

Die Netzstudie des Biegens ohne Dorn wird jeweils für die beiden Materialien 1.4301 und 1.4509 bei einem Einstellwinkel von 45° durchgeführt. Die Diskretisierung wird analog zum Prägeprozess durch die Erhöhung der Elementanzahl entlang des Rohrquerschnitts von 50 aufsteigend in 20er-Schritten untersucht. Die Genauigkeitsgrenzen der Simulationsergebnisse werden auf 0,1 mm und $0,1^\circ$ festgelegt.

Die drei Zielgrößen Rohrhöhe, Rohrbreite und Rohrtiefe bestätigen mit der im Prägeprozess ermittelten Elementanzahl von 156.250 eine hinreichende Genauigkeit des Biegeprozesses (vgl. Abb. 4.18). Die plateau-ähnlichen Verläufe oberhalb der ermittelten Elementanzahl weisen für die Rohrhöhe nur noch eine Änderung von 0,07 mm, für die Rohrbreite eine Änderung von 0,04 mm und für die Rohrtiefe eine Änderung von 0,09 mm auf. Die Ergebnisse des Biegewinkels, der Rückfederung und der Wandstärken liegen ebenfalls unter der geforderten Genauigkeitsgrenze.

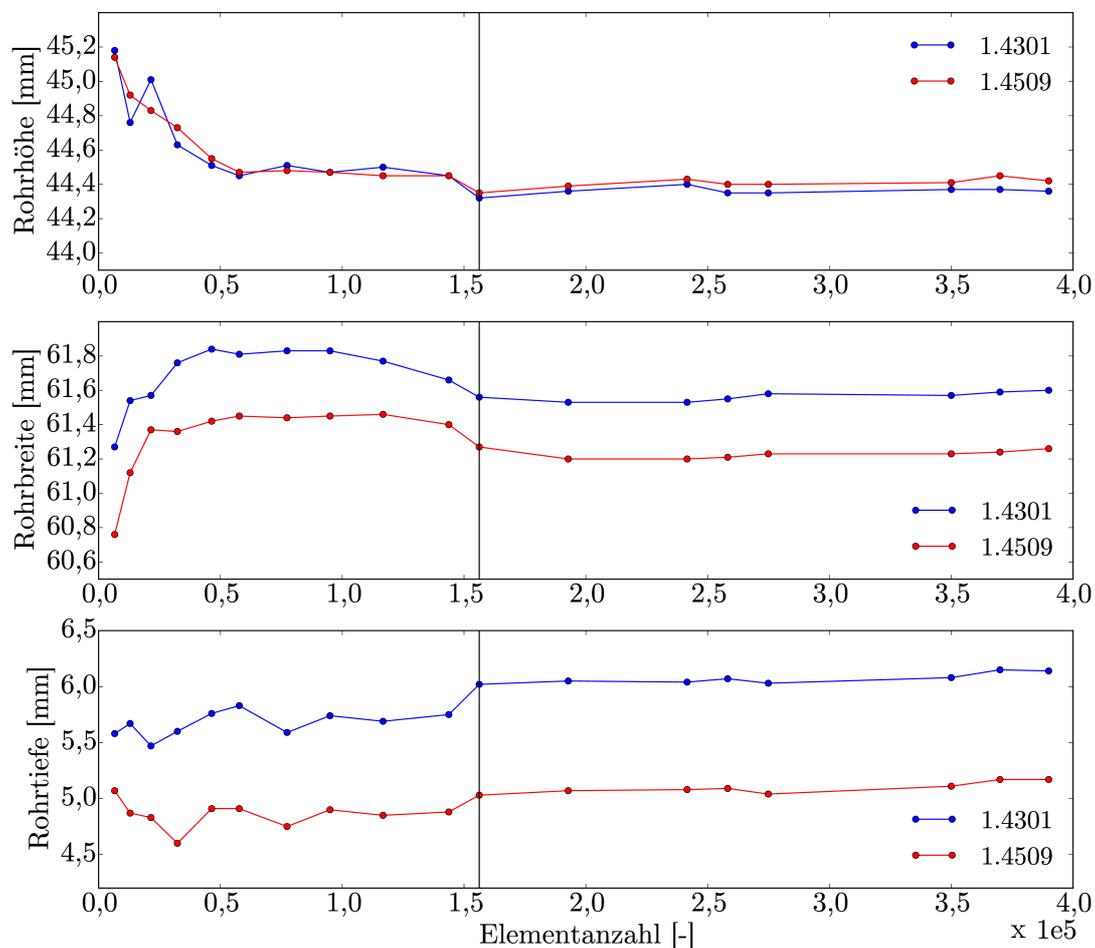


Abbildung 4.18: Auswertung der Netzstudie für den Biegeprozess für die Materialien 1.4301 und 1.4509; Linie bei der notwendigen Elementanzahl von 156.250

Vergleich

Die Allgmeintoleranz ISO 2768 -m [32] wird für die experimentellen Ergebnisse verwendet, um eine Bewertung der Simulationsergebnisse zu ermöglichen. Dadurch ergeben sich folgende Toleranzgrenzen:

- Biegewinkel: $\pm 0,3^\circ$
- Rückfederung: $\pm 0,1^\circ$
- Rohrhöhe / Rohrbreite: $\pm 0,3$ mm
- Rohrtiefe / Wandstärkenextrema: $\pm 0,1$ mm.

Jede untersuchte Einstellung im Experiment wird dreimal zur Gewährleistung einer entsprechenden Statistik durchgeführt und der Mittelwert der drei Ergebnisse beim

Vergleich mit den Simulationen verwendet. Zur Erfüllung der Allgmeintoleranz müssen die Simulationsergebnisse innerhalb der Toleranzgrenzen um den experimentellen Mittelwert liegen. Die Auswertung der Ergebnistabelle 4.3 erfolgt nach drei Aspekten:

- Biegecharakteristiken
- Unterschied zwischen den Materialien (1.4301 / 1.4509)
- Vergleich zwischen Experiment und Simulation.

Die **Biegecharakteristiken** werden anhand der experimentellen Ergebnisse deutlich. Die Ergebnisse weisen mit steigendem Einstellwinkel einen Anstieg der Rückfederung auf, was zu einer deutlichen Konturabweichung von bis zu 7,4 % führt. Die Rohrhöhe sinkt mit steigendem Biegewinkel deutlich ab, was auf den fehlenden Biegedorn zurückzuführen ist. Bereits bei einem Biegewinkel von knapp 15° hat sich der Rohrquerschnitt um ca. 5 mm reduziert. Durch den zusätzlichen Anstieg der Rohrbreite nimmt die Ovalisierung weiter zu. Die starke Ovalisierung von 12,62 mm bei einem Biegewinkel von ca. 30° führt zu einem zusätzlichen Einfall des Rohres von 0,93 mm (Rohrtiefe). Mit steigendem Biegewinkel nimmt sowohl die Ovalisierung als auch die Rohrtiefe unerwünscht zu. Die Wandstärkenverteilung wurde im Experiment entlang eines Ringes in regelmäßigen Abständen ermittelt (vgl. Abb. 4.19).

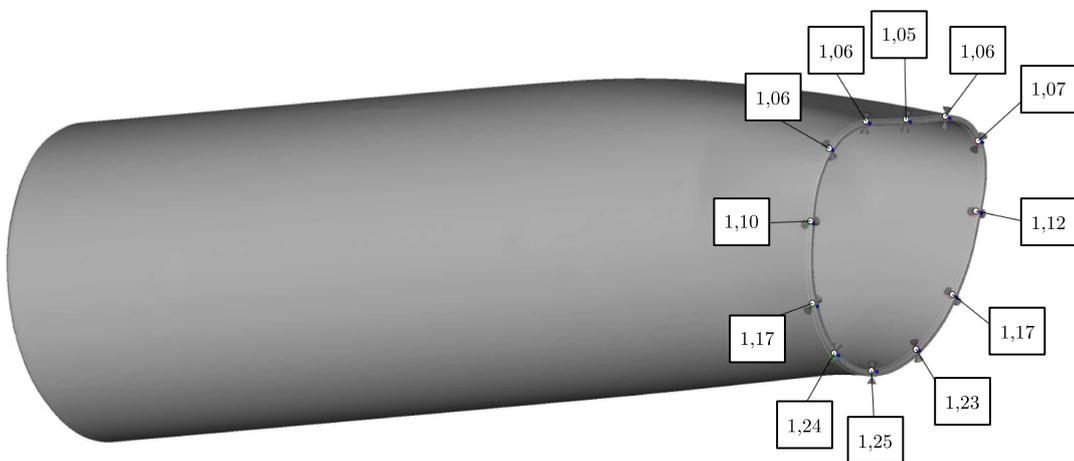


Abbildung 4.19: Die Vermessung der Wandstärke der digitalisierten Ergebnissen

Im Außenbogen ist eine deutliche Wandstärkenabnahme erkennbar und im Innenbogen eine entsprechende Wandstärkenzunahme. Während die Abnahme bei allen vier Einstellwinkel mit knapp 12,5 % ähnlich ist, steigt die Wandstärke im Innenbogen mit größer werdendem Winkel leicht an.

Im Prägeprozess waren keine wesentlichen Unterschiede zwischen beiden **Materialien** erkennbar. Im Biegeprozess lassen sich Unterschiede in der Rückfederung und in der

Tabelle 4.3: Simulationsergebnisse des Biegens in Relation zu den Experimenten (grau) für die Materialien 1.4301 und 1.4509 (WS: Wandstärke; grün/gelb/orange/rot: aufsteigender Einstellwinkel; rote Zahl: Wert außerhalb des Toleranzbereiches)

		1.4301							
		Einstellwinkel [°]	Biege- winkel [°]	Rück- federung [°]	Höhe [mm]	Breite [mm]	Tiefe [mm]	min. WS [mm]	max. WS [mm]
1.4301	Experiment	14,71	13,70	1,01	54,99	60,46	0,00	1,06	1,24
		31,91	30,34	1,57	48,16	60,78	0,93	1,05	1,25
		44,07	42,16	1,92	44,48	61,73	5,29	1,05	1,29
		58,45	56,15	2,30	37,91	61,60	13,18	1,05	1,28
	Simulation	Einstellwinkel [°]	Δ Biege- winkel [°]	Δ Rück- federung [°]	Δ Höhe [mm]	Δ Breite [mm]	Δ Tiefe [mm]	Δ min. WS [mm]	Δ max. WS [mm]
		14,70	-0,15	0,14	-0,20	-0,03	0,00	0,08	0,07
		31,91	0,04	-0,03	-0,22	-0,17	0,33	0,06	0,10
		44,07	0,21	-0,22	0,13	-0,20	0,28	0,05	0,07
58,46	-0,03	0,04	-0,24	-0,08	0,23	0,04	0,11		
1.4509	Experiment	Einstellwinkel [°]	Biege- winkel [°]	Rück- federung [°]	Höhe [mm]	Breite [mm]	Tiefe [mm]	min. WS [mm]	max. WS [mm]
		14,62	13,66	0,96	54,73	60,46	0,00	1,09	1,23
		30,70	29,44	1,26	48,57	60,53	0,41	1,04	1,25
		44,59	43,10	1,49	44,31	61,11	4,59	1,05	1,28
	59,25	57,53	1,72	38,53	61,66	12,71	1,06	1,35	
	Simulation	Einstellwinkel [°]	Δ Biege- winkel [°]	Δ Rück- federung [°]	Δ Höhe [mm]	Δ Breite [mm]	Δ Tiefe [mm]	Δ min. WS [mm]	Δ max. WS [mm]
		14,61	0,00	-0,01	0,01	-0,07	0,00	0,04	0,09
		30,70	0,04	-0,04	-0,28	-0,17	0,19	0,06	0,11
		44,59	0,16	-0,16	0,17	0,16	0,26	0,04	0,09
59,25	-0,04	0,04	-0,44	-0,36	-0,30	0,02	0,07		

Ovalität des Rohrquerschnitts erkennen. Die Rückfederung ist für das Material 1.4301 größer als für das Material 1.4509, wodurch das Material 1.4509 kleinere Konturab-

weichungen nach der Umformung erfährt. Die geringe Rückfederung resultiert aus dem Fließkurvenverlauf, der eine geringere Fließgrenze und eine geringere Verfestigung als die Fließkurve des Materials 1.4301 aufweist (vgl. Abb. 2.3 (b)+(c)). Zusätzlich sind die Ovalisierung des Rohrquerschnitts im Biegebereich und der Anstieg der Rohrtiefe für das Material 1.4509 geringer. Obwohl die Ergebnisse bereits eine deutliche Ovalisierung und einen starken Einfall aufweisen und somit keine brauchbaren Resultate erzeugt werden, weist das Material 1.4509 ein leicht besseres Ergebnis auf als das Material 1.4301. Für beide Materialien sind die Wandstärkenextrema überwiegend ähnlich. Um **Experiment und Simulation vergleichen** zu können, wurden die experimentellen Einstellwinkel in die Simulation übernommen. Die experimentellen Einstellwinkel wurden manuell angefahren und anschließend exakt vermessen. Alle Biegewinkel in der Simulation liegen im geforderten Toleranzbereich von $\pm 0,3^\circ$. Der Anstieg der Rückfederung mit größer werdendem Biegewinkel wird ebenso abgebildet (vgl. Abb. 4.20).

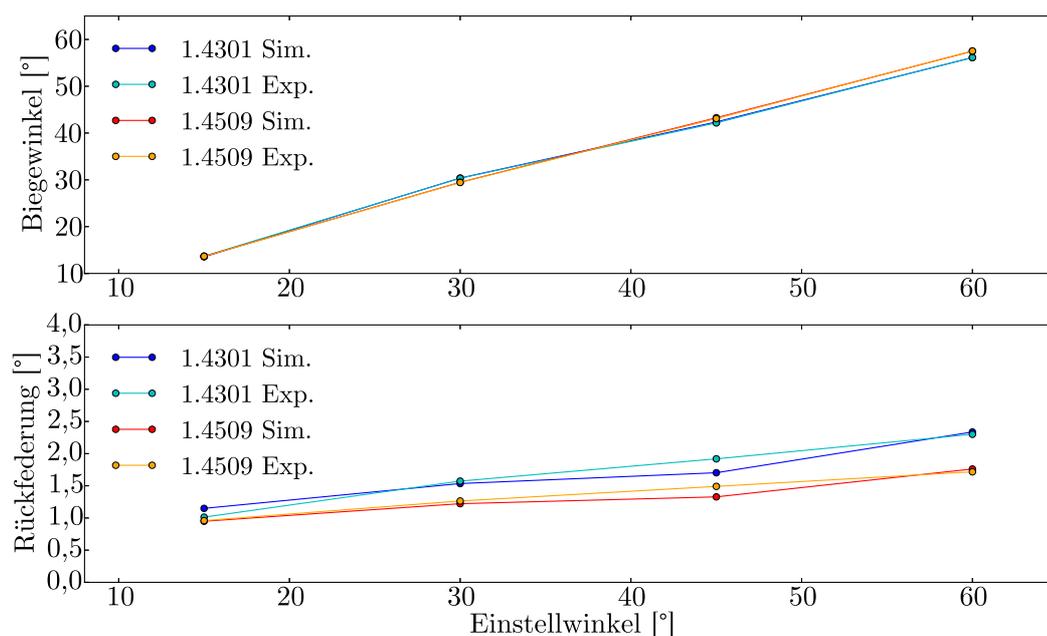


Abbildung 4.20: Vergleich des Biegewinkels und der Rückfederung zwischen Experiment und Simulation für die Materialien 1.4301 und 1.4509

Die minimale Rohrhöhe, die maximale Rohrbreite und die maximale Rohrtiefe wurden sowohl im Experiment als auch in der Simulation entlang der Biegezone ermittelt. Die Rohrhöhen und die Rohrbreiten liegen im geforderten Toleranzbereich und können den Verlauf der experimentellen Werte sehr gut darstellen (vgl. Abb. 4.21). Lediglich die Resultate für das Material 1.4509 mit einem Einstellwinkel von 60° weisen in der minimalen Rohrhöhe und in der maximalen Rohrbreite Werte außerhalb der Toleranzgrenzen auf.

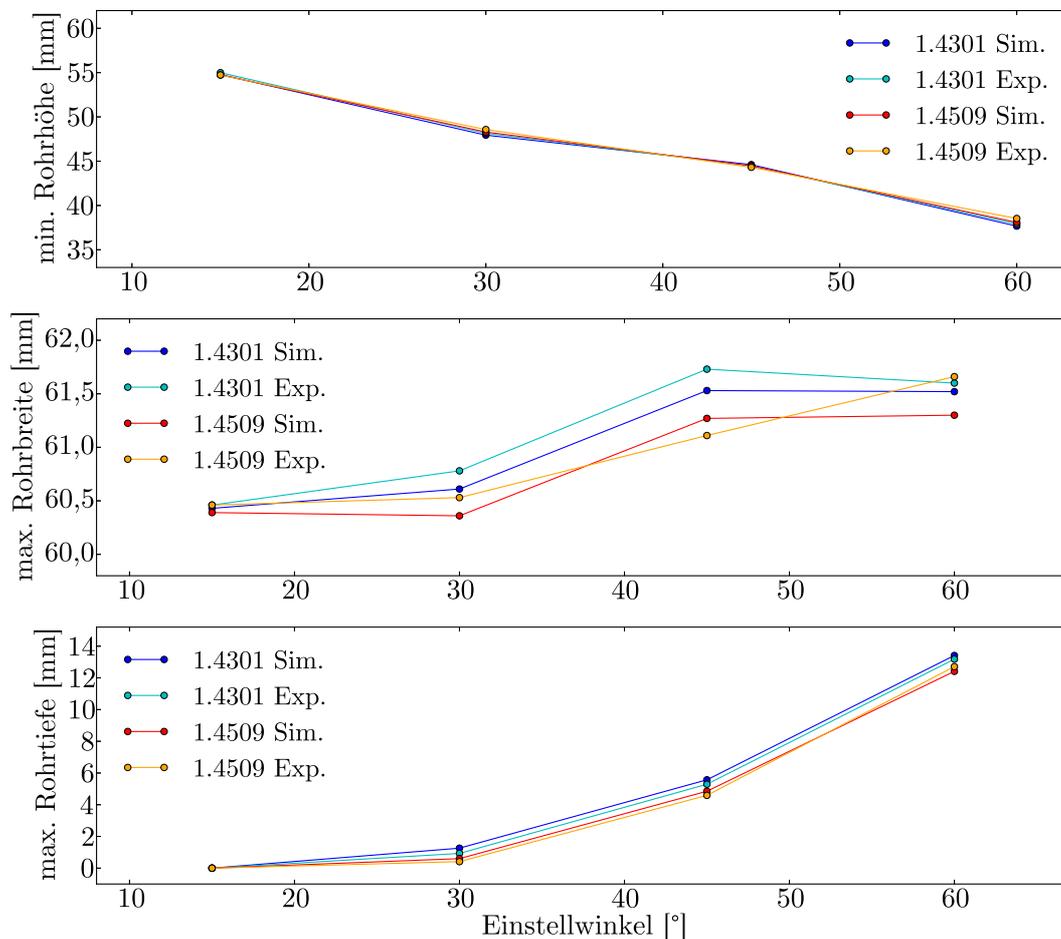


Abbildung 4.21: Vergleich der Rohrhöhe, Rohrbreite und Rohrtiefe zwischen Experiment und Simulation für die Materialien 1.4301 und 1.4509

Die Abweichung resultiert aus dem Erreichen der maximal zulässigen Fließspannung des Materials 1.4509, wodurch eine Abaqus[®] interne Erweiterung der Fließkurve und somit eine Idealisierung stattfindet. Der Verlauf der Rohrtiefe wird mit steigendem Einstellwinkel sehr gut durch die Simulation abgebildet. Dennoch liegen die meisten Werte leicht außerhalb des geforderten Toleranzbereiches von $\pm 0,1$ mm, wodurch eine Untersuchung des Werkstückeinflusses auch beim Biegeprozess notwendig ist. Die Wandstärkenextrema sind für beide Materialien in der Simulation größer als die experimentellen Werte. Obwohl die Abweichungen überwiegend im Toleranzbereich liegen, deutet der gleichmäßige Unterschied auf eine Abweichung der Nennwandstärke in der betrachteten Rohrcharge hin. Die Vermessung der Anfangswandstärke im Experiment ergab einen Mittelwert von 1,14 mm, was den Unterschied zur Simulation erklärt.

4.4.3 Einfluss des Werkstücks auf den Biegeprozess

Der Vergleich zwischen Experiment und Simulation wurde durch chargenbedingte Toleranzen in der Werkstückgeometrie beeinflusst und macht daher eine weitere Untersuchung des Werkstückeinflusses notwendig. Für jede Werkstücktoleranz werden vier Einstellwinkel betrachtet, wodurch eine allgemeine Tendenz genau dann vorliegt, wenn mindestens zwei von vier Ergebnissen eine Tendenz aufweisen. Für den Biegeprozess wird folgende Einteilung vorgenommen:

- $0,0 \text{ mm}/^\circ - 0,1 \text{ mm}/^\circ$: kein Einfluss (\rightarrow)
- $0,1 \text{ mm}/^\circ - 0,3 \text{ mm}/^\circ$: leichter Einfluss (\uparrow / \downarrow)
- $> 0,3 \text{ mm}/^\circ$: starker Einfluss (\uparrow / \downarrow).

Weiterhin ist eine allgemeine Tendenz *nicht eindeutig (n.e.)*, wenn zwei gegenläufige Tendenzen mit steigendem Winkel festgestellt werden. Die absoluten Werte der Biegeergebnisse können im Anhang nachgelesen werden. Folgende Einflüsse werden untersucht:

- Außendurchmesser,
- Wandstärke,
- Ovalität,
- Materialparameter,
- Anfangseigenstressungen und
- Reibung.

Außendurchmesser

- Nenngröße: 60,0 mm
- Toleranzgrößen: 59,7 mm / 60,3 mm (Außendurchmesser \downarrow / \uparrow)

Die Reduzierung des Außendurchmessers (**Außendurchmesser** \downarrow) hat einen Spalt zwischen Rohr und Biegewerkzeuge zur Folge. Durch den Spalt wird das Rohr nicht mehr ideal geklemmt, wodurch die Rotation der Klemmbanke nicht mehr mit dem Winkel des Rohres übereinstimmt. Dadurch wird das Rohr nicht weit genug gebogen, was zusammen mit einer erhöhten Rückfederung zu einer deutlichen Biegewinkelabweichung von bis zu $0,6^\circ$ führt. Der Spalt bewirkt zudem eine starke Reduzierung der Rohrhöhe und einen starken Anstieg der Rohrbreite, wodurch die Ovalisierung des Rohrquerschnitts im Biegebereich zunimmt. Trotz der deutlichen Zunahme der Ovalisierung,

sinkt die Rohrtiefe mit steigendem Biegewinkel, was auf den ersten Blick widersprüchlich wirkt. Der Grund für dieses Verhalten ist ein Faltenwurf im Innenbogen, der durch den Spalt zwischen Rohr und Gleitschiene entstanden ist. Durch den Spalt hat das Rohr vor der Tangentiallinie keinen Gegenhalt am Außenradius, wodurch sich das Rohr zu Beginn der Umformung zur Gleitschiene drückt, um die Lücke zu schließen. So entsteht vor der Tangentiallinie ein Spalt am Innenradius, der den Materialfluss stört. Die Störung im Innenradius führt zu einer übermäßigen Materialanhäufung und dadurch zu einem Faltenwurf. Die extreme Materialanhäufung macht sich durch einen Anstieg der maximalen Wandstärke von über 25 % bemerkbar. Der Faltenwurf wirkt dem Einfall am Außenbogen entgegen und reduziert dadurch die Rohrtiefe. Im Experiment konnte dieses Verhalten bei Rohren mit kleinem Außendurchmesser ebenso beobachtet werden (vgl. Abb. 4.22).

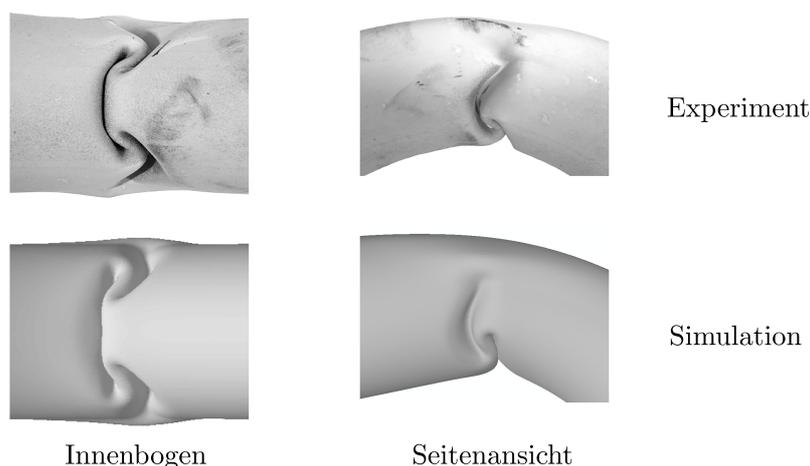


Abbildung 4.22: Faltenwurf im Experiment und in der Simulation durch einen zu geringen Anfangsausendurchmesser des Rohres

Die Simulationsergebnisse können bei entsprechender Berücksichtigung der Rohrgeometrie die charakteristische Form des Faltenwurfs mit einer Falte in der Rohrmitte und zwei Falten zur Seite hin hervorragend abbilden. Für das Material 1.4509 konnte der Faltenwurf ebenfalls im Experiment festgestellt werden und in der Simulation dargestellt werden. Da der Umformfehler nicht direkt aus den Ergebniswerten erkennbar ist, erfolgt durch das Auswerteskript eine zusätzliche Überprüfung der Energiekurven aus Abaqus®. Die Gesamtenergie des Systems E_{Tot} setzt sich aus der Summe der inneren Energie E_U , der kinetischen Energie E_K , der Arbeit durch Reibung E_F und dem negativen Betrag der Arbeit durch externe Kräfte E_W zusammen,

$$E_{Tot} = E_U + E_K + E_F - E_W = konst. . \quad (4.1)$$

Die Gesamtenergie des Systems muss während des kompletten Prozesses näherungsweise konstant bleiben, da ein nicht-konstanter Kurvenverlauf auf ein fehlerhaftes Verhalten in der Simulation hindeutet [23]. In Abbildung 4.23 ist der starke Abfall des Energieverlaufs und die gleichzeitige Entwicklung des Umformfehlers dargestellt. Ab einem Biegewinkel von 15° beginnt die Kurve abzufallen, was den Beginn des Faltenwurfs kennzeichnet.

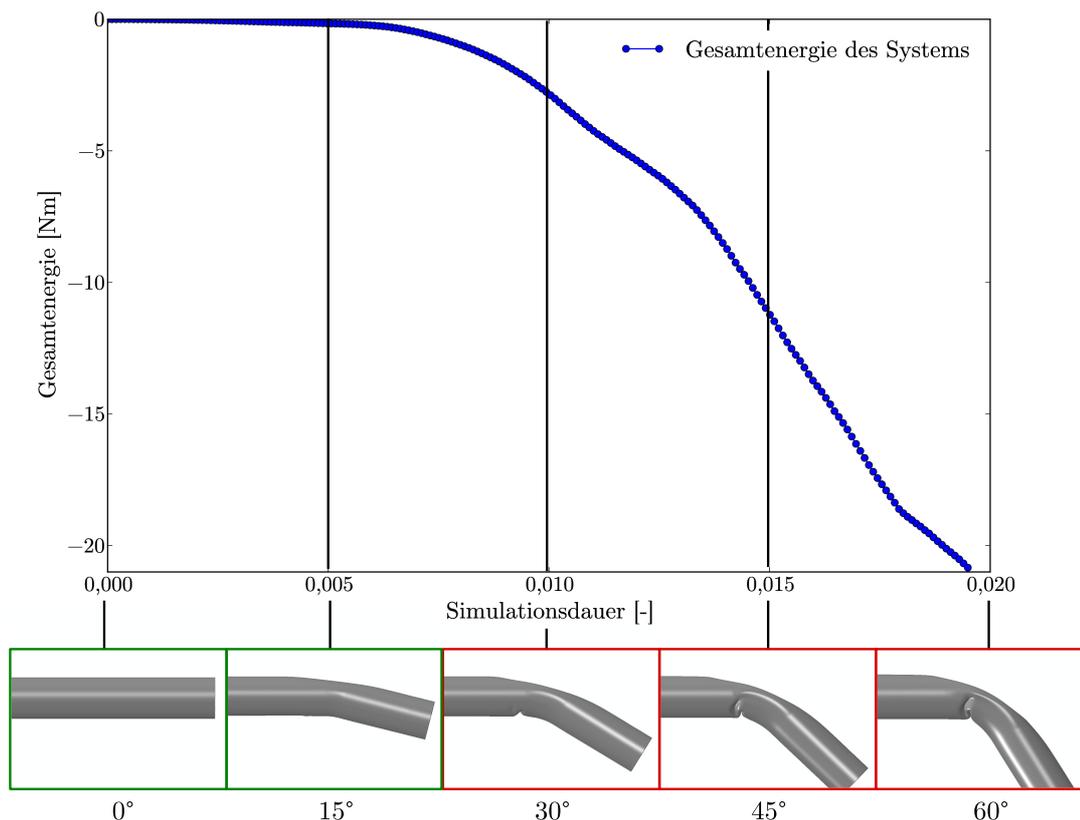


Abbildung 4.23: Verlauf der Gesamtenergie während des Biegeprozesses mit geringerem Anfangsaußendurchmesser des Rohres

Eine Erhöhung des Außendurchmessers (**Außendurchmesser** \uparrow) führt zu einer Anpassung der Biegewerkzeuge an den neuen Rohrquerschnitt. Somit sind die anfängliche Rohrhöhe und die anfängliche Rohrbreite um jeweils 0,3 mm erhöht. Diese Erhöhung ist in einem leichten Anstieg der Rohrhöhe, der Rohrbreite und der Rohrtiefe erkennbar. Der Biegewinkel und die Wandstärkenextrema bleiben nahezu unbeeinflusst.

Zusammenfassung:

Eine Reduzierung des **Außendurchmessers** führt mit steigendem Einstellwinkel zu einem Faltenwurf im Innenbogen. Ein größerer Anfangsaußendurchmesser bewirkt einen Anstieg der Rohrhöhe, der Rohrbreite und der Rohrtiefe.

Wandstärke

- Nenngröße: 1, 2 mm
- Toleranzgrößen: 1, 1 mm / 1, 3 mm (Wandstärke ↓ / ↑)

Eine Reduzierung der Wandstärke (**Wandstärke** ↓) beeinflusst gleichermaßen die Wandstärkenextrema. Während der Biegewinkel durch die Wandstärkenänderung unbeeinflusst bleibt, nimmt die Ovalisierung des Rohrquerschnitts im Biegebereich durch eine stark sinkende Rohrhöhe und eine leicht steigende Rohrbreite deutlich zu. Mit steigender Ovalisierung des Querschnitts erhöhen sich die Rohrtiefe und somit auch der Einfall am Außenbogen. Die Wandstärkenreduzierung und somit die voranschreitende Leichtbauweise von Rohren führen zu einer zunehmenden Umformproblematik bei Biegeprozessen. Bei einer Wandstärkenzunahme (**Wandstärke** ↑) ist das gegenteilige Ergebnis zu beobachten. Die Ovalisierung des Rohrquerschnitts nimmt ab, wodurch auch der Einfall mit steigendem Winkel abnimmt. Die Wandstärkenextrema werden gleichermaßen erhöht.

Zusammenfassung:

Eine Variation der **Wandstärke** beeinflusst die Ovalisierung des Rohrquerschnitts und den Einfall am Außenbogen deutlich. Während die Reduzierung der Wandstärke die Ovalisierung und den Einfall erhöht, werden diese durch eine Erhöhung der Wandstärke reduziert.

Ovalität

- Nenngröße: 60, 0 mm - 60, 0 mm (Rohrhöhe - Rohrbreite)
- Toleranzgrößen: 60, 0 mm - 59, 7 mm / 59, 7 mm - 60, 0 mm (Ovalität hoch / breit)

Das ovalisierte Rohr mit einer anfänglich reduzierten Rohrbreite (**Ovalität hoch**) weist zur Seite hin einen Spalt auf. Die Ovalisierung führt durch einen starken Abfall der Rohrhöhe zu einem Anstieg der Ovalisierung im Biegebereich. Die gleichzeitige Reduzierung des Rohreinfalls am Außenbogen und der Anstieg der Materialanhäufung im Innenbogen sind erneut Anzeichen für einen Faltenwurf. Die Überprüfung der Energiekurve bestätigt mit steigendem Biegewinkel die Entwicklung eines Faltenwurfs im Innenbogen (vgl. Abb. 4.24). Bei einem Einstellwinkel von 30° knickt das Rohr an der Tangentiallinie ein, was den Start der Faltenbildung kennzeichnet.

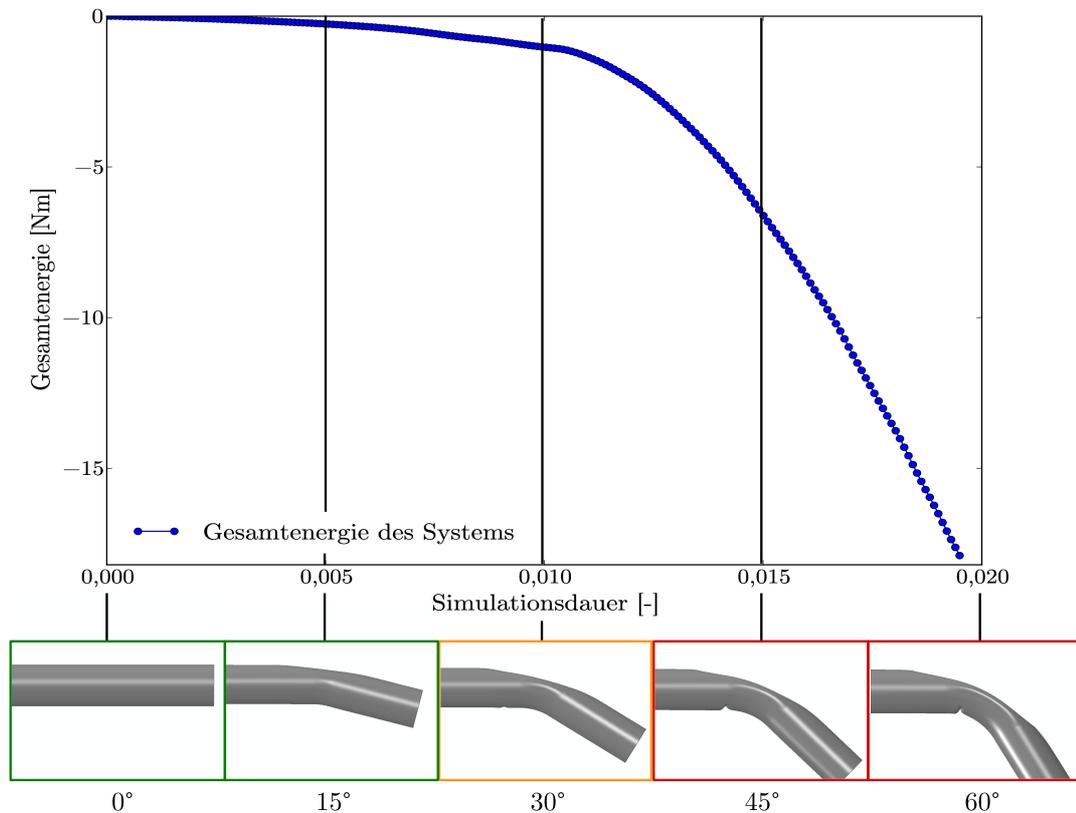


Abbildung 4.24: Verlauf der Gesamtenergie während des Biegeprozesses mit Anfangsovalität des Rohres

Der nachfolgende Faltenwurf bei einer Anfangsovalität unterscheidet sich jedoch in der Form von der des geringeren Anfangsaußendurchmessers (vgl. Abb. 4.25). Der Faltenwurf bei einer Ovalität ist durch eine einzelne Falte im Innenbogen charakterisiert. Bei einem geringeren Anfangsaußendurchmesser sind zwei weitere Falten zur Rohrseite erkennbar. Variationen am Anfangsrohrquerschnitt führen somit zu Umformfehler im Biegeprozess und weisen je nach Art der Variation unterschiedliche Charakteristiken in der Faltenbildung auf. Das ovalisierte Rohr mit einer reduzierten Rohrhöhe (**Ovalität breit**) bestätigt ebenfalls einen Faltenwurf im Innenbogen. Lediglich die Rohrhöhe lässt im Unterschied zum höheren Rohrquerschnitt keinen eindeutigen Trend erkennen.

Zusammenfassung:

Ein **ovalisierter Anfangsquerschnitt** des Rohres führt im Biegeprozess zu einem Faltenwurf im Innenbogen. Der genaue Einfluss auf das Biegeergebnis ist dabei abhängig von der Positionierung des Rohres.

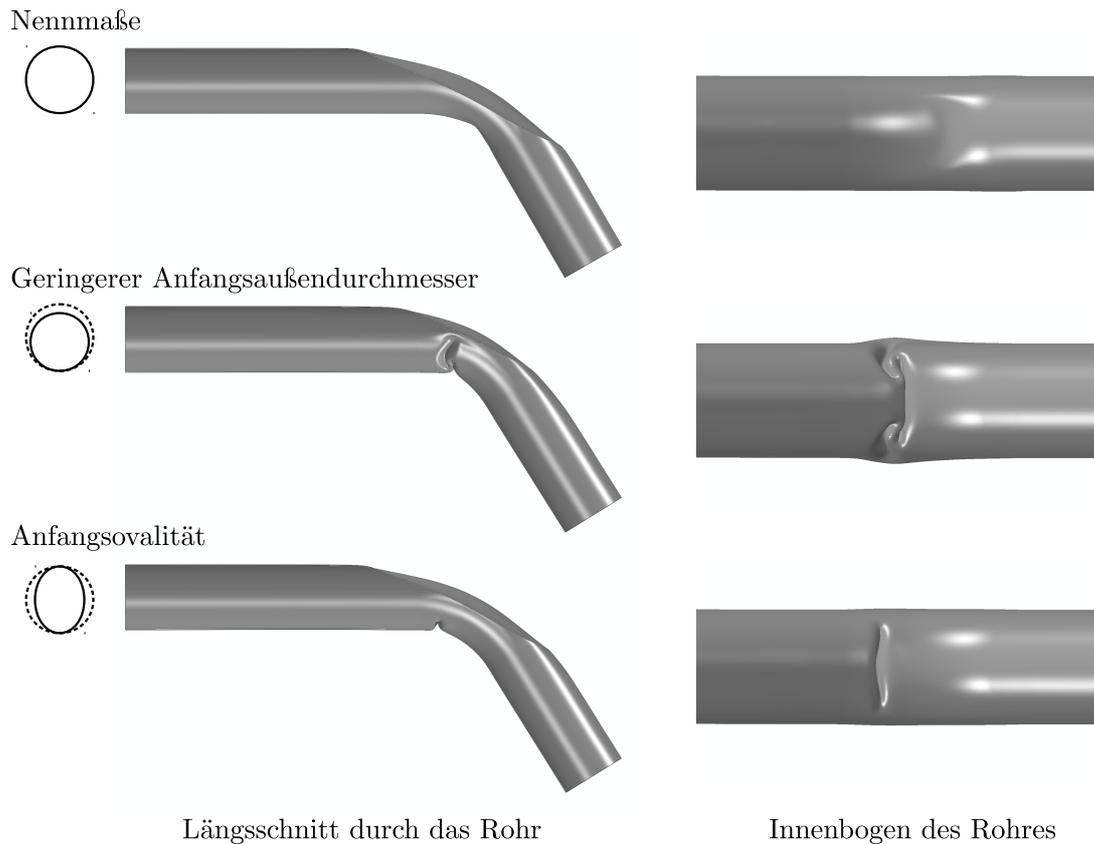


Abbildung 4.25: Unterschiedliche Rohrquerschnitte im Biegebereich bei unterschiedlichen Ausgangsrohren

Materialparameter

- Nenngröße: 1.4301 / 1.4509 (experimentell ermittelt)
- Toleranzgrößen: 1.4301 / 1.4509 (Literatur)

Die Fließkurve für das Material 1.4301 aus der Literatur (**1.4301 Literatur**) liegt für kleine Deformationen und sehr große Deformationen außerhalb des Streubereichs der experimentell ermittelten Fließkurve (vgl. Abb. 4.4). Die Kurve aus der Literatur hat eine starke Reduzierung der Rohrtiefe bzw. einen geringen Einfall am Außenbogen zur Folge. Der Einfluss auf die Ovalisierung des Rohrquerschnitts ist nicht eindeutig, da die Rohrhöhe mit steigendem Biegewinkel im Bereich von $\pm 0,3$ mm schwankt und die Rohrbreite nahezu unbeeinflusst bleibt. Zusätzlich sinkt der resultierende Biegewinkel durch eine erhöhte Rückfederung des Materials. Die Wandstärkenextrema bleiben durch den Materialparameterwechsel unbeeinflusst. Die unterschiedlichen Fließkurvenverläufe haben somit einen größeren Einfluss auf den Biegeprozess als auf den Prägeprozess. Die Fließkurve für das Material 1.4509 aus der Literatur (**1.4509 Literatur**) liegt vollständig im Streubereich der experimentell ermittelten Fließkurve, weist aber einen geringeren maximalen Umformgrad auf. Aus diesem Grund ist nur ein Anstieg

der Rohrtiefe zu registrieren. Alle anderen Zielgrößen bleiben durch den Wechsel der Fließkurve unbeeinflusst.

Zusammenfassung:

Eine Variation der **Materialparameter** hat einen starken Einfluss auf die Rohrtiefe im Biegeprozess. Wenn die Unterschiede zwischen den Materialparameter größer als der experimentelle Streubereich sind, erfahren der Biegewinkel und die Rohrhöhe eine leichte Änderung.

Anfangseigenspannungen

- Nenngröße: Keine Eigenspannungen
- Toleranzgrößen: Eigenspannungen unter / über Fließgrenze (Eigenspannungen ↓ / ↑)

Anfangseigenspannungen, die zu elastischen Vordeformationen des Rohres führen (**Eigenspannungen** ↓), haben nahezu keinen Einfluss auf das Biegeergebnis. Erst bei einem Einstellwinkel von 60° sind erste Einflüsse am Rohrquerschnitt im Biegebereich zu erkennen. Anfangseigenspannungen, die zu plastischen Vordeformationen des Rohres führen (**Eigenspannungen** ↑), bewirken eine leichte Reduzierung des Biegewinkels. Die restlichen Zielgrößen bleiben ebenfalls unbeeinflusst. Die Anfangsspannungsverteilung ist bei einer globalen Umformung wie dem Biegen nur geringfügig erkennbar.

Zusammenfassung:

Anfangseigenspannungen haben nahezu keinen Einfluss auf das Biegeergebnis. Lediglich der Biegewinkel wird in Abhängigkeit der Spannungswerte leicht reduziert.

Reibung

- Nenngröße: 0,3 (Gleitschiene) / 0,1 (Faltenglätter) / 0,1 (Biegeschablone) / 0,6 (Klemmbacke)
- Toleranzgrößen: 0,2/0,4 (Reibung Gleitschiene ↓ / ↑) / 0,2 (Reibung Faltenglätter ↑) / 0,2 (Reibung Biegeschablone ↑) / 0,5 (Reibung Klemmbacke ↓)

Eine Reduzierung der Reibung zwischen Rohr und Gleitschiene (**Reibung Gleitschiene** ↓) beeinflusst den Materialfluss am Außenradius in der Biegezone. Durch den gerin-

gen Widerstand erhöht sich die Rohrhöhe stark und reduziert somit die resultierende Ovalisierung des Rohres. Die restlichen Werte bleiben unbeeinflusst. Lediglich bei einem Biegewinkel vom 60° und mehr erhöht sich zusätzlich der Biegewinkel und die Rohrtiefe verringert sich stark. Eine Erhöhung der Reibung zwischen Rohr und Gleitschiene (**Reibung Gleitschiene** \uparrow) senkt die Rohrhöhe leicht und die Rohrtiefe steigt leicht an. Somit ist der Effekt nicht so stark wie bei einer Reduzierung der Reibung. Sowohl die Ovalisierung als auch der Einfall am Außenbogen nehmen jedoch zu. Die restlichen Zielgrößen bleiben unverändert. Eine Erhöhung der Reibung zwischen Rohr und Faltenglätter (**Reibung Faltenglätter** \uparrow) beeinflusst wie die Gleitschiene den Materialfluss des Rohres in der Biegezone. Die erhöhte Reibung bewirkt ebenfalls eine reduzierte Rohrhöhe und eine erhöhte Rohrtiefe, wodurch die Ovalisierung und der Rohreinfall zunehmen. Die restlichen Zielgrößen bleiben unbeeinflusst. Eine Erhöhung der Reibung zwischen Rohr und Biegeschablone (**Reibung Biegeschablone** \uparrow) zeigt sich verstärkt durch das Ziehen des Rohres entlang der Biegeschablone mit steigendem Biegewinkel. Dadurch steigt die resultierende Rohrhöhe und die Rohrtiefe verringert sich. Bei einem Winkel von 60° erfahren der Biegewinkel und die Rohrhöhe eine starke Erhöhung und die Rohrbreite und die Rohrtiefe werden gesenkt. Eine Reduzierung der Reibung zwischen Rohr und Klemmbacke (**Reibung Klemmbacke** \downarrow) führt zu einer unvollständigen Klemmung des Rohres und stellt somit eine Fehlerquelle dar. Durch die unvollständige Klemmung steigt die Ovalisierung des Rohrquerschnitts im Biegebereich und der Rohreinfall am Außenbogen nimmt zu. Bei einem Biegewinkel von 60° ist ein deutlicher Abfall der Rohrhöhe zu registrieren. Die restlichen Ergebniswerte bleiben unbeeinflusst.

Zusammenfassung:

Eine Reduzierung der Reibung vor der Tangentiallinie durch die **Gleitschiene** und den **Faltenglätter** führt tendenziell zu einer erhöhten Rohrhöhe und zu einer niedrigeren Rohrtiefe. Eine Reduzierung der Reibung hinter der Tangentiallinie durch die **Biegeschablone** und die **Klemmbacke** führt hingegen tendenziell zu einer niedrigeren Rohrhöhe und zu einer erhöhten Rohrtiefe. Die Biegewinkel und die Wandstärkenextrema bleiben nahezu unbeeinflusst.

Übersicht

Werkstücktoleranzen führen im Biegeprozess zu signifikanten Abweichungen in den Umformergebnissen und konnten als eine Ursache für einen Faltenwurf am Rohr belegt werden. Die Wirkungen der einzelnen Werkstücktoleranzen auf das Biegeergebnis sind in Tabelle 4.4 dargestellt.

Tabelle 4.4: Auflistung aller Werkstückeinflüsse auf den Biegeprozess (\uparrow / \downarrow : Variation größer / kleiner als Nenngröße; grün/rot: positiver/negativer Einfluss; \rightarrow : kein Einfluss; \uparrow / \downarrow : maximal mögliche Änderung im Bereich von $\pm 0,3$ mm; $\uparrow\uparrow / \downarrow\downarrow$: maximal mögliche Änderung $> 0,3$ mm; n.e.: nicht eindeutig)

Variationsparameter	Biege- winkel	Höhe	Breite	Tiefe	min. WS	max. WS	Falten- wurf
Außendurchmesser \downarrow	\downarrow	\downarrow	\uparrow	\downarrow	\rightarrow	\uparrow	Ja
Außendurchmesser \uparrow	\rightarrow	\uparrow	\uparrow	\uparrow	\rightarrow	\rightarrow	Nein
Wandstärke \downarrow	\rightarrow	\downarrow	\uparrow	\uparrow	\rightarrow	\downarrow	Nein
Wandstärke \uparrow	\rightarrow	\uparrow	\downarrow	\downarrow	\rightarrow	\uparrow	Nein
Ovalität hoch	\downarrow	\downarrow	n.e.	\downarrow	\rightarrow	\uparrow	Ja
Ovalität breit	\downarrow	n.e.	\rightarrow	\downarrow	\rightarrow	\uparrow	Ja
1.4301 Literatur	\downarrow	n.e.	\rightarrow	\downarrow	\rightarrow	\rightarrow	Nein
1.4509 Literatur	\rightarrow	\rightarrow	\rightarrow	\uparrow	\rightarrow	\rightarrow	Nein
Eigenspannungen \downarrow	\rightarrow	\rightarrow	\rightarrow	\rightarrow	\rightarrow	\rightarrow	Nein
Eigenspannungen \uparrow	\downarrow	\rightarrow	\rightarrow	\rightarrow	\rightarrow	\rightarrow	Nein
Reibung							
Gleitschiene \downarrow	\rightarrow	\uparrow	\rightarrow	\rightarrow	\rightarrow	\rightarrow	Nein
Gleitschiene \uparrow	\rightarrow	\downarrow	\rightarrow	\uparrow	\rightarrow	\rightarrow	Nein
Faltenglätter \uparrow	\rightarrow	\downarrow	\rightarrow	\uparrow	\rightarrow	\rightarrow	Nein
Biegeschablone \uparrow	\rightarrow	\uparrow	\rightarrow	\downarrow	\rightarrow	\rightarrow	Nein
Klemmbacke \downarrow	\rightarrow	\downarrow	\rightarrow	\uparrow	\rightarrow	\rightarrow	Nein

Die Verringerung des Anfangsquerschnitts und eine anfängliche Ovalität im Rohrquerschnitt führen zu einer Faltenbildung im Innenbogen des Rohres. Die unterschiedlichen Ausprägungen der beiden Umformfehler konnten in der Simulation abgebildet werden. Die Vergrößerung des Rohraußendurchmessers und die Variationen in der Wandstärke bewirken eine starke Änderung des Rohrquerschnitts im Biegebereich. Während eine Änderung der Materialparameter vor allem den Biegewinkel und die Rohrtiefe beeinflusst, machen sich Anfangseigenspannungen nicht bemerkbar. Die unterschiedlichen Reibkoeffizienten verändern den Materialfluss während des Biegevorgangs, was in der Rohrhöhe und der Rohrtiefe erkennbar wird.

4.5 Numerische Darstellung des Biegens und Prägens von Rohren

Die validierten Simulationsmodelle des einfachen Prägens und des Biegens ohne Dorn liefern die Grundlage für die folgenden Untersuchungen der Kombination aus Biegen mit Dorn und anschließendem Prägen. Der Biegeprozess wird durch einen Biegedorn erweitert, um den Rohreinfall am Außenbogen zu verhindern und die Ovalisierung des Rohrquerschnitts im Biegebereich zu reduzieren. Der anschließende Prägeprozess wird an drei unterschiedlichen Positionen durchgeführt. Dadurch wird der Einfluss der Deformationen und der Eigenspannungen aus dem Biegeprozess auf das Prägergebnis untersucht.

4.5.1 Simulationsmodell des Biegens und Prägens von Rohren

Einstellparameter

Die Grundeinstellungen des Biegeprozesses werden aus Kapitel 4.4 übernommen. Zusätzlich zu den Grundeinstellungen wird ein Biegedorn über die graphische Benutzeroberfläche hinzugeschaltet (vgl. Abb. 4.26). Drei unterschiedliche Dornarten stehen dem Benutzer zur Verfügung (vgl. Abb. 4.27). Der Grundaufbau des Dorns besteht immer aus einem Dornschaft und einer unterschiedlichen Anzahl verschiedener Dornglieder. Der **BL-Dorn** wurde im Experiment verwendet (vgl. Kap. 2.3.2), um während der Biegeversuchen den Rohreinfall am Außenbogen zu verhindern (vgl. Abb. 4.27 (a)). Der Biegedorn besteht aus einem Schaft und drei Dorngliedern und wurde für Rohre mit einem Außendurchmesser von 60 mm und einer Wandstärke von 1,2 mm konstruiert. Dieser Dorn wird im Simulationsmodell für den Vergleich zwischen Experiment und Simulation verwendet. Eine genauere Beschreibung zur Funktion der einzelnen Elemente erfolgt im nachfolgenden Abschnitt. Ein **dreigliedriger Dorn** wurde analog zum BL-Dorn aus einem Schaft und drei Dorngliedern definiert (vgl. Abb. 4.27 (b)). Ein vereinfachter Aufbau ermöglicht eine Parametrisierung der wichtigsten Geometrieabschnitte und somit eine variable Anpassung an die Rohrgeometrie. Hierzu lassen sich die Glieder im Durchmesser, im Kantenradius, in der Dicke und im Abstand zueinander verändern. Die Dicke der Dornkugeln ist aufgrund der Bauweise deutlich dünner als der Durchmesser, wodurch die Kugelgeometrie in eine Scheibenform übergeht. Der Schaft ist variabel im Durchmesser, in der Länge und in der Kantenverrundung. Im Gegensatz zum experimentell verwendeten Dorn ist auch die Positionierung um die Tangentiallinie frei durch den Benutzer wählbar. Dadurch besitzt der Dorn insgesamt



Abbildung 4.26: Einstellmöglichkeiten für den Biegedorn und die dazugehörigen Standardwerte in der graphischen Benutzeroberfläche "DTFS"

acht Einstellparameter. Im Rahmen der Optimierung wird ein **eingliedriger Dorn** mit einem Schaft und einem Dornglied verwendet (vgl. Abb. 4.27 (c)). Dieser Dorn führt zu einer Verringerung der Einstellparameter und reduziert somit auch die Anzahl der zu optimierenden Parameter. Der Schaft und die Dornkugel haben den gleichen Durchmesser, der durch den Benutzer festgelegt wird. Die Kugeldicke und der Abstand zum Schaft können frei eingestellt werden und die Positionierung des Dorns um die Tangentiallinie ist variabel. Der Dorn mit einem Glied hat somit vier Einstellparameter.

Die Umsetzung des Prägeprozesses gebogener Rohre verläuft analog zum experimentellen Aufbau (vgl. Kap. 2.3.2). Das Prägen des Rohres erfolgt an drei fest definierten Stellen im **geraden Bereich**, im **Übergangsbereich** und im **Biegebereich** (vgl. Abb. 2.25). Die drei Prägestempel und die Rohrklemmung werden über die graphische Benutzeroberfläche definiert (vgl. Abb. 4.28). Die **Rohrklemmung** kann durch den Innendurchmesser, den Biegeradius und den Biegewinkel an das gebogene Rohr angepasst werden. Analog zum einfachen Prägen ist jeder **Stempel** in der Form, in der Länge, in der Kantenverrundung und im Stempelhub variabel. Die Breite und die

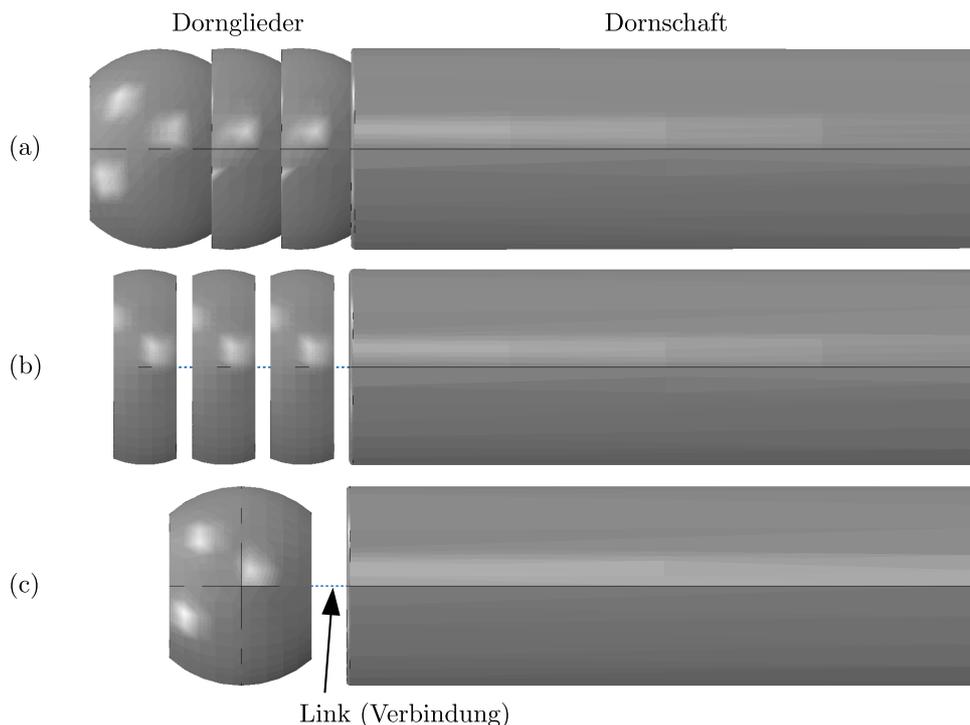


Abbildung 4.27: Verfügbare Dornarten in der graphischen Benutzeroberfläche "DTFS": BL-Dorn für Experimente (a), variabler Dorn mit drei Gliedern (b), variabler Dorn mit einem Glied (c)

Eckenverrundung sind einheitlich festgelegt. Aufgrund des Aufbaus unterscheidet sich die Standardeinstellung der Stempel von der des einfachen Prägens, was beim experimentellen Aufbau bereits thematisiert wurde (vgl. Kap. 2.3.2). Eine freie Änderung der Prägeposition über die graphische Benutzeroberfläche ist nicht vorgesehen.

Aufbau

Der zweistufige Umformprozess bedarf insgesamt vier Simulationsmodelle in Abaqus[®], wobei jeweils ein explizit berechnetes Modell für das Biegen und Prägen verwendet wird und jeweils ein implizit berechnetes Modell für die beiden Rückfederungen benötigt wird (vgl. Abb. 4.29). Das **erste Simulationsmodell** zum Rohrbiegen, bestehend aus Klemmbacke, Biegeschablone, Gleitschiene und Faltenglätter (vgl. Abb. 4.15), wird durch einen Biegedorn erweitert. Der Biegedorn wird, wie die restlichen Werkzeuge, als diskretisierter Starrkörper definiert, wofür 4-Knoten bi-lineare Viereckselemente des Abaqus[®]-internen Typs *R3D4* verwendet werden. Der Aufbau des Dorns - aus einem Schaft und drei Gliedern - entspricht der realen Bauteilgeometrie (vgl. Abb. 4.27 (a)). Die Verbindung der Dornglieder erfolgt im Simulationsmodell durch Links, die eine Rotationsbewegung entlang der Rohrbiegung zulassen. Aufgrund der Rechendauerersparnis ist die Vereinfachung des Drahtseils durch Verbindungselemente gerechtfertigt



Abbildung 4.28: Einstellmöglichkeiten für den Prägeprozess gebogener Rohre und die dazugehörigen Standardwerte in der graphischen Benutzeroberfläche "DTFS"

und in der Literatur gängige Praxis [81, 99, 132, 134]. Die Dornposition erfolgt durch eine Platzierung der Schaftspitze an der Tangentiallinie (vgl. Abb. 2.24) und ist in der Startposition fixiert. Die Dornlieder befinden sich im Biegebereich und unterstützen das Rohr während des Biegeprozesses von innen. Die Dornkugeln sind über die Links miteinander verbunden und unterliegen sonst keinen zusätzlichen Randbedingungen. Mit steigendem Biegewinkel drückt sich das Rohrmaterial im Außenbogen in die Lücken zwischen den Dorngliedern, was zu leichten Kugelabdrücken führt. Im Experiment erfolgt nach dem Biegen ein Dornrückzug zur Glättung der Dornkugelabdrücke im Rohr (vgl. Abb. 2.24). In der Simulation wird ebenfalls die Fixierung des Schafts gelöst und der Dorn nach hinten aus der Rohröffnung gezogen.

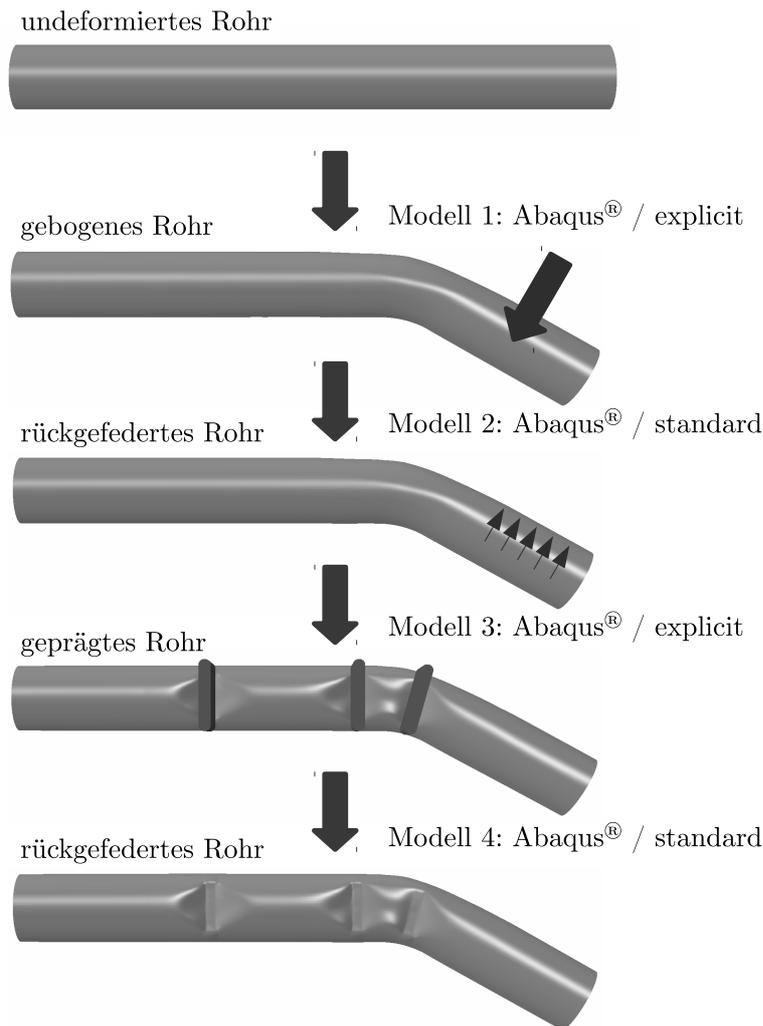


Abbildung 4.29: Ablaufplan für das Biegen mit anschließendem Prägen durch die unterschiedlichen Simulationsmodelle in Abaqus®

Im **zweiten Simulationsmodell** erfolgt analog zum Biegen ohne Dorn durch das Entfernen aller Werkzeuge und dem Fixieren des ungebogenen Rohrendes die Rückfederung des Rohres entgegen der Belastungsrichtung. Im **dritten Simulationsmodell** werden die Rohrklammer und die drei Prägestempel hinzugefügt und am gebogenen Rohr ausgerichtet (vgl. Abb. 4.30). Der Bogen in der Rohrklammer ist abhängig vom Biegewinkel und vom Biegeradius aus dem vorherigen Biegeprozess. Die Klemmvorrichtung ist von Beginn an geschlossen und fixiert. Die Positionen der Stempelöffnungen sind fest vorgegeben und die Größe der Öffnungen richtet sich nach den verwendeten Stempelflächen und einem fest definierten Spalt von 1 mm um den Stempel. Die Stempel besitzen analog zum Experiment eine Länge von 10 mm (vgl. Kap. 2.3.2). Im **vierten Simulationsmodell** erfolgt durch das Entfernen aller Werkzeuge und einer entsprechenden Fixierung des ungebogenen Rohrendes die Rückfederung. Das Biegen und das Prägen des Rohres finden jeweils verschiebungsgesteuert und quasistatisch

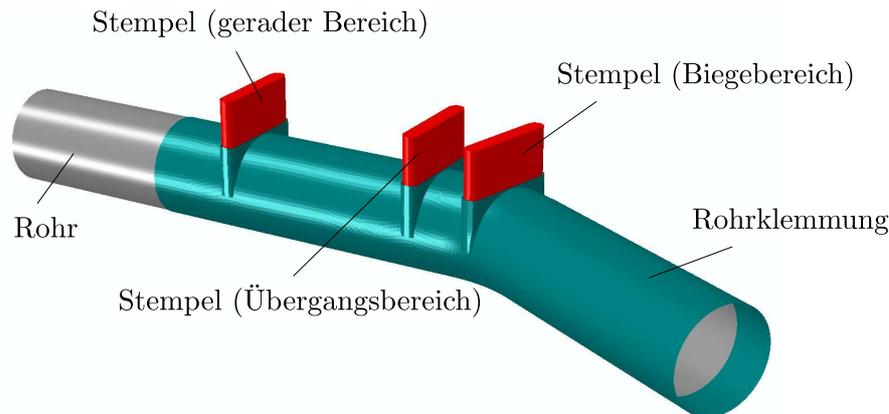


Abbildung 4.30: Simulationsmodell zum Prägen gebogener Rohre

statt. Die Randbedingungen werden so festgelegt, dass in beiden Prozessen das Rohr frei in den Anfangspositionen liegt. Der Reibungskoeffizient wird für den Kontakt zwischen Rohr und Biegedorn und für Rohr und Prägewerkzeuge auf 0,1 festgelegt. Die Umformgeschwindigkeit ist beim Biegeprozess 300° s^{-1} und beim Prägeprozess 1 m s^{-1} . Das Prägen eines doppelt gebogenen Rohres wird analog zum einfach gebogenen Rohr im zweiten Biegebereich vollzogen, sodass der erste Biegebereich ungeprägt bleibt.

Auswertung

Die Auswertungsprozedur erfolgt analog zum Biegen ohne Dorn in Kapitel 4.4.1 und dem einfachen Prägen in Kapitel 4.3.1. Der Unterschied besteht in der Auswertung von drei unterschiedlich geprägten Positionen, wodurch für jede Position die Zielgrößen bestimmt werden müssen. Zusätzlich werden sowohl die Wandstärke als auch der Biegewinkel jeweils nach beiden Umformprozessen ausgewertet, um die Entwicklung der Werte zu dokumentieren.

4.5.2 Vergleich mit experimentellen Biegeergebnissen und Prägeergebnissen

Der Vergleich zwischen experimentellen und numerischen Ergebnissen aus Biegen und Prägen erfolgt in zwei Schritten. Im ersten Schritt wird durch den **Biegeprozess** der notwendige Biegebogen am Rohr - durch den Biegewinkel und den Biegeradius - realisiert. Der Biegeradius wird dazu auf einen Wert von 110 mm festgelegt. Um den finalen Biegewinkel von 15° bzw. 30° zu erreichen, wird die entsprechende Rückfederung bereits beim Einstellwinkel berücksichtigt. Im zweiten Schritt erfolgt das **Prägen des gebogenen Rohres**. Die Rohrklemmung lässt sich dazu durch den adaptiven Aufbau

an den Biegewinkel von 15° bzw. 30° anpassen (vgl. Kap. 2.3.2). Die Rohrklemmung besitzt für die numerische Umsetzung einen Nenninnendurchmesser von 60 mm. Die Stempel haben eine ebene Prägefläche und verfahren alle mit demselben Hub von 5 mm bzw. 10 mm. Für den Vergleich zwischen Experiment und Simulation werden Rohre der Materialien 1.4301 und 1.4509 verwendet. Das Rohr wird in der Simulation mit einer Elementanzahl von 156.250, die das Ergebnis der beiden Netzstudien der jeweiligen Umformprozesse ist (vgl. Kap. 4.3.2 und Kap. 4.4.2), dargestellt.

Zur Bewertung der Simulationsergebnisse wird die Allgmeintoleranz ISO 2768 -m [32] angewandt. Dazu werden jede Einstellung im Experiment dreimal zur Gewährleistung einer Statistik durchgeführt und der Mittelwert für den Vergleich mit den Simulationen verwendet. Die Simulationsergebnisse müssen dadurch innerhalb der geforderten Toleranzgrenzen um den experimentellen Mittelwert liegen. Im Folgenden werden die beiden Prozesse nacheinander diskutiert.

Vergleich Biegen

Die Allgmeintoleranz ISO 2768 -m [32] definiert für die Zielgrößen folgende Toleranzbereiche:

- Biegewinkel: $\pm 0,3^\circ$
- Rückfederung: $\pm 0,1^\circ$
- Rohrhöhe / Rohrbreite: $\pm 0,3$ mm
- Rohrtiefe / Wandstärkenextrema: $\pm 0,1$ mm.

Die Auswertung der Ergebnisse in Tabelle 4.5 erfolgt nach drei Aspekten:

- Biegecharakteristiken und Unterschied zum Biegen ohne Dorn
- Unterschied zwischen den Materialien (1.4301 / 1.4509)
- Vergleich zwischen Experiment und Simulation.

Anhand der Experimente werden die **Biegecharakteristiken** für das Biegen mit Dorn diskutiert. Damit die Biegewinkel von 15° bzw. 30° erreicht werden, mussten die Rohre um den Rückfederungsanteil überbogen werden. Die Rückfederung ist um bis zu 37% geringer geworden als noch beim Biegen ohne Dorn. Die Ovalisierung des Rohrquerschnitts im Biegebereich ist durch den geringen Abfall der Rohrhöhe gesunken. Während beim Biegen ohne Dorn die Rohrhöhe bei einem Biegewinkel von 30° bereits um 11,84 mm reduziert wurde, beträgt die Reduzierung mit Dorn nur noch ein Drittel dieses Wertes. Ein gewisser Grad an Ovalisierung lässt sich auch mit Dorn nicht verhindern, da ein kleines Maß an Freiraum zwischen Dorn und Rohrmaterial vorhanden

Tabelle 4.5: Simulationsergebnisse des Biegens mit Dorn in Relation zu den Experimenten (grau) für die Materialien 1.4301 und 1.4509 (WS: Wandstärke; grün/gelb: aufsteigender Einstellwinkel)

1.4301	Experiment	Einstellwinkel [°]	Biege- winkel [°]	Rück- federung [°]	Höhe [mm]	Breite [mm]	min. WS [mm]	max. WS [mm]
		15,82	15,05	0,77	58,10	60,06	1,02	1,22
		31,09	30,10	0,99	56,40	60,04	1,02	1,29
	Simulation	Δ Einstell- winkel [°]	Δ Biege- winkel [°]	Δ Rück- federung [°]	Δ Höhe [mm]	Δ Breite [mm]	Δ min. WS [mm]	Δ max. WS [mm]
		-0,11	-0,09	-0,02	-0,20	0,21	0,07	0,09
		-0,11	-0,11	-0,01	0,12	0,18	0,00	0,09
1.4509	Experiment	Einstellwinkel [°]	Biege- winkel [°]	Rück- federung [°]	Höhe [mm]	Breite [mm]	min. WS [mm]	max. WS [mm]
		15,52	14,93	0,59	57,98	60,18	1,07	1,27
		30,80	30,04	0,76	56,64	60,20	1,03	1,29
	Simulation	Δ Einstell- winkel [°]	Δ Biege- winkel [°]	Δ Rück- federung [°]	Δ Höhe [mm]	Δ Breite [mm]	Δ min. WS [mm]	Δ max. WS [mm]
		0,06	0,09	-0,03	-0,15	0,05	0,00	0,06
		-0,06	-0,04	-0,02	-0,19	-0,04	-0,04	0,10

sein muss, um Umformfehler und eine extreme Materialausdünnung zu verhindern. Zusätzlich wird durch die Verwendung des Dorns ein Einfall am Außenbogen komplett verhindert, sodass die Rohrtiefe zu Null wird (vgl. Abb. 4.31).

Die Wandstärkenextrema haben sich nur leicht durch den Biegedorn verändert. Die Materialausdünnung am Außenbogen hat minimal zugenommen, da nun der Dorn den Rohreinfall verhindert und somit das Material im Außenbogen mehr gestreckt wird.

Das **Material** 1.4301 besitzt bei Verwendung eines Dorns weiterhin eine größere Rückfederung als das Material 1.4509. Wie beim Biegen ohne Dorn sind leichte Unterschiede in der Ovalisierung vorhanden. Die Wandstärkenextrema zeigen keine wesentlichen Änderungen zum dornlosen Biegen.

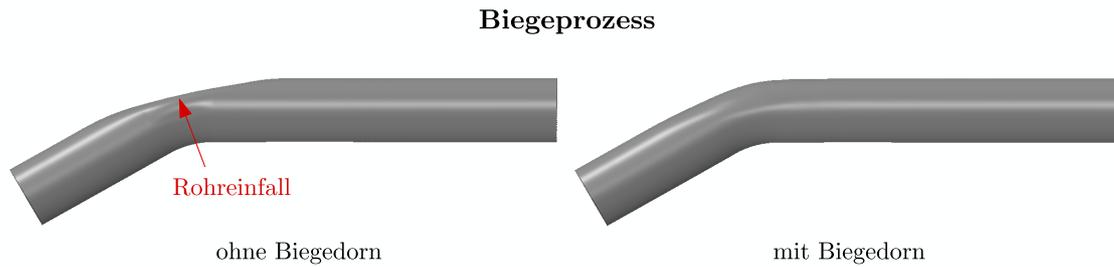


Abbildung 4.31: Biegeergebnis ohne Verwendung eines Biegedorns (links) und mit Verwendung eines Biegedorns (rechts)

Die **Simulationsergebnisse** können die experimentellen Ergebnisse sehr gut abbilden. Der Biegewinkel und die entsprechende Rohrgeometrie im Biegebereich können trotz des komplexen Dornverhaltens während des Biegevorgangs durch die Simulation im erlaubten Toleranzbereich dargestellt werden. Dadurch sind in der Simulation die Anfangsabweichungen im nachfolgenden Prägeprozess relativ gering.

Vergleich Prägen

Die Verhinderung des Rohreinfalls, die Reduzierung der Ovalisierung und das Einhalten des Toleranzbereiches des Biegewinkels stellen die Grundlage zum Prägen eines gebogenen Rohres. Beim Prägeprozess werden durch die Allgmeintoleranz ISO 2768-m [32] folgende Toleranzgrenzen an die Zielgrößen gestellt:

- Prägehöhe / Prägebreite: $\pm 0,3 \text{ mm}$
- Prägetiefe: $\pm 0,1 \text{ mm}$
- Biegewinkel: $\pm 0,3^\circ$.

Da das Rohr an drei unterschiedlichen Stellen geprägt wird, werden diese Vorgaben für jede der drei Prägepositionen separat überprüft. Die Auswertung der Prägeergebnisse erfolgt ebenfalls nach drei Aspekten:

- Prägecharakteristiken und Unterschied zwischen den einzelnen Positionen
- Unterschied zwischen den Materialien (1.4301 / 1.4509)
- Vergleich zwischen Experiment und Simulation.

Während die **Prägecharakteristik** im geraden Rohrbereich (Bereich 1) vergleichbar ist mit dem Prägen an einem ungebogenen Rohr, müssen für die Prägepositionen im Übergangsbereich (Bereich 2) und im Biegebereich (Bereich 3) Vordeformationen und Eigenspannungen aus dem Biegeprozess berücksichtigt werden.

Tabelle 4.6: Simulationsergebnisse des Prägens gebogener Rohre in Relation zu den Experimenten (grau) für die Materialien 1.4301 und 1.4509 (BW: Biege­winkel; H: Stempelhub; (1/2/3): Stempelposition im geraden Bereich/Übergangsbereich/Biegebereich; grün/gelb/orange/rot: verschiedene Kombinationen aus Biege­winkel und Stempelhub; rote Zahl: Wert außerhalb des Toleranzbereiches)

1.4301	Experiment	BW / H [° / mm]	Höhe (1 / 2 / 3) [mm]			Breite (1 / 2 / 3) [mm]			Tiefe (1 / 2 / 3) [mm]		
		15 / 5	55,52	55,58	55,69	60,00	59,58	58,67	0,22	0,08	0,13
		15 / 10	50,82	50,95	50,49	60,23	60,04	58,80	0,15	0,28	0,44
		30 / 5	55,63	55,50	55,73	60,04	59,61	57,34	0,16	0,08	0,21
		30 / 10	50,53	51,01	51,46	60,26	59,92	58,10	0,19	0,28	0,25
	Simulation	BW / H [° / mm]	Δ Höhe (1 / 2 / 3) [mm]			Δ Breite (1 / 2 / 3) [mm]			Δ Tiefe (1 / 2 / 3) [mm]		
		15 / 5	0,06	0,12	0,12	0,19	-0,18	-0,15	0,08	0,02	-0,05
		15 / 10	-0,19	-0,21	0,23	0,00	-0,04	0,31	0,08	0,39	0,30
		30 / 5	-0,07	0,29	0,22	0,18	-0,31	0,29	0,12	0,05	-0,03
30 / 10		0,07	-0,12	-0,28	0,00	0,16	-0,08	0,05	-0,10	0,01	
1.4509	Experiment	BW / H [° / mm]	Höhe (1 / 2 / 3) [mm]			Breite (1 / 2 / 3) [mm]			Tiefe (1 / 2 / 3) [mm]		
		15 / 5	55,40	55,30	55,40	60,40	59,63	58,86	0,18	0,10	0,07
		15 / 10	50,70	50,80	50,78	60,27	59,79	58,86	0,19	0,31	0,47
		30 / 5	55,40	55,38	55,48	60,16	59,48	57,42	0,22	0,08	0,11
		30 / 10	50,48	50,80	50,95	60,32	60,20	57,40	0,22	0,14	0,14
	Simulation	BW / H [° / mm]	Δ Höhe (1 / 2 / 3) [mm]			Δ Breite (1 / 2 / 3) [mm]			Δ Tiefe (1 / 2 / 3) [mm]		
		15 / 5	0,17	0,33	0,25	-0,24	-0,21	-0,37	0,09	0,06	0,03
		15 / 10	-0,11	-0,15	-0,33	-0,09	-0,14	0,15	0,04	0,25	0,11
		30 / 5	0,15	0,28	0,12	-0,01	-0,13	-0,20	0,08	0,06	-0,01
30 / 10		0,09	-0,02	-0,21	-0,16	-0,04	0,10	0,00	0,01	0,11	

Diese Vordeformation und Eigenspannungen sind winkelabhängig und beeinflussen das Ergebnis mit steigendem Stempelhub unterschiedlich stark (vgl. Tabelle 4.6). Die **Prä­gehöhen** weisen an den verschiedenen Positionen je nach Winkel und Hub deutliche Abweichungen voneinander auf. Während sich bei einem 15°-Winkel und einem Hub von 5 mm die Rohrhöhen um maximal 0,17 mm unterscheiden, beträgt der Unterschied

bei einem 30° -Winkel und einem 10 mm-Hub bereits 1 mm. Da die Prägehöhe die primäre Zielgröße darstellt, sind diese Unterschiede bereits sehr groß. Zudem ist im Fall des 30° -Winkels und eines Hubs von 10 mm im Biegebereich eine Abweichung von 1,46 mm vom Sollwert zu registrieren, was bei einem Toleranzbereich von $\pm 0,3$ mm deutlich zu hoch ist. Ursache dafür sind der bereits ovalisierte Querschnitt und die Eigenspannungen aus dem Biegeprozess. Die Ovalisierung des Anfangsquerschnitts hatte bereits beim einfachen Prägen eine Steigung der Prägehöhe zur Folge (vgl. Kap. 4.3.3). Die geringere Prägefläche führt außerdem zu einem starken Einfluss der Eigenspannung und der Querschnittsform. Ein eindeutiger Verlauf oder Trend lässt sich für die drei Prägepositionen durch die Veränderung der Winkel und der Hübe nicht erkennen. Die **Prägebreite** weist eine deutliche Reduzierung im Biegebereich auf. Während die Prägebreite im ungebogenen Bereich knapp über dem Nennmaß von 60 mm liegt, sinkt diese in Richtung Biegebereich um bis zu 2,7 mm ab. Der Übergangsbereich und der Biegebereich werden bereits durch den ovalisierten Querschnitt aus dem Biegeprozess beeinflusst, weshalb die Prägebreite deutlich geringer ist als im ungebogenen Bereich. Diese Differenzen wurden bereits aus dem Biegeprozess übernommen, was an den Rohrlängen nach dem Biegeprozess deutlich wird (vgl. Abb. 4.32). Dadurch sind auch die Unterschiede zwischen den verschiedenen Biegewinkeln besonders groß, da nach dem Biegen die Rohre unterschiedlich stark ovalisiert sind. Mit größer werdendem Hub steigt die Prägebreite durch die lokale Deformation wieder an. Die **Prägetiefe** ist unabhängig von der Position geringer als beim einfachen Prägeprozess, was an der geringeren Prägefläche liegt. Eine detaillierte Untersuchung der Werkzeuggeometrie erfolgt in Kapitel 5.

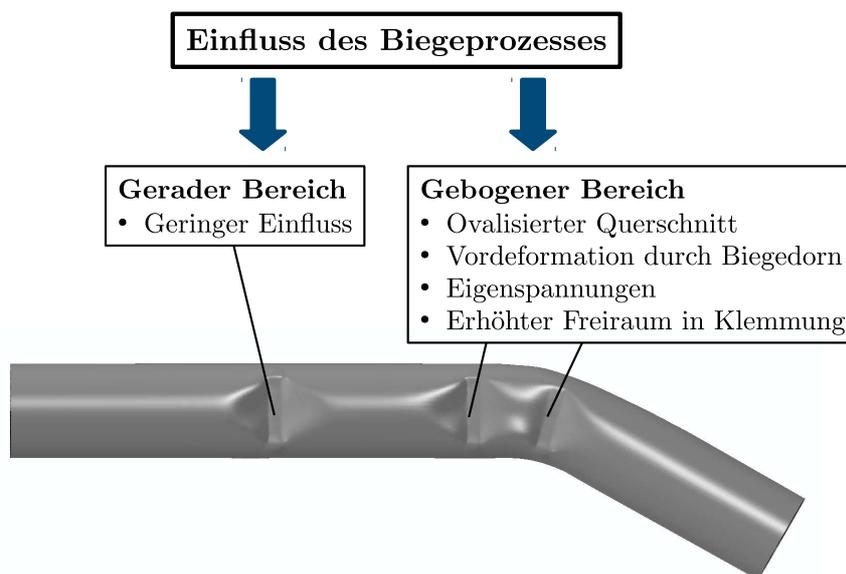


Abbildung 4.32: Einfluss des Biegeprozesses auf die einzelnen Positionen im Prägeprozess

Die Prägertiefe weist entlang der verschiedenen Positionen keinen eindeutigen Verlauf oder Trend auf und ist stark abhängig von den positionsabhängigen Eigenspannungen und der entsprechenden Vordeformation. Lediglich bei einem 15° -Winkel erhöht sich die Prägertiefe der beiden Prägepositionen im gebogenen Bereich. Der Grund für diese Erhöhung liegt im geringen Abstand zwischen den beiden Positionen, wodurch eine gegenseitige Beeinflussung stattfindet (vgl. Abb. 4.32). Durch das Prägen des bereits gebogenen Rohres werden die Eigenspannungen im Rohr umverteilt, wodurch das Rohr eine erneute Rückfederung und somit eine weitere **Winkeländerung** erfährt (vgl. Abb. 4.33).

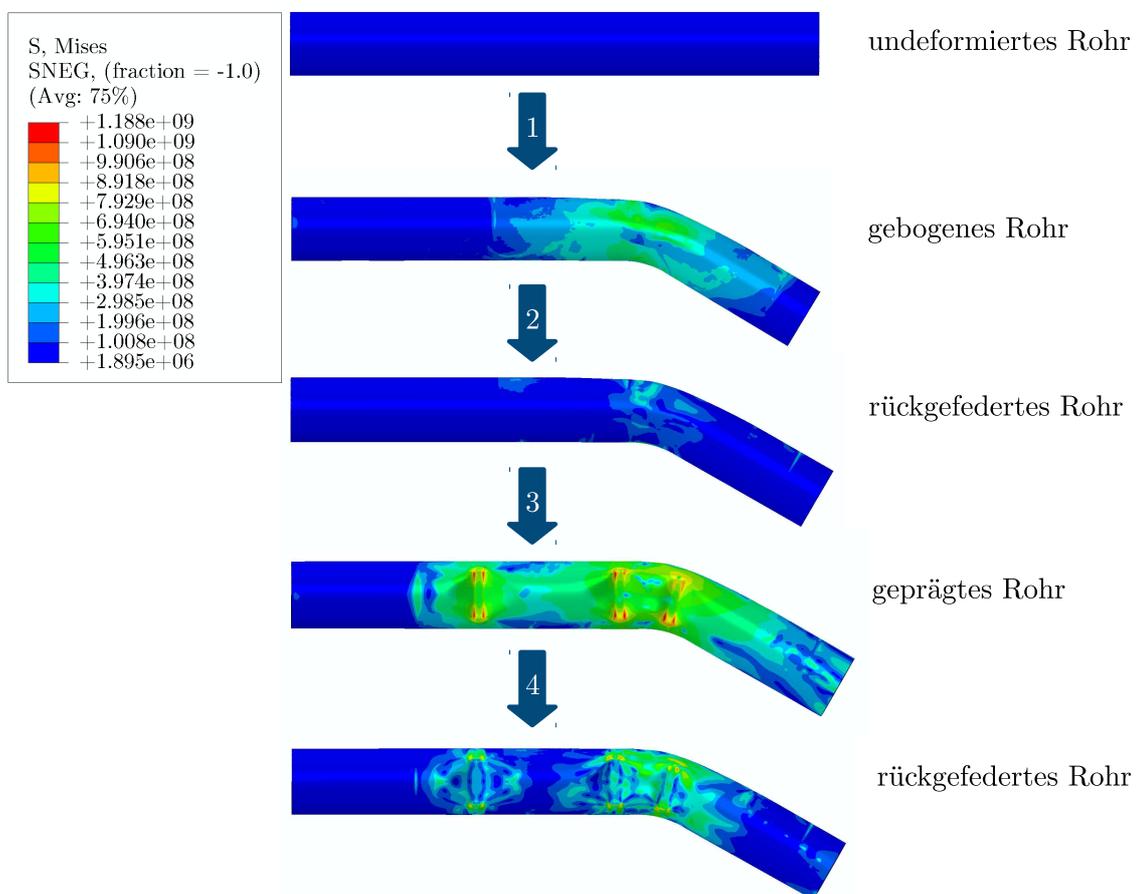


Abbildung 4.33: Spannungsverteilung im Rohr nach jedem Umformschritt

Bei einem Winkel von 15° beträgt die erneute Rückfederung unabhängig vom Hub ca. $0,1^\circ$ und liegt somit im Toleranzbereich. Deutlich größer werden die Abweichungen bei einem Biegewinkel von 30° . Die Rückfederung hat mit ca. $0,3^\circ$ die Grenze des Toleranzbereiches beim Biegen erreicht. Somit kann durch den Prägeprozess der Biegewinkel so verändert werden, dass die Anforderungen nicht mehr erfüllt sind.

Die Ergebnisunterschiede zwischen den beiden **Materialien** waren nach dem Biegeprozess noch relativ gering. Die Unterschiede nehmen durch den Prägeprozess mit

steigendem Stempelhub und mit steigendem Biegewinkel deutlich zu. So entstehen beispielsweise in der Prägehöhe Differenzen von bis zu 0,5 mm, wodurch das Material 1.4509 in der Prägehöhe geringere Abweichungen zum Sollwert aufweist. Die Prägebreite und die Prägertiefe lassen keinen eindeutigen Trend zu, was an der hohen Anzahl an Einflussfaktoren liegt.

Das Simulationsmodell kann trotz **Simulation mit Nenngrößen** und komplexem mehrstufigen Umformverhalten das experimentelle Ergebnis hervorragend abbilden (vgl. Abb. 4.34) und dadurch für eine Vorhersage den Ergebnisbereich sehr gut einschränken.

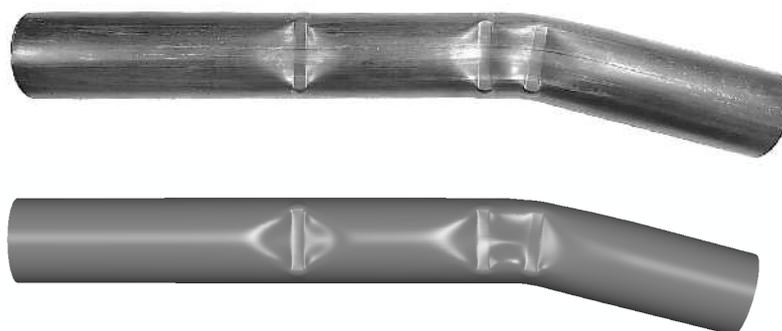


Abbildung 4.34: Reales (oben) und simuliertes Ergebnis (unten) eines um 15° gebogenen und mit 10 mm geprägten Rohres

Obwohl eine Vielzahl an Faktoren das Ergebnis beeinflusst, liegen nur wenige Zielgrößen der Simulation außerhalb des geforderten Toleranzbereiches. Bisher wurden nur Toleranzen im Werkstück untersucht, dennoch hat der Innendurchmesser der Rohrklammer aufgrund der Biegetoleranzen eine besondere Rolle und wird daher im Folgenden näher betrachtet.

Variation Klemminnendurchmesser

Die numerische Modellierung der Rohrklammer mit einem Nenninnendurchmesser und einem Nennwinkel kann bei einer Geometrieabweichung oder einer Winkelabweichung des gebogenen Rohres zu einer fehlerhaften Umformung führen. Die Allgometoleranz nach ISO 2768 -m [32] erlaubt eine Toleranz von $\pm 0,3^\circ$ für den Biegewinkel des Rohres, wodurch das Rohr im schlechtesten Fall eine Differenz von $0,3^\circ$ zum fest definierten Winkel der Klemmung aufweist. Dadurch wäre eine geeignete Positionierung des Rohres in der Klemmung nicht mehr möglich. Um solche Abweichungen zu kompensieren, ist ein größerer Innendurchmesser der Klemmung von $60\text{ mm} + 0,3\text{ mm}$ sinnvoll. Zu diesem Zweck werden die Prägesimulationen erneut mit einem Klemminnendurchmesser von $60,3\text{ mm}$ durchgeführt. Neben den Rohren mit einem Sollwinkel

Tabelle 4.7: Simulationsergebnisse des Prägens gebogener Rohre mit größerem Innendurchmesser (ID) der Rohrklemmung in Relation zur Referenzsimulation mit Nenngrößen (grau) (Material: 1.4301; BW: Biegewinkel; H: Stempelhub; (1/2/3): Stempelposition im geraden Bereich/Übergangsbereich/Biegebereich; grün/gelb/orange/rot: verschiedene Kombinationen aus Biegewinkel und Stempelhub; rote Zahl: Wert außerhalb des Toleranzbereiches)

	ID	BW / H	Höhe (1 / 2 / 3)			Breite (1 / 2 / 3)			Tiefe (1 / 2 / 3)		
	[mm]	[° / mm]	[mm]			[mm]			[mm]		
Referenz	60,0	15 / 5	55,58	55,70	55,81	60,19	59,40	58,52	0,30	0,10	0,08
		15 / 10	50,63	50,74	50,72	60,23	60,00	59,11	0,23	0,67	0,74
		30 / 5	55,56	55,79	55,95	60,22	59,30	57,63	0,28	0,13	0,18
		30 / 10	50,60	50,89	51,18	60,26	60,08	58,02	0,24	0,18	0,26
Variation Klemminnendurchmesser	Δ ID	BW / H	Δ Höhe (1 / 2 / 3)			Δ Breite (1 / 2 / 3)			Δ Tiefe (1 / 2 / 3)		
	[mm]	[° / mm]	[mm]			[mm]			[mm]		
	+0,3	15 / 5	-0,17	-0,06	-0,05	0,28	0,10	0,09	-0,11	-0,02	0,02
		15 / 10	-0,30	-0,16	-0,15	0,43	0,15	0,12	0,01	-0,18	-0,25
		30 / 5	-0,13	-0,04	-0,07	0,23	0,08	0,04	-0,10	0,04	0,03
		30 / 10	-0,28	-0,04	-0,05	0,39	0,00	0,07	0,01	0,06	-0,04
	+0,3	14,7 / 5	-0,18	-0,04	-0,06	0,28	0,12	0,06	-0,13	0,00	0,02
		14,7 / 10	-0,30	-0,14	-0,09	0,43	0,19	0,16	0,02	-0,12	-0,14
		29,7 / 5	-0,15	-0,06	-0,05	0,24	0,07	0,03	-0,10	0,03	0,05
		29,7 / 10	-0,28	-0,04	-0,06	0,39	0,00	0,14	-0,01	0,06	-0,06
	+0,3	15,3 / 5	-0,19	-0,05	-0,03	0,28	0,13	0,13	-0,16	0,00	0,05
		15,3 / 10	-0,30	-0,15	-0,13	0,41	0,16	0,21	0,00	-0,15	-0,22
		30,3 / 5	-0,15	-0,04	-0,03	0,23	0,09	0,01	-0,13	0,03	-0,01
		30,3 / 10	-0,28	-0,04	-0,05	0,38	-0,03	0,07	-0,02	0,05	-0,04

von 15° bzw. 30° werden zusätzlich Rohre mit einer Winkelabweichung von $\pm 0,3^\circ$ untersucht. Der Innendurchmesser der Werkzeuge im Biegeprozess wird nicht geändert, wodurch sich die Biegeergebnisse nur im resultierenden Winkel unterscheiden.

Der größere Innendurchmesser der Klemmung (**Prägen: Klemminnendurchmesser** \uparrow) hat einen zusätzlichen Freiraum um das Rohr zur Folge. Dadurch verringert sich in Abhängigkeit des Hubs in allen drei Positionen die Prägehöhe (vgl. Tab. 4.7). Durch den Spalt zwischen Rohr und Klemmung wird das Rohr erst im Gesamten eingedrückt, bevor die lokale Deformation dominiert. Im ungebogenen Bereich ist die Wirkung mit bis zu 0,3 mm am größten und erreicht dadurch die Toleranzgrenze. Der Einfluss des

Biegewinkels ist nahezu vernachlässigbar. Gleichzeitig führt der zusätzliche Freiraum zu einem hubabhängigen Anstieg der Prägebreite. Im ungebogenen Bereich ist der Einfluss mit mehr als 0,4 mm am stärksten. Der Einfluss des Biegewinkels ist erneut sehr gering. Die Prägertiefe wird stellenweise leicht beeinflusst, zeigt aber keine eindeutigen Tendenzen. Lediglich die Beeinflussung der beiden Prägepositionen im gebogenen Bereich bei einem Winkel von 15° wird durch den zusätzlichen Spalt reduziert, wodurch auch die Prägertiefe sinkt. Die Winkelabweichungen von $\pm 0,3^\circ$ (**Prägen: Biegewinkel** \downarrow / \uparrow) haben bei größerem Klemminnendurchmesser keinen zusätzlichen Einfluss auf das Prägeergebnis. Lediglich der finale Biegewinkel wird durch die Winkelabweichung beeinflusst.

4.5.3 Einfluss des Werkstücks auf den Prägeprozess gebogener Rohre

Der Werkstückeinfluss erwies sich bisher als eine Quelle für Abweichungen zwischen Experiment und Simulation aber auch als Ursache für Umformfehler. Im Folgenden werden chargenbedingte Werkstücktoleranzen sowohl im Biegeprozess mit Dorn als auch im Prägeprozess untersucht. Um den Einfluss der Toleranzen zu beurteilen, wird folgende Einteilung verwendet:

- $0,0 \text{ mm}/^\circ - 0,1 \text{ mm}/^\circ$: kein Einfluss (\rightarrow)
- $0,1 \text{ mm}/^\circ - 0,3 \text{ mm}/^\circ$: leichter Einfluss (\uparrow / \downarrow)
- $> 0,3 \text{ mm}/^\circ$: starker Einfluss ($\uparrow\uparrow / \downarrow\downarrow$).

Der Einfluss wird nach beiden Umformprozessen untersucht. Für jede Werkstücktoleranz werden zwei Einstellwinkel und zwei Stempelhübe betrachtet. Eine allgemeine Tendenz liegt somit vor, wenn im Biegeprozess beide Ergebnisse eine Tendenz aufweisen, und im Prägeprozess, wenn mindestens zwei von vier Ergebnissen eine Tendenz aufweisen. Weiterhin ist eine allgemeine Tendenz *nicht eindeutig (n.e.)*, wenn zwei gegenläufige Tendenzen mit steigendem Winkel bzw. Stempelhub festgestellt werden. Folgende Einflüsse werden untersucht:

- Biegen und Prägen:
 - Außendurchmesser / Wandstärke / Ovalität / Materialparameter / Anfangseigenstress / Reibung
- Prägen (zusätzlich):
 - Verfestigung / Spannungsarmglühen

Außendurchmesser

- Nenngröße: 60,0 mm
- Toleranzgrößen: 59,7 mm / 60,3 mm (Außendurchmesser ↓ / ↑)

Eine Reduzierung des Rohraußendurchmessers (**Biegen: Außendurchmesser ↓**) hatte im einfachen Biegeprozess bereits ab einem Biegewinkel von 30° einen Faltenwurf zur Folge (vgl. Kap. 4.4.3). Durch die Verwendung eines Biegedorns kann der Faltenwurf bei einem reduzierten Außendurchmesser verhindert werden. Es erfolgt eine Reduzierung des Biegewinkels um bis zu 0,32° bzw. 4,3%, was bereits beim Biegen ohne Dorn beobachtet werden konnte. Der Einfluss des reduzierten Außendurchmessers auf den Rohrquerschnitt im Biegebereich und auf die Wandstärkenextrema wird durch den Biegedorn deutlich verringert. Trotzdem lässt sich beim 30°-Winkel eine leichte Materialanhäufung im Innenbogen von 0,1 mm registrieren. Die Reduzierung des Außendurchmessers (**Prägen: Außendurchmesser ↓**) beeinflusst vor allem die Positionierung des Rohres in der Klemmung, da der Spalt zwischen Rohr und Werkzeug bereits während des Biegeprozesses zu Konturabweichungen führte. Die Prägehöhe steigt im Wesentlichen in allen drei Positionen an, wobei der Einfluss im ungebogenen Bereich mit bis zu 0,49 mm am größten ist. Lediglich mit steigendem Biegewinkel und steigendem Stempelhub lässt sich teilweise eine Reduzierung der Prägehöhe feststellen. Die Reduzierung des Außendurchmessers ist im Biegeprozess vor allem im Bereich der Tangentiallinie bemerkbar und reduziert dadurch die Prägebreite im Übergangsbereich stark. Während die Prägebreite im Biegebereich leicht ansteigt, ist die Tendenz im ungebogenen Bereich nicht eindeutig. Die Prägtiefe weist ebenfalls keine eindeutige Tendenz auf. Die Werte werden leicht beeinflusst und sind abhängig von der vorherigen Biegeumformung und dem entsprechenden Stempelhub. Eine zusätzliche Abweichung des Biegewinkels findet nicht statt. Die Erhöhung des Außendurchmessers (**Biegen: Außendurchmesser ↑**) auf 60,3 mm wird mit einer entsprechenden Anpassung der Biegewerkzeuge und der anschließenden Prägwerkzeuge berücksichtigt. Der größere Außendurchmesser hat eine ähnliche Wirkung wie beim dornlosen Biegen. Während der Biegewinkel nahezu unverändert bleibt, steigen die Rohrhöhe leicht und die Rohrbreite stark an, wodurch die Ovalität im Biegebereich zunimmt. Die Wandstärkenextrema ändern sich im Vergleich zu den Referenzergebnissen nicht. Die Vergrößerung des Rohrquerschnitts (**Prägen: Außendurchmesser ↑**) zeigt im Gegensatz zur Querschnittsreduzierung eine eindeutige Tendenz. In allen drei Positionen wird die Prägehöhe reduziert und die Prägebreite erhöht. Die Prägtiefe wiederum bleibt von der Querschnittsvergrößerung unbeeinflusst.

Zusammenfassung:

Eine Reduzierung des **Außendurchmessers** hat eine deutliche Biegewinkelabweichung zur Folge. Im nachfolgenden Prägeprozess sind größere Ergebnisabweichungen zu erkennen, die jedoch keine eindeutige Tendenz aufweisen und somit schwer vorhersagbar sind. Eine Außendurchmessererhöhung hingegen lässt tendenziell die Rohrhöhe und Rohrbreite im Biegeprozess ansteigen. Im nachfolgenden Prägeprozess werden die Prägehöhe erhöht, die Prägebreite verringert, und die Prägetiefe bleibt unbeeinflusst.

Wandstärke

- Nenngröße: 1, 2 mm
- Toleranzgrößen: 1, 1 mm / 1, 3 mm (Wandstärke ↓ / ↑)

Die Wandstärkenänderung des Rohres (**Biegen: Wandstärke** ↓/↑) beeinflusst im gleichen Maße die Wandstärkenextrema. Der Biegewinkel und der Rohrquerschnitt im Biegebereich werden hingegen nicht beeinflusst. Analog zum einfachen Prägeprozess hat die Wandstärkenvariation (**Prägen: Wandstärke** ↓/↑) bis auf einzelne Werte keine Auswirkung auf das nachfolgende Prägergebnis.

Zusammenfassung:

Die **Wandstärkenvariation** beeinflusst im Biegeprozess nur die Wandstärkenextrema und hat auf den Prägeprozess keine Auswirkungen.

Ovalität

- Nenngröße: 60, 0 mm - 60, 0 mm (Rohrhöhe - Rohrbreite)
- Toleranzgrößen: 60, 0 mm - 59, 7 mm / 59, 7 mm - 60, 0 mm (Ovalität hoch / breit)

Die Ausrichtung des ovalisierten Anfangsquerschnitts (**Biegen: Ovalität hoch / breit**) hat einen Einfluss auf das Biegeergebnis mit Dorn. Während der höhere Rohrquerschnitt keine eindeutige Auswirkung auf den Biegewinkel hat, steigt dieser beim breiteren Querschnitt tendenziell an. Mit steigendem Biegewinkel zeigen beiden Ausrichtungen einen starken Anstieg der Rohrhöhe. Die restlichen Zielgrößen bleiben nahezu unverändert. Der ovalisierte Anfangsquerschnitt des Rohres führte beim Biegeprozess ohne Dorn zur Ausbildung von Umformfehlern (vgl. Kap. 4.4.3). Obwohl die

Ergebniswerte beim Biegen mit Dorn keine Entwicklung von Umformfehlern vermuten lassen, wird durch den abfallenden Verlauf der Gesamtenergie ein Umformfehler im System festgestellt. Die Visualisierung des Rohres zeigt die Ausbildung zweier Beulen vor der Tangentiallinie (vgl. Abb. 4.35).

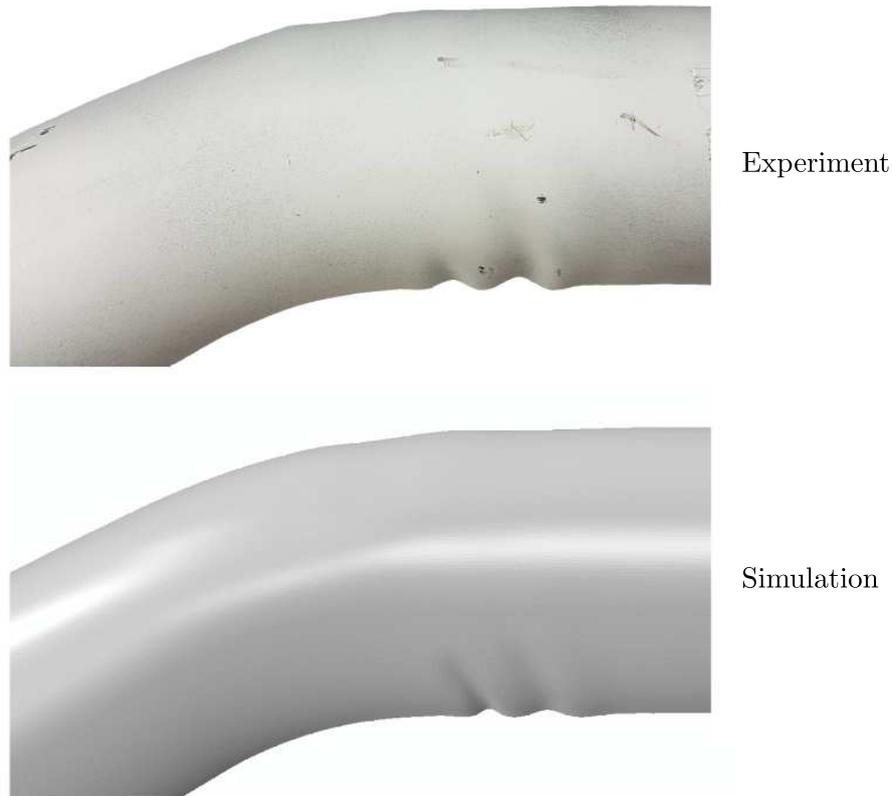


Abbildung 4.35: Faltenwurf im Experiment und in der Simulation durch eine Anfangsovalität des Rohres beim Biegen mit Dorn

Bei den um 15° gebogenen Rohre ist bereits ein leichter Versatz am Innenradius vor der Tangentiallinie zu beobachten, der sich mit steigendem Biege Winkel zu einem Umformfehler entwickelt. Trotz komplexen Dornverhaltens kann durch die Simulation der Faltenwurf im Experiment realitätsnah abgebildet werden. Der ovalisierte Anfangsquerschnitt des Rohres führt somit trotz der Verwendung eines Biegedorns zu Umformfehler. Trotzdem wird der Einfluss auf den nachfolgenden Prägeprozess untersucht. Der ovalisierte Querschnitt (**Prägen: Ovalität hoch / breit**) beeinflusst den Prägeprozess stark und lässt für keine der drei Zielgrößen eine eindeutige Tendenz zu, wodurch eine Vorhersage für ovale Anfangsquerschnitte extrem schwierig ist. Der Faltenwurf im Biegeprozess würde in der Realität aber eine nachfolgende Prägeumformung ausschließen.

Zusammenfassung:

Eine **Anfangsovalität** des Rohrquerschnitts führt trotz der Verwendung eines Biegedorns zu einem Faltenwurf im Biegeprozess. Die Ergebnisse des nachfolgenden Prägeprozesses lassen dadurch keine eindeutigen Tendenzen mehr zu.

Materialparameter

- Nenngröße: 1.4301; 1.4509 (experimentell ermittelt)
- Toleranzgrößen: 1.4301 / 1.4509 (Literatur)

Der Wechsel der Materialparameter (**Biegen: 1.4301 / 1.4509 Literatur**) hat für beide Materialien nahezu keinen Einfluss auf den Biegeprozess mit Dorn. Beim dornlosen Biegen wurde im Wesentlichen die Rohrtiefe beeinflusst (vgl. Kap. 4.4.3), die durch den Biegedorn verhindert wird. Der Einfluss des Materialparameterwechsels (**Prägen: 1.4301 / 1.4509 Literatur**) auf den Prägeprozess ist bis auf vereinzelte Ergebniswerte nicht vorhanden. Die vereinzelten Werte treten alle im gebogenen Bereich des Rohres auf.

Zusammenfassung:

Der Wechsel der **Materialparameter** hat weder einen Einfluss auf den Biegeprozess mit Dorn noch auf den nachfolgenden Prägeprozess.

Werkstoffverfestigung

- Nenngröße: isotrope Verfestigung
- Toleranzgrößen: kinematische Verfestigung

Bisher wurden alle Simulationen mit einer **isotropen Verfestigung** berechnet, so dass beim Erreichen der Fließspannung σ_F die Verfestigung durch das Anwachsen der Fließfläche beschrieben wird. Bei einer mechanischen Wechselbeanspruchung ist die weitere Plastifizierung somit unabhängig von der Belastungsrichtung. Viele Metalle weisen jedoch bei einer Lastumkehr einen Bauschingereffekt auf. Dadurch erfolgt bei einer Lastumkehr der Wiedereintritt der Plastifizierung bei einer niedrigeren Fließspannung, was durch die bereits aufgestauten Versetzungen zu begründen ist. Der Bauschingereffekt lässt sich über eine **kinematische Verfestigung** beschreiben. Da für

die vorliegende Arbeit keine experimentell ermittelten Verfestigungsparameter bei einer Lastumkehr vorhanden waren, wurde der Fließkurvenverlauf über eine Funktion in Abaqus[®] approximiert. Durch die Parameterapproximation ist eine erste Beurteilung des Effektes möglich. Der ungebogene Rohrbereich bleibt durch die Änderung der Verfestigung (**Prägen: kinematische Verfestigung**) unbeeinflusst. Ein Wechsel der Verfestigung wirkt sich hauptsächlich im Biegebereich aus, da dort die Folgen beider Umformungen am größten sind. Der Übergangsbereich und vor allem der Biegebereich weisen eine Reduzierung der Prägehöhe auf. Der Effekt verstärkt sich mit steigendem Biegewinkel und steigendem Stempelhub. Die Prägebreite und die Prägetiefe werden hingegen nicht beeinflusst.

Zusammenfassung:

Die Verwendung einer **kinematischen Verfestigung** reduziert die Prägehöhen im gebogen Teil des Rohres. Die Prägebreite und die Prägetiefe bleiben unbeeinflusst.

Anfangseigenstressungen

- Nenngröße: Keine Eigenstressungen
- Toleranzgrößen: Eigenstressungen unter / über Fließgrenze (Eigenstressungen ↓ / ↑)

Ein Einfluss der unterschiedlichen Anfangseigenstressungsverteilungen (**Biegen: Eigenstressungen** ↓ / ↑) auf das gebogene Rohr sind nicht vorhanden. Analog zum Biegeprozess ohne Dorn beeinflussen Anfangseigenstressungen die globale Umformung nicht. Die Anfangseigenstressungen aus dem Biegeprozess (**Prägen: Eigenstressungen** ↓ / ↑) können auch den nachfolgenden Prägeprozess nicht beeinflussen. Der Einfluss der Anfangseigenstressungen war bereits im Biegeprozess nicht vorhanden und wurde zusätzlich durch neue Eigenstressungen mit größerem Einfluss ergänzt.

Zusammenfassung:

Anfangseigenstressungen haben keinen Einfluss auf den Biegeprozess mit Dorn und auf den nachfolgenden Prägeprozess.

Spannungsarmglühen

- Nenngröße: Eigenspannungen nach Biegeprozess
- Toleranzgrößen: Keine Eigenspannungen nach Biegeprozess (Spannungsarm)

Beim Prägen von gebogenen Rohren haben Vordeformationen und Eigenspannungen einen Einfluss auf das Umformergebnis. Nach dem Biegeprozess liegen die maximale von-Mises Spannungen im Biegebereich bei 619 MPa für ein um 15° gebogenes Rohr und bei 733 MPa für ein um 30° gebogenes Rohr. Um die Wirkung der Eigenspannungen aus dem Biegeprozess zu untersuchen, werden die gebogenen Rohre spannungsarmgeglüht und anschließend geprägt. In der numerischen Umsetzung kann dieser Vorgang vereinfacht durch das Importieren des deformierten Rohres ohne Berücksichtigung der vorhandenen Eigenspannungen realisiert werden. Dadurch bleiben die Vordeformationen aus dem Biegeprozess unverändert und es wird lediglich der Einfluss der Eigenspannungen untersucht.

Die fehlenden Eigenspannungen aus dem Biegeprozess (**Prägen: Spannungsarm**) bewirken eine Reduzierung der Prägehöhe im gebogenen Bereich, da die Rückfederung reduziert und der Materialfluss verändert wird. Der ungebogene Bereich bleibt vom Spannungsarmglühen unbeeinflusst. Die Wirkung auf die Prägebreite und Prägetiefe ist nicht vorhanden.

Zusammenfassung:

Spannungsarmgeglühte Rohre weisen eine reduzierte Prägehöhe im gebogenen Bereich des Rohres auf. Die Prägebreite und die Prägetiefe bleiben unverändert.

Reibung

- Nenngröße: 0,1 (Biegedorn) / 0,1 (Prägeklemmung) / 0,1 (Prägestempel)
- Toleranzgrößen: 0,3 (Reibung Biegedorn ↑) / 0,3 (Reibung Klemmung ↑) / 0,3 (Reibung Stempel ↑)

Damit der Biegedorn einen Rohreinfall verhindert und eine Ovalisierung des Rohrquerschnitts reduziert, muss neben einer geeigneten Dornform auch ein ausreichender Materialfluss entlang des Dorns existieren (vgl. Kap. 2.2.1). Der Widerstand am Biegedorn wird durch die Erhöhung des Reibwertes (**Biegen: Reibung Biegedorn** ↑) größer und verhindert somit einen fehlerfreien Biegeablauf. Im Innenbogen des Rohres bildet sich bei einem Winkel von 30° aufgrund des gestörten Materialflusses ein Faltenwurf hinter der Dornkugel, wodurch auch der Dornrückzug keine Verbesserung mehr

bringt. Die abfallende Rohrhöhe und die abfallende Gesamtenergie in der Simulation bestätigen die Entstehung eines Faltenwurfs. Da die Erhöhung der Reibung zwischen Rohr und Biegedorn die besondere Rolle eines ausreichenden Materialflusses aufzeigen soll, wird aufgrund des Faltenwurfes auf eine nachfolgende Prägeumformung verzichtet. Beide Reibungsvariationen (**Prägen: Reibung Klemmung / Stempel** ↑) haben keinen Einfluss auf das Prägeergebnis. Die geringe Relativbewegung zwischen Rohr und Klemmung und die geringe Stempelfläche sind die Gründe für den fehlenden Einfluss.

Zusammenfassung:

Die Variation der **Reibungskoeffizienten** führt beim Biegedorn durch den gestörten Materialfluss zu einem Faltenwurf im Innenbogen. Die Änderung des Reibungskoeffizienten hat aufgrund der geringen Stempellänge und der geringen Relativbewegung zwischen Rohr und Klemmung keinen Einfluss auf das Prägeergebnis.

Übersicht Biegen

Tabelle 4.8: Auflistung aller Werkstückeinflüsse auf den Biegeprozess mit Biegedorn (↑ / ↓: Variation größer / kleiner als Nenngröße; grün/rot: positiver/negativer Einfluss; →: kein Einfluss; ↑ / ↓: maximal mögliche Änderung im Bereich von $\pm 0,3$ mm; ↑ / ↓: maximal mögliche Änderung $> 0,3$ mm; n.e.: nicht eindeutig)

Variationsparameter	Biege- winkel	Höhe	Breite	min. WS	max. WS	Falten- wurf
Außendurchmesser ↓	↓	→	→	→	→	Nein
Außendurchmesser ↑	→	↑	↑	→	→	Nein
Wandstärke ↓	→	↑	→	→	↓	Nein
Wandstärke ↑	→	→	→	→	↑	Nein
Ovalität hoch	n.e.	↑	→	→	→	Ja
Ovalität breit	↑	↑	↑	→	→	Ja
1.4301 Literatur	→	→	↑	→	→	Nein
1.4509 Literatur	→	→	→	→	→	Nein
Eigenspannungen ↓	→	→	→	→	→	Nein
Eigenspannungen ↑	→	→	→	→	→	Nein
Reibung Biegedorn ↑	↓	↓	→	→	→	Ja

Viele Einflussfaktoren müssen bei einer Kombination aus Biegen und Prägen zur Rea-

Jeder Einfluss auf das Biegeergebnis bewirkt eine Änderung der Prägebedingungen. Während Umformfehler im Biegeprozess ein fehlerfreies Prägeergebnis unmöglich machen, sind die Auswirkungen von Ergebnisabweichungen auf das Prägeergebnis deutlich komplexer. Tabelle 4.9 listet die Einflüsse der untersuchten Werkstückvariationen auf. Obwohl das Biegeergebnis durch die Verringerung des Außendurchmessers nur leicht im Biegewinkel beeinflusst wurde, sind die Auswirkungen auf das Prägeergebnis deutlich stärker und schwer vorhersagbar. Der vergrößerte Anfangsquerschnitt führt demgegenüber zu einer tendenziellen Reduzierung der Prägehöhe und einer Erhöhung der Prägebreite. Der ovalisierte Anfangsquerschnitt führt zu nicht eindeutigen Ergebnisverläufen, was auf den Faltenwurf aus dem Biegeprozess zurückzuführen ist und somit eine nachfolgende Prägeumformung überflüssig macht. Variationen im Anfangsquerschnitt bewirken somit eine starke Änderung der Prägeergebnisse und müssen daher sorgfältig im Experiment berücksichtigt werden. Die Verwendung einer kinematischen Verfestigung im Materialmodell und spannungsarmgeglühte Rohre haben eine leichte Reduzierung der Prägehöhe im gebogenen Bereich zur Folge. Die restlichen Zielgrößen bleiben unverändert. Die Variation der Materialparameter, die Anfangseigenspannungen aus dem Biegeprozess und die Variation der Reibungskoeffizienten beeinflussen den Prägeprozess nicht.

4.6 Diskussion der numerischen Umsetzung

Dieses Kapitel thematisierte die numerische Umsetzung der in Kapitel 2 vorgestellten Rohrumformprozesse und die Validierung der entsprechenden Simulationsergebnisse. Zusätzlich wurden verschiedene Werkstückeinflüsse charakterisiert und der Einfluss auf die Umformergebnisse untersucht. Die wesentlichen Punkte des Kapitels werden im Folgenden zusammengefasst:

- Eine **graphische Benutzeroberfläche** namens *Derr Tube Forming Simulator (DTFS)* wurde entwickelt, um die Umformprozesse des Prägens und des Biegens einzeln und in Kombination automatisiert nach Benutzervorgaben zu simulieren. Alle Umformprozesse sind so parametrisiert, dass die wichtigsten Umformwerkzeuge variiert werden können und an beliebige Rohrgeometrien automatisch angepasst werden. Die Kommunikationsstruktur der graphischen Benutzeroberfläche ermöglicht zudem die automatisierte Auswertung der Simulationen und die Optimierung der Umformwerkzeuge.
- Für den Biegeprozess und für den Prägeprozess wurde jeweils eine **Netzstudie** durchgeführt und eine einheitliche Elementanzahl von 156.250 für das Werkstück ermittelt, was einer Kantenlänge von 0,8 mm entspricht.

- Die **Simulationsmodelle der drei Umformprozesse** des Prägens, des Biegens und des Prägens gebogener Rohre wurden erfolgreich durch den Vergleich mit den Experimenten validiert. Dazu wurden verschiedene Rohrmaterialien und Werkzeugeinstellungen untersucht. Die Simulationen mit Nenngrößen des Werkstücks können somit im Wesentlichen die experimentellen Ergebnisse sehr gut abbilden.
- Der **Prägeprozess** wird nur geringfügig durch Werkstücktoleranzen beeinflusst. Lediglich ein erhöhter Außendurchmesser und ein ovalisierter Rohrquerschnitt konnten einzelne Zielgrößen negativ beeinflussen. Die Variation der Wandstärke, die Änderung der Materialparameter und die Reibungsvariation erwiesen sich beim Prägen als wirkungslose Einflussfaktoren. Die Nenngrößen beim Werkstück sind somit zur Abbildung des Prägeprozesses geeignet.
- Der **Biegeprozess ohne Biegedorn** war beim Auftreten von Werkstücktoleranzen sehr anfällig für Umformfehler. Ein reduzierter Anfangsquerschnitt und ein ovalisierter Rohrquerschnitt führten aufgrund eines fehlerhaften Prozessablaufs zu einem Faltenwurf im Innenbogen. Die unterschiedlichen Ausprägungen des Faltenwurfs konnten durch die Simulation realitätsnah abgebildet werden. Während eine reduzierte Wandstärke die Ovalisierung und den Einfall im Biegebereich erhöht, wird durch einen erhöhten Anfangsaußendurchmesser nur der Rohreinfall erhöht. Zudem führen ein zu großer Reibungswiderstand vor der Tangentiallinie und eine unzureichende Klemmung des Rohres ebenfalls zu einem Anstieg der Ovalisierung und dem Einfall im Biegebereich. Werkstücktoleranzen in der Simulation des Biegeprozesses ohne Biegedorn müssen aufgrund der Fehleranfälligkeit unbedingt berücksichtigt werden.
- Der **Biegeprozess mit Biegedorn** erwies sich als fehleranfällig bei einem ovalisierten Anfangsquerschnitt und einer erhöhten Reibung zwischen Rohr und Biegedorn. Der reduzierte Anfangsaußendurchmesser hat aufgrund des Dorns keinen Umformfehler mehr zur Folge und zeigt nur bei einem vergrößerten Anfangsaußendurchmesser eine Verbreiterung des Rohres im Biegebereich. Die Einflüsse der Wandstärkenvariation, der Materialparametervariation und der Anfangseigenspannungen sind sehr gering. Eine Anfangsovalität und ein erhöhter Reibwiderstand am Biegedorn führen beim Biegen mit Dorn zu einem Faltenwurf und müssen bei einer Simulation mit Nennmaßen im Experiment berücksichtigt werden.
- Der **Prägeprozess gebogener Rohre** ist im Gegensatz zum einfachen Prägeprozess anfälliger gegenüber Werkstücktoleranzen. Der reduzierte Anfangsaußendurchmesser führt zu schwer vorhersagbaren Ergebnisänderungen, da die Abwei-

chungen stark von der Zielgröße und der Position abhängen. Der erhöhte Außendurchmesser führt zu einer Erhöhung der Prägebreite. Ein ovalisierter Rohrquerschnitt zu Beginn der Umformung lässt, unabhängig von der Positionierung, aufgrund des Faltenwurfs beim Biegen keine eindeutigen Tendenzen zu. Die Wandstärkenänderung hat keine Auswirkungen auf den Prägeprozess. Die numerischen Aspekte der unterschiedlichen Materialparameter, der Verfestigungsauswahl, der Anfangseigenstressungen, des Spannungsarmglühens oder der Auswahl der Reibungskoeffizienten haben einen geringen Einfluss auf das Ergebnis. Somit liefern die Simulationen mit Nennmaßen sehr gute Vorhersagen, wobei Abweichungen im Anfangsrohrquerschnitt als Fehlerquelle berücksichtigt werden müssen.

- Die Simulationen können die Experimente realitätsnah abbilden, was durch die Validierung der Simulationsmodelle und der detailgetreuen Darstellung von Umformfehlern bestätigt wurde. Dadurch ist die Grundlage für die Optimierung im nachfolgenden Kapitel gelegt.

5

Optimierung der Umformprozesse

Die Optimierung der Umformwerkzeuge erfolgt auf Basis der validierten Simulationsmodelle aus Kapitel 4. Ziel des Kapitels ist die automatisierte Ermittlung geeigneter Einflussparameter bei gegebenen Anforderungen an die Zielgrößen des Umformprozesses. Dazu werden zu Beginn des Kapitels die Einflussgrößen für jeden Umformprozess festgelegt, die im späteren Verlauf optimiert werden sollen. Diese Einflussgrößen werden anschließend variiert und ihr Einfluss auf den jeweiligen Umformprozess untersucht. Die erstellte Datenbank mit den Simulationsergebnissen wird für die Optimierung benötigt. Zur Zusammenstellung einer Datenbank wird die statistische Versuchsplanung erläutert, um mit einer möglichst geringen Anzahl an Versuchen das Optimum an Informationen in einer Datenbank zu generieren. Die Auswertung der Informationen erfolgt durch eine Regressionsanalyse, die eine Beziehung zwischen Einflussgrößen und Zielgrößen ermittelt. Diese Beziehung ermöglicht die Definition einer Zielfunktion, mit deren Hilfe eine Optimierung durchgeführt werden kann. Für eine detaillierte Beschreibungen der Grundlagen wird auf die umfangreiche Literatur verwiesen [45, 70, 102, 113, 125]. Die Bestimmung des Werkzeugeinflusses wird im Folgenden für die beiden Umformprozesse des Prägens und des Biegens und für die Kombination der beiden Umformungen vorgenommen. Auf Basis der daraus entstandenen Ergebnisse werden anhand zweier Optimierungsbeispiele die grundsätzliche Vorgehensweise und die Funktionalität des Optimierungstools aufgezeigt.

5.1 Einstellparameter

Zur Bestimmung geeigneter Einstellparameter für die Optimierung wird die statistische Versuchsplanung verwendet. Unter der statistischen Versuchsplanung wird eine Methode des Qualitätsmanagements zur effizienten Planung und Auswertung von Versuchsreihen verstanden [45, 70, 113]. Ziel der statistischen Versuchsplanung ist eine standardisierte Vorgehensweise zur Beschaffung der notwendigen Informationen mit minimalem Aufwand. Dadurch werden die Genauigkeit und Zuverlässigkeit von Ergebnissen optimiert und somit die Kosten und der Aufwand minimiert. Eine sinnvolle Anzahl an Versuchsdurchläufen muss ermittelt werden, um den Einfluss der untersuchten Größen zu bestimmen. Hierzu müssen in der graphischen Benutzeroberfläche für die Optimierung

- die Einflussgrößen und
- die Zielgrößen

festgelegt werden. Die **Einflussgrößen** stellen die wichtigsten Prozessparameter dar und sind eine Teilmenge der Eingangsgrößen des jeweiligen Prozesses (vgl. Tab. 5.1).

Tabelle 5.1: Verfügbare Einflussgrößen zur Optimierung der verschiedenen Umformprozesse (1/2/3: Stempelposition im geraden Bereich/Übergangsbereich/Biegebereich)

Einflussgrößen	Prägen	Biegen	Prägen nach Biegen
x_1	Stempelhub	Einstellwinkel	Stempelhub 1
x_2	Stempelform	Biegeradius	Stempelhub 2
x_3	Stempellänge	Dorndurchmesser	Stempelhub 3
x_4	Kantenverrundung	Kugeldicke	Stempelform 1
x_5	Klemminnen- durchmesser	Kugelabstand	Stempelform 2
x_6	/	Schaftposition	Stempelform 3
x_7	/	/	Klemminnen- durchmesser

Die restlichen Eingangsgrößen werden beobachtet und während des Prozesses möglichst konstant gehalten. Die Einstellungen müssen reproduzierbar sein und dürfen sich nicht gegenseitig ausschließen. Die Einflussgrößen in Tabelle 5.1 sind stetige Größen und müssen daher für die Untersuchungen in einem festgelegten Intervall in sinnvolle Stufen unterteilt werden. So kann beispielsweise die Stempelposition der Prägeoptimierung im Bereich von -10 mm bis 10 mm stetig variiert werden. Um den Einfluss der

Stempelform erfassen zu können, erfolgt die Variation innerhalb des Intervalls in 5 mm-Schritten. Beim einfachen Prägeprozess werden insgesamt fünf Einflussgrößen $x_1 - x_5$ betrachtet. Alle Einflussgrößen müssen mindestens in drei Stufen variiert werden, damit eine nachfolgende Regressionsanalyse funktioniert. Eine Unterteilung der Intervalle aller fünf Einflussgrößen in mindestens drei Stufen führt zu einer Mindestanzahl an Versuchen von 243. Um ein besseres Ergebnis mit der Regressionsanalyse zu erzielen, sind fünf Stufen pro Einflussgröße im Rahmen der Optimierung vorgesehen. Da der Versuchsaufwand mit steigender Anzahl an Einflussgrößen und mit steigender Anzahl an Stufen deutlich zunimmt, muss auf einige Kombinationen verzichtet werden. Durch die statistische Versuchsplanung lässt sich dafür ein systematisches Vorgehen definieren. In der Literatur werden verschiedene Arten der Versuchsplanung diskutiert [113]. Mit dem Vollfaktormodell werden alle Kombinationen untersucht, wodurch alle Haupteffekte und alle Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Einflussgrößen erfasst werden. Der Versuchsaufwand n berechnet sich mit der Anzahl an Einflussgrößen n_E und der Anzahl an Stufen n_S aus der Formel

$$n = (n_S)^{n_E}. \quad (5.1)$$

Bei einem Teilfaktormodell werden nur noch die Haupteffekte jeder Einflussgröße und die einfache Wechselwirkung mit einer weiteren Einflussgröße untersucht. Dadurch werden maximal zwei Parameter gleichzeitig variiert und der Einfluss auf die Zielgrößen untersucht. Die Wechselwirkungen höherer Ordnung sind in den meisten Fällen vernachlässigbar [45, 113]. Durch die Verwendung eines teilfaktoriellen Versuchsplans kann die Mindestversuchsanzahl bei drei Stufen von 243 auf 81 reduziert werden. Die untersuchten Einflussgrößen mit entsprechender Stufenunterteilung werden bei der Untersuchung des jeweiligen Umformprozesses angegeben. Die **Zielgrößen** sind zur Beurteilung des umgeformten Rohres die wichtigsten Ergebniswerte im jeweiligen Umformprozess. Die Zielgrößen y_i sind in Tabelle 5.2 aufgelistet und wurden bereits für die Validierung der einzelnen Simulationsmodelle vorgestellt.

5.2 Werkzeugeinfluss in den Umformprozessen

Im Folgenden werden nacheinander die Einflussgrößen aus Tabelle 5.1

- des Prägeprozesses,
- des Biegeprozesses mit Dorn und
- des Prägeprozesses eines gebogenen Rohres

Tabelle 5.2: Verfügbare Zielgrößen zur Optimierung der verschiedenen Umformprozesse (1/2/3: Stempelposition im geraden Bereich/Übergangsbereich/Biegebereich; die mit (*) gekennzeichneten Größen werden nur im Rahmen der Optimierung ausgewertet)

Zielgrößen	Prägen	Biegen	Prägen nach Biegen
y_1	Prägehöhe	Biegewinkel	Prägehöhe 1
y_2	Prägebreite	Rohrhöhe	Prägehöhe 2
y_3	Prägetiefe	Rohrbreite	Prägehöhe 3
y_4	Wandstärke*	Wandstärke	Prägebreite 1
y_5	/	Ovalität*	Prägebreite 2
y_6	/	/	Prägebreite 3
y_7	/	/	Prägetiefe 1
y_8	/	/	Prägetiefe 2
y_9	/	/	Prägetiefe 3
y_{10}	/	/	Biegewinkel*
y_{11}	/	/	Wandstärke*

variiert und der Einfluss auf das Umformergebnis diskutiert. Die gewonnenen Ergebnisse werden in einer prozessspezifischen Datenbank gespeichert und für die nachfolgende Optimierung verwendet (vgl. Abb. 5.1).

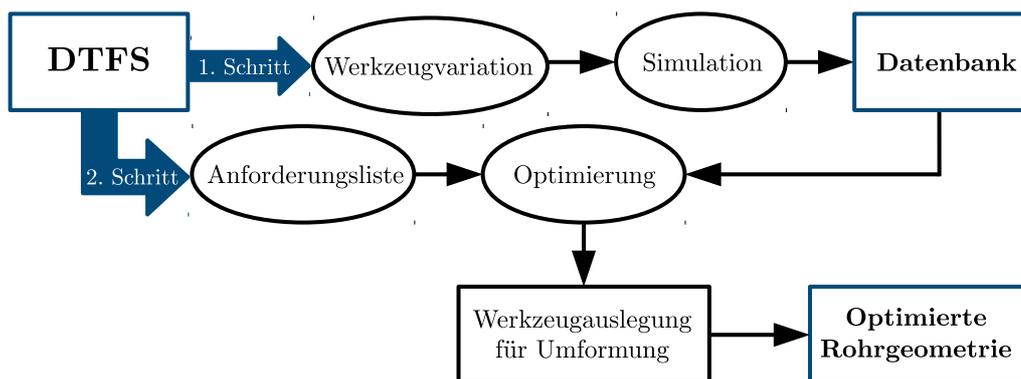


Abbildung 5.1: Der Weg zur optimierten Rohrgeometrie

Das Werkstück besitzt im Rahmen der Optimierung standardmäßig Nennwerte (vgl. Kap. 4.2) und es wird nur das Material 1.4301 betrachtet.

5.2.1 Einfluss der Prägwerkzeuge

Beim Prägeprozess wird der Einfluss

- des Stempelhubes,
- der Stempelform,
- der Stempellänge,
- der Kantenverrundung (vgl. Abb. 2.13) und
- des Klemminnendurchmessers

untersucht. Die Variation der Stempelbreite wird nicht näher betrachtet, da die Standardbreite mit 100 mm deutlich über dem Rohraußendurchmesser liegt und eine Verringerung unter den Außendurchmesser keine sinnvollen Ergebnisse mehr liefert. Die Öffnung in der Rohrklemmung ist in jede Richtung um 10 mm größer als die Prägefläche. Dadurch soll ein weicher Übergang von Prägestelle zu undeformiertem Rohr garantiert werden. Der Versuchsraum im Prägeprozess wird durch die Intervalle der einzelnen Einflussgrößen mit entsprechender Stufenverteilung definiert (vgl. Tab. 5.3).

Tabelle 5.3: Grenzen der Einstellparameter im Prägeprozess mit Stufenunterteilung und Standardwerten

Einstellparameter	Standard	Minimum	Maximum	Stufen
Stempelhub	/	0,0 mm	15,0 mm	5,0 mm
Stempelform	0,0 mm	-10,0 mm	10,0 mm	5,0 mm
Stempellänge	50,0 mm	10,0 mm	90,0 mm	20,0 mm
Kantenverrundung	1,0 mm	1,0 mm	9,0 mm	2,0 mm
Klemminnen- durchmesser	60,0 mm	60,0 mm	65,0 mm	1,0 mm

Die Standardwerte werden für die Einflussgrößen verwendet, wenn sie nicht variiert werden. Alle untersuchten Einflussgrößen werden mit einem Hub von 5 mm, 10 mm und 15 mm untersucht. Der maximale Verfahrweg beträgt somit 25 % des Rohraußendurchmessers. Die Schrittweite orientiert sich an den experimentellen Werten. Die Zielgrößen sind die die Prägehöhe, die Prägebreite und die Prägetiefe. Zur Beurteilung des Einflusses werden die allgemeinen Tendenzen aus Kapitel 4.3.3 verwendet:

- 0,0 mm - 0,1 mm: kein Einfluss (\rightarrow)
- 0,1 mm - 0,3 mm: leichter Einfluss (\uparrow / \downarrow)

- $> 0,3$ mm: starker Einfluss (\uparrow / \downarrow).

Wenn im untersuchten Intervall die entsprechenden Ergebniswerte innerhalb eines Bereiches von $\pm 0,1$ mm variieren, weist die Werkzeugvariation keinen Einfluss auf. Die Werkzeugvariation hat einen leichten Einfluss, falls das Ergebnis mehr als $0,1$ mm im Intervall abweicht und einen starken Einfluss, wenn der Wert mehr als $0,3$ mm abweicht. Die allgemeine Tendenz ist *nicht eindeutig (n.e.)*, sofern gegenläufige Tendenzen innerhalb einer Variation erkennbar sind.

Stempelform

- Standard: $0,0$ mm
- Intervall: $-10,0$ mm bis $0,0$ mm (Stempelform \downarrow)
- Intervall: $0,0$ mm bis $10,0$ mm (Stempelform \uparrow)

Die Variation der Stempelform berücksichtigt zusätzlich zum ebenen und zum konvex gekrümmten Stempel aus den Experimenten auch konkav gekrümmte Stempelformen (vgl. Abb. 2.13). Da der Einfluss auf das Prägeergebnis bei konkaven und konvexen Stempel deutlich unterschiedlich ist, werden die beiden Fälle getrennt voneinander betrachtet und der ebene Stempel als Standard gewählt.

Die ebene Stempelform und die konvexe Stempelform führten bereits im Experiment zu deutlich unterschiedlichen Ergebnissen (vgl. Kap. 4.3.2). Im Vergleich zum Standardwert bewirkt der konvexe Stempel (**Stempelform** \uparrow) einen deutlichen Anstieg der Prägehöhe und eine deutliche Reduzierung der Prägebreite. Aufgrund der Stempelform steigt zusätzlich die Prägetiefe und somit das Fehlermaß signifikant an. Der konkave Stempel (**Stempelform** \downarrow) hingegen führt zu einem starken Anstieg der Prägebreite und zu einer deutlichen Reduzierung der Prägetiefe. Die Stempelform begünstigt den Materialfluss zur Seite, wodurch die Prägebreite mit steigendem Hub zunimmt. Die Entwicklung der Prägetiefe wird durch die Prägefläche komplett verhindert, jedoch wird durch den Stempel auch keine plane Prägefläche erzeugt. Mit einer gering konkav ausgeprägten Stempelfläche ist eine plane Fläche wieder realisierbar. Die Prägehöhe wird durch den konkaven Stempel nur leicht erhöht.

Zusammenfassung:

Konvexe **Stempelformen** sind für das Prägen nicht geeignet. Ebene und leicht konkave Stempelformen hingegen bieten eine geeignete Grundlage zum Realisieren planer Prägeflächen.

Stempellänge

- Standard: 50,0 mm
- Intervall: 10,0 mm bis 90,0 mm (Stempellänge ↑)
- Intervall: 100,0 mm bis 400,0 mm (Stempellänge ↑↑)

Die Stempellänge beeinflusst maßgeblich die Größe der geprägten Fläche. Bei der Untersuchung des Parameters wird der erlaubte Bereich von 10 mm bis 90 mm definiert und der Standardwert analog zu den Experimenten auf 50 mm gesetzt. Zusätzlich zum genannten Intervall wird der Bereich von 100 mm bis 400 mm separat untersucht, da sehr große Stempellängen zu unterschiedlichen Ausprägungen der Prägefläche führen und somit gesondert diskutiert werden.

Die Vergrößerung der Stempellänge (**Stempellänge** ↑) führt zu einem starken Anstieg der drei betrachteten Zielgrößen. Mit steigender Stempellänge nimmt die Prägefläche zu, wodurch der Materialfluss nach außen steigt und die Prägebreite stark zunimmt. Die größere Fläche ist zudem anfälliger für einen Einfall bzw. einem Anstieg der Prägtiefe. Eine erhöhte Rückfederung führt zusätzlich zu einem leichten Anstieg der Prägöhe. Das gegenteilige Verhalten konnte bei kleinen Stempellängen im Prägeprozess gebogener Rohre beobachtet werden (vgl. Kap. 4.5.2). Die Auswertung der Längen über 100 mm (**Stempellänge** ↑) erfolgt separat, da dort die Verformung des Rohrs nicht mehr dem vorherigen Muster folgt. Bisher war bei der Verwendung einer ebenen Stempelfläche die tiefste Stelle immer in der Mitte der geprägten Fläche. Für die Stempellänge von 400 mm sinkt die Prägefläche zum Rand in Längsrichtung ab, wodurch das Ergebnis in der Mitte nicht mehr repräsentativ ist (vgl. Abb. 5.2).



Abbildung 5.2: Prägebereich in Rohrlängsrichtung bei einer Stempellänge von 400 mm

Dadurch musste die Auswertung erweitert werden, sodass die geprägte Stelle ringweise abgerastert wird und so die extremen Abmaße erfasst werden. Die Prägöhe und die Prägebreite steigen mit größer werdenden Länge stark an. Die Prägtiefe hingegen zeigt keinen eindeutigen Trend, was auf die Ausprägung der Fläche zurückzuführen ist. Bei kleinem Hub ist eine deutliche Reduzierung der Prägtiefe zu erkennen, wohingegen bei einem Hub von 15 mm eine deutliche Zunahme ersichtlich wird. Die Zunahme

beträgt bei einer Stempellänge von 200 mm 4,88 mm, was knapp 250% des ursprünglichen Wertes ist. Neben der Entwicklung der einzelnen Zielgrößen sind mit sehr großen Stempellängen keine planen Flächen mehr ohne weitere Unterstützung zu realisieren und der Verlauf ist nicht mehr eindeutig vorherzusagen.

Zusammenfassung:

Mit steigender **Stempellänge** steigen die Prägehöhe, die Prägebreite und die Prägetiefe erheblich an. Für sehr große Stempellängen lässt sich die Prägetiefe nicht mehr eindeutig vorhersagen.

Kantenverrundung

- Standard: 1,0 mm
- Intervall: 1,0 mm bis 9,0 mm (Kantenverrundung ↑)

Die Kantenverrundung führt zu einem weichen Übergang an den Kanten der Prägefläche. Obwohl dadurch ein weicherer Übergang an den Kanten geschaffen wird, führt eine größere Kantenverrundung zu einer geringen effektiven Prägefläche. Die effektive Prägefläche in Rohrlängsrichtung berechnet sich aus der Differenz von Stempellänge und doppelter Kantenverrundung. Dadurch hat ein Stempel mit einer Länge von 50 mm und einer Kantenverrundung von 9 mm eine effektive Prägefläche von 32 mm. Die Kantenverrundung kann von 1 mm bis 9 mm variiert werden. Eine Kantenverrundung von 9 mm kann zudem erst ab einer Stempellänge von 18 mm genutzt werden, was in der graphischen Benutzeroberfläche kontrolliert wird. In diesem Fall besäße der Stempel eine konvexe Form in Rohrlängsrichtung. Die Standardgröße beträgt im Folgenden 1 mm.

Die Vergrößerung der Kantenverrundung (**Kantenverrundung** ↑) hat keinen Einfluss auf die Prägehöhe und die Prägebreite. Die Prägetiefe wird mit steigendem Hub deutlich reduziert, was am weicheren Übergang von Prägefläche zu ungeprägtem Rohr liegt. Zusätzlich kann der weichere Übergang Materialschädigungen verhindern. Dennoch muss bei einer Vorgabe der Kantenverrundung die effektive Prägeflächenlänge berücksichtigt werden.

Zusammenfassung:

Eine Erhöhung der **Kantenverrundung** reduziert die Prägetiefe erheblich, führt aber auch zu einer geringeren effektiven Prägefläche. Die Prägehöhe und die Prägebreite bleiben unbeeinflusst.

Klemminnendurchmesser

- Standard: 60,0 mm
- Intervall: 60,0 mm bis 65,0 mm (Klemminnendurchmesser ↑)

Bei der Verwendung von Standardwerten besitzt die Klemmung einen Nenninnendurchmesser von 60 mm, wodurch kein Freiraum um das Rohr herum existiert. Während die obere Rohrhälfte aufgrund des Stempelfreigangs um die Prägefläche genügend Platz nach außen besitzt, existiert um das restliche Rohr kein Freiraum. Durch eine Erhöhung des Innendurchmessers entsteht neben dem Freiraum um den Prägebereich ein Spalt entlang des kompletten Rohres. Mit diesem Spalt kann bewusst der Materialfluss beim Prägen verändert werden, sodass bei einem großen Stempelhub die lokale Deformation reduziert wird. Die Maximalgrenze wird auf 65 mm festgelegt und der Rohraußendurchmesser von 60 mm stellt den Standard und die Untergrenze dar.

Eine Erhöhung des Klemminnendurchmessers (**Klemminnendurchmesser** ↑) hat mit steigendem Hub eine deutliche Zunahme der Prägehöhe und der Prägebreite zur Folge. Bei niedrigem Hub gibt das Rohr durch den zusätzlichen Freiraum im gesamten Prägebereich mehr nach, wodurch die Plastifizierung nicht so dominant gegenüber der Rückfederung ist. Bei hohem Hub dominiert die Plastifizierung und das Rohr wird eingedrückt. Der zusätzliche Freiraum bewirkt aufgrund des geänderten Materialflusses eine starke Reduzierung der Prägetiefe.

Zusammenfassung:

Die Erhöhung des **Klemminnendurchmessers** bewirkt einen starken Anstieg der Rohrhöhe und der Rohrbreite. Zusätzlich wird die Prägetiefe deutlich reduziert.

Übersicht

Das Prägergebnis kann durch die einzelnen Variationen der Einflussgrößen signifikant beeinflusst werden (vgl. Tab. 5.4).

Während die konvexe Stempelform aufgrund eines deutlichen Anstiegs der Prägehöhe und der Prägetiefe nicht für die Optimierung geeignet ist, lässt sich durch die konkave Stempelform die Prägetiefe stark verringern. Dennoch wird mit steigender Stempellängung eine starke Verbreiterung der Prägefläche beobachtet. Eine kleine Stempellänge führt zu einer Reduzierung der Prägehöhe, der Prägebreite und der Prägetiefe, was hervorragend für eine Optimierung ist. Die Stempellänge ist jedoch in der Regel durch eine Mindestlänge der Prägefläche vorgegeben, wodurch keine freie Optimierung

Tabelle 5.4: Einfluss der Einstellparameter auf den Prägeprozess innerhalb der untersuchten Intervalle (\uparrow / $\uparrow\uparrow$ / \downarrow : Größe steigend / deutlich steigend / sinkend; grün/rot: positiver/negativer Einfluss; \rightarrow : kein Einfluss; \uparrow / \downarrow : maximal mögliche Änderung im Bereich von $\pm 0,3$ mm; $\uparrow\uparrow$ / $\downarrow\downarrow$: maximal mögliche Änderung $> 0,3$ mm; n.e.: nicht eindeutig)

Prägewerkzeuge	Prägehöhe	Prägebreite	Prägetiefe
Stempelform \downarrow	\uparrow	\uparrow	\downarrow
Stempelform \uparrow	$\uparrow\uparrow$	\downarrow	\uparrow
Stempellänge \uparrow	$\uparrow\uparrow$	$\uparrow\uparrow$	$\uparrow\uparrow$
Stempellänge $\uparrow\uparrow$	$\uparrow\uparrow$	$\uparrow\uparrow$	n.e.
Kantenverrundung \uparrow	\rightarrow	\rightarrow	\downarrow
Klemminnen- durchmesser \uparrow	\uparrow	\uparrow	\downarrow

möglich ist. Mit steigender Länge steigen auch die Prägehöhe und die Prägebreite stark an, wodurch der Trend der Prägetiefe nicht mehr eindeutig ist. Eine größere Kantenverrundung führt zu einer deutlichen Abnahme der Prägetiefe, ist jedoch ebenfalls an eine Mindestprägelänge gebunden. Obwohl ein größerer Querschnitt der Klemmung zu einer deutlichen Abnahme der Prägetiefe führt, wird gleichzeitig ein starker Anstieg der Prägehöhe und der Prägetiefe identifiziert. Die Auswahl geeigneter Einflussparameter ist somit sehr komplex und muss durch eine Optimierung ermittelt werden.

5.2.2 Einfluss der Biegewerkzeuge

Für den Biegeprozess wird der Einfluss des Rohrbogens durch

- den Biegewinkel und
- den Biegeradius

untersucht und der Einfluss des Biegedorns (vgl. Abb. 5.3) durch

- den Dorndurchmesser,
- die Kugeldicke,
- den Abstand zwischen Schaft und Kugel und
- die Schaftpositionierung.

Die Längen der Biegewerkzeuge werden fixiert und der Spalt, der noch fertigungsbedingt zwischen Tangentiallinie und Faltenglätter existierte, wird auf Null gesetzt.

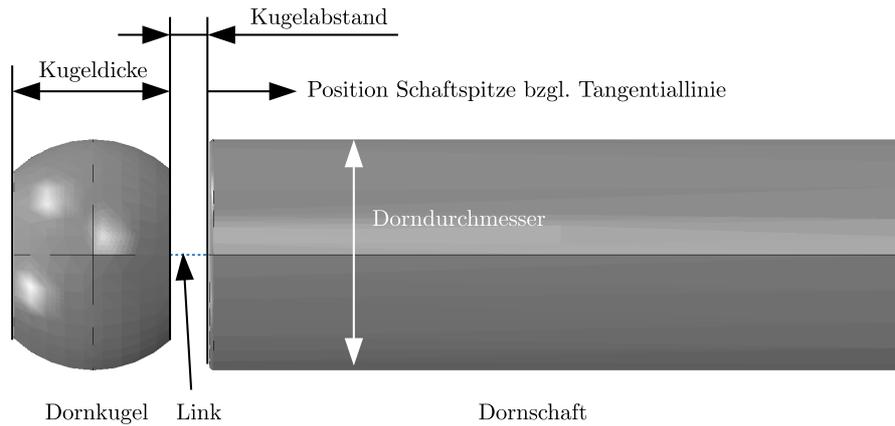


Abbildung 5.3: Einflussgrößen des Biegedorns für die Optimierung des Biegeprozesses

Tabelle 5.5: Grenzen der Einstellparameter im Biegeprozess mit Stufenunterteilung und Standardwerten

Einstellparameter	Standard	Minimum	Maximum	Stufen
Biegewinkel	0,0°	/	30,0°	10,0°
Biegeradius	110,0 mm	90,0 mm	170,0 mm	20,0 mm
Dorndurchmesser	57,4 mm	56,8 mm	57,6 mm	0,2 mm
Kugeldicke	40,0 mm	10,0 mm	50,0 mm	10,0 mm
Kugelabstand	2,0 mm	2,0 mm	10,0 mm	2,0 mm
Schaftposition	1,0 mm	1,0 mm	9,0 mm	2,0 mm

Die Intervalle der Einflussgrößen mit den entsprechenden Stufen und Standardwerten sind in Tabelle 5.5 aufgelistet. Alle Einflussgrößen werden mit einem Einstellwinkel von 10°, 20° und 30° untersucht. Die Schrittweite und der Maximalwert des Einstellwinkels orientieren sich an den experimentellen Werten. Die Zielgrößen sind der Biegewinkel, die Rohrhöhe, die Rohrbreite und die Wandstärkenextrema. Zur Beurteilung des Einflusses der einzelnen Werkzeugvariationen auf das Biegeergebnis werden die allgemeinen Tendenzen aus Kapitel 4.4.3 verwendet:

- 0,0 mm - 0,1 mm: kein Einfluss (→)
- 0,1 mm - 0,3 mm: leichter Einfluss (↑ / ↓)
- > 0,3 mm: starker Einfluss (↑ / ↓).

Eine allgemeine Tendenz bleibt vorhanden, wenn mindestens 50 % der Umformergebnisse für eine bestimmte Variation eine Tendenz aufweisen. Die allgemeine Tendenz ist *nicht eindeutig* (*n.e.*), sofern gegenläufige Tendenzen innerhalb einer Variation erkennbar sind.

Biegeradius

- Standard: 110,0 mm
- Intervall: 90,0 mm bis 170,0 mm (Biegeradius ↑)

Neben dem Biegewinkel ist der **Biegeradius** der wichtigste Kennwert zur Definition des Biegebogens. Der Biegefaktor ist als Quotient von Biegeradius zu Rohraußendurchmesser definiert und dient als Faktor zur Beurteilung der Biegebarkeit des Rohres. Der Quotient beträgt bei einem Biegeradius von 110 mm (Standardwert) und einem Außendurchmesser von 60 mm 1,83. Je kleiner der Biegeradius gewählt wird, desto schwieriger wird es, das Rohr fehlerfrei zu biegen. Zusammen mit dem Wanddickenfaktor - dem Quotient aus Rohraußendurchmesser zu Wandstärke - wird die Notwendigkeit zur Verwendung eines Biegedorns beurteilt. Der Wanddickenfaktor beträgt in der vorliegenden Arbeit standardmäßig 50. Dieser Bereich kann nur durch die Hinzunahme eines Biegedorns fehlerfrei umgeformt werden (vgl. Kap. 2.2.1). Der Biegeradius wird in 20 mm Abständen von 90 mm bis 170 mm variiert.

Mit steigendem Biegeradius (**Biegeradius** ↑) reduziert sich die maximale Wandstärke. Die Rohrhöhe zeigt keinen eindeutigen Trend und ist abhängig vom Einstellwinkel. Der Biegewinkel und die Rohrbreite bleiben unverändert. Obwohl der Einfluss des Biegeradius auf das Biegeergebnis relativ gering ist, kann grundsätzlich der Einsatz des Biegedorns bei Grenzfällen durch größere Biegeradien vermieden werden.

Zusammenfassung:

Die Variation des **Biegeradius** hat beim Biegen mit Dorn nur einen geringen Einfluss auf das Umformergebnis.

Dorndurchmesser

- Standard: 57,4 mm
- Intervall: 56,8 mm bis 57,6 mm (Dorndurchmesser ↑)

Der **Dorndurchmesser** definiert den Spalt zwischen Dorn und Rohrinne Durchmesser. Der Schaft stützt ortsfest den Innendurchmesser an sowie vor der Tangentiallinie (vgl. Abb. 2.24), wohingegen die Kugel den Biegebereich, in der die Ovalisierung stattfindet, stützt. Ein einheitlicher Durchmesser für Schaft und Kugel wurde gewählt, um die Anzahl der Parameter gering zu halten. In der Literatur [121] gibt es zur Auslegung

eines Biegedorns Faustregeln. Der Durchmesser der Dornspitze M_d berechnet sich aus dem Außendurchmesser AD und der Wandstärke WS des Rohres zu

$$M_d = AD - (2,21 \cdot WS) = 60,0 \text{ mm} - (2,21 \cdot 1,2 \text{ mm}) = 57,35 \text{ mm} . \quad (5.2)$$

Auf Basis der Faustformel in Gleichung 5.2 sollte bei gegebener Stufenunterteilung ein Dorndurchmesser von 57,4 mm das beste Ergebnis liefern, weshalb dieser Wert auch als Standardwert gewählt wird. Der Dorndurchmesser von 57,6 mm stellt einen Spezialfall dar, da dieser Dorndurchmesser dem Innendurchmesser des Rohres entspricht und somit kein Spalt zwischen Dorn und Rohr zu Beginn des Prozesses existiert. Eine Erhöhung des Außendurchmessers (**Dorndurchmesser** ↑) bewirkt tendenziell einen Anstieg des Biegewinkels, da der kleiner werdende Spalt zwischen Dorn und Innendurchmesser den Biegeablauf beeinflusst. Außerdem führt er zu einem deutlichen Anstieg der Rohrhöhe und somit bei gleichbleibender Rohrbreite zu einer Reduzierung der Ovalisierung. Der größere Dorndurchmesser bewirkt auch eine Erhöhung der Materialanhäufung im Innenbogen. Der Sonderfall des Dorndurchmessers von 57,6 mm führt bei einem Biegewinkel von 30° zu einem Faltenwurf im Innenbogen. Ein geringer Spalt zwischen Rohr und Dorn ist aufgrund der Ovalisierung im Biegebereich notwendig, da sich sonst das Material zwischen Schaft und Rohr direkt nach Innen drückt. Daher liefert die Faustformel einen sehr guten Richtwert zur ersten Auslegung des Dorns.

Zusammenfassung:

Eine falsche Dimensionierung des **Dorndurchmessers** führt zu einer starken Reduzierung der Rohrhöhe. Umformfehler entstehen, wenn nicht genügend Spielraum um den Dorn herum existiert.

Kugeldicke

- Standard: 40,0 mm
- Intervall: 10,0 mm bis 50,0 mm (Kugeldicke ↑)

Das Dornglied besitzt eine Kugelform mit einem Außendurchmesser von 57,4 mm (Standard). Die Kugeldicke bestimmt, wie viel der Kugel in Dickenrichtung dargestellt wird. Bei einer Dicke von 57,4 mm wird die Kugel komplett dargestellt. Eine Reduzierung der Dicke führt dazu, dass die Form der Kugel in eine Scheibe übergeht. Die Auflagefläche am Rohrrinnendurchmesser ist somit der äußerste Punkt der Kugel. Das Bewegungsverhalten im Rohr während des Biegevorgangs wird durch die Größe

und die Form der Dornkugel beeinflusst. Der Einstellparameter wird zwischen 10 mm und 50 mm begrenzt und der Standardwert auf 40 mm festgelegt.

Eine Erhöhung der Kugeldicke (**Kugeldicke** ↑) führt zu einem deutlichen Anstieg von Biegewinkel und Rohrhöhe. Die Abweichung des Biegewinkels beträgt bei einem Einstellwinkel von 30° mehr als 0,5°. Die Abweichung im Biegewinkel entsteht durch den veränderten Biegeablauf und durch eine Reduzierung der Rückfederung. Mit geringer Kugeldicke wird das Rohr nicht ausreichend im Biegebereich gestützt, wodurch der Außenbogen stellenweise ohne Widerstand einfallen kann und somit die Rohrhöhe stark abfällt. Zwar ist die minimale Rohrhöhe noch weit von dem Biegeergebnis ohne Dorn entfernt, dennoch ist der Einfall mit 4,46 mm bzw. knapp 7,5% schon sehr deutlich. Mit größer werdender Kugeldicke lässt sich der Abfall der Rohrhöhe stark reduzieren. Die Rohrbreite und die maximale Wandstärke erhöhen sich leicht.

Zusammenfassung:

Die **Kugeldicke** des eingliedrigen Dorns muss hinreichend groß sein, da sonst eine unzureichende Unterstützung im Innendurchmesser des Rohres erfolgt und somit der Biegewinkel und die Rohrhöhe stark reduziert werden.

Kugelabstand

- Standard: 2,0 mm
- Intervall: 2,0 mm bis 10,0 mm (Kugelabstand ↑)

Da der eingesetzte Biegedorn nur eine Kugel besitzt, wird durch den Abstand zwischen Schaft und Kugel die Position der Kugel im Biegebereich definiert. Während der Schaft das Rohr an der Tangentiallinie stützt, wird durch den Abstand festgelegt, an welcher Stelle im Biegebereich die Kugel als innerer Widerstand gegen die Ovalisierung dient. Eine zu große Lücke ermöglicht einen Materialfluss in den entstandenen Spalt, wohingegen eine zu kleine Lücke die Ovalisierung an der falschen Stelle verhindert. Dadurch müssen die Schaftpositionierung und der Kugelabstand aufeinander abgestimmt sein. Eine Aussparung am Schaft verhindert einen möglichen Kontakt zwischen Schaft und Kugel. Zudem wird die Untergrenze des Abstandes zwischen Schaftspitze und Kugelbeginn auf 2 mm festgelegt.

Bei einer Erhöhung des Kugelabstands (**Kugelabstand** ↑) steigt die Rohrhöhe stark an. Eine Positionierung tiefer im Biegebereich führt zu einer besseren Unterstützung des Biegebogens und somit zu einer Erhöhung der Rohrhöhe um bis zu 0,86 mm. Bei einem zu geringem Abstand liegt die Dornkugel zu Beginn nicht weit genug im Biegebereich

und kann somit die entscheidenden Stellen nicht stützen. Neben der Rohrhöhe nehmen mit steigendem Abstand auch der Biegewinkel und die Materialanhäufung leicht zu.

Zusammenfassung:

Der **Kugelabstand** muss bei einem eingliedrigen Biegedorn hinreichend groß gewählt werden, sodass der Biegebereich eine optimale Unterstützung im Rohrinne Durchmesser erfährt. Ein zu kleiner Abstand führt zu einer starken Reduzierung der Rohrhöhe.

Schaftpositionierung

- Standard: 1,0 mm
- Intervall: 1,0 mm bis 9,0 mm (Schaftpositionierung ↑)

Die Schaftpositionierung definiert den Abstand zwischen Schaftspitze und Tangentiallinie. Die Schaftspitze wird im Allgemeinen hinter der Tangentiallinie platziert, da dieser den Anfang des Umformbereichs definiert (vgl. Abb. 2.24). Eine Positionierung der Schaftspitze vor der Tangentiallinie führt zu einer erhöhten Ovalisierung des Rohrquerschnitts im Biegebereich und möglicherweise zu einem Faltenwurf, da das Rohr nicht ordnungsgemäß an der Tangentiallinie von Innen gestützt wird. Aus diesem Grund kann die Schaftspitze nicht vor der Tangentiallinie positioniert werden. Eine Positionierung zu weit hinter der Tangentiallinie hat eine extreme Materialausdünnung am Außenbogen zur Folge. Im schlechtesten Fall führt die Positionierung zu einer Beule im Außenbogen und daraus folgend zu einer Schädigung (vgl. Abb. 2.9). Die geeignete Positionierung lässt sich durch eine Faustformel näherungsweise ermitteln [84, 121]. Die maximale Schafttiefe S_{max} wird über den Biegeradius R_c , den Außendurchmesser AD , die Wandstärke WS , den Dornspitzendurchmesser M_d aus Gleichung 5.2 und der Kantenverrundung der Schaftspitze M_r über die Formel

$$S_{max} = \sqrt{\left(R_c + \left(\frac{AD}{2}\right) - WS\right)^2 - \left(R_c + \left(\frac{M_d}{2}\right)\right)^2} + M_r \quad (5.3)$$

berechnet. Die Kantenverrundung an der Schaftspitze beträgt $0,02 M_d$. Für den vorliegenden Fall ergibt sich dadurch ein maximaler Wert von 7,06 mm. Das Optimum befindet sich dadurch zwischen $0,5 S_{max}$ (3,53 mm) und $0,66 S_{max}$ (4,70 mm). Zur Variation wird 1 mm als untere Grenze und 10 mm als obere Grenze gesetzt.

Mit tieferer Schaftpositionierung hinter der Tangentiallinie (**Schaftposition** ↑) redu-

ziert sich der Biegewinkel aufgrund einer steigenden Rückfederung. Gleichzeitig steigt die Rohrhöhe leicht an und die Rohrbreite zeigt einen nichteindeutigen Trend. Für einen Biegewinkel von 30° wird die Zunahme der Rohrhöhe stärker. Die Wandstärkenextrema bleiben unverändert.

Zusammenfassung:

Die **Schaftpositionierung** um den Bereich der Tangentiallinie hat im betrachteten Intervall einen geringen Einfluss auf das Biegeergebnis. Eine zu tiefe Positionierung des Dornschafts im Biegebereich kann im ungünstigsten Fall zu einer Schädigung des Rohres führen.

Übersicht

Die Änderung des Biegeradius hat nahezu keinen Einfluss auf das Biegeergebnis (vgl. Tab. 5.6). Die Auswahl des Biegedorns ist abhängig vom Biegeradius. Die Steigerung des Dorndurchmessers führt aufgrund einer Reduzierung des Freiraums zum Rohr zu einem Anstieg der Rohrhöhe im Biegebereich. Bei einem zu großen Dorndurchmesser (kein Freiraum) entstand ein Faltenwurf im Innenbogen. Zusätzlich werden der Biegewinkel und die maximale Wandstärke im Innenbogen leicht beeinflusst. Eine steigende Kugeldicke führt zu einer deutlichen Erhöhung des Biegewinkels und der Rohrhöhe. Eine Vergrößerung des Kugelabstands hat eine verbesserte Unterstützung des Biegebereichs zur Folge und die Rohrhöhe steigt stark an. Eine tiefere Schaftpositionierung im Biegebereich führt ebenfalls zu einer Erhöhung der Rohrhöhe. Die Werkzeugvarianten veranschaulichen, dass bei einer falschen Auslegung des Biegeprozesses vor allem die Rohrhöhe im Biegebereich signifikant abfällt.

Tabelle 5.6: Einfluss der Einstellparameter auf den Biegeprozess innerhalb der untersuchten Intervalle (↑: Größe steigend; WS: Wandstärke; grün/rot: positiver/negativer Einfluss; →: kein Einfluss; ↑ / ↓: maximal mögliche Änderung im Bereich von $\pm 0,3$ mm; ↑ / ↓: maximal mögliche Änderung $> 0,3$ mm; n.e.: nicht eindeutig)

Biegewerkzeuge	Biege- winkel	Rohr- höhe	Rohr- breite	min. WS	max. WS
Biegeradius ↑	→	n.e.	→	→	↓
Dorndurchmesser ↑	↑	↑	→	→	↑
Kugeldicke ↑	↑	↑	↑	→	↑
Kugelabstand ↑	↑	↑	→	→	↑
Schafttiefe ↑	↓	↑	n.e.	→	→

5.2.3 Einfluss der Prägwerkzeuge auf ein gebogenes Rohr

Das gebogene Rohr wird an drei unterschiedlichen Positionen gleichzeitig geprägt (vgl. Abb. 4.30). Für den Prägeprozess werden

- der Biegeradius des Rohres / der Rohrklammung,
- der Biegewinkel des Rohres / der Rohrklammung,
- die Stempelform der drei Stempel und
- der Klemminnendurchmesser

variiert und der Einfluss auf das Prägeergebnis untersucht. Aufgrund der großen Anzahl an Variationsmöglichkeiten werden alle drei Stempel gleichermaßen verändert und nur die Stempelform untersucht. Die Stempellänge orientiert sich an den experimentellen Werten und bleibt konstant auf 10 mm. Eine Verlängerung des Stempels würde bei einem kleinen Biegewinkel zu einer gegenseitigen Beeinflussung der Prägezonen im Übergangsbereich und im Biegebereich führen. Die Kantenverrundung bleibt bei dem Standardwert von 1 mm, da die Stempellänge mit 10 mm sehr klein ist und durch eine größere Kantenverrundung die effektive Prägefläche weiter reduziert wird. Die Breite wird auf 100 mm und die Eckenverrundung auf 5 mm festgelegt. Die Rohrklammung ist variabel im Innendurchmesser und zusätzlich abhängig vom Biegebogen des Rohres. Aus diesem Grund werden der Biegewinkel und der Biegeradius sowohl im Biegeprozess als auch im Prägeprozess variiert. Die restlichen Einstellungen der Biegewerkzeuge werden aus Kapitel 4.4.1 übernommen und konstant gehalten. Ein einheitlicher Klemminnendurchmesser wird im Rahmen der Werkzeugvariation verwendet, wodurch keine individuelle Anpassung des Durchmessers an den lokalen Prägepositionen nötig ist. In Tabelle 5.7 sind die Einflussgrößen mit den entsprechenden Variationsintervallen aufgelistet.

Tabelle 5.7: Grenzen der Einstellparameter im kombinierten Biege- und Prägeprozess mit Stufenunterteilung und Standardwerten

Einstellparameter	Standard	Minimum	Maximum	Stufen
Biegewinkel	10,0°	10,0°	30,0°	10,0°
Biegeradius	110,0 mm	110,0 mm	170,0 mm	30,0 mm
Stempelhub	/	5,0 mm	15,0 mm	5,0 mm
Stempelform	0,0 mm	-10,0 mm	0,0 mm	5,0 mm
Klemminnendurchmesser	60,0 mm	60,0 mm	62,0 mm	1,0 mm

Alle Einflussgrößen werden jeweils mit einem Hub von 5 mm, 10 mm und 15 mm untersucht. Der Biegewinkel wird auf 10° , 20° und 30° festgelegt und der notwendige Biegedorn aus dem vorherigen Abschnitt mit den Standardwerten übernommen. Die Beurteilung des Einflusses der einzelnen Werkzeugvariationen auf das Prägeergebnis erfolgt durch die allgemeinen Tendenzen:

- 0,0 mm - 0,1 mm: kein Einfluss (\rightarrow)
- 0,1 mm - 0,3 mm: leichter Einfluss (\uparrow / \downarrow)
- $> 0,3$ mm: starker Einfluss (\uparrow / \downarrow).

Da der Prägeprozess gebogener Rohre durch viele Einflussfaktoren beeinflusst wird, ist die Wahrscheinlichkeit, eine eindeutige Tendenz im gesamten Hubbereich von 0 mm bis 15 mm zu erzielen, gering. Um dennoch möglichst eindeutige Aussagen bezüglich der Tendenzen machen zu können, wird der Stempelhub in zwei Bereiche unterteilt. Bereich *I* beinhaltet einen Stempelhub von 0 mm bis einschließlich 7,5 mm und Bereich *II* kennzeichnet den Bereich von 7,5 mm bis 15 mm. Zu diesem Zweck werden die allgemeinen Tendenzen für die beiden Bereiche getrennt dargestellt. Somit wird von einer allgemeinen Tendenz gesprochen, wenn mindestens 50 % der Ergebnisse im jeweiligen Bereich eine Tendenz aufweisen.

Biegeradius und Biegewinkel

- Biegeradius
 - Standard: 110,0 mm
 - Intervall: 110,0 mm bis 170,0 mm (Biegeradius \uparrow)
- Biegewinkel
 - Standard: $10,0^\circ$
 - Intervall: $10,0^\circ$ bis $30,0^\circ$ (Biegewinkel \uparrow)

Die Erhöhung des Biegeradius (**Biegeradius** \uparrow) hat keinen Einfluss auf das Prägeergebnis. Bereits der Einfluss auf das Biegeergebnis war kaum vorhanden (vgl. Tab. 5.6). Während die Prägeposition im geraden Bereich durch einen steigenden Biegewinkel (**Biegewinkel** \uparrow) keine Änderung erfährt, steigt im Übergangsbereich und im Biegebereich die Prägehöhe an und die Prägetiefe sinkt bei großen Stempelhuben. Die Prägetiefe erfährt eine deutliche Reduktion, weil im gebogenen Bereich mit steigendem Winkel die gegenseitige Beeinflussung der Prägepositionen deutlich geringer wird. Die

Prägebreite hingegen weist in Abhängigkeit des Biegewinkels und des Hubs unterschiedliche Tendenzen auf, was das Resultat der unterschiedlich ovalisierten Rohrquerschnitte aus dem Biegeprozess ist. Bei einem gleichzeitigen Anstieg von Biegeradius und Biegewinkel (**Biegeradius** \uparrow , **Biegewinkel** \uparrow) dominiert der Einfluss des Biegewinkels. Lediglich die Prägehöhen im Übergangsbereich und im Biegebereich werden bei niedrigem Hub nicht mehr beeinflusst.

Zusammenfassung:

Die Erhöhung des **Biegeradius** hat keinen Einfluss auf den nachfolgenden Prägeprozess. Eine Erhöhung des **Biegewinkels** erhöht die Rohrhöhe und reduziert mit steigendem Hub deutlich die Prägetiefe im gebogenen Bereich.

Stempelform

- Standard: 0,0 mm
- Intervall: $-10,0$ mm bis 0,0 mm (Stempelform \downarrow)

Eine extreme Krümmung des Prägestempels und eine konvexe Stempelform waren bisher nicht zur Realisierung einer planen Prägefläche geeignet. Aus diesen Gründen wird die Variation der Stempelform auf ebene Flächen und schwach konkave Flächen beschränkt. Somit ist die Untergrenze bei -10 mm und die Obergrenze bei 0 mm. Als Standardwert wird weiterhin der ebene Stempel verwendet.

Die konkave Stempelform (**Stempelform** \downarrow) führt im Wesentlichen zu einer Reduzierung der Prägehöhe, was sich im Übergangsbereich und im Biegebereich mit größer werdendem Hub stark bemerkbar macht. Die Reduzierung der Prägehöhe ist zusätzlich auf die geringe Stempellänge zurückzuführen. Dieses Verhalten konnte bereits bei der Werkzeugvariation des Prägeprozesses mit sinkender Stempellänge beobachtet werden (vgl. Tab. 5.4). Die Prägebreite bleibt bei niedrigem Hub unbeeinflusst und steigt erst mit größer werdendem Hub teils deutlich an, da die lokale Deformation signifikant zunimmt. Die Prägetiefe weist mit kleinem Hub eine leichte Erhöhung im gebogenen Bereich auf, besitzt im Allgemeinen jedoch keine eindeutige Tendenz. Die Kombination aus Vordeformation und vorhandenen Eigenspannungen lässt die Ergebnisse vor allem im Biegebereich sehr stark variieren. Dadurch ist das Ergebnis abhängig vom Stempelhub und somit vom Grad der lokalen Deformation. Die Stempelvariation wird zusätzlich bei größeren Biegewinkeln (**Stempelform** \downarrow , **Biegewinkel** \uparrow) untersucht, da der Biegebereich stark vom Biegewinkel abhängig ist. Der steigende Biegewinkel beeinflusst die Prägeergebnisse im Übergangsbereich und im gebogenen Bereich und

führt größtenteils zu nicht eindeutigen Vorhersagen. Eine Vermischung der Einflüsse tritt somit für alle drei Zielgrößen ein und verdeutlicht bereits die Komplexität der Ergebnisvorhersage bei mehreren Einflussgrößen.

Zusammenfassung:

Der Einfluss der **konkaven Stempelform** auf das Prägeergebnis zeigt einzelne Tendenzen, ist aber durch die vorherige Biegeumformung nicht eindeutig.

Klemminnendurchmesser

- Standard: 60,0 mm
- Intervall: 60,0 mm bis 62,0 mm (Klemminnendurchmesser ↑)

Der Klemminnendurchmesser beeinflusst das Prägeergebnis maßgeblich durch den zusätzlich entstandenen Freiraum um das Rohr herum. Der minimale Klemminnendurchmesser entspricht gerade dem Rohraußendurchmesser. Aufgrund der bereits gewonnenen Informationen zum Prägeprozess (vgl. Kap. 5.2.1) wird die Obergrenze des Innendurchmessers von 65 mm auf 62 mm reduziert, da über 62 mm keine brauchbaren Ergebnisse mehr auftreten.

Die Vergrößerung des Klemminnendurchmessers (**Klemminnendurchmesser** ↑) führt bei einem geringen Hub (Bereich I) in allen drei Positionen zu einem starken Anstieg der Prägehöhe, der Prägebreite und der Prägetiefe. Somit stimmen die Trends der Prägehöhe und der Prägebreite mit denen des einfachen Prägeprozesses überein (vgl. Tab. 5.4), während die Prägetiefe aufgrund der geringeren Stempellänge einen gegenläufigen Trend aufweist. Eine Erhöhung des Stempelhubes (Bereich II) verändert den Trend in der Prägehöhe erheblich, indem eine starke Reduzierung der Prägehöhe in allen drei Positionen beobachtet wird. Der zusätzliche Freiraum führt zu einer geringeren lokalen Deformation an den Prägepositionen, was bei größeren Hüben zu einem Tendenzwechsel führt. Gleichzeitig wird auch die Prägetiefe im Übergangsbereich und im Biegebereich auch stark reduziert. Bei einer Kombination aus steigendem Klemminnendurchmesser und steigendem Biegewinkel (**Klemminnendurchmesser** ↑, **Biegewinkel** ↑) dominiert der Einfluss des Klemminnendurchmessers. Lediglich die Rohrhöhe und die Rohrbreite im Biegebereich erfahren durch den steigenden Biegewinkel eine leichte Veränderung. Die restlichen Zielgrößen bleiben tendenziell zur einfachen Variation des Klemminnendurchmessers unverändert.

Zusammenfassung:

Der Einfluss des **Klemminnendurchmessers** ist stark abhängig vom Stempelhub. Für kleine Hübe steigen die Prägehöhe, die Prägebreite und die Prägetiefe deutlich an. Mit steigendem Hub ändern sich die Trends für die Rohrhöhe und die Rohrtiefe. Eine gleichzeitige Erhöhung des Biegewinkels hat einen geringen Einfluss auf die Ergebnisse.

Stempelform und Klemminnendurchmesser

Da aufgrund der Vielzahl an Variationsmöglichkeiten nur zwei Werkzeugeinstellungen im Prägeprozess untersucht werden, wird zusätzlich der Einfluss einer gleichzeitigen Parametervariation der beiden Einflussgrößen betrachtet. Das Ergebnis einer konkaven Form mit steigendem Innendurchmesser (**Stempelform** ↓, **Klemminnendurchmesser** ↑) zeigt für die Prägehöhe und die Prägebreite überwiegend die gleichen Tendenzen wie die reine Innendurchmesservariation. Mit kleinem Hub (Bereich I) steigen beide Zielgrößen tendenziell stark an, wohingegen die Prägehöhe mit großem Hub (Bereich II) die Tendenz wechselt. Für die Prägetiefe ist der Einfluss beider Einflussgrößen zu erkennen, wodurch keine eindeutige Tendenz mehr vorhanden ist.

Wird gleichzeitig zu den beiden Einflussgrößen noch der Biegewinkel erhöht (**Biegewinkel** ↑, **Stempelform** ↓, **Klemminnendurchmesser** ↑), so bleiben die allgemeinen Tendenzen zwar noch erkennbar, aber die Anzahl an nicht eindeutigen Einzel Tendenzen nimmt zu.

Zusammenfassung:

Der Einfluss des **Klemminnendurchmessers** auf das Prägeergebnis gebogener Rohre ist stärker als die der **Stempelform**. Eine Vorhersage wird mit steigender Anzahl an Einflussgrößen deutlich schwieriger und die Anzahl eindeutiger Tendenzen geringer.

Übersicht

Die Übersicht der Werkzeugvariationen in Tabelle 5.8 zeigt, dass trotz der geringen Anzahl an Einflussgrößen die Ergebnisstreuung bereits sehr groß ist. Im Rahmen einer zuverlässigen Vorhersage ist eine Optimierung der Prozesskette aus Biegen und Prägen somit unerlässlich.

Tabelle 5.8: Einfluss der Einstellparameter auf den Prägeprozess gebogener Rohre (\uparrow / \downarrow : Größe steigend / sinkend; BR: Biegeradius; BW: Biegewinkel; SF: Stempelform; KD: Klemminnendurchmesser; 1/2/3: Prägeposition im geraden Bereich/Übergangsbereich/Biegebereich; Hubbereich I: 0 – 7,5 mm, Hubbereich II: 7,5 – 15 mm; grün/rot: positiver/negativer Einfluss; \rightarrow : kein Einfluss; \uparrow / \downarrow : maximal mögliche Änderung im Bereich von $\pm 0,3$ mm; \uparrow / \downarrow : maximal mögliche Änderung $> 0,3$ mm; n.e.: nicht eindeutig)

Werkzeuge	Hubbereich	Prägehöhe			Prägebreite			Prägetiefe		
		1	2	3	1	2	3	1	2	3
BR \uparrow	I	\rightarrow			\rightarrow			\rightarrow		
	II	\rightarrow			\rightarrow			\rightarrow		
BW \uparrow	I	\rightarrow	\uparrow		\rightarrow	\downarrow	n.e.	\rightarrow		
	II	\rightarrow	\uparrow		\rightarrow	\uparrow	\downarrow	\rightarrow	\downarrow	
BR \uparrow BW \uparrow	I	\rightarrow			\rightarrow	\downarrow	n.e.	\rightarrow		
	II	\rightarrow	\uparrow	\uparrow	\rightarrow	n.e.	\downarrow	\rightarrow	\downarrow	
SF \downarrow	I	\downarrow	\rightarrow		\rightarrow			n.e.	\uparrow	
	II	\downarrow	\downarrow		\uparrow	\rightarrow	\uparrow	n.e.		
SF \downarrow BW \uparrow	I	\downarrow	\rightarrow		\rightarrow	\downarrow	n.e.	n.e.	\uparrow	\uparrow
	II	\downarrow	n.e.		\uparrow		n.e.	n.e.	\downarrow	n.e.
KD \uparrow	I	\uparrow			\uparrow			\uparrow		
	II	\downarrow			\uparrow			\uparrow	\downarrow	
KD \uparrow BW \uparrow	I	\uparrow			\uparrow		n.e.	\uparrow		
	II	\downarrow	\downarrow	n.e.	\uparrow		n.e.	\uparrow	\downarrow	
SF \downarrow KD \uparrow	I	n.e.	\uparrow		\uparrow			\downarrow	\uparrow	
	II	\downarrow			\uparrow			n.e.		\downarrow
SF \downarrow ; KD \uparrow BW \uparrow	I	n.e.	\uparrow		\uparrow		n.e.	n.e.	\uparrow	
	II	\downarrow	\downarrow	n.e.	\uparrow			\uparrow	n.e.	\downarrow

Eine Variation des Biegeradius hat keinen Einfluss auf das Prägeergebnis. Durch einen steigenden Biegewinkel wird im Wesentlichen der gebogene Bereich beeinflusst. Die konkave Stempelform besitzt vor allem mit steigendem Stempelhub einen starken Einfluss auf das Prägeergebnis. Mit wachsendem Biegewinkel ist der Einfluss nicht mehr eindeutig. Ein größerer Querschnitt der Klemmung bewirkt bei kleinem Hub einen starken Anstieg der Prägehöhe, der Prägebreite und der Prägetiefe. Mit größer werdendem Stempelhub sinken hingegen die Prägehöhe und die Prägetiefe im Biegebereich stark ab und wechselt somit den Trend. Eine zusätzliche Überlagerung mit einem steigen-

den Biegewinkel beeinflusst die Ergebnisse im Biegebereich nur leicht. Eine gleichzeitige Variation der Stempelform und des Klemmminendurchmessers lässt vor allem den Einfluss der Klemmung im Prägeergebnis erkennen. Dennoch sind die Auswirkungen der Stempelform nicht zu vernachlässigen, was an der Prägetiefe deutlich wird. Eine zusätzliche Überlagerung eines steigenden Biegewinkels macht eine Vorhersage schwieriger und verdeutlicht die Notwendigkeit einer Optimierung zur Ermittlung geeigneter Einstellparameter für den kombinierten Umformprozess.

5.3 Grundlagen der Optimierung

Mittels einer Simulation ist es möglich, die Einflüsse aller Einstellparameter der Umformprozesse zu prüfen, zu visualisieren und zu bewerten. Die Voraussetzung dafür ist nicht nur ein funktionierendes und validiertes Simulationsmodell, sondern auch die Kenntnis der notwendigen Einstellparameter. In der Regel sind die Anforderungen an das umgeformte Rohr bekannt und die dafür notwendigen Einstellparameter müssen noch ermittelt werden. Durch neue Rohrgeometrien und neue Materialien wird die Einstellung von Umformprozessen zusätzlich erschwert, wodurch das Simulationsmodell ständig an die neuen Gegebenheiten angepasst werden muss. Obwohl durch den Einsatz von Simulationen Material und Kosten im Experiment eingespart werden können, ist eine händische Variation von Einflussgrößen für die Simulation nicht zielführend. Auf Basis bereits berechneter Umformsimulationen lassen sich mit Hilfe einer Optimierung die geeigneten Einstellungen für ein bestehendes Problem deutlich schneller ermitteln. Im Rahmen der Arbeit wird die Optimierung der einzelnen Umformprozesse über die graphische Benutzeroberfläche gesteuert. Zu diesem Zweck werden zwei Teilaspekte der Optimierung - die **Regressionsanalyse** und die **Parameteroptimierung** - zum Verständnis erläutert, bevor der **Optimierungsablauf** in der graphischen Benutzeroberfläche vorgestellt und anhand **zweier Optimierungsbeispiele** diskutiert wird.

5.3.1 Regressionsanalyse

Nachdem mit Hilfe der statistischen Versuchsplanung im ersten Teil des Kapitels eine Datenbank erstellt wurde, wird diese im zweiten Teil des Kapitels mit einem statistischen Analyseverfahren ausgewertet [7, 18, 48, 123, 125]. Die Kombination aus statistischer Versuchsplanung mit nachfolgender Regressionsanalyse ist in der Literatur gängige Praxis und wird beispielhaft zur Ermittlung einer geeigneten Vorform für die Hydroumformung [17, 140] oder zur Optimierung der Rückfederung im Biegeprozess [78] verwendet. Ziel des Analyseverfahrens ist die Definition einer mathematischen Be-

ziehung zwischen Einflussgrößen und Zielgrößen. Die ermittelte Beziehung zwischen Einflussgrößen und Zielgrößen ermöglicht innerhalb eines definierten Versuchsraums für beliebige Einflussparameter eine Vorhersage der entsprechenden Zielparameter. Da mehrere Einflussgrößen x_j eine Zielgröße y_i gleichzeitig beeinflussen, wird eine *multiple lineare Regression* verwendet. Die Beziehung erster Ordnung lautet

$$y_i = \beta_0 + \sum_{j=1}^n \beta_j x_j + \varepsilon. \quad (5.4)$$

Ziel der Analyse ist die Ermittlung der Regressionsparameter β_0 und β_j . Dabei beschreibt β_0 den allgemeinen Einfluss und β_j den Einfluss der einzelnen Einflussparameter x_j . Die Größe ε ist ein zufälliger Fehler, dessen Komponenten ε_j unabhängig und normalverteilt sind. Die Gleichung erster Ordnung lautet in Matrixnotation

$$\mathbf{Y} = \mathbf{X} \cdot \boldsymbol{\beta} + \boldsymbol{\varepsilon}. \quad (5.5)$$

Darin ist \mathbf{Y} eine $m \times 1$ Matrix, wobei m die Anzahl der vorhandenen Datenpunkte ist. Die Größe \mathbf{X} ist eine $m \times (j + 1)$ Matrix und die Regressionsparameter bilden einen $(j + 1) \times 1$ Vektor. Die Regressionsparameter werden durch die Methode der kleinsten Quadrate ermittelt, wodurch die Summe der Fehlerquadrate minimal wird. Dadurch berechnen sich die Regressionsparameter zu

$$\boldsymbol{\beta} = (\mathbf{X}^T \cdot \mathbf{X})^{-1} \cdot \mathbf{X}^T \cdot \mathbf{Y}. \quad (5.6)$$

Die Regressionsparameter werden verwendet, um die betrachtete Zielgröße für eine beliebige Auswahl von Einflussparameter innerhalb des Versuchsraums vorherzusagen. Für jede Zielgröße müssen die Regressionsparameter separat bestimmt werden. Zur Ermittlung geeigneter Einstellparameter, die alle Anforderungen der betrachteten Zielgrößen erfüllen, muss eine nachfolgende Parameteroptimierung erfolgen.

5.3.2 Parameteroptimierung

Die Optimierung eines Prozesses erfordert eine Funktion, die durch die Ermittlung geeigneter Einflussparameter in ihrem Funktionswert minimiert wird. Durch die Regressionsanalyse wurde eine Beziehung zwischen Einflussgrößen x_j und Zielgrößen y_i ermittelt. Ziel der Optimierung ist es, die Zielgrößen durch das Anpassen der Einflussgrößen einem benutzerdefinierten Wert anzunähern. Dadurch lässt sich die Zielfunktion

$f(x_j)$ folgendermaßen definieren

$$f(x_j) = \sum_i a_i (y_{i,soll} - y_{i,ist}(x_j))^2, \quad j = \text{verschiedene Einflussgrößen.} \quad (5.7)$$

Der Sollwert $y_{i,soll}$ wird durch den Benutzer für jede Zielgröße vorgegeben. Der Istwert $y_{i,ist}$ wird mit Hilfe der Regressionsanalyse aus den Einflussgrößen x_j bestimmt (vgl. Gl. 5.4). Die Quadrierung der Differenz schließt negative Abweichungen aus und erhöht den Einfluss großer Differenzen auf den Funktionswert. Der Vorfaktor a_i wird für jede Zielgröße eingestellt und ermöglicht dadurch eine Gewichtung des Einflusses. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit sind die Gewichtungsfaktoren standardmäßig auf den Wert 1 gesetzt. Die Optimierung der Einflussgrößen in der Zielfunktion wird folgendermaßen beschrieben

$$\min f(\mathbf{x}) \quad \text{mit} \quad \begin{cases} \mathbf{c}_i(\mathbf{x}) = \mathbf{0}, & i \in \mathcal{E} \\ \mathbf{c}_i(\mathbf{x}) \leq \mathbf{0}, & i \in \mathcal{I} \end{cases} \quad (5.8)$$

\mathcal{E} und \mathcal{I} sind Sätze von Indizes für Gleichheits- und Ungleichheitseinschränkungen. Gesucht wird der Vektor \mathbf{x}^* , der alle Einschränkungen erfüllt und gleichzeitig die Funktion $f(\mathbf{x})$ minimiert. Die Einschränkungen ergeben sich durch den beschränkten Versuchsraum der Einflussgrößen und durch die vorgegebenen Toleranzbereiche der Zielgrößen. Jeder Sollwert $y_{i,soll}$ bekommt einen Toleranzbereich, der über die Funktionen \mathbf{c}_i definiert wird. Da die Einflussgrößen in der Optimierung nicht frei wählbar sind, sondern durch den definierten Versuchsraum beschränkt sind, muss ein geeigneter Optimierungsalgorithmus verwendet werden.

Optimierungsalgorithmen sind iterativ und beginnen mit einer ersten Schätzung der Variablen x_j und erzeugen eine Sequenz von verbesserten Schätzungen (Iterationen), bis sie zu einer akzeptablen Lösung gelangen. Die Algorithmen unterscheiden sich im Ablauf der Iterationen. Viele Methoden verwenden die Variablen der Zielfunktion, Einschränkungen und teilweise auch die erste und zweite Ableitung der Funktion. Python[®] stellt zur Minimierung von nichtlinearen Funktionen mit Einschränkungen einen *Sequential Least Square Programming (SLSQP)*-Algorithmus zur Verfügung [75]. Diese gehört zu den effektivsten Methoden bei einer nichtlinearen beschränkten Optimierung, da die Iterationen durch Lösen von quadratischen Unterproblemen generiert werden [12, 46, 75, 102, 111]. Das nichtlineare Problem wird iterativ durch die Gleichung

$$\mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{x}_k + \alpha_k \mathbf{p}_k \quad (5.9)$$

gelöst, wobei α_k die Schrittlänge und \mathbf{p}_k die Suchrichtung im k -ten Schritt beschreiben. Der Startvektor \mathbf{x}_0 wird vorgegeben und in jeder Iteration werden α_k und \mathbf{p}_k berechnet. Der *SLSQP*-Algorithmus ermittelt durch das Lösen eines Unterproblems die Schrittlänge und die Suchrichtung in jeder Iteration. Der Algorithmus verwendet das von Han-Powell modifizierte quasi Newton-Verfahren für die Suchrichtung [42, 103, 129] und eine l_1 -Merit Funktion für die Schrittlänge [51]. Zur detaillierten Erklärung des Optimierungsablaufs wird auf die Arbeit von Kraft [75] verwiesen.

5.4 Prozessoptimierung

5.4.1 Optimierungsablauf

Die Optimierung eines Umformprozesses ist bei einer hinreichend großen prozessspezifischen Datenbank ohne Simulation möglich. Die Optimierung wird komplett innerhalb der Python[®]-Umgebung durchgeführt und muss dadurch nicht auf die Abaqus[®]-Umgebung zugreifen. Werden neue Materialien oder Geometrien außerhalb des maximal zulässigen Versuchsraums der Datenbank gefordert, so sind weitere Simulationen für eine Regressionsanalyse notwendig. Zum Starten der Optimierung sind in der graphischen Benutzeroberfläche zwei Schritte notwendig:

- Die zulässigen Intervalle der Einflussgrößen definieren.
- Die Sollwerte mit entsprechenden Toleranzbereichen der Zielgrößen definieren.

Für die Einflussgrößen in Tabelle 5.1 werden in der graphischen Benutzeroberfläche die maximal zulässigen Variationsgrenzen bei der Optimierung definiert (vgl. Abb. 5.4). Die Startwerte der Optimierung sind abhängig vom betrachteten Prozess und werden im Optimierungsskript automatisch festgelegt, um eine konvergierende Lösung zu garantieren. Die Einflussgrößen können für die Optimierung auch fixiert werden, sodass diese als konstant berücksichtigt werden. Da die graphische Benutzeroberfläche Einstellgrenzen für die Einflussgrößen besitzt, sind dies auch die maximal möglichen Grenzen in der Optimierung, wodurch eine komplett freie Parameteroptimierung generell nicht möglich ist. Die Anforderungen an die Zielgrößen (vgl. Tab. 5.2) werden ebenfalls in der graphischen Benutzeroberfläche durch den geforderten Sollwert und den erlaubten Toleranzbereich definiert (vgl. Abb. 5.5).

Ziel des Optimierungsskriptes ist es, den Funktionswert der Zielfunktion in Gleichung 5.7 in Abhängigkeit der Benutzervorgaben bestmöglich zu minimieren. Für eine erfolgreiche Optimierung ist eine geeignete Definition des erlaubten Toleranzbereiches ein

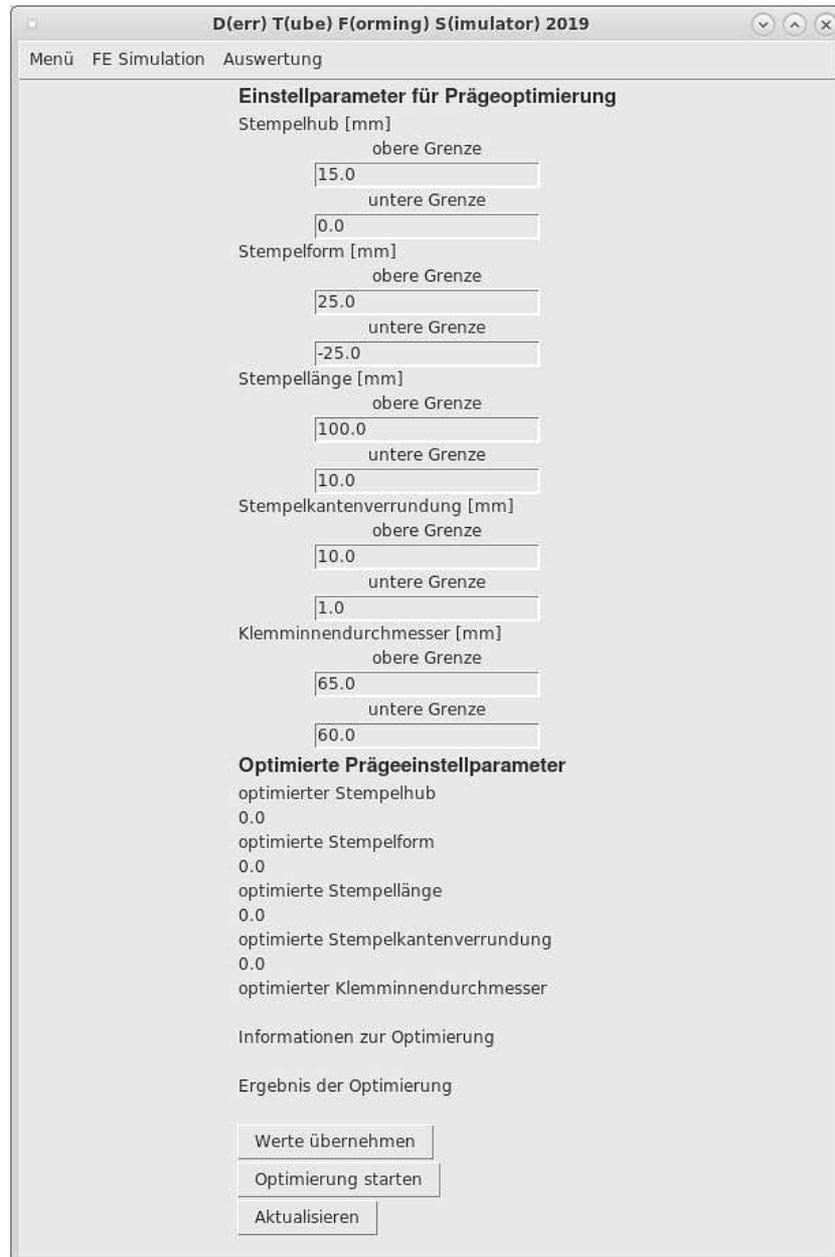


Abbildung 5.4: Einstellung der Parametergrenzen und Ausgabe der optimierten Ergebnisse in der graphischen Benutzeroberfläche "DTFS"

wichtiger Faktor. Zu kleine Toleranzbereiche können bei mehreren zu optimierenden Zielgrößen eine Lösungsermittlung innerhalb des erlaubten Bereiches unmöglich machen. Ein zu großer Toleranzbereich hingegen kann zu einer Lösung führen, die zu weit von den Sollwerten entfernt ist.

Nach der Initialisierung des Optimierungsskriptes erfolgt eine Regressionsanalyse auf Basis der prozessspezifischen Datenbank. Für die Analyse werden alle Parametervariationen der zu optimierenden Einflussgrößen aus der Datenbank verwendet. Für den Optimierungsprozess wird die Zielfunktion $f(x_j)$ aus Gleichung (5.7) in Matrixschreib-

Abbildung 5.5: Einstellung der Anforderungen an das geprägte Rohr in der graphischen Benutzeroberfläche "DTFS"

weise bzw. in Standardform verwendet

$$f(\mathbf{x}) = \frac{1}{2} \mathbf{x}^T \mathbf{G} \mathbf{x} + \mathbf{d} \mathbf{x} + \mathbf{d}_0. \quad (5.10)$$

Die Standardform ist für die Verwendung der *SLSQP*-Methode als Optimierungsprozess in Python[®] notwendig. Durch das Einsetzen der Regressionsgleichung aus Gleichung 5.4 in Gleichung 5.7 ergibt sich durch Umrechnen die Gleichung 5.10. Dabei ist \mathbf{G} eine $n \times n$ Matrix, wobei n die Anzahl der Einflussgrößen ist. Die Größen \mathbf{x} , \mathbf{d} und \mathbf{d}_0 sind $n \times 1$ Vektoren. Die einzelnen Regressionsparameter der Einflussgrößen sind in \mathbf{G} , \mathbf{d} und \mathbf{d}_0 beinhaltet. Für jede Zielgröße in der Zielfunktion wird ein Regressionsparametersatz β bestimmt. Der Optimierungsprozess ermittelt über die Regressionsparameter optimale Einflussgrößen \mathbf{x} , sodass der Funktionswert von Gleichung (5.10) minimal

wird. Dazu wird zusätzlich der Gradientenvektor über die Gleichung

$$\nabla f(\mathbf{x}) = \mathbf{x}^T \mathbf{G} + \mathbf{d} \quad (5.11)$$

verwendet. Die benutzerdefinierten Toleranzbereiche für die Zielfunktionen werden über entsprechende Nebenbedingungen

$$\mathbf{Ax} \leq \mathbf{b} \quad (5.12)$$

festgelegt, wobei die Matrix \mathbf{A} die Regressionsparameter und der Vektor \mathbf{b} die Toleranzen beinhalten. In jeder Optimierungsiteration wird eine neue Vorhersage gemacht und die Zielfunktion und die entsprechenden Nebenbedingungen werden ausgewertet (vgl. Abb. 5.6).

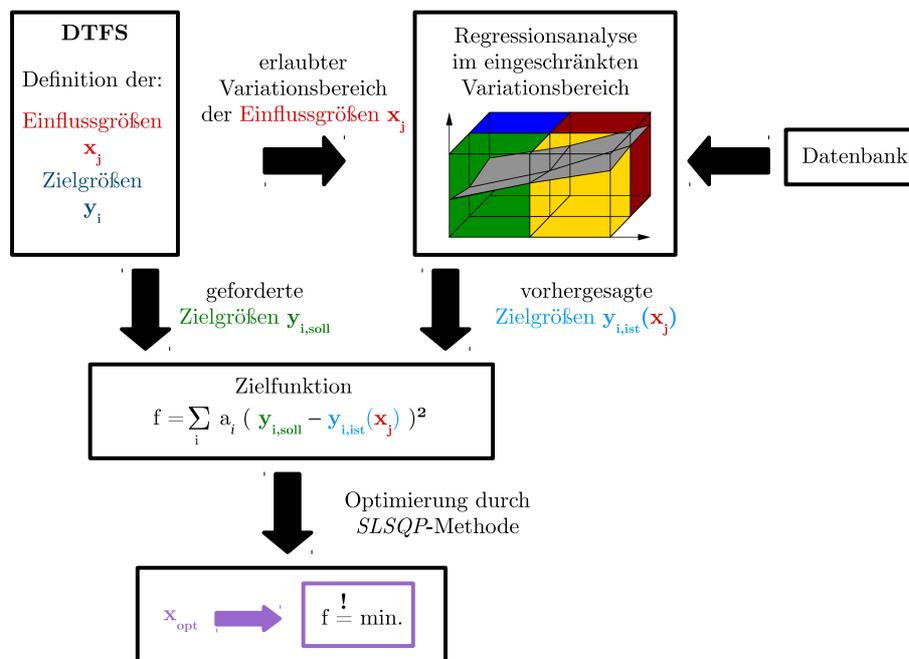


Abbildung 5.6: Optimierungsablauf von der graphischen Benutzeroberfläche *DTFS* ausgehend bis zu den optimierten Einflussgrößen x_{opt}

Zur Bestimmung der optimalen Einflussparameter wird die Optimierung zweimal intern durchgeführt. Im ersten Durchlauf wird zur Bestimmung der Regressionsparameter die komplette Datenbank verwendet und im zweiten Durchlauf wird auf Basis des ersten Durchlaufs der betrachtete Bereich der Datenbank reduziert, um die Qualität der Parameter zu verbessern. Trotz zweifachen Durchlaufs der Optimierung existiert keine Garantie zur Einhaltung der Anforderungsbereiche, da die Optimierung nur mit erfüllbaren Toleranzbereichen sinnvolle Ergebnisse liefern kann. Die Funktionswerte beider Durchläufe werden miteinander verglichen und die Lösung mit dem geringeren Wertes

der Zielfunktion wird übernommen. Die optimierten Einflussparameter werden mit den entsprechenden Zielparameter in der graphischen Benutzeroberfläche ausgegeben (vgl. Abb. 5.4). Durch eine anschließende Simulation mit den optimierten Parametern wird die Optimierungsvorhersage überprüft und das erwartete Umformergebnis visualisiert.

5.4.2 Optimierungsbeispiele

Zur Demonstration des Optimierungsprozesses werden im Folgenden zwei Optimierungsbeispiele diskutiert. Im ersten Optimierungsbeispiel werden die Werkzeugparameter zum Prägen eines geraden Rohres optimiert. Im zweiten Optimierungsbeispiel werden die Werkzeugparameter zum Biegen eines geraden Rohres und die Werkzeugparameter zum Prägen eines gebogenen Rohres optimiert. Dazu werden jeweils folgende Schritte durchgeführt:

- Definition der Anforderungen an die Zielgrößen
- Definition des Variationsbereiches der Einflussgrößen
- Optimierung der Einflussgrößen
- Kontrolle der optimierten Einflussgrößen durch eine nachfolgende Simulation.

Einfache Optimierung des Prägeprozesses

Tabelle 5.9 visualisiert die **Anforderungen an die Zielgrößen** des Prägeprozesses.

Tabelle 5.9: Anforderungsliste für die Optimierung eines einfach geprägten Rohres

Zielgröße	Anforderung
Prägehöhe	52,0 mm \pm 0,3 mm
Prägebreite	61,0 mm \pm 0,5 mm
Prägetiefe	0,1 mm \pm 0,1 mm
min. Länge der effektiven Prägefläche	30,0 mm
Wandstärke	1,2 mm \pm 0,1 mm

Bei einem geforderten Sollwert von 52,0 mm für die Prägehöhe beträgt die effektive Querschnittsminderung 8 mm. Der Toleranzbereich von $\pm 0,3$ mm wird durch die Allgemeintoleranz ISO 2768 -m [32] festgelegt. Die Prägebreite definiert die maximale Breitenausdehnung und ist abhängig vom effektiven Stempelhub, weswegen der Sollwert auf 61 mm festgelegt wird. Eine Vorgabe von 60 mm ist bei der geforderten Quer-

schnittsminderung nicht realisierbar. Da die Prägebreite als Folge der Querschnittsminderung keinen bestimmten Wert erfüllen muss, sondern nur beschränkt wird, wird der Toleranzbereich mit $\pm 0,5$ mm größer als die Toleranz der Prägehöhe gewählt. Das Ziel des Prägeprozesses ist eine möglichst plane Prägefläche, weshalb die Prägetiefe mit $0,1 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$ sehr niedrig gesetzt wird. Da ein Sollwert von $0,0 \text{ mm}$ gerade den Grenzbereich der Zielgröße darstellt, würde dies zu Problemen in der Regressionsanalyse führen, da ein gewisses Toleranzmaß gegeben sein muss. Die Anforderungen an die minimale Länge der effektiven Prägefläche muss durch die Einflussgrößen berücksichtigt werden. Die effektive Länge berechnet sich aus der Differenz von Stempellänge und zweifacher Kantenverrundung. Die Wandstärke wird mit $1,2 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$ vorgegeben.

Zur Realisierung der Anforderungen in Tabelle 5.9 werden die **Variationsbereiche der Einflussgrößen** definiert (vgl. Tab. 5.10).

Tabelle 5.10: Variationsbereiche der Einflussgrößen für die Optimierung eines einfach geprägten Rohres

Einflussgröße	Variationsbereich
Stempelhub	0 - 15 mm
Stempelform	-25 - 0 mm
Stempellänge	40 - 100 mm
Kantenverrundung	1 - 5 mm
Klemminnendurchmesser	60 - 62 mm

Bei den Stempelformen wird die konvexe Stempelgeometrie ausgeschlossen, da sie aufgrund der bisherigen Erfahrungen die Anforderungen nicht realisieren kann. Die minimale Stempellänge wurde auf 40 mm festgelegt, sodass auch bei einer Beschränkung der Kantenverrundung auf maximal 5 mm die Forderung nach einer minimalen Länge weiterhin erfüllt bleibt. Der maximale Innendurchmesser der Rohrklemmung wird auf 62 mm festgelegt, da größere Durchmesser tendenziell dem Rohr zu viel Freiraum bieten. Der Stempelhub ist bis 15 mm frei wählbar.

Die **Optimierung** dauert im Schnitt ca. 5 Sekunden und liefert einen Funktionswert der Zielfunktion von 0,008, was das Gesamtresiduum kennzeichnet (vgl. Abb. 5.7). Je komplexer die Vorgaben werden, desto größere Residuen müssen toleriert werden. Für den einfachen Prägeprozess wurde die Grenze auf einen Maximalwert von 0,1 gesetzt. Während der Optimierung waren insgesamt 12 Iterationen notwendig, wobei 13 mal der Funktionswert und 8 mal der Gradient ausgewertet wurde. Bei einem Residuum über 0,1 oder bei Zielgrößen außerhalb des Toleranzbereiches, muss eine weitere Optimierung mit geänderten Toleranzbereichen durchgeführt werden. Obwohl die Ergebnisse

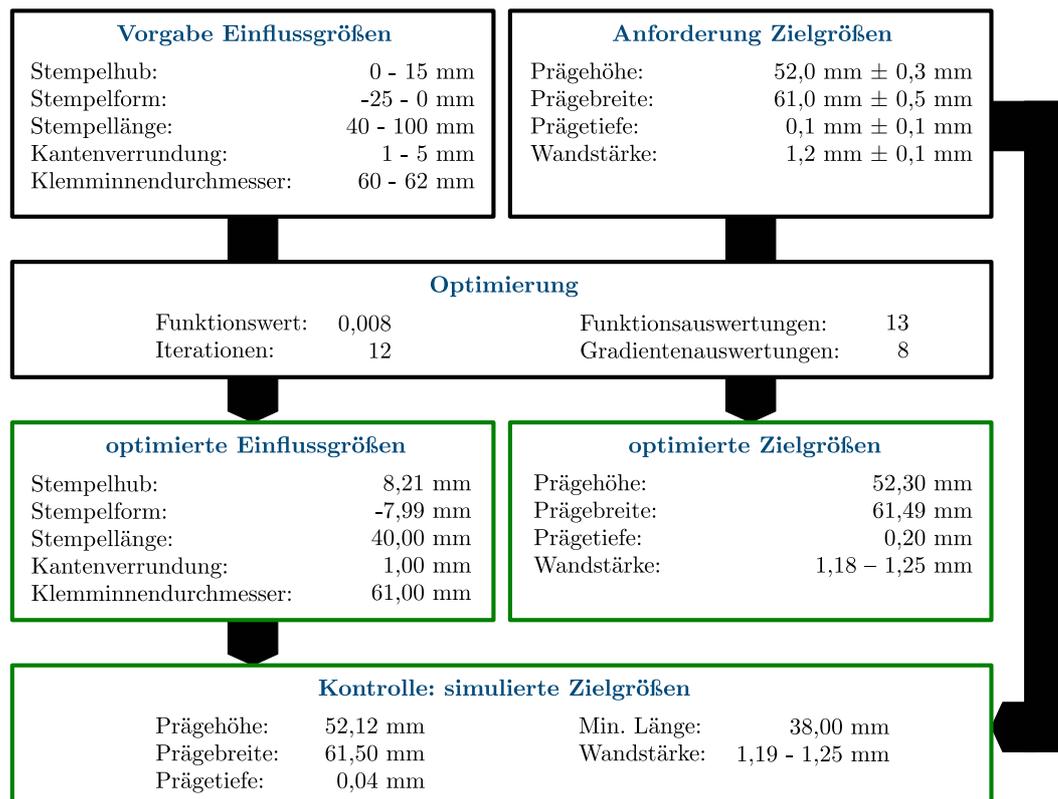


Abbildung 5.7: Ergebnis der Prägeoptimierung gerader Rohre durch Vorgabe des Variationsbereiches der Einflussgrößen und der Anforderungen an die Zielgrößen; Kontrolle der optimierten Ergebnisse durch eine nachfolgende Simulation

an den Grenzen der erlaubten Toleranzbereiche liegen, können die Anforderungen erfüllt werden.

Die optimierten Einstellparameter werden **durch eine Simulation überprüft**, da die *multiple lineare Regressionsanalyse* Näherungswerte liefert und die Qualität abhängig ist von dem Informationsgehalt der Datenbank. Die Simulationsergebnisse weichen geringfügig von den vorhergesagten Ergebnissen ab, befinden sich aber alle weiterhin im geforderten Toleranzbereich. Die optimierte Prägefläche ist in Abbildung 5.8 dargestellt. Die Geometrie weist keine Prägetiefe auf und erfüllt die notwendigen Anforderungen. Da die Abweichungen zwischen Vorhersage und Simulation sehr gering sind, ist die Optimierung in der Lage, ohne zusätzliche Simulation sehr gute Vorhersagen bezüglich des zu erwarteten Prägeergebnisses zu liefern.

Zusammenfassung:

Die **Optimierung des einfachen Prägeprozesses** liefert innerhalb weniger Sekunden optimierte Werkzeugparameter, die die benutzerdefinierten Anforderungen erfüllen können. Die Kontrolle der Werkzeugparameter durch eine nachfolgende Simulation bestätigt die Vorhersage.

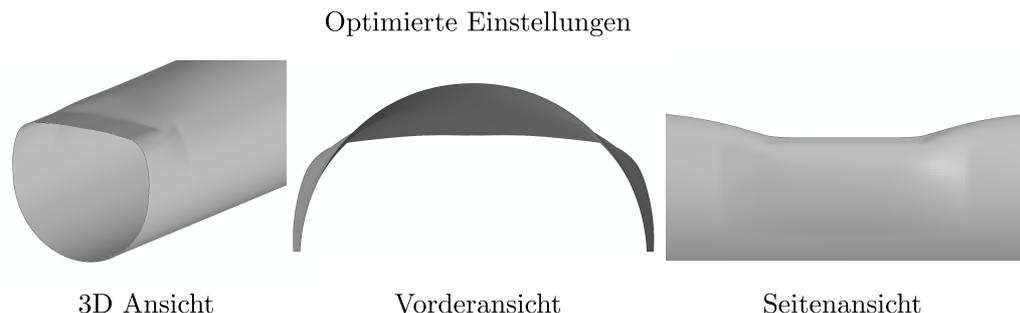


Abbildung 5.8: Prägefläche aus unterschiedlichen Blickwinkel der Simulation mit optimierten Einstellungen

Komplexe Optimierung der Kombination aus Biegen und Prägen

Der zweistufige Umformprozess besteht aus einem Biegevorgang und einem anschließendem Prägevorgang an drei unterschiedlichen Positionen des gebogenen Rohres. Die zweistufige Optimierung erfordert die Optimierung der einzelnen Umformprozesse nach benutzerdefinierten Anforderungen.

Optimierung Biegeprozess

Die **Anforderungen** an den Biegeprozess sind in Tabelle 5.11 aufgelistet.

Tabelle 5.11: Anforderungsliste der Optimierung eines einfach gebogenen Rohres

Zielgröße	Anforderung
Biegewinkel	$25,0^\circ \pm 0,3^\circ$
Rohrhöhe	$59,5 \text{ mm} \pm 0,3 \text{ mm}$
Rohrbreite	$60,3 \text{ mm} \pm 0,3 \text{ mm}$
Rohrtiefe	$0,0 \text{ mm} \pm 0,0 \text{ mm}$
Ovalität	$0,6 \text{ mm} \pm 0,5 \text{ mm}$
Biegeradius	110,0 mm
Wandstärke	$1,2 \text{ mm} \pm 0,3 \text{ mm}$

Die Anforderungen an den Biegewinkel und an den Biegeradius ergeben sich aus dem geforderten Biegebogen. Der Biegebogen wird fest definiert, da im nachfolgenden Prägeprozess eine Rohrklemmung mit dem entsprechenden Maß verwendet werden muss. Somit muss der geforderte Biegewinkel bestmöglich im Toleranzbereich realisiert werden, damit das Rohr in der Klemmung positioniert werden kann. Die Rohrhöhe und die Rohrbreite definieren die maximal erlaubten Änderungen der Rohrgeometrie im Biegebereich. Die Vorgabe eines Sollwertes von 59,5 mm für die Höhe bzw. 60,3 mm für die

Breite berücksichtigen bereits ein kleines Maß an Ovalisierung. Eine Ovalisierung des Rohrquerschnitts im Biegebereich ist, trotz Verwendung eines Biegedorns, nicht zu verhindern. Die Zielgröße der Ovalisierung wird zusätzlich vorgegeben, um das Verhältnis von Rohrbreite zu Rohrhöhe an jeder Stelle des Biegebereiches zu kontrollieren. Ein Einfall des Rohraußenbogens muss durch den Biegedorn komplett verhindert werden, weshalb die Rohrtiefe keinen Toleranzbereich hat. Der Toleranzbereich der Wandstärke wird im Vergleich zum Prägeprozess etwas vergrößert, da die Ausprägung der Wandstärkenextrema im Biegeprozess größer ist.

Der erlaubte **Variationsbereich der Einflussgrößen** ist in Tabelle 5.12 dargestellt.

Tabelle 5.12: Variationsbereiche der Einflussgrößen der Optimierung eines einfach gebogenen Rohres

Einflussgröße	Variationsbereich
Einstellwinkel	0 - 30°
Biegeradius	110 mm
Dorndurchmesser	56,8 - 57,6 mm
Kugeldicke	10 - 50 mm
Kugelabstand	2 - 10 mm
Schaftposition	1 - 9 mm

Der Einstellwinkel lässt sich bis 30° variieren, während der Biegeradius fest auf 110 mm festgelegt wird. Im Rahmen der Optimierung wird der Biegedorn mit einer Dornkugel verwendet (vgl. Abb. 4.27 (c)). Die Variationsgrenzen der einzelnen Größen entsprechen denen aus Kapitel 5.2.2.

Die **Optimierung** des Biegeprozesses dauert im Schnitt ca. 10 Sekunden und liefert für das betrachtete Beispiel einen Funktionswert von 0,683, wofür 66 Iterationen notwendig waren (vgl. Abb. 5.9). Der im Vergleich zum Prägeprozess gestiegene Funktionswert und die größere Anzahl an notwendigen Iterationen deuten auf eine erschwerte Realisierung der Anforderungen hin. Zur Ermittlung der optimierten Parameter waren 344 Funktionsauswertungen (Prägeoptimierung: 13) und 66 Gradientenauswertungen (Prägeoptimierung: 8) notwendig. Dennoch können alle Anforderungen realisiert werden. Der Kugeldurchmesser wurde auf 57,36 mm optimiert und liegt sehr nah am Wert der Faustformel von 57,348 aus Gleichung 5.2. Somit liefert die Faustformel bereits einen sehr guten Richtwert. Bei der Schaftpositionierung wurde ein optimaler Wert von 3,90 mm ermittelt. Die Faustformel aus Gleichung 5.3 errechnete einen optimalen Bereich für die Positionierung zwischen 3,53 mm und 4,70 mm. Somit liefert diese Faustformel ebenfalls einen hervorragenden Richtwert.

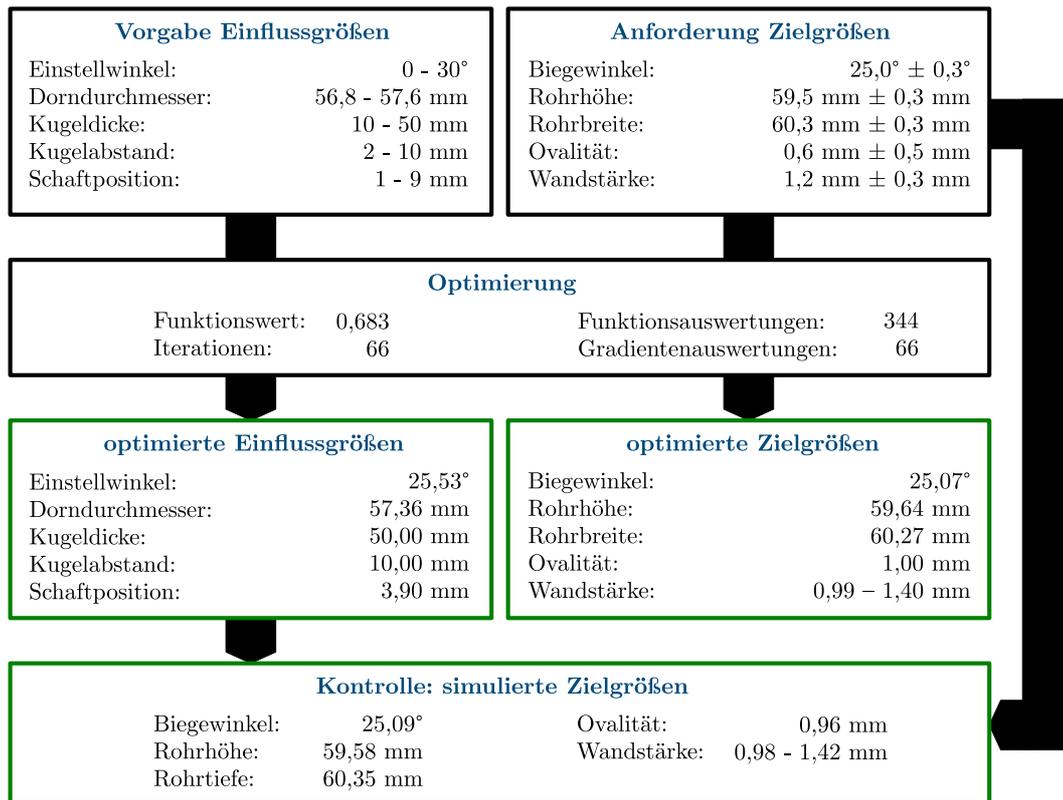


Abbildung 5.9: Ergebnis der Biegeoptimierung gerader Rohre durch Vorgabe des Variationsbereiches der Einflussgrößen und der Anforderungen an die Zielgrößen; Kontrolle der optimierten Ergebnisse durch eine nachfolgende Simulation

Die **Überprüfung der Einflussparameter** bestätigt durch eine nachfolgende Simulation das Ergebnis der Optimierung. Alle Zielgrößen befinden sich im geforderten Toleranzbereich und auch die Abweichungen zwischen Vorhersage und Simulation sind geringfügig. Durch die Realisierung aller Anforderungen an den Biegeprozess, lassen sich die optimierten Parameter für die nachfolgende Prägeoptimierung verwenden.

Optimierung Prägeprozess

Beim Prägeprozess werden an alle drei Prägepositionen dieselben **Anforderungen an die Zielgrößen** gestellt (vgl. Tab. 5.13). Die geforderte Querschnittsminderung wird auf 6 mm festgelegt, wodurch eine Prägehöhe von $54 \text{ mm} \pm 0,3 \text{ mm}$ realisiert werden soll. Die entsprechende Verbreiterung des Rohres wird auf einen Bereich von $60,3 \text{ mm} \pm 0,3 \text{ mm}$ beschränkt. Die Prägebreite wird deutlich näher zum Ausgangswert von 60,0 mm gesetzt als noch bei der einfachen Prägeoptimierung, weil der Stempel deutlich kleiner ist und somit die Prägebreite mit größer werdendem Hub nicht so stark ansteigt (vgl. Tab. 5.4). Der Toleranzbereich der Prägetiefe wird mit $0,2 \text{ mm} \pm 0,2 \text{ mm}$ größer gewählt, da die einzelnen Positionen unterschiedliche Ausgangssituationen be-

Tabelle 5.13: Anforderungsliste der Optimierung des Prägeprozesses eines gebogenen Rohres

Zielgröße	Anforderung
Prägehöhe 1 / 2 / 3	54,0 mm \pm 0,3 mm
Prägebreite 1 / 2 / 3	60,3 mm \pm 0,3 mm
Prägetiefe 1 / 2 / 3	0,2 mm \pm 0,2 mm
min. Länge der effektiven Prägefläche	8,0 mm
Biegewinkel nach dem Prägen	25,0° \pm 0,3°
Wandstärke	1,2 mm \pm 0,3 mm

sitzen und für alle die gleichen Anforderungen gelten sollen. Die Länge der effektiven Prägefläche wird auf 8 mm festgelegt, da die Stempellänge 10 mm und die Kantenverrundung 1 mm beträgt (vgl. Kap. 5.2.3). Der finale Biegewinkel darf auch nach dem Prägeprozess nicht mehr als $\pm 0,3^\circ$ vom Sollwert abweichen. Die Wandstärkenanforderung bleibt aus der Biegeoptimierung bestehen.

Der **Variationsbereich der Einflussgrößen** wird analog zu den Zielgrößen aller drei Stempel gleichermaßen vorgegeben (vgl. Tab. 5.14).

Tabelle 5.14: Variationsbereich der Einflussgrößen der Optimierung des Prägeprozesses eines gebogenen Rohres

Einflussgröße	Variationsbereich
Stempelhub 1 / 2 / 3	0 - 15 mm
Stempelform 1 / 2 / 3	-10 - 0 mm
Stempellänge	10 mm
Kantenverrundung	1 mm
Klemminnendurchmesser	60 - 62 mm

Die Variationsgrenzen betragen für die Stempelformen -10 mm und 0 mm und für den Klemminnendurchmesser 60 mm und 62 mm. Da die graphische Benutzeroberfläche nur einen einheitlichen Klemminnendurchmesser für die Simulationen zulässt, wird die Optimierung auf einen einzelnen Wert beschränkt. Die Optimierung kann jedoch grundsätzlich für jede Position einen eigenen optimierten Wert für den Klemminnendurchmesser ermitteln. Dadurch muss dieser Wert bestmöglich auf alle drei Positionen abgestimmt werden, was die positionsabhängigen Anforderungen an Stempelhub und Stempelform erschweren.

Der **Optimierungsprozess** dauert für den vorliegenden Fall ca. 10 Sekunden und liefert einen Funktionswert von 0,224 (110 Funktionsauswertungen und 62 Gradientenauswertungen) (vgl. Abb. 5.10).

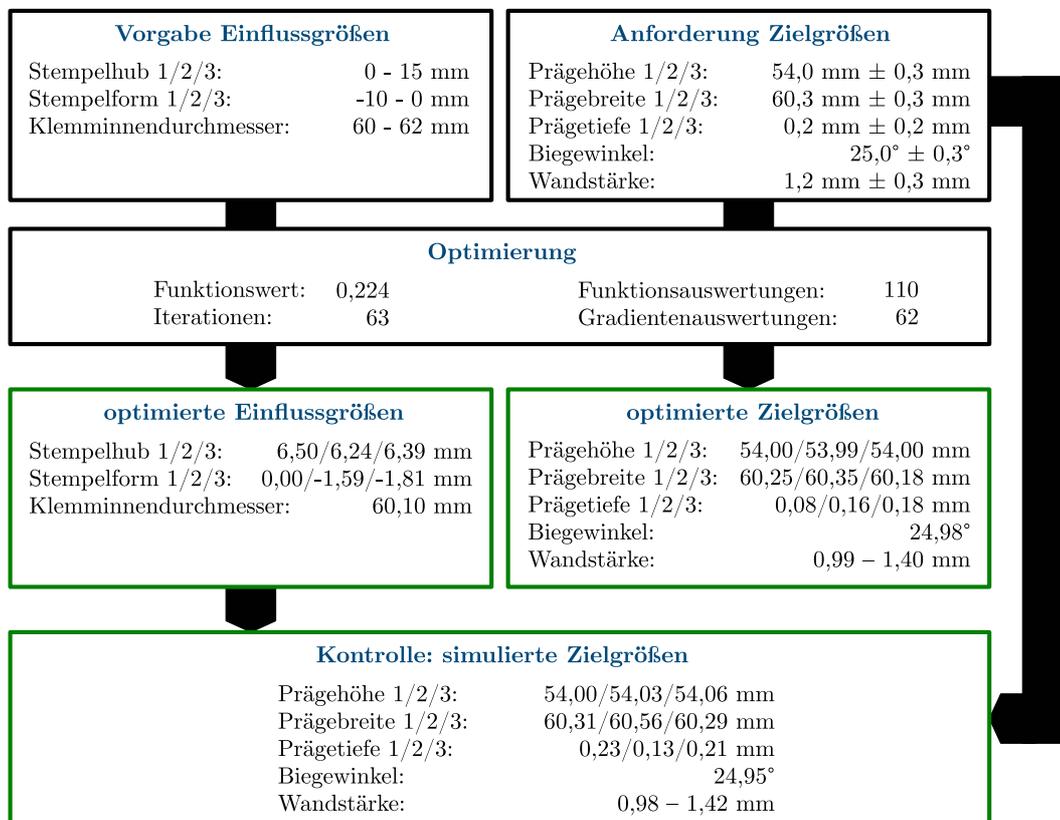


Abbildung 5.10: Ergebnis der Prägeoptimierung gebogener Rohre durch Vorgabe des Variationsbereiches der Einflussgrößen und der Anforderungen an die Zielgrößen; Kontrolle der optimierten Ergebnisse durch eine nachfolgende Simulation

Um auf Basis der optimierten Biegestruktur eine Optimierung der Prägewerkzeuge durchzuführen, werden in der Prägeoptimierung zusätzlich die Biegeinformationen aus der Datenbank verwendet. Die Optimierung liefert für die drei Prägepositionen unterschiedliche Stempelhuber und unterschiedliche Stempelformen. Im ungebogenen Bereich wurde eine ebene Stempelform ermittelt, während im Übergangsbereich und im Biegebereich eine leicht konkave Form bestimmt wurde. Die Optimierung des Klemminnendurchmessers ergibt einen Wert von 60,1 mm, wodurch ein Freiraum von 0,1 mm existiert. Für jede Prägeposition liegen die vorhergesagten Zielparameter im erlaubten Toleranzbereich.

Die **Überprüfung der vorhergesagten Zielgrößen** erfolgt durch eine nachfolgende Simulation und bestätigt die Vorhersage der Optimierung. Die Abweichungen zwischen Optimierung und Simulation sind sehr gering, wodurch alle Ergebnisse im geforderten Toleranzbereich liegen. Die komplette Anforderungsliste der zweistufigen Optimierung konnte erfüllt werden. Dadurch wurden die entsprechenden Einflussparameter inner-

halb von 20 Sekunden ermittelt. Abbildung 5.11 visualisiert das Umformergebnis der zweistufigen Optimierung. Der Informationsgehalt in der prozessspezifischen Datenbank und die Forderung nach realistischen Anforderungen an die Zielgrößen sind die Voraussetzungen für den Erfolg der Optimierung. Der Informationsgehalt wird durch eine hohe Anzahl an vorherigen Simulationen erreicht, die zudem ein breites Spektrum an Werkzeugvariationen aufweisen. Realistische Anforderungen beinhalten die Vorgabe sinnvoller Bereiche für Einflussgrößen und für Zielgrößen. Dazu dürfen sich einzelne Bedingungen nicht gegenseitig ausschließen und die Einschränkungen des Optimierungsprozesses sollten realistisch sein. Je komplexer die zu optimierenden Umformprozesse werden und je mehr Einflussgrößen optimiert werden sollen, desto wichtiger sind diese Voraussetzungen zum Erhalt einer realitätsnahen Vorhersage.

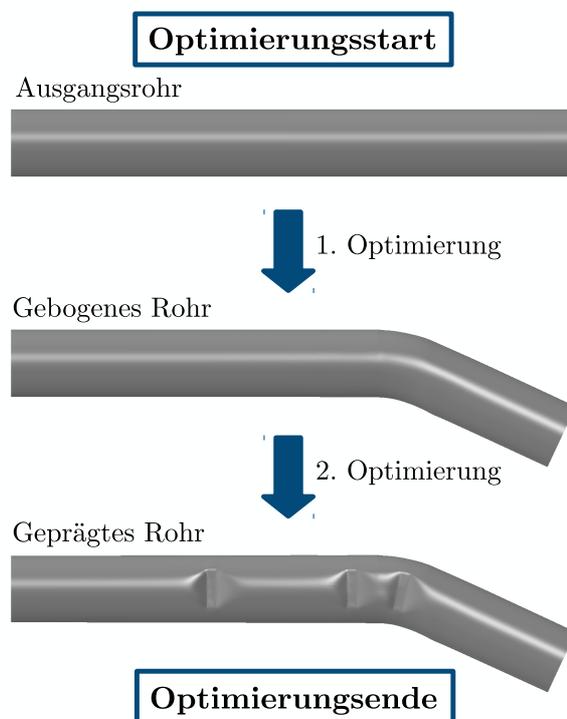


Abbildung 5.11: Simulationsergebnisse der Biegeoptimierung und der nachfolgenden Prägeoptimierung

Zusammenfassung:

Das Optimierungstool ist in der Lage innerhalb kürzester Zeit optimierte Einflussparameter für **kombinierte Umformprozesse** zu generieren. Individuelle Werkzeugeinstellungen konnten für die unterschiedlichen Prägepositionen ermittelt werden, sodass alle Anforderungen an das zweifach umgeformte Rohr hervorragend erfüllt wurden.

5.5 Diskussion der Umformoptimierung

Im vorliegenden Kapitel wurde mittels der Werkzeugvariation der einzelnen Umformprozesse die Grundlage für die Optimierung gelegt. Die Ermittlung geeigneter Werkzeugeinstellungen wurde durch das Optimierungstool anhand zweier Beispiele demonstriert. Dazu wurden ein einfacher Prägeprozess und ein zweistufiger Umformprozess aus Biegen und Prägen ausgewählt. Nachfolgend werden die wichtigsten Erkenntnisse zusammengefasst:

- Für den **Prägeprozess** wurden die Stempelform, die Stempellänge, die Kantenverrundung des Stempels und der Klemminnendurchmesser verändert. Die Stempelform erwies sich als einer der Haupteinflussfaktoren auf das Prägeergebnis. Mit einer konvexen Stempelform war grundsätzlich kein brauchbares Umformergebnis möglich. Die ebenen und schwach konkav gekrümmten Flächen erwiesen sich als beste Option zum Prägen eines Rohres. Die Stempellänge definiert zusammen mit der Kantenverrundung die effektiv geprägte Fläche und ist dadurch oftmals als Anforderung vorgegeben. Eine steigende Stempellänge führt zu einem deutlichen Anstieg der Prägebreite und der Prägetiefe, wodurch das Umformergebnis verschlechtert wird. Im Längenbereich zwischen 100 mm und 400 mm traten zudem Unterschiede in der Ausprägung des Prägebereiches auf. Die Entwicklung der Prägetiefe wurde mit steigender Kantenverrundung deutlich reduziert. Ein erhöhter Klemminnendurchmesser erzeugte einen zusätzlichen Freiraum um das Rohr. Ein zu großer Freiraum hatte einen hohen Anstieg der Prägehöhe und der Prägebreite zur Folge. Die Prägetiefe hingegen wurde stark reduziert.
- Der **Biegeprozess** wurde mit einem eingliedrigem Biegedorn durchgeführt. Die Werkzeugvariation des Biegeprozesses umfasste den Biegeradius, den Dorndurchmesser, die Kugeldicke, den Kugelabstand und die Schaftposition. Der Biegeradius hatte nur einen sehr geringen Einfluss auf das Biegeergebnis. Für den Dornschaft und die Dornkugel wurde ein einheitlicher Durchmesser verwendet. Ein Mindestmaß an Freiraum zwischen Rohrinne Durchmesser und Dorndurchmesser musste gegeben sein, da sonst eine fehlerhafte Umformung stattfand. Zu viel Freiraum hingegen führte zu einer unzureichenden Unterstützung durch die Dornkugel im Biegebereich. Ein ähnlicher Effekt ergab sich durch die Verringerung der Kugeldicke und durch die Reduzierung des Kugelabstandes zum Schaft. Beide Einflüsse führten während der Umformung zu einer zu geringen Unterstützung des Biegebereichs. Daher musste die Kugel eine ausreichende Dicke aufweisen und weit genug im Biegebereich positioniert werden. Die Positionierung der Schaftspitze erfolgte hinter der Tangentiallinie, um das Rohr im Bereich der Tangential-

linie optimal zu stützen. Eine Positionierung in Richtung Biegebereich verbesserte die Rohrhöhe leicht.

- Die Untersuchung des **Prägeprozesses gebogener Rohre** beinhaltete neben der Variation der Prägwerkzeuge auch die Variation des Biegebogens. Die Definition der Klemmvorrichtung erforderte zusätzliche Untersuchungen unterschiedlicher Biegeradien und Biegewinkel. Die Änderung des Biegeradius hatte keine Auswirkungen auf das Prägeergebnis. Mit steigendem Biegewinkel wurde der Biegebereich verändert und beeinflusste dadurch auch die nachfolgende Prägeumformung. Die Prägehöhe wurde dadurch tendenziell erhöht, wohingegen die Prägetiefe reduziert wurde.

Im Rahmen des Prägeprozesses wurden die Stempelformen der drei untersuchten Positionen und der einheitliche Klemminnendurchmesser variiert. Eine stärker werdende konkave Krümmung des Stempels führt tendenziell zu einer Reduzierung der Prägehöhen, einer teilweisen Steigerung der Prägebreiten und zu einer nicht eindeutigen Tendenz bei den Prägetiefen. Mit einem gleichzeitigen Anstieg des Biegewinkels überlagern sich beide Einflüsse, was eine Vorhersage erschwert. Eine Erhöhung des Klemminnendurchmessers führt bei kleinem Stempelhub zu einem deutlichen Anstieg der Prägehöhe, der Prägebreite und der Prägetiefe. Mit steigendem Stempelhub hingegen ist für die Prägehöhe und die Prägetiefe der gegenläufige Trend zu erkennen. Mit steigendem Biegewinkel werden einzelne Tendenzen leicht beeinflusst, der Einfluss des Klemminnendurchmessers bleibt jedoch dominant. Bei einer gleichzeitigen Variation der Stempelform und des Klemminnendurchmessers wurden die Prägeergebnisse wesentlich durch die Klemmung beeinflusst. Die zusätzliche Erhöhung des Biegewinkels lässt zwar die ursprünglichen Tendenzen stellenweise noch erkennen, erschwert aber bereits eine eindeutige Vorhersage. Obwohl lediglich vier Einflussgrößen betrachtet wurden, zeigen sich bereits große Unterschiede in den Tendenzen der einzelnen Positionen. Die Vermischung der Einflüsse macht eine Vorhersage extrem anspruchsvoll und somit eine Optimierung notwendig.

- Eine **Prägeoptimierung am geraden Rohr** wurde auf Basis benutzerdefinierter Anforderungen durchgeführt. Dabei erwies sich vor allem die Vorgabe einer planen Prägefläche und somit einer sehr geringen Prägetiefe als schwierigste Anforderung. Eine Beschränkung der Stempellänge war notwendig, um die minimale Längenanforderung des geprägten Bereiches zu erfüllen. Die Optimierung konnte innerhalb von Sekunden Werkzeugparameter ermitteln, die die Anforderungen erfüllen.

- Der **kombinierte Umformprozess aus Biegen und Prägen** erforderte eine aufeinanderfolgende Optimierung der beiden einzelnen Prozesse. Aufgrund der Anforderungen an den Biegeprozess musste trotz Verwendung eines Biegedorns eine leichte Ovalisierung des Rohres berücksichtigt werden. Die Fixierung des Biegeradius war aufgrund der Klemmvorrichtung im Prägeprozess notwendig. Die Optimierung lieferte hervorragende Ergebnisse, die durch eine nachfolgende Simulation bestätigt werden konnten. Der Prägeprozess erfolgte an drei unterschiedlichen Positionen. An die Zielgrößen der drei Positionen wurden die gleichen Anforderungen gestellt. Für jede Position wurden die Stempelform und der Stempelhub individuell optimiert. Der Klemminnendurchmesser wurde aufgrund der entsprechenden Umsetzung in der graphischen Benutzeroberfläche einheitlich optimiert. Im gebogenen Teil des Rohres ergaben sich schwach konkav gekrümmte Stempelflächen, wohingegen im geraden Bereich eine ebene Stempelform ermittelt wurde. Trotz der hohen Anzahl von Einflussfaktoren konnten Ergebnisse realisiert werden, die die gegebenen Anforderungen erfüllen. Eine Überprüfung der optimierten Einflussgrößen durch eine nachfolgende Simulation konnte das Ergebnis bestätigen.
- In diesem Kapitel wurden durch Werkzeugvariationen erfolgreich prozessspezifische Datenbanken erzeugt, mit denen innerhalb kürzester Zeit eine **Optimierung der Umformwerkzeuge** realisiert werden kann. Dadurch konnte die Funktionalität des Optimierungstools bestätigt werden.

6

Zusammenfassung und Ausblick

6.1 Darstellung der erzielten Ergebnisse

Obwohl die Fahrzeugindustrie zurzeit viel Geld in die Entwicklung der Elektromobilität investiert, wird in der unmittelbaren Zukunft der Verbrennungsmotor weiterhin den Markt anführen. Eine der größten Herausforderungen in der aktuellen Entwicklung der Automobilindustrie ist der Leichtbau. Obwohl Fahrzeuge immer größer und komplexer werden, müssen bei den einzelnen Elementen das Gewicht und somit auch die Kosten stetig reduziert werden. Bei der Herstellung von Abgasrohren ist eine Folge davon die Verwendung dünnwandiger Rohre, was wiederum den Umformprozess der Rohre deutlich erschwert. Zusätzlich führt die steigende Anzahl an Komponenten zu einem Platzmangel im Unterbodenbereich des Fahrzeugs, was eine flexiblere Gestaltung der Rohrgeometrie erfordert. Um diesen steigenden Anforderungen gerecht zu werden und diese gleichzeitig kostengünstig realisieren zu können, bedarf es vermehrt dem Einsatz von prozessgestützten und prozessbegleitenden Simulationen.

Ziel der Arbeit war die Entwicklung eines simulationsgestützten Optimierungstools für Rohrbiege- und Rohrprägewerkzeuge. Aufgrund des geplanten Einsatzes in kleinen und mittleren Unternehmen wurde eine **graphische Benutzeroberfläche** entwickelt, die die entsprechenden Simulationsmodelle durch einfache Parametervariationen automatisiert aufbaut. Eine Entkopplung der Benutzeroberfläche von der Simulationssoftware Abaqus[®] war notwendig, damit eine große Anzahl von Benutzern das Simulationstool bedienen kann, ohne Hintergrundwissen über die Simulationssoftware zu benötigen. Die Simulationsergebnisse wurden mit den experimentellen Ergebnissen verglichen, um die Simulationsmodelle zu validieren. Vereinfachungen in den Randbe-

dingungen und die Modellierung des Werkstücks mit Nennmaßen sind unter anderem Gründe für Abweichungen zwischen Experiment und Simulation. Während Vereinfachungen in den Randbedingungen zur Reduzierung der Simulationsdauer notwendig und somit aus numerischer Sicht gerechtfertigt sind, sind chargenbedingte Werkstücktoleranzen ein großes Problem bei der numerischen Modellierung. Die Modellierung des Werkstücks erfolgt standardmäßig mit Nennmaßen, weil die Abweichungen im Vorhinein oftmals nicht bekannt sind und sich mit unterschiedlichen Werkstückchargen ändern können. Daher können die realen Randbedingungen niemals exakt dargestellt werden. Vielmehr soll die Simulation den erwartenden Ergebnisbereich einschränken können und somit den Aufbau des realen Prozesses beschleunigen. Die **Validierung der Simulationsmodelle** des Biegens und des Prägens wurde erfolgreich mit Nenngrößen des Werkstücks realisiert. Die experimentellen Ergebnisbereiche konnten durch die Simulationsergebnisse sehr gut eingeschränkt werden und ermöglichen dadurch eine realitätsnahe Vorhersagemöglichkeit.

Dennoch wurde untersucht, ob gewisse **Werkstücktoleranzen** das Umformergebnis verschlechtern und somit eine Vorhersage mit Nennmaßen als ungeeignet einstufen. Der einfache **Prägeprozess** wurde durch verschiedene Werkstücktoleranzen nur leicht im Umformergebnis beeinflusst, daher kann eine Simulation mit Nennmaßen das Prägeergebnis sehr gut einschränken. Der **Biegeprozess** hingegen erwies sich ohne die Verwendung eines Biegedorns als sehr fehleranfällig gegenüber produktionsbedingter Abweichungen im Rohrquerschnitt. Sowohl Abweichungen im Rohraußendurchmesser als auch Anfangsovalitäten führten zu unterschiedlichen Arten von Faltenwurf im Innenbogen. Die Umformfehler konnten bei geeigneter Berücksichtigung der Randbedingungen im Simulationsmodell realitätsnah abgebildet werden. Simulationsmodelle können somit im Vorhinein verwendet werden, um solche Umformfehler vorherzusagen und dadurch im realen Prozess zu verhindern, was gerade bei neu geplanten Prozessabläufen sinnvoll ist. Die **Verwendung eines Biegedorns** ist notwendig, um grundsätzlich den Einfall des Rohrquerschnitts im Außenbogen zu verhindern. Trotz der Verwendung eines Biegedorns führt eine Anfangsovalität des Rohres und eine erhöhte Reibung zwischen Rohr und Biegedorn zu einem Faltenwurf. Bei der **Kombination aus Biegen und Prägen** wurde das gebogene Rohr an drei unterschiedlichen Positionen geprägt. Erneut beeinflussten Abweichungen im Rohrquerschnitt das Umformergebnis negativ. Während ovale Anfangsquerschnitte des Rohres bereits im Biegeprozess zu Umformfehlern führten, lieferten Abweichungen im Anfangsaußendurchmesser teils erhebliche Ergebnisabweichungen. Obwohl weitere Aspekte wie Materialparameter, Anfangseigenstressspannungen und Reibungseinflüsse untersucht wurden, führten im Wesentlichen nur Abweichungen im Rohrquerschnitt bei fehlender Berücksichtigung zu negativen Auswirkungen im Umformergebnis. Die Simulationen stellen somit ein geeignetes Hilfsin-

strument dar, um negative Auswirkungen im realen Prozessaufbau mittels geeigneter Maßnahmen zu verhindern.

Neben der Möglichkeit von prozessergänzenden Simulationen ist eine zuverlässige **Optimierung der Umformwerkzeuge** auf Basis von benutzerdefinierten Anforderungen eines der Kernpunkte der entwickelten graphischen Benutzeroberfläche. Die Untersuchung der Werkstückeinflüsse setzt in der Regel den Aufbau des Prozesses mit ausgewählten Werkzeugeinstellungen voraus. Da die Ermittlung geeigneter Werkzeugeinstellungen das Ziel des entwickelten Optimierungstools ist, musste der Einfluss verschiedener Werkzeugparameter auf den jeweiligen Umformprozess untersucht werden. Dazu wurde ermittelt, welche Werkzeugvariationen einen positiven Einfluss auf das Umformergebnis besitzen. Zusätzlich wird mittels der Ergebnisse eine prozessspezifische Datenbank aufgebaut, die die Grundlage für die Optimierung darstellt. Die Optimierung der Werkzeugparameter erfolgt durch die Vorgabe der Anforderungen an das umgeformte Rohr und durch eine Einschränkung der Einflussgrößen aufgrund bestimmter Vorgaben. Ein digitales Optimierungstool wurde geschaffen, das über eine graphische Benutzeroberfläche eine vollständig automatisierte Ermittlung von Werkzeugparameter zur Rohrumformung ermöglicht. Das Optimierungstool beschleunigt dadurch erheblich die Entwicklung neuer Werkzeuggeometrien, wodurch die notwendige Anzahl an realen Versuchen verringert und dadurch Ressourcen und Zeit eingespart werden können.

Im Optimierungstool konnten innerhalb von wenigen Sekunden geeignete Werkzeugeinstellungen im **Prägeprozess** ermittelt werden. Aufgrund der Forderung nach einer planen Prägefläche in der Industrie sind ebene und leicht konkave Stempelflächen notwendig. Eine gezielte Änderung des Klemminnendurchmessers konnte den Materialfluss und auch das Ergebnis positiv beeinflussen. Tendenziell kann durch die Verringerung der Stempellänge die Verbreiterung und der Einfall der Prägefläche reduziert werden. Hierbei sind der Klemminnendurchmesser durch den Außendurchmesser des Rohres und die Stempellänge durch die Mindestlänge der Prägefläche beschränkt. Das **Biegeergebnis** wird aufgrund der gegebenen Rohrgeometrie und der Verwendung eines Biegedorns nur geringfügig durch den Biegeradius beeinflusst. Die Geometrie und die Positionierung des Biegedorns hingegen beeinflussen das Biegeergebnis stark. Zur Verhinderung von Umformfehlern musste ein Spalt zwischen Rohr und Biegedorn berücksichtigt werden. Der Biegeprozess beeinflusst durch den Rohrbogen und die Vordeformationen den nachfolgenden Prägeprozess. Zur Realisierung des geforderten Rohrbogens und zur Reduzierung der Ovalisierung wurden geeignete Einstellparameter mittels des Optimierungstools ermittelt. Zur Erfüllung der Anforderungen erwies sich der Biegedorn mit einer Dornkugel als geeignet. Das nachfolgende **Prägen des gebogenen Rohres** erfolgte an drei unterschiedlichen Positionen (gerader Bereich, Übergangsbereich, Biegebereich) und lieferte teils große Ergebnisunterschiede. Im gebogenen Bereich war der

Einfluss von Vordeformationen, vom ovalisierten Rohrquerschnitt und von Eigenspannungen sehr stark. Die hohe Anzahl an Einflussfaktoren verhinderte bei der Variation des Stempels und des Klemmminendurchmessers eindeutige Ergebnistendenzen. Bei einem kombinierten Umformprozess ist eine Optimierung der Werkzeugeinstellungen zur Realisierung der geforderten Ergebnisse unerlässlich. Die Vorgabe einheitlicher Anforderungen an alle drei Prägepositionen lieferte individuelle Einstellungen, wodurch die geforderten Umformergebnisse realisiert werden konnten.

Das **Ziel der Entwicklung eines simulationsgestützten Optimierungstools** für die industrielle Anwendung bei kleinen und mittleren Unternehmen konnte erfüllt werden. Das entwickelte Optimierungstool ermöglicht eine prozessergänzende Vorhersage von Umformergebnissen. Die Simulationen haben gezeigt, dass die Realität hervorragend abgebildet wird. Herstellungsbedingte Werkstücktoleranzen, die im Vergleich zu den Simulationen mit Nennmaßen des Werkstücks negative Abweichungen im Ergebnis lieferten, konnten ermittelt und realitätsnah dargestellt werden. Eine frühzeitige Erkennung solcher Fehlerquellen erspart durch das Ausschließen problematischer Toleranzen eine aufwändige Fehleranalyse während des Prozesses. Dadurch können unnötige Korrekturschleifen im Entwicklungsprozess reduziert und die Prozesssicherheit erhöht werden. Im Sinne der Industrie 4.0 verknüpft das entwickelte Optimierungstool die digitale Technik mit den Fertigungsprozessen des Biegens und des Prägens. Somit bietet das Tool für kleine und mittlere Unternehmen in der industriellen Anwendung eine effiziente und innovative Lösung.

6.2 Zukünftige Forschungsbereiche

Mit der graphischen Benutzeroberfläche wurde ein **Grundstein zur automatisierten Vorhersage** von Rohrumformergebnissen gelegt. Die digitale Technik muss nun im realen Betrieb erprobt werden. Die Integration des Simulationstools in den Prozessablauf kann nur durch eine verstärkte prozessbegleitende Anwendung erfolgen. Dadurch können mögliche Fehlerquellen im Simulationsprozess erkannt und diese durch geeignete Überarbeitung der Struktur beseitigt werden. Ebenso ergeben sich Verbesserungsmöglichkeiten durch die häufige Verwendung der Benutzeroberfläche durch verschiedene Anwender. Das digitale Werkzeug muss ähnlich wie ein neuer Fertigungsprozess über die Zeit weiterentwickelt werden und deshalb verschiedene Überarbeitungsphasen durchlaufen.

Ein weiterer zukünftiger Forschungsbereich ergibt sich durch die Verwendung von dünnwandig geschweißten Rohren zur Herstellung von Abgasrohren. Das **Schweißverfahren** beeinflusst die Form, die Größe, die Qualität und somit auch die mechanischen Eigenschaften der Schweißzone. Durch die Änderung der mechanischen Eigenschaften

ist die Schweißzone ein ausschlaggebender Faktor bei der Ausbildung von Umformfehlern. Eine geeignete Positionierung der Schweißzone ist bei mehrstufigen komplexen Umformprozessen durchaus problematisch und kann zur Ausbildung von Umformfehlern führen. Daher steigt auch die Relevanz einer geeigneten Abbildung der Schweißzone in prozessergänzenden Simulationen. Die Entwicklung eines Simulationsmodells mit Berücksichtigung der Schweißzone benötigt jedoch eine aufwändige experimentelle Materialcharakterisierung der Schweißnaht und der umliegenden Wärmeeinflusszone. Die numerische Modellierung der inhomogenen Verteilung der Materialeigenschaften innerhalb der Schweißzone ist ebenfalls komplex. Da die Anzahl an entsprechenden Untersuchungen noch verhältnismäßig gering ist und die Relevanz in der Industrie steigt, wird die vollständige numerische Abbildung eines geschweißten Rohres in Zukunft wichtig sein.

Aufgrund der steigenden Anforderungen und des voranschreitenden Leichtbaus wird auch die Kaltumformung zukünftig an die Grenzen des Möglichen kommen. Um die Anforderungen trotzdem noch realisieren zu können, werden neben den prozessbegleitenden Simulationen weitere Maßnahmen notwendig sein, um mit einer Kaltumformung in der Industrie konkurrenzfähig zu bleiben. Eine Möglichkeit die Umformgrenzen zu erweitern ohne auf eine vollständige Warmumformung zurückgreifen zu müssen, sind **gezielte lokale, örtliche begrenzte Änderungen der Materialeigenschaften** am Rohr, die zu einer Verbesserung des Umformergebnisses führen. Die gezielte lokale Änderung von Materialeigenschaften bietet ein großes Spektrum an Möglichkeiten und wurde in der Form noch nicht untersucht. Somit können bei einer erfolgreichen Anwendung Rohre umgeformt werden, die normalerweise nicht oder nur durch eine kostenintensive Erweiterung bzw. Anpassung des Umformprozesses verarbeitet werden können. Durch diese Modifizierung des Rohres kann auf bereits bestehende Kaltumformprozesse und entsprechende Anlagen zurückgegriffen werden, da die Änderung der Materialeigenschaften vor dem eigentlichen Umformprozess stattfindet. Die lokale Modifizierung könnte durch eine lokale Oberflächenbehandlung mittels Sandstrahlen oder Wärmebehandlung stattfinden. Die abschnittsweise Modifizierung erfolgt durch den Zusammenbau zweier Rohrhalschalen aus unterschiedlichen Materialien. Erste Untersuchungen zeigen ein vielversprechendes Ergebnis und müssen in Zukunft experimentell und numerisch weiter untersucht werden. Eine erfolgreiche experimentelle Umsetzung in Kombination mit einem numerischen Optimierungstool würde das Umformspektrum deutlich erweitern.

Literaturverzeichnis

- [1] ALTENBACH, H. [2012]. *Kontinuumsmechanik*. Springer Vieweg Berlin-Heidelberg.
- [2] ASNAFI, N., T. NILSSON & G. LASSL [2003]. ‘Tubular hydroforming of automotive side members with extruded aluminium profiles.’ *Journal of Materials Processing Technology*, **142**(1), pp. 93 – 101.
- [3] BACH, T., editor [2008]. *Praxisgerechte Biegesimulation als Vorformoperation für den IHU-Prozess*.
- [4] BACHMANN, M., A. GUMENYUK & M. RETHMEIER [2016]. ‘Welding with high-power lasers: trends and developments.’ *Physics Procedia*, **83**, pp. 15–25.
- [5] BÄHRE, D. & H. BRÜNNET [2011]. ‘Simulation of removing autofrettage-induced residual stress loaded layers by finite element analysis.’ *Procedia Engineering*, **19**, pp. 9 – 15. 1st CIRP Conference on Surface Integrity (CSI).
- [6] BARDELCIK, A. & M. WORSWICK, editors [2005]. *The Effect of Element Formulation on the Prediction of Boost Effects in Numerical Tube Bending*, volume 778.
- [7] BARTZ-BEIELSTEIN, T., C. W. LASARCZYK & M. PREUSS [2005]. ‘Sequential parameter optimization.’ In *2005 IEEE congress on evolutionary computation*, volume 1, pp. 773–780. IEEE.
- [8] VAN BASSHUYSEN, R. & F. SCHÄFER [2015]. *Handbuch Verbrennungsmotor*. Springer Vieweg.
- [9] BATHE, K.-J. [2001]. *Finite-Elemente-Methoden*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- [10] BIHAMTA, R., Q.-H. BUI, M. GUILLOT, G. D’AMOURS, A. RAHEM & M. FARFARD [2015]. ‘Global optimisation of the production of complex aluminium tubes

- by the hydroforming process.’ *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, **9**, pp. 1–11.
- [11] BIRKERT, A., S. HAAGE & M. STRAUB [2013]. *Umformtechnische Herstellung komplexer Karosserieteile*. Springer Vieweg.
- [12] BOGGS, P. & J. W. TOLLE [1995]. ‘Sequential quadratic programming.’ *Acta Numerica*, **4**, pp. 1–51.
- [13] BONET, J. & R. WOOD [2008]. *Nonlinear Continuum Mechanics for Finite Element Analysis*. Cambridge University Press.
- [14] BONIARDI, M. & A. CASAROLI [2014]. ‘Rostfreie Edelstähle.’
- [15] BREUER, D. [2007]. *Bestimmung des Formänderungsvermögens bei der Kaltmassivumformung*. Ph.D. thesis, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen.
- [16] BRÜNNET, H. & D. BÄHRE [2013]. ‘Simulation of beneficial compressive residual stress fields as design tool in manufacturing internally pressurized parts.’ In *Proceedings of Simulia Community Conference, Conference EBook*.
- [17] CAI, Y., X. S. WANG & S. J. YUAN [2016]. ‘Pre-form design for hydro-forming of aluminum alloy automotive cross members.’ *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, **86**(1), pp. 463–473.
- [18] CARLEY, K. M. & N. Y. KAMNEVA [2004]. ‘Response surface methodology.’ In *CASOS Technical Report*.
- [19] CHU, G.-N., C.-Y. LIN, W. LI & Y.-L. LIN [2018]. ‘Effect of internal pressure on springback during low pressure tube hydroforming.’ *International Journal of Material Forming*, **11**, pp. 855–866.
- [20] CHU, G. N., G. LIU, W. J. LIU & S. J. YUAN [2012]. ‘An approach to improve thickness uniformity within tailor-welded tube hydroforming.’ *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, **60**(9), pp. 1247–1253.
- [21] COULES, H., D. SMITH, K. ABBURI VENKATA & C. TRUMAN [2014]. ‘A method for reconstruction of residual stress fields from measurements made in an incompatible region.’ *International Journal of Solids and Structures*, **51**, pp. 1980–1990.
- [22] COURANT, R., K. FRIEDRICHS & H. LEWY [1928]. ‘Über die partiellen Differenzgleichungen der mathematischen Physik.’ *Mathematische Annalen*, **100**(1), pp. 32–74.

- [23] DASSAULT SYSTEMES SIMULIA CORP., R., PROVIDENCE. *Abaqus Theory Manual, Version 6.14*.
- [24] DIEBELS, S. ‘Materialmodellierung.’ Vorlesungsskript: Universität des Saarlandes - Lehrstuhl für Technische Mechanik.
- [25] DIN 8580:2003-09 [2003]. ‘Manufacturing processes - terms and definitions, division.’ Norm. Beuth Verlag GmbH, Berlin.
- [26] DIN 8582:2003-09 [2003]. ‘Manufacturing processes forming - classification; subdivision, terms and definitions, alphabetical index.’ Norm. Beuth Verlag GmbH, Berlin.
- [27] DIN 8583-5:2003-09 [2003]. ‘Manufacturing processes forming under compressive conditions - part 5: Indentation-forming; classification, subdivision, terms and definitions.’ Norm. Beuth Verlag GmbH, Berlin.
- [28] DIN 8586:2003-09 [2003]. ‘Manufacturing processes forming by bending - classification, subdivision, terms and definitions.’ Norm. Beuth Verlag GmbH, Berlin.
- [29] DIN EN 10296-2:2006-02 [2006]. ‘Geschweißte kreisförmige Stahlrohre für den Maschinenbau und allgemeine technische Anwendungen - Technische Lieferbedingungen - Teil 2: Nichtrostende Stähle.’ Norm. Beuth Verlag GmbH, Berlin.
- [30] DIN EN ISO 1127:2019-03 [2019]. ‘Nichtrostende Stahlrohre - Maße, Grenzabmaße und längenbezogene Masse.’ Norm. Beuth Verlag GmbH, Berlin.
- [31] DIN EN ISO 527-2:2012-06 [2012]. ‘Kunststoffe - Bestimmung der Zugeigenschaften - Teil 2: Prüfbedingungen für Form- und Extrusionsmassen.’ Norm. Beuth Verlag GmbH, Berlin.
- [32] DIN ISO 2768-1:1991-06 [1991]. ‘Allgemeintoleranzen; Toleranzen für Längen- und Winkelmaße ohne einzelne Toleranzeintragung.’ Norm. Beuth Verlag GmbH, Berlin.
- [33] DIRKSEN, U., M. HERMES & M. KLEINER [2006]. ‘Jedes Produkt ein Spezialfall.’ *Blech Rohre Profile*, **12**, pp. 14–17.
- [34] DOEGE, E. & B.-A. BEHRENS [2010]. *Handbuch Umformtechnik: Grundlagen, Technologien, Maschinen*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- [35] DOEGE, F., H. MEYER-NOLKEMPER & I. SAEED [1986]. *Fliesskurvenatlas metallischer Werkstoffe*. Hanser München, Wien.

- [36] EICHMÜLLER, C., G. HOFSTETTER, W. WILLEKE & P. GAUCHEL [2001]. ‘Die Abgasanlage des neuen BMW M3.’ *MTZ - Motortechnische Zeitschrift*, **62**(3), pp. 218–226.
- [37] ENGEL, B., C. GERLACH & S. CORDES [2008]. ‘Biegemomentabschätzung des Dornbiegeverfahrens.’ *UTFscience*, **2**, pp. 1–8.
- [38] ENGEL, B. & H. HASSAN [2015]. ‘Advanced model for calculation of the neutral axis shifting and the wall thickness distribution in rotary draw bending processes.’ *International Journal of Mechanical, Aerospace, Industrial, Mechatronic and Manufacturing Engineering*, **9**(2), pp. 239 – 243.
- [39] FANG, J., S. LU, K. WANG, J. XU, X. XU & Z. YAO [2013]. ‘Effect of mandrel on cross-section quality in numerical control bending process of stainless steel 2169 small diameter tube.’ *Advanced in Materials Science and Engineering*, **2013**, pp. 9.
- [40] FANG, J., S. LU, K. WANG & Z. YAO [2015]. ‘Three-dimensional finite element model of high strength 21-6-9 stainless steel tube in rotary draw bending and its application.’ *Indian Journal of Engineering & Materials Science*, **22**, pp. 141–152.
- [41] FENG, H. & C. HAN [2018]. ‘Study on wrinkling behavior in hydroforming of large diameter thin-walled tube through local constraints.’ *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, **08**, pp. 1–12.
- [42] FLETCHER, R. [1980]. *Practical Methods of Optimization. Vol. I Unconstrained Optimization*. John Wiley.
- [43] FRANZ, W.-D. [1988]. *Maschinelles Rohrbiegen. Verfahren und Maschinen*. VDI-Verlag.
- [44] FRITZ, A. H. & G. SCHULZE [2012]. *Fertigungstechnik*. Springer Vieweg.
- [45] GEIGER, W. & W. KOTTE [2008]. *Handbuch Qualität, Grundlagen und Elemente des Qualitätsmanagements: Systeme - Perspektiven*. Friedr. Vieweg & Sohn Verlag | GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden.
- [46] GILL, P. & E. WONG [2012]. *Sequential Quadratic Programming Methods*, volume 154, pp. 147–224. UCSD Department of Mathematics.
- [47] GU, R.-J., H. YANG, M. ZHAN & H. LI [2006]. ‘Springback of thin-walled tube in precision bending and its numerical simulation.’ *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, **16**, pp. s631 – s638.

- [48] HAMBY, D. M. [1994]. ‘A review of techniques for parameter sensitivity analysis of environmental models.’ *Environmental Monitoring and Assessment*, **32**(2), pp. 135–154.
- [49] HAN, C., H. FENG, L. D. YAN & S. J. YUAN [2017]. ‘Thickness improvement in non-homogeneous tube hydroforming of a rectangular component by contact sequence.’ *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, **92**(5), pp. 2667–2675.
- [50] HAN, C., H. FENG & S. J. YUAN [2017]. ‘Springback and compensation of bending for hydroforming of advanced high-strength steel welded tubes.’ *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, **89**(9), pp. 3619–3629.
- [51] HAN, S. [1977]. ‘A globally convergent method for nonlinear programming.’ *Journal of Optimization Theory and Applications*, **22**, pp. 297–309.
- [52] HARTL, C. [2005]. ‘Research and advances in fundamentals and industrial applications of hydroforming.’ *Journal of Materials Processing Technology*, **167**, pp. 383–392.
- [53] HAUPT, P. [2000]. *Continuum Mechanics and Theory of Materials*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, second edition.
- [54] HE, Z., S. YUAN, G. LIU, J. WU & W. CHA [2010]. ‘Formability testing of az31b magnesium alloy tube at elevated temperature.’ *Journal of Materials Processing Technology*, **210**, pp. 877–884.
- [55] HEIL, B., C. ENDERLE, H. HERWIG, E. STROHMER, A. MARGADANT & W. RUTH [2002]. ‘Die Abgasanlage des Mercedes SL 500.’ *MTZ - Motortechnische Zeitschrift*, **63**(1), pp. 6–14.
- [56] HELLWIG, W. & M. KOLBE [2012]. *Spanlose Fertigung Stanzen*. Springer Vieweg.
- [57] HERBERTZ, R., H. HERMANN & R. LABS [2013]. *Massivumformung kurz und bündig*. Industrieverband Massivumformung e. V., Hagen Dorothea Bachmann Osenberg.
- [58] HOLZAPFEL, G. [2000]. *Nonlinear Solid Mechanics*. Wiley.
- [59] HORLACHER, H.-B. & U. HELBIG [2016]. *Rohrleitung 1: Grundlagen, Rohrwerkstoffe, Komponenten*. Springer Verlag.

- [60] HORN, K. [n.d.]. ‘Mandrel bending 101 - the basics.’ Technical report, HMT - Horn Machine Tools, Inc.
- [61] HUGHES, T. J. & W. K. LIU [1981]. ‘Nonlinear finite element analysis of shell: Part i. three-dimensional shells.’ *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, **26**(3), pp. 331 – 362.
- [62] HWANG, Y.-M. & R.-K. WU [2017]. ‘Process and loading path design for hydraulic compound forming of rectangular tubes.’ *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, **91**(5), pp. 2135–2142.
- [63] IRSLINGER, J. [2013]. *Mechanische Grundlagen und Numerik dreidimensionaler Schalenelemente*. Ph.D. thesis, Universität Stuttgart.
- [64] ISHIKAWA, S. & Y. ISHIKAWA, editors [2015]. *Simulation of Pipe Bending Process with Abaqus*. SIMULIA Community Conference.
- [65] JUNG, A., Z. CHEN, J. SCHMAUCH, C. MOTZ & S. DIEBELS [2016]. ‘Micro-mechanical characterisation of ni/al hybrid foams by nano- and microindentation coupled with ebsd.’ *Acta Materialia*, **102**, pp. 38 – 48.
- [66] KAJIKAWA, S., G. WANG, T. KUBOKI, M. WATANABE & A. TSUICHIYA [2018]. ‘Prevention of defects by optimizing mandrel position and shape in rotary draw bending of copper tube with thin wall.’ *Procedia Manufacturing*, **15**, pp. 828–835.
- [67] KHALFALLAH, A. [2014]. ‘Experimental and numerical assessment of mechanical properties of welded tubes for hydroforming.’ *Materials & Design (1980-2015)*, **56**, pp. 782 – 790.
- [68] KIM, J., L.-P. LEI & B.-S. KANG [2003]. ‘Preform design in hydroforming of automobile lower arm by fem.’ *Journal of Materials Processing Technology*, **138**, pp. 58–62.
- [69] KLEIN, B. [2015]. *FEM - Grundlagen und Anwendungen der Finite-Element-Methode im Maschinen- und Fahrzeugbau*. Springer Vieweg.
- [70] KLEPPMANN, W. [2011]. *Taschenbuch Versuchsplanung: Produkte und Prozesse optimieren*. Hanser Verlag.
- [71] KLOCKE, F. & W. KÖNIG [2006]. *Fertigungsverfahren Umformen*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- [72] KOC, M. [2008]. *Hydroforming for advanced manufacturing*. CRC Press.

- [73] KOC, M. & T. ALTAN [2002]. ‘Prediction of forming limits and parameters in the tube hydroforming process.’ *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, **42**, pp. 123–138.
- [74] KONG, D., L. LANG, S. RUAN, Z. SUN & C. ZHANG [2017]. ‘A novel hydroforming approach in manufacturing thin-walled elbow parts with small bending radius.’ *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, **90**, pp. 1579–1591.
- [75] KRAFT, D. [1988]. ‘A software package for sequential quadratic programming.’ Technical Report DFVLR-FB 88-28, DLR German Aerospace Center - Institute for Flight Mechanics, Köln.
- [76] KRIDL, G., L. BAO, P. MALLICK & Y. TIAN [2003]. ‘Investigation of thickness variation and corner filling in tube hydroforming.’ *Journal of Materials Processing Tech.*, **133**(3), pp. 287–296.
- [77] LANG, L., H. LI, S. YUAN, J. DANCKERT & K. NIELSEN [2009]. ‘Investigation into the pre-forming’s effect during multi-stages of tube hydroforming of aluminum alloy tube by using useful wrinkles.’ *Journal of Materials Processing Technology*, **209**(5), pp. 2553 – 2563.
- [78] LEPADATU, D., R. HAMBLI, A. KOBİ & A. BARREAU [2005]. ‘Optimisation of springback in bending processes using fem simulation and response surface method.’ *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, **27**, pp. 40–47.
- [79] LI, C., H. YANG, M. ZHAN, X.-D. XU & G.-J. LI [2009]. ‘Effects of process parameters on numerical control bending process for large diameter thin-walled aluminium alloy tubes.’ *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, **19**, pp. 668–673.
- [80] LI, H. & H. YANG [2011]. ‘A study on multi-defect constrained bendability of thin-walled tube nc bending under different clearance.’ *Chinese Journal of Aeronautics*, **24**, pp. 102–112.
- [81] LI, H., H. YANG, J. YAN & M. ZHAN [2009]. ‘Numerical study on deformation behaviors of thin-walled tube nc bending with large diameter and small bending radius.’ *Computational Materials Science*, **45**(4), pp. 921 – 934.
- [82] LI, H., H. YANG & M. ZHAN [2009]. ‘A study on plastic wrinkling in thin-walled tube bending via an energy-based wrinkling prediction model.’ *Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering*, **17**, pp. 33.

- [83] LI, H., H. YANG, M. ZHAN & R.-J. GU [2006]. ‘Forming characteristics of thin-walled tube bending process with small bending radius.’ *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, **16**, pp. 613–623.
- [84] LI, H., H. YANG, M. ZHAN & R.-J. GU [2007]. ‘The interactive effects of wrinkling and other defects in thin-walled tube nc bending process.’ *Journal of Materials Processing Technology*, **187-188**, pp. 502–507.
- [85] LI, H., H. YANG, M. ZHAN & Y. KOU [2010]. ‘Deformation behaviors of thin-walled tube in rotary draw bending under push assistant loading conditions.’ *Journal of Materials Processing Technology*, **210**, pp. 143–158.
- [86] LI, H., H. YANG, M. ZHAN, Z. SUN & R. GU [2007]. ‘Role of mandrel in nc precision bending process of thin-walled tube.’ *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, **47**, pp. 1164–1175.
- [87] LI, H., H. YANG, Z. ZHANG, G. LI, N. LIU & T. WELO [2014]. ‘Multiple instability-constrained tube bending limits.’ *Journal of Materials Processing Technology*, **214(2)**, pp. 445 – 455.
- [88] LI, S., X. XU, W. ZHANG & Z. LIN [2008]. ‘Study on the crushing and hydroforming processes of tubes in a trapezoid-sectional die.’ *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, **43(1)**, pp. 67.
- [89] LIN, Y., H. YANG, H. LI & M. ZHAN [2003]. ‘Influences of forming parameters in wrinkling in nc thin-walled tube bending.’ *Hangkong Xuebao/Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, **24**, pp. 456–461.
- [90] LIU, G., J. PENG, S. YUAN, B. TENG & K. LI [2015]. ‘Analysis on critical conditions of sidewall wrinkling for hydroforming of thin-walled tee-joint.’ *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, **97**, pp. 42 – 49.
- [91] LIU, J., H. YANG, M. ZHAN & N. REN [2011]. ‘Finite element modelling of seamed tube nc bending process and its application.’ *Materials Research Innovations*, **15**, pp. s315–s318.
- [92] LIU, J., H. YANG, M. ZHAN, N. REN, H.-M. JIANG, K.-S. DIAO & X.-P. CHEN [2011]. ‘Influence of weld relative strength on wrinkling and wall thickness distribution of thin-walled seamed tube in rotary draw bending process.’ *Cailiao Kexue yu Gongyi/Material Science and Technology*, **19**, pp. 1–6.
- [93] LÜCKE, H.-U., C. HARTL & T. ABBEY [2001]. ‘Hydroforming.’ *The Journal of The Minerals, Metals & Materials Society*, **115**, pp. 87–91.

- [94] LYUBENOVA, N., M. JACQUEMIN & D. BÄHRE [2016]. ‘Influence of the pre-stressing on the residual stresses induced by deep rolling.’ In *Residual Stress 2016 - ICRS-10*.
- [95] MANGERIG, I. & A. HESS [2014]. ‘Zur Stabilität von oberflächennah durch plastisches Umformen eingeprägten Eigenspannungen.’ *Stahlbau*, **83**(4), pp. 236–244.
- [96] MANNINEN, T. & J. SÄYNÄJÄKANGAS, editors [2012]. *Mechanical Properties of Ferritic Stainless Steels at Elevated Temperature*.
- [97] MASOUMI, H., Y. MIRBAGHERI, R. JAFARI NEDOUSHAN, M. SALEM & M. KALANTARI [2012]. ‘Effect of mandrel, its clearance and pressure die on tube bending process via rotary draw bending method.’ *International Journal of Advanced Design and Manufacturing Technology*, **5**, pp. 47–52.
- [98] NEUGEBAUER, R. [2007]. *Hydro-Umformung*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- [99] NEUGEBAUER, R. & G. LAUX, editors [2003]. *FEM-Modellierung und Simulation des Biegens von Rundrohren..*
- [100] NEUGEBAUER, R. & G. LAUX [2004]. ‘Komplexe FEM-Simulation von Rohr-biegevorgängen.’ Technical report, Fraunhofer IWU.
- [101] NIKHARE, C., M. WEISS & P. HODGSON [2017]. ‘Buckling in low pressure tube hydroforming.’ *Journal of Manufacturing Processes*, **28**, pp. 1 – 10.
- [102] NOCEDAL, J. & S. WRIGHT [2006]. *Numerical Optimization*. Springer-Verlag New York.
- [103] POWELL, M. [1978]. *Numerical Analysis, Lecture Notes in Mathematics*, volume 630, chapter A fast algorithm for nonlinearity constrained optimization calculations, pp. 144–157. Springer, Berlin.
- [104] PUGH, H. [1970]. *Mechanical Behaviour of Materials Under Pressure*. Elsevier Pub. Co.
- [105] REN, N., M. ZHAN, H. YANG, Z. ZHANG, H. JIANG, K. DIAO & X. CHEN [2011]. ‘Significance analysis of weld and processing parameters on wall thinning and cross-sectional deformation of welded tube in nc bending process.’ *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, **423**, pp. 457–460.
- [106] REN, N., M. ZHAN, H. YANG, Z. ZHANG, Y. QIN, H. JIANG, K. DIAO & X. CHEN [2012]. ‘Constraining effects of weld and heat-affected zone on

- deformation behaviors of welded tubes in numerical control bending process.’ *Journal of Materials Processing Technology*, **212**(5), pp. 1106 – 1115.
- [107] RISSE, A. [2012]. *Fertigungsverfahren der Mechatronik, Feinwerk- und Präzisionsgerätetechnik*. Springer Vieweg+Teubner Verlag.
- [108] RUST, W. [2011]. *Nichtlineare Finite-Elemente Berechnungen*. Vieweg+Teubner Verlag.
- [109] SACHS, G. & H. VOEGELI [1966]. *Principles and Methods of Sheet-Metal Fabricating*. Reinhold Publishing Corporation.
- [110] SALEM, M., M. FARZIN, M. KADKHODAEI & M. NAKHAEI [2015]. ‘A chain link mandrel for rotary draw bending: experimental and finite element study of operation.’ *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, **79**(5), pp. 1071–1080.
- [111] SCHITTKOWSKI, K. & Y.-X. YUAN [2010]. ‘Sequential quadratic programming methods.’ *Department of Computer Science. University of Bayreuth. Bayreuth*, p. 19.
- [112] SCHULER G., editor [1996]. *Handbuch der Umformtechnik*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- [113] SIEBERTZ, K., D. VAN BEBBER & T. HOCHKIRCHEN [2010]. *Statistische Versuchsplanung: Design of Experiments (DoE)*. Springer.
- [114] SIEGERT, K. [2015]. *Blechumformung: Verfahren, Werkzeuge und Maschinen*. Springer Vieweg.
- [115] SIMO, J. & T. HUGHES [2000]. *Computational Inelasticity*. Springer.
- [116] SOEZEN, L., M. GULER, D. BEKAR & E. ACAR [2012]. ‘Investigation and prediction of springback in rotary-draw tube bending process using finite element method.’ *Journal of Mechanical Engineering Science*, **226**, pp. 2967–2981.
- [117] DE SOUZA NETO, E., D. PERIC & D. OWEN [2008]. *Computational methods for plasticity: theory and applications*. Wiley.
- [118] SPUR, G., R. NEUGEBAUER & H. HOFFMANN [2012]. *Handbuch Umformen*. Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG.
- [119] STENGER, H. [1965]. *Über die Abhängigkeit des Formänderungsvermögens metallischer Stoffe vom Spannungszustand*. Ph.D. thesis, RWTH Aachen.

- [120] TABATABAEI, S. A., M. S. PANAH, M. M. MASHHADI, S. M. TABATABEE & M. AGHAJANZADEH [2013]. ‘Optimum design of preform geometry and forming pressure in tube hydroforming using the equi-potential lines method.’ *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, **69**(9), pp. 2787–2792.
- [121] TINGLEY, W. [2011]. ‘The rotary-draw tube-bending guide.’ Technical report, Bend Tooling, Inc.
- [122] TOTTEN, G., M. HOWES & T. INOUE [2002]. *Handbook of Residual Stress and Deformation of Steel*. ASM International.
- [123] TOUTENBURG, H., M. SCHOMAKER, M. ABD WISSMANN & C. HEUMANN [2009]. *Arbeitsbuch zur deskriptiven und induktiven Statistik*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- [124] TRANA, K. [2002]. ‘Finite element simulation of the tube hydroforming process—bending, preforming and hydroforming.’ *Journal of Materials Processing Technology*, **127**(3), pp. 401 – 408.
- [125] URBAN, D. & J. MAYERL [2011]. *Regressionsanalyse: Theorie, Technik und Anwendung*. VS Verlag.
- [126] WAGNER, M. [2017]. *Lineare und nichtlineare FEM*. Springer Vieweg.
- [127] WEICH, I. [2008]. *Ermüdungsverhalten mechanisch nachbehandelter Schweißverbindungen in Abhängigkeit des Randschichtzustands*. Ph.D. thesis, Technische Universität Carolo-Wilhelmina, Braunschweig.
- [128] WEN, T. [2014]. ‘On a new concept of rotary draw bend-die adaptable for bending tubes with multiple outer diameters under non-mandrel condition.’ *Journal of Materials Processing Technology*, **214**(2), pp. 311 – 317.
- [129] WILSON, R. [1963]. *A Simplicial Algorithm For Concave Programming*. Ph.D. thesis, Graduate School of Business Administration, Harvard University.
- [130] WRIGGERS, P. [2001]. *Nichtlineare Finite-Element-Methoden*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- [131] XIE, W. C., C. HAN, G. N. CHU & S. J. YUAN [2015]. ‘Research on hydro-forming process of closed section tubular parts.’ *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, **80**(5), pp. 1149–1157.
- [132] YAN, J., H. YANG, M. ZHAN & H. LI [2010]. ‘Forming characteristics of al-alloy large-diameter thin-walled tubes in nc-bending under axial compressive loads.’ *Chinese Journal of Aeronautics*, **23**, pp. 461–469.

- [133] YANG, H., R.-J. GU, M. ZHAN & H. LI [2006]. ‘Effect of frictions on cross section quality of thin-walled tube nc bending.’ *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, **16**, pp. 878–886.
- [134] YANG, H., J. YAN, M. ZHAN, H. LI & Y. KOU [2009]. ‘3d numerical study on wrinkling characteristics in nc bending of aluminium alloy thin-walled tubes with large diameters under multi-die constraints.’ *Computational Materials Science*, **45**, pp. 1052–1067.
- [135] YANG, J.-B., B. HEE JEON & S.-I. OH [2001]. ‘The tube bending technology of a hydroforming process for an automotive part.’ *Journal of Materials Processing Technology*, **111**(1), pp. 175 – 181. International symposium on advanced forming and die manufacturing technology.
- [136] YUAN, S., C. HAN & X. WANG [2006]. ‘Hydroforming of automotive structural components with rectangular-sections.’ *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, **46**(11), pp. 1201 – 1206. 1st International Conference on New Forming Technology.
- [137] ZHAN, M., H. DU, J. LIU, N. REN, H. YANG, H. JIANG, K. DIAO & X. CHEN [2010]. ‘A method for establishing the plastic constitutive relationship of the weld bead and heat-affected zone of welded tubes based on the rule of mixtures and a microhardness test.’ *Materials Science and Engineering: A*, **527**(12), pp. 2864 – 2874.
- [138] ZHAN, M., K. GUO & H. YANG [2016]. ‘Advances and trends in plastic forming technologies for welded tubes.’ *Chines Journal of Aeronautics*, **29**(2), pp. 305–315.
- [139] ZHAN, M., Y. WANG, H. YANG & H. LONG [2016]. ‘An analytic model for tube bending springback considering different parameter variations of ti-alloy tubes.’ *Journal of Materials Processing Technology*, **236**, pp. 123–137.
- [140] ZHANG, W. W., C. HAN & S. J. YUAN [2016]. ‘Optimization of pre-form shapes by response surface methodology for hydro-forming of 780 mpa torsion beam.’ *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, **85**(5), pp. 1227–1237.
- [141] ZHANG, Y. & D. REDEKOP [2006]. ‘Shell element simulation of the punch method of tube bending.’ *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, **17**, pp. 1–2.

-
- [142] ZIENKIEWICZ, O. & R. TAYLOR [2006]. *The Finite Element Method for Solid and Structural Mechanics*, volume 2. Butterworth-Heinemann, fifth edition.
- [143] ZIENKIEWICZ, O., R. TAYLOR & J. ZHU [2006]. *The Finite Element Method: its Basis and Fundamentals*, volume 1. Butterworth-Heinemann.

Anhang

Tabellen

Tabelle 6.1: Simulationsergebnisse des Prägens für unterschiedliche Außendurchmesser (AD) und Wandstärken (WS) des Rohres in Relation zur Referenzsimulation mit Nennwerten (grau) (Material: 1.4301; S1: ebene Stempelform, S2: konvexe Stempelform; grün/gelb/rot: aufsteigender Stempelhub; rote Zahl: Wert außerhalb des Toleranzbereiches)

Geometrie			S1 (eben)			S2 (konvex)		
Referenz	AD [mm]	Hub	Höhe	Breite	Tiefe	Höhe	Breite	Tiefe
	WS [mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
	60,0	5,8	54,49	60,32	0,58	55,43	60,29	1,82
	1,2	10,2	50,16	61,17	0,58	52,15	60,42	2,91
		14,6	45,83	65,79	0,56	49,01	61,44	4,01
Werkstückvariation	Δ AD [mm]	Hub	Δ Höhe	Δ Breite	Δ Tiefe	Δ Höhe	Δ Breite	Δ Tiefe
	Δ WS [mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
	-0,3	5,8	0,14	-0,06	-0,01	-0,06	-0,11	-0,49
		10,2	0,04	-0,16	-0,01	-0,10	-0,01	-0,28
		14,6	0,07	-0,54	-0,01	-0,12	-0,12	-0,29
	+0,3	5,8	0,00	0,31	0,01	0,08	0,31	0,10
		10,2	0,00	0,43	0,00	0,10	0,32	0,08
		14,6	0,01	0,60	0,00	0,10	0,38	0,10
	0,0	5,8	0,00	0,03	0,01	0,03	0,00	0,00
		10,2	0,00	-0,05	0,01	0,05	-0,01	-0,03
		14,6	0,01	-0,06	0,01	0,05	-0,08	-0,01
	+0,1	5,8	0,00	-0,02	0,00	-0,02	0,00	-0,01
		10,2	-0,01	0,03	0,01	-0,04	0,01	0,02
		14,6	-0,01	0,03	0,00	-0,05	0,07	0,01

Tabelle 6.2: Simulationsergebnisse des Prägens für unterschiedliche Ovalitäten des Rohrquerschnitts in Relation zur Referenzsimulation mit rundem Querschnitt (grau) (Material: 1.4301; S1: ebene Stempelform, S2: konvexe Stempelform; grün/gelb/rot: aufsteigender Stempelhub; rote Zahl: Wert außerhalb des Toleranzbereiches)

Ovalität			S1 (eben)			S2 (konvex)		
Referenz	Höhe [mm]	Hub	Höhe	Breite	Tiefe	Höhe	Breite	Tiefe
	Breite [mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
	60,0	5,8	54,49	60,32	0,58	55,43	60,29	1,82
	60,0	10,2	50,16	61,17	0,58	52,15	60,42	2,91
		14,6	45,83	65,79	0,56	49,01	61,44	4,01
Werkstückvariation	Δ Höhe [mm]	Hub	Δ Höhe	Δ Breite	Δ Tiefe	Δ Höhe	Δ Breite	Δ Tiefe
	Δ Breite [mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
	0,0	5,8	0,19	-0,15	-0,04	0,02	-0,19	-0,26
	-0,3	10,2	0,12	-0,09	-0,04	-0,01	-0,04	-0,16
		14,6	0,09	-0,26	-0,03	-0,03	-0,05	-0,16
	-0,3	5,8	-0,04	0,08	-0,03	-0,21	0,08	-0,25
	0,0	10,2	-0,05	-0,02	-0,04	-0,17	0,09	-0,16
		14,6	-0,03	-0,25	-0,03	-0,16	0,00	-0,16

Tabelle 6.3: Simulationsergebnisse des Prägens für Materialdaten aus der Literatur in Relation zur Referenzsimulation mit den in der Arbeit experimentell ermittelten Materialdaten (grau) (S1: ebene Stempelform, S2: konvexe Stempelform; grün/gelb/rot: aufsteigender Stempelhub; rote Zahl: Wert außerhalb des Toleranzbereiches

Material			S1 (eben)			S2 (konvex)				
1.4301	Referenz	Simulation	Hub [mm]	Höhe [mm]	Breite [mm]	Tiefe [mm]	Höhe [mm]	Breite [mm]	Tiefe [mm]	
			5,8	54,49	60,32	0,58	55,43	60,29	1,82	
			10,2	50,16	61,17	0,58	52,15	60,42	2,91	
			14,6	45,83	65,79	0,56	49,01	61,44	4,01	
	Variation	Literatur	Hub [mm]	Δ Höhe [mm]	Δ Breite [mm]	Δ Tiefe [mm]	Δ Höhe [mm]	Δ Breite [mm]	Δ Tiefe [mm]	
			5,8	0,11	0,07	-0,03	0,05	0,03	-0,05	
			10,2	0,08	-0,08	-0,04	0,04	0,05	-0,04	
			14,6	0,08	-0,32	-0,03	0,07	-0,11	0,03	
	1.4509	Referenz	Simulation	Hub [mm]	Höhe [mm]	Breite [mm]	Tiefe [mm]	Höhe [mm]	Breite [mm]	Tiefe [mm]
				5,8	54,42	60,28	0,63	55,41	60,26	1,92
				10,2	50,06	61,12	0,60	52,15	60,37	3,01
				14,6	45,73	65,60	0,56	49,00	61,34	4,16
Variation		Literatur	Hub [mm]	Δ Höhe [mm]	Δ Breite [mm]	Δ Tiefe [mm]	Δ Höhe [mm]	Δ Breite [mm]	Δ Tiefe [mm]	
			5,8	0,00	-0,02	-0,04	-0,02	-0,01	-0,07	
			10,2	0,01	0,07	-0,03	-0,01	0,00	-0,08	
			14,6	0,01	0,16	-0,03	-0,01	0,10	-0,11	

Tabelle 6.4: Simulationsergebnisse des Prägens für unterschiedlich definierte Anfangseigen-
spannungsverteilungen in Relation zur Referenzsimulation ohne Anfangseigen-
spannungen (grau) (Material: 1.4301; σ : Anfangseigen-
spannung, S1: ebene Stempel-
form, S2: konvexe Stempel-
form; grün/gelb/rot: aufsteigender Stempelhub; ro-
te Zahl: Wert außerhalb des Toleranzbereiches)

Eigenspannung			S1 (eben)			S2 (konvex)		
Referenz	σ [MPa]	Hub [mm]	Höhe [mm]	Breite [mm]	Tiefe [mm]	Höhe [mm]	Breite [mm]	Tiefe [mm]
	keine	5,8	54,49	60,32	0,58	55,43	60,29	1,82
		10,2	50,16	61,17	0,58	52,15	60,42	2,91
		14,6	45,83	65,79	0,56	49,01	61,44	4,01
Werkstückvariation	σ [MPa]	Hub [mm]	Δ Höhe [mm]	Δ Breite [mm]	Δ Tiefe [mm]	Δ Höhe [mm]	Δ Breite [mm]	Δ Tiefe [mm]
	unter Fließgrenze	5,8	0,00	0,02	-0,02	0,01	0,02	-0,13
		10,2	0,00	0,01	-0,02	0,00	0,01	-0,09
		14,6	0,00	0,01	-0,02	0,00	0,01	-0,08
	über Fließgrenze	5,8	0,05	0,02	-0,11	0,00	0,02	-0,51
		10,2	0,05	0,06	-0,10	0,02	0,06	-0,35
		14,6	0,05	0,07	-0,10	0,00	0,06	-0,28

Tabelle 6.5: Simulationsergebnisse des Prägens für unterschiedliche Reibkoeffizienten μ zur Beschreibung des Kontaktes zwischen Rohr und Stempel (μ_S), Rohrklammer (μ_K) in Relation zur Referenzsimulation (grau) (Material: 1.4301; S1: ebene Stempelform, S2: konvexe Stempelform; grün/gelb/rot: aufsteigender Stempelhub; rote Zahl: Wert außerhalb des Toleranzbereiches)

Reibung		S1 (eben)				S2 (konvex)		
Referenz	μ [-]	Hub [mm]	Höhe [mm]	Breite [mm]	Tiefe [mm]	Höhe [mm]	Breite [mm]	Tiefe [mm]
	μ_S 0,1	5,8	54,49	60,32	0,58	55,43	60,29	1,82
	μ_K 0,1	10,2	50,16	61,17	0,58	52,15	60,42	2,91
		14,6	45,83	65,79	0,56	49,01	61,44	4,01
Werkstückvariation	$\Delta \mu$ [-]	Hub [mm]	Δ Höhe [mm]	Δ Breite [mm]	Δ Tiefe [mm]	Δ Höhe [mm]	Δ Breite [mm]	Δ Tiefe [mm]
	μ_S +0,2	5,8	0,04	-0,01	-0,08	0,01	-0,01	-0,13
	μ_K 0,0	10,2	0,07	-0,01	-0,05	0,03	-0,01	-0,15
		14,6	0,08	0,06	-0,04	0,03	0,01	-0,11
	μ_S 0,0	5,8	-0,01	-0,01	0,01	0,01	-0,02	0,03
	μ_K +0,2	10,2	-0,01	-0,04	0,01	0,01	-0,02	0,03
	14,6	-0,02	-0,04	0,01	0,01	-0,06	0,04	

Tabelle 6.6: Simulationsergebnisse des Biegens für unterschiedliche Außendurchmesser (AD) und Wandstärken (WS) des Rohres in Relation zur Referenzsimulation mit Nennwerten (grau) (Material: 1.4301; grün/gelb/orange/rot: aufsteigender Einstellwinkel; rote Zahl: Wert außerhalb des Toleranzbereiches)

Referenz	Geometrie	Einstell-	Biege-	Rück-	Höhe	Breite	Tiefe	min.	max.
	AD [mm] WS [mm]	winkel [°]	winkel [°]	federung [°]	[mm]	[mm]	[mm]	WS [mm]	WS [mm]
Referenz	60,0 1,2	14,70	13,55	1,15	54,79	60,43	0,00	1,14	1,31
		31,91	30,38	1,54	47,94	60,61	1,26	1,11	1,35
		44,07	42,37	1,70	44,61	61,53	5,57	1,10	1,36
		58,46	56,12	2,34	37,67	61,52	13,41	1,09	1,39
Werkstückvariation	Δ AD [mm] Δ WS [mm]	Δ Einstell- winkel [°]	Δ Biege- winkel [°]	Δ Rück- federung [°]	Δ Höhe [mm]	Δ Breite [mm]	Δ Tiefe [mm]	Δ min. WS [mm]	Δ max. WS [mm]
	-0,3 0,0	-0,29	-0,43	0,15	-0,18	-0,24	0,00	0,00	0,00
		-0,30	-0,41	0,11	-2,98	-0,24	-0,21	0,01	0,26
		-0,25	-0,22	-0,03	-5,09	0,77	-2,29	0,01	0,31
		-0,24	-0,60	0,36	-4,60	4,53	-6,67	0,02	0,35
	+0,3 0,0	-0,02	-0,03	0,01	0,26	0,29	0,00	0,00	0,00
		-0,04	-0,04	0,00	0,20	0,30	0,03	0,00	0,00
		-0,04	-0,04	0,00	0,15	0,30	0,16	0,00	0,00
		-0,01	-0,02	0,02	0,19	0,29	0,16	0,00	0,00
	0,0 -0,1	-0,03	-0,02	-0,01	-0,05	0,03	0,00	-0,09	-0,11
		-0,02	-0,02	0,00	-0,23	0,17	0,35	-0,09	-0,11
		-0,02	0,02	-0,03	-0,61	0,32	1,09	-0,09	-0,11
		0,01	-0,05	0,06	-1,69	0,15	1,16	-0,09	-0,11
	0,0 0,1	-0,02	-0,03	0,01	0,07	-0,06	0,00	0,10	0,11
		-0,02	-0,03	0,01	0,29	-0,12	-0,26	0,09	0,12
		-0,04	-0,06	0,03	0,54	-0,26	-0,76	0,09	0,11
		-0,06	0,08	-0,13	2,43	-0,20	-1,40	0,09	0,10

Tabelle 6.7: Simulationsergebnisse des Biegens für unterschiedliche Ovalitäten des Rohrquerschnitts in Relation zur Referenzsimulation mit rundem Rohrquerschnitt (grau) (Material: 1.4301; H: Höhe; B: Breite; WS: Wandstärke; grün/gelb/orange/rot: aufsteigender Einstellwinkel; rote Zahl: Wert außerhalb des Toleranzbereiches)

Referenz	Ovalität	Einstell-	Biege-	Rück-	Höhe	Breite	Tiefe	min.	max.	
	H [mm]	winkel	winkel	federung				WS	WS	
	B [mm]	[°]	[°]	[°]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	
		14,70	13,55	1,15	54,79	60,43	0,00	1,14	1,31	
	60,0	31,91	30,38	1,54	47,94	60,61	1,26	1,11	1,35	
	60,0	44,07	42,37	1,70	44,61	61,53	5,57	1,10	1,36	
		58,46	56,12	2,34	37,67	61,52	13,41	1,09	1,39	
Werkstückvariation	ΔH [mm]	Δ Einstell-	Δ Biege-	Δ Rück-	Δ Höhe	Δ Breite	Δ Tiefe	Δ min.	Δ max.	
	ΔB [mm]	winkel	winkel	federung				WS	WS	
		[°]	[°]	[°]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	
			-0,21	-0,25	0,04	-0,06	-0,19	0,00	0,00	0,00
		0,0	-0,18	-0,22	0,02	0,12	-0,05	-0,05	0,00	0,00
		-0,3	-0,21	-0,41	0,20	-0,93	-0,58	-1,23	0,01	0,31
			-0,16	-0,24	0,09	-2,01	0,33	-3,37	0,01	0,53
			-0,21	-0,23	0,02	-0,15	0,02	0,00	0,00	0,00
		-0,3	-0,18	-0,20	0,01	-0,05	0,02	-0,02	0,00	0,00
		0,0	-0,18	-0,30	0,12	0,96	-0,37	-0,79	0,00	0,15
			-0,15	-0,17	0,03	-0,98	0,06	-3,26	0,01	0,52

Tabelle 6.8: Simulationsergebnisse des Biegens für Materialdaten aus der Literatur in Relation zu der Referenzsimulation mit den in der Arbeit experimentell ermittelten Materialdaten (grau) (WS: Wandstärke; grün/gelb/orange/rot: aufsteigender Einstellwinkel; rote Zahl: Wert außerhalb des Toleranzbereiches)

1.4301	Referenz	Material	Einstellwinkel [°]	Biege- winkel [°]	Rück- federung [°]	Höhe [mm]	Breite [mm]	Tiefe [mm]	min. WS [mm]	max. WS [mm]
		Simulation	14,70	13,55	1,15	54,79	60,43	0,00	1,14	1,31
			31,91	30,38	1,54	47,94	60,61	1,26	1,11	1,35
			44,07	42,37	1,70	44,61	61,53	5,57	1,10	1,36
			58,46	56,12	2,34	37,67	61,52	13,41	1,09	1,39
	Variation		Δ Einstell- winkel [°]	Δ Biege- winkel [°]	Δ Rück- federung [°]	Δ Höhe [mm]	Δ Breite [mm]	Δ Tiefe [mm]	Δ min. WS [mm]	Δ max. WS [mm]
		Literatur	-0,02	-0,23	0,21	0,17	0,08	0,00	-0,01	0,01
			-0,03	-0,25	0,22	0,01	-0,08	-0,62	-0,01	0,01
			-0,05	-0,26	0,21	-0,15	0,00	-1,01	-0,01	0,01
			-0,04	-0,20	0,17	0,30	0,12	-1,22	-0,01	0,02
1.4509	Referenz	Material	Einstell- winkel [°]	Biege- winkel [°]	Rück- federung [°]	Höhe [mm]	Breite [mm]	Tiefe [mm]	min. WS [mm]	max. WS [mm]
		Simulation	14,61	13,66	0,95	54,74	60,39	0,00	1,13	1,32
			30,70	29,48	1,22	48,29	60,36	0,60	1,10	1,36
			44,59	43,26	1,33	44,48	61,27	4,85	1,09	1,37
			59,25	57,49	1,76	38,09	61,30	12,41	1,08	1,42
	Variation		Δ Einstell- winkel [°]	Δ Biege- winkel [°]	Δ Rück- federung [°]	Δ Höhe [mm]	Δ Breite [mm]	Δ Tiefe [mm]	Δ min. WS [mm]	Δ max. WS [mm]
		Literatur	-0,03	-0,01	-0,03	-0,02	-0,05	0,00	0,00	-0,01
			-0,04	-0,01	-0,03	0,02	-0,01	0,31	0,00	0,00
			-0,03	-0,01	-0,02	0,04	-0,04	0,49	0,00	0,00
			-0,02	-0,01	-0,02	-0,38	-0,07	0,49	0,00	0,01

Tabelle 6.9: Simulationsergebnisse des Biegens für unterschiedlich definierte Anfangseigen-
spannungsverteilungen in Relation zur Referenzsimulation ohne Anfangseigen-
spannungen (grau) (Material: 1.4301; σ : Anfangseigen-
spannung; WS: Wandstärke; grün/gelb/orange/rot: aufsteigender Einstellwinkel; rote Zahl: Wert außer-
halb des Toleranzbereiches)

Referenz	Eigenspg. σ [MPa]	Einstell- winkel [°]	Biege- winkel [°]	Rück- federung [°]	Höhe [mm]	Breite [mm]	Tiefe [mm]	min. WS [mm]	max. WS [mm]
	keine	14,70	13,55	1,15	54,79	60,43	0,00	1,14	1,31
		31,91	30,38	1,54	47,94	60,61	1,26	1,11	1,35
		44,07	42,37	1,70	44,61	61,53	5,57	1,10	1,36
		58,46	56,12	2,34	37,67	61,52	13,41	1,09	1,39
Werkstückvariation	σ [MPa]	Δ Einstell- winkel [°]	Δ Biege- winkel [°]	Δ Rück- federung [°]	Δ Höhe [mm]	Δ Breite [mm]	Δ Tiefe [mm]	Δ min. WS [mm]	Δ max. WS [mm]
	unter Fließgrenze	-0,04	-0,06	0,02	0,00	-0,02	0,00	0,00	0,00
		-0,04	-0,06	0,02	0,02	0,05	0,02	0,00	0,00
		-0,04	-0,08	0,04	0,03	0,07	0,05	0,00	0,00
		-0,04	-0,08	0,04	0,33	0,10	-0,32	0,00	0,00
	über Fließgrenze	-0,10	-0,14	0,05	-0,03	-0,04	0,02	0,00	0,00
		-0,10	-0,15	0,05	0,00	0,05	0,03	0,00	0,00
		-0,10	-0,15	0,06	0,02	0,08	0,05	0,00	0,00
		-0,05	-0,11	0,05	0,24	0,12	-0,31	0,00	0,00

Tabelle 6.10: Simulationsergebnisse des Biegens für unterschiedliche Reibkoeffizienten μ zur Beschreibung des Kontaktes zwischen Rohr und Gleitschiene (μ_G), Faltenglätter (μ_F), Biegeschablone (μ_B), Klemmbacke (μ_K) in Relation zur Referenzsimulation (grau) (Material: 1.4301; WS: Wandstärke; grün/gelb/orange/rot: aufsteigender Einstellwinkel; rote Zahl: Wert außerhalb des Toleranzbereiches)

Referenz	Reibung	Einstell-	Biege-	Rück-	Höhe	Breite	Tiefe	min.	max.
	μ [-]	winkel [°]	winkel [°]	federung [°]	[mm]	[mm]	[mm]	WS [mm]	WS [mm]
Referenz	μ_G 0,3	14,70	13,55	1,15	54,79	60,43	0,00	1,14	1,31
	μ_F 0,1	31,91	30,38	1,54	47,94	60,61	1,26	1,11	1,35
	μ_B 0,1	44,07	42,37	1,70	44,61	61,53	5,57	1,10	1,36
	μ_K 0,6	58,46	56,12	2,34	37,67	61,52	13,41	1,09	1,39
	$\Delta \mu$ [-]	Δ Einstell- winkel [°]	Δ Biege- winkel [°]	Δ Rück- federung [°]	Δ Höhe [mm]	Δ Breite [mm]	Δ Tiefe [mm]	Δ min. WS [mm]	Δ max. WS [mm]
Gleitschiene	-0,1	0,01	-0,01	0,02	0,13	-0,06	0,00	0,00	0,00
	0,0	-0,01	-0,06	0,04	0,31	0,03	-0,02	0,00	0,00
	0,0	-0,03	-0,08	0,05	0,32	0,10	-0,06	0,00	0,01
	0,0	0,03	0,27	-0,24	2,43	-0,08	-0,68	0,01	-0,02
	+0,1	-0,04	-0,02	-0,02	-0,10	0,04	0,00	0,00	-0,01
	0,0	-0,03	-0,01	-0,03	-0,25	0,02	0,10	0,00	-0,01
	0,0	-0,02	0,00	-0,03	-0,31	-0,01	0,24	0,00	-0,01
	0,0	0,01	0,02	-0,01	-0,13	-0,14	0,39	0,00	-0,01
Faltenglätter	0,0	-0,03	-0,04	0,01	-0,09	0,03	0,00	0,00	-0,01
	+0,1	-0,03	-0,04	0,00	-0,22	0,02	0,05	0,00	-0,01
	0,0	-0,02	-0,03	0,00	-0,25	-0,02	0,21	0,00	-0,01
	0,0	0,00	0,01	-0,01	0,00	-0,17	0,49	0,00	-0,01
Biegeschablone	0,0	-0,02	-0,02	0,00	0,01	-0,01	0,00	0,00	0,00
	0,0	-0,02	-0,02	-0,01	0,10	0,03	-0,02	0,00	0,00
	+0,1	-0,04	-0,05	0,01	0,17	0,04	-0,12	0,00	0,00
	0,0	0,05	0,30	-0,25	2,46	-0,20	-0,80	0,00	-0,03
Klemmbacke	0,0	-0,07	-0,09	0,02	-0,01	0,00	0,00	0,00	0,00
	0,0	-0,07	-0,08	0,01	-0,04	0,00	0,03	0,00	0,00
	0,0	-0,06	-0,06	0,00	-0,11	-0,01	0,20	0,00	0,00
	-0,2	-0,06	-0,19	0,13	-1,33	0,11	0,27	0,00	0,01

Tabelle 6.11: Simulationsergebnisse des Biegens mit Dorn für unterschiedliche Außendurchmesser (AD) und Wandstärken (WS) in Relation zur Referenzsimulation mit Nennwerten (grau) (Material: 1.4301; grün/gelb: aufsteigender Einstellwinkel; rote Zahl: Wert außerhalb des Toleranzbereiches)

Referenz	Geometrie	Einstell-	Biege-	Rück-	Höhe	Breite	min.	max.
	AD [mm]	winkel	winkel	federung			WS	WS
	WS [mm]	[°]	[°]	[°]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
	60,0	15,71	14,96	0,75	57,90	60,27	1,09	1,31
	1,2	30,98	29,99	0,98	56,52	60,22	1,02	1,38
Werkstücktoleranzen	Δ AD [mm]	Δ Einstell-	Δ Biege-	Δ Rück-	Δ Höhe	Δ Breite	Δ min.	Δ max.
	Δ WS [mm]	winkel	winkel	federung			WS	WS
		[°]	[°]	[°]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
	-0,3	-0,25	-0,32	0,07	0,09	-0,12	0,00	0,02
	0,0	-0,37	-0,30	-0,06	-0,02	-0,02	0,02	0,10
	+0,3	0,00	0,00	0,00	0,07	0,31	0,01	0,02
	0,0	-0,02	-0,02	0,01	0,19	0,33	0,01	0,02
	0,0	0,01	0,03	-0,02	0,00	-0,02	-0,09	-0,09
-0,1	-0,03	0,06	-0,08	0,16	0,06	-0,08	-0,11	
0,0	0,02	0,03	-0,01	-0,03	-0,02	0,09	0,13	
+0,1	-0,02	0,01	-0,02	0,05	-0,01	0,09	0,12	

Tabelle 6.12: Simulationsergebnisse des Prägens gebogener Rohre mit unterschiedlichen Außendurchmesser (AD) und Wandstärken (WS) in Relation zur Referenzsimulation mit Nennmaßen (grau) (Material: 1.4301; BW: Biegewinkel; H: Stempelhub; (1/2/3): Stempelposition im geraden Bereich/Übergangsbereich/Biegebereich; grün/gelb/orange/rot: verschiedene Kombinationen aus Biegewinkel und Stempelhub; rote Zahl: Wert außerhalb des Toleranzbereiches)

Referenz	Geometrie	BW / H	Höhe (1 / 2 / 3)			Breite (1 / 2 / 3)			Tiefe (1 / 2 / 3)		
	AD [mm] WS [mm]	[° / mm]	[mm]			[mm]			[mm]		
Referenz	60,0 1,2	15 / 5	55,58	55,70	55,81	60,19	59,40	58,52	0,30	0,10	0,08
		15 / 10	50,63	50,74	50,72	60,23	60,00	59,11	0,23	0,67	0,74
		30 / 5	55,56	55,79	55,95	60,22	59,30	57,63	0,28	0,13	0,18
		30 / 10	50,60	50,89	51,18	60,26	60,08	58,02	0,24	0,18	0,26
Werkstücktoleranzen	Δ AD [mm]	BW / H	Δ Höhe (1 / 2 / 3)			Δ Breite (1 / 2 / 3)			Δ Tiefe (1 / 2 / 3)		
	Δ WS [mm]	[° / mm]	[mm]			[mm]			[mm]		
	-0,3 0,0	15 / 5	0,49	0,29	0,23	-0,04	0,14	0,13	-0,19	-0,01	0,12
		15 / 10	0,31	0,08	0,07	1,00	-0,05	0,19	0,09	-0,25	-0,18
		30 / 5	0,26	0,00	0,04	-0,12	-0,64	0,04	-0,14	0,01	0,00
		30 / 10	-0,10	0,10	-0,11	0,26	-1,42	-0,06	-0,04	0,14	-0,02
	+0,3 0,0	15 / 5	-0,15	-0,15	-0,12	0,31	0,28	0,07	-0,02	0,00	0,00
		15 / 10	-0,14	-0,15	-0,11	0,30	0,32	0,14	0,02	0,05	0,08
		30 / 5	-0,14	-0,15	-0,11	0,28	0,23	0,13	0,02	0,04	0,00
		30 / 10	-0,13	-0,16	-0,11	0,26	0,28	0,19	-0,01	-0,01	0,02
	0,0 -0,1	15 / 5	-0,01	-0,02	0,03	0,03	0,04	0,00	-0,03	-0,01	0,00
		15 / 10	-0,02	-0,01	0,00	0,04	0,01	-0,05	-0,01	0,07	-0,09
		30 / 5	-0,02	-0,05	-0,02	0,01	0,17	0,08	-0,01	0,00	0,01
		30 / 10	-0,03	0,00	-0,11	0,00	-0,26	-0,05	-0,03	0,04	0,09
	0,0 +0,1	15 / 5	0,02	0,02	-0,01	-0,02	-0,05	-0,02	0,01	0,02	-0,01
		15 / 10	0,00	-0,01	-0,01	-0,01	0,00	0,01	0,03	-0,05	-0,19
		30 / 5	0,03	0,03	0,00	-0,06	0,02	0,02	0,02	0,01	0,00
		30 / 10	0,01	0,00	0,02	-0,07	0,06	0,01	0,01	-0,03	0,02

Tabelle 6.13: Simulationsergebnisse des Biegens mit Dorn für unterschiedliche Ovalitäten des Rohrquerschnitts in Relation zur Referenzsimulation mit rundem Rohrquerschnitt (grau) (Material: 1.4301; WS: Wandstärke; grün/gelb: aufsteigender Einstellwinkel; rote Zahl: Wert außerhalb des Toleranzbereiches)

Referenz	Ovalität	Einstell-	Biege-	Rück-	Höhe	Breite	min.	max.
	Höhe [mm]	winkel	winkel	federung			WS	WS
	Breite [mm]	[°]	[°]	[°]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
	60,0	15,71	14,96	0,75	57,90	60,27	1,09	1,31
	60,0	30,98	29,99	0,98	56,52	60,22	1,02	1,38
Werkstückvariation	Δ Höhe [mm]	Δ Einstell-	Δ Biege-	Δ Rück-	Δ Höhe	Δ Breite	Δ min.	Δ max.
	Δ Breite [mm]	winkel	winkel	federung			WS	WS
		[°]	[°]	[°]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
	0,0	0,17	0,17	0,00	-0,03	0,04	0,00	0,01
	-0,3	-0,32	-0,14	-0,16	0,48	-0,04	0,01	0,07
-0,3	0,17	0,17	0,00	-0,03	0,04	0,00	0,01	
0,0	0,08	0,38	-0,29	0,43	0,17	0,01	0,06	

Tabelle 6.14: Simulationsergebnisse des Prägens gebogener Rohre mit unterschiedlichen Ovalitäten des Anfangsrohrquerschnitts in Relation zur Referenzsimulation mit rundem Anfangsrohrquerschnitt (grau) (Material: 1.4301; BW: Biegewinkel; H: Stempelhub; (1/2/3): Stempelposition im geraden Bereich/Übergangsbereich/Biegebereich; grün/gelb/orange/rot: verschiedene Kombinationen aus Biegewinkel und Stempelhub; rote Zahl: Wert außerhalb des Toleranzbereiches)

Referenz	Ovalität	BW / H	Höhe (1 / 2 / 3)			Breite (1 / 2 / 3)			Tiefe (1 / 2 / 3)		
	Höhe [mm] Breite [mm]	[° / mm]	[mm]			[mm]			[mm]		
Referenz	60,0 60,0	15 / 5	55,58	55,70	55,81	60,19	59,40	58,52	0,30	0,10	0,08
		15 / 10	50,63	50,74	50,72	60,23	60,00	59,11	0,23	0,67	0,74
		30 / 5	55,56	55,79	55,95	60,22	59,30	57,63	0,28	0,13	0,18
		30 / 10	50,60	50,89	51,18	60,26	60,08	58,02	0,24	0,18	0,26
Werkstückvariation	Δ Höhe [mm] Δ Breite [mm]	BW / H [° / mm]	Δ Höhe (1 / 2 / 3) [mm]			Δ Breite (1 / 2 / 3) [mm]			Δ Tiefe (1 / 2 / 3) [mm]		
	0,0 -0,3	15 / 5	0,02	0,01	-0,12	0,15	0,06	-0,01	-0,13	0,17	0,07
		15 / 10	-0,17	0,05	-0,08	0,62	-0,08	-0,07	-0,04	0,24	0,20
		30 / 5	0,23	-0,08	0,05	0,05	0,05	0,36	-0,15	-0,02	-0,01
		30 / 10	-0,18	-0,09	-0,40	0,30	-0,16	0,43	-0,08	-0,13	-0,22
	-0,3 0,0	15 / 5	0,12	0,11	0,09	-0,07	-0,09	-0,11	-0,10	-0,04	0,06
		15 / 10	-0,11	0,08	0,08	0,14	-0,17	-0,18	-0,02	0,27	0,21
		30 / 5	0,11	0,11	-0,09	-0,17	0,11	0,37	-0,09	-0,05	-0,15
30 / 10		-0,05	0,01	-0,38	0,04	-0,21	0,39	-0,08	0,05	0,14	

Tabelle 6.15: Simulationsergebnisse des Biegens mit Dorn für Materialdaten aus der Literatur (Lit.) in Relation zur Referenzsimulation mit den in der Arbeit experimentell ermittelten Materialdaten (Sim.; grau) (WS: Wandstärke; grün/gelb: aufsteigender Einstellwinkel; rote Zahl: Wert außerhalb des Toleranzbereiches)

1.4301	Referenz	Material	Einstell- winkel [°]	Biege- winkel [°]	Rück- federung [°]	Höhe [mm]	Breite [mm]	min. WS [mm]	max. WS [mm]	
		Sim.	15,71 30,98	14,96 29,99	0,75 0,98	57,90 56,52	60,27 60,22	1,09 1,02	1,31 1,38	
	Variation		Δ Einstell- winkel [°]	Δ Biege- winkel [°]	Δ Rück- federung [°]	Δ Höhe [mm]	Δ Breite [mm]	Δ min. WS [mm]	Δ max. WS [mm]	
		Lit.	0,19 0,17	0,04 -0,01	0,15 0,19	0,05 0,03	0,12 0,06	-0,01 -0,01	0,03 0,01	
	1.4509	Referenz	Material	Einstell- winkel [°]	Biege- winkel [°]	Rück- federung [°]	Höhe [mm]	Breite [mm]	min. WS [mm]	max. WS [mm]
			Sim.	15,58 30,74	15,02 30,00	0,56 0,74	57,83 56,45	60,23 60,16	1,07 0,99	1,33 1,39
Variation			Δ Einstell- winkel [°]	Δ Biege- winkel [°]	Δ Rück- federung [°]	Δ Höhe [mm]	Δ Breite [mm]	Δ min. WS [mm]	Δ max. WS [mm]	
		Lit.	-0,03 -0,05	-0,02 -0,03	-0,01 -0,02	0,01 0,10	0,01 0,01	0,01 -0,01	0,01 0,05	

Tabelle 6.16: Simulationsergebnisse des Prägens gebogener Rohre für Materialdaten aus der Literatur in Relation zur Referenzsimulation mit den in der Arbeit experimentell ermittelten Materialdaten (grau) (BW: Biegewinkel; H: Stempelhub; (1/2/3): Stempelposition im geraden Bereich/Übergangsbereich/Biegebereich; grün/gelb/orange/rot: verschiedene Kombinationen aus Biegewinkel und Stempelhub; rote Zahl: Wert außerhalb des Toleranzbereiches)

1.4301	Referenz	Material	BW / H [° / mm]	Höhe (1 / 2 / 3) [mm]			Breite (1 / 2 / 3) [mm]			Tiefe (1 / 2 / 3) [mm]		
		Simulation	15 / 5	55,58	55,70	55,81	60,19	59,40	58,52	0,30	0,10	0,08
			15 / 10	50,63	50,74	50,72	60,23	60,00	59,11	0,23	0,67	0,74
			30 / 5	55,56	55,79	55,95	60,22	59,30	57,63	0,28	0,13	0,18
	30 / 10		50,60	50,89	51,18	60,26	60,08	58,02	0,24	0,18	0,26	
	Variation		BW / H [° / mm]	Δ Höhe (1 / 2 / 3) [mm]			Δ Breite (1 / 2 / 3) [mm]			Δ Tiefe (1 / 2 / 3) [mm]		
		Literatur	15 / 5	0,03	-0,01	0,04	0,04	0,07	0,11	-0,06	-0,02	0,02
			15 / 10	-0,02	-0,06	-0,07	0,09	0,02	0,10	-0,02	-0,09	-0,13
30 / 5			0,03	-0,06	0,01	0,00	0,05	-0,03	-0,03	-0,01	0,03	
30 / 10	0,00		-0,01	-0,02	0,04	-0,06	0,06	-0,03	0,04	0,01		
1.4509	Referenz	Material	BW / H [° / mm]	Höhe (1 / 2 / 3) [mm]			Breite (1 / 2 / 3) [mm]			Tiefe (1 / 2 / 3) [mm]		
		Simulation	15 / 5	55,57	55,63	55,65	60,16	59,42	58,49	0,27	0,16	0,10
			15 / 10	50,59	50,65	50,45	60,18	59,65	59,01	0,23	0,56	0,58
			30 / 5	55,55	55,66	55,60	60,15	59,35	57,22	0,30	0,14	0,10
	30 / 10		50,57	50,78	50,74	60,16	60,16	57,50	0,22	0,15	0,25	
	Variation		BW / H [° / mm]	Δ Höhe (1 / 2 / 3) [mm]			Δ Breite (1 / 2 / 3) [mm]			Δ Tiefe (1 / 2 / 3) [mm]		
		Literatur	15 / 5	0,00	0,03	0,04	-0,02	-0,03	-0,04	0,01	-0,01	0,00
			15 / 10	0,01	0,02	0,16	-0,02	0,27	-0,03	0,00	0,00	0,00
30 / 5			0,00	0,00	-0,01	0,01	-0,09	-0,06	0,01	0,02	0,02	
30 / 10	0,00		-0,01	0,00	0,01	-0,11	0,03	-0,01	0,01	-0,02		

Tabelle 6.17: Simulationsergebnisse des Prägens gebogener Rohre mit einem Materialmodell für kinematische Verfestigung (KV) in Relation zur Referenzsimulation mit einem Materialmodell für isotrope Verfestigung (IV ; grau) (BW: Biegewinkel; H: Stempelhub; (1/2/3): Stempelposition im geraden Bereich/Übergangsbereich/Biegebereich; grün/gelb/orange/rot: verschiedene Kombinationen aus Biegewinkel und Stempelhub; rote Zahl: Wert außerhalb des Toleranzbereiches)

Referenz	Material	BW / H [° / mm]	Höhe (1 / 2 / 3) [mm]			Breite (1 / 2 / 3) [mm]			Tiefe (1 / 2 / 3) [mm]		
	1.4301 IV	15 / 5	55,58	55,70	55,81	60,19	59,40	58,52	0,30	0,10	0,08
15 / 10		50,63	50,74	50,72	60,23	60,00	59,11	0,23	0,67	0,74	
30 / 5		55,56	55,79	55,95	60,22	59,30	57,63	0,28	0,13	0,18	
30 / 10		50,60	50,89	51,18	60,26	60,08	58,02	0,24	0,18	0,26	
Werkstückvariation		BW / H [° / mm]	Δ Höhe (1 / 2 / 3) [mm]			Δ Breite (1 / 2 / 3) [mm]			Δ Tiefe (1 / 2 / 3) [mm]		
	1.4301 KV	15 / 5	-0,01	-0,07	-0,11	-0,01	-0,01	-0,02	-0,03	0,02	0,03
		15 / 10	-0,06	-0,10	-0,15	0,04	-0,03	-0,04	0,03	-0,06	-0,06
		30 / 5	0,00	-0,12	-0,24	-0,01	-0,04	-0,06	-0,02	0,00	-0,09
		30 / 10	-0,05	-0,15	-0,35	0,03	0,04	-0,10	0,03	0,02	-0,11

Tabelle 6.18: Simulationsergebnisse des Biegens mit Dorn für unterschiedlich definierte Anfangseigenstressverteilungen in Relation zur Referenzsimulation ohne Anfangseigenstressungen (grau) (Material: 1.4301; σ : Anfangseigenstressung; WS: Wandstärke; grün/gelb: aufsteigender Einstellwinkel; rote Zahl: Wert außerhalb des Toleranzbereiches)

Referenz	Eigenstressung	Einstellwinkel	Biege- winkel	Rück- federung	Höhe	Breite	min. WS	max. WS
	σ [MPa]	[°]	[°]	[°]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
keine		15,71	14,96	0,75	57,90	60,27	1,09	1,31
		30,98	29,99	0,98	56,52	60,22	1,02	1,38
Werkstückvariation	σ [MPa]	Δ Einstell- winkel [°]	Δ Biege- winkel [°]	Δ Rück- federung [°]	Δ Höhe [mm]	Δ Breite [mm]	Δ min. WS [mm]	Δ max. WS [mm]
	unter Fließgrenze	0,01	0,01	0,00	0,00	-0,02	0,00	0,02
		-0,01	-0,01	0,01	0,04	0,01	0,00	0,01
	über Fließgrenze	-0,04	-0,08	0,04	0,02	0,00	0,00	0,02
	-0,06	-0,07	0,02	0,02	-0,02	0,00	0,00	

Tabelle 6.19: Simulationsergebnisse des Prägens gebogener Rohre für unterschiedlich definierte Anfangseigenstressverteilungen in Relation zur Referenzsimulation ohne Anfangseigenstressungen (grau) (Material: 1.4301; σ : Anfangseigenstressung; BW: Biege­winkel; H: Stempelhub; (1/2/3): Stempelposition im geraden Bereich/Übergangsbereich/Biegebereich; grün/gelb/orange/rot: verschiedene Kombinationen aus Biege­winkel und Stempelhub; rote Zahl: Wert außerhalb des Toleranzbereiches)

Referenz	Eigenstressung	BW / H	Höhe (1 / 2 / 3)			Breite (1 / 2 / 3)			Tiefe (1 / 2 / 3)		
	σ [MPa]	[° / mm]	[mm]			[mm]			[mm]		
keine	keine	15 / 5	55,58	55,70	55,81	60,19	59,40	58,52	0,30	0,10	0,08
		15 / 10	50,63	50,74	50,72	60,23	60,00	59,11	0,23	0,67	0,74
		30 / 5	55,56	55,79	55,95	60,22	59,30	57,63	0,28	0,13	0,18
		30 / 10	50,60	50,89	51,18	60,26	60,08	58,02	0,24	0,18	0,26
Werkstückvariation	σ [MPa]	BW / H [° / mm]	Δ Höhe (1 / 2 / 3) [mm]			Δ Breite (1 / 2 / 3) [mm]			Δ Tiefe (1 / 2 / 3) [mm]		
	unter Fließgrenze	15 / 5	0,01	-0,01	-0,03	0,01	0,01	0,02	-0,01	0,01	0,00
		15 / 10	-0,02	-0,01	-0,02	0,02	0,01	0,03	-0,01	-0,01	-0,11
		30 / 5	0,01	0,01	0,00	-0,03	-0,01	0,02	-0,01	0,01	-0,02
		30 / 10	-0,01	0,01	0,00	-0,02	-0,04	0,02	0,00	0,01	-0,02
	über Fließgrenze	15 / 5	0,01	0,01	0,00	-0,01	-0,01	0,00	-0,07	0,02	0,00
		15 / 10	-0,06	0,01	0,01	0,03	-0,08	0,01	-0,02	0,06	-0,03
		30 / 5	0,02	0,03	0,00	-0,05	-0,02	-0,01	0,00	0,01	-0,04
		30 / 10	-0,02	0,02	0,00	-0,03	-0,02	-0,01	-0,04	-0,01	-0,01

Tabelle 6.20: Simulationsergebnisse des Prägens gebogener spannungsarmgeglühter Rohre in Relation zur Referenzsimulation mit Eigenspannungen aus dem Biegeprozess (grau) (Material: 1.4301; BW: Biegewinkel; H: Stempelhub; (1/2/3): Stempelposition im geraden Bereich/Übergangsbereich/Biegebereich; grün/gelb/orange/rot: verschiedene Kombinationen aus Biegewinkel und Stempelhub; rote Zahl: Wert außerhalb des Toleranzbereiches)

Referenz	Eigenspannung nach Biegen	BW / H [° / mm]	Höhe (1 / 2 / 3) [mm]			Breite (1 / 2 / 3) [mm]			Tiefe (1 / 2 / 3) [mm]		
	ja		15 / 5	55,58	55,70	55,81	60,19	59,40	58,52	0,30	0,10
		15 / 10	50,63	50,74	50,72	60,23	60,00	59,11	0,23	0,67	0,74
		30 / 5	55,56	55,79	55,95	60,22	59,30	57,63	0,28	0,13	0,18
		30 / 10	50,60	50,89	51,18	60,26	60,08	58,02	0,24	0,18	0,26
Werkstückvariation		BW / H [° / mm]	Δ Höhe (1 / 2 / 3) [mm]			Δ Breite (1 / 2 / 3) [mm]			Δ Tiefe (1 / 2 / 3) [mm]		
	nein	15 / 5	0,00	-0,09	-0,16	0,00	0,03	0,03	0,00	0,02	0,02
		15 / 10	-0,01	-0,05	-0,10	0,01	0,03	-0,05	-0,01	-0,02	-0,01
		30 / 5	0,02	-0,13	-0,26	0,00	-0,01	-0,02	0,00	0,01	-0,05
		30 / 10	-0,02	-0,11	-0,25	0,01	0,07	-0,14	0,00	-0,05	-0,08

Tabelle 6.21: Simulationsergebnisse des Biegens mit Dorn für unterschiedliche Reibkoeffizienten μ zur Beschreibung des Kontaktes zwischen Rohr und Biegedorn (μ_{BD}) in Relation zur Referenzsimulation (grau) (Material: 1.4301; WS: Wandstärke; grün/gelb: aufsteigender Einstellwinkel; rote Zahl: Wert außerhalb des Toleranzbereiches)

Referenz	Reibung	Einstell-	Biege-	Rück-	Höhe	Breite	min.	max.
	μ [-]	winkel [°]	winkel [°]	federung [°]	[mm]	[mm]	WS [mm]	WS [mm]
μ_{BD} 0,1		15,71	14,96	0,75	57,90	60,27	1,09	1,31
		30,98	29,99	0,98	56,52	60,22	1,02	1,38
Werkstückvariation	$\Delta \mu$ [-]	Δ Einstell-	Δ Biege-	Δ Rück-	Δ Höhe	Δ Breite	Δ min.	Δ max.
		winkel [°]	winkel [°]	federung [°]	[mm]	[mm]	WS [mm]	WS [mm]
+0,2		-0,02	-0,03	0,01	0,04	-0,01	-0,01	0,02
		-0,14	-0,23	0,10	-3,93	-0,04	-0,01	0,05

Tabelle 6.22: Simulationsergebnisse des Prägens gebogener Rohre für unterschiedliche Reibkoeffizienten μ zur Beschreibung des Kontaktes zwischen Rohr und Stempel (μ_S), Rohrklemmung (μ_K) in Relation zur Referenzsimulation (grau) (Material: 1.4301; BW: Biegewinkel; H: Stempelhub; (1/2/3): Stempelposition im geraden Bereich/Übergangsbereich/Biegebereich; grün/gelb/orange/rot: verschiedene Kombinationen aus Biegewinkel und Stempelhub; rote Zahl: Wert außerhalb des Toleranzbereiches)

Referenz	Reibung	BW / H	Höhe (1 / 2 / 3)			Breite (1 / 2 / 3)			Tiefe (1 / 2 / 3)		
	μ [-]	[° / mm]	[mm]			[mm]			[mm]		
		15 / 5	55,58	55,70	55,81	60,19	59,40	58,52	0,30	0,10	0,08
	μ_S 0,1	15 / 10	50,63	50,74	50,72	60,23	60,00	59,11	0,23	0,67	0,74
	μ_K 0,1	30 / 5	55,56	55,79	55,95	60,22	59,30	57,63	0,28	0,13	0,18
		30 / 10	50,60	50,89	51,18	60,26	60,08	58,02	0,24	0,18	0,26
Werkstückvariation	$\Delta \mu$	BW / H	Δ Höhe (1 / 2 / 3)			Δ Breite (1 / 2 / 3)			Δ Tiefe (1 / 2 / 3)		
	[-]	[° / mm]	[mm]			[mm]			[mm]		
		15 / 5	0,00	0,02	0,03	0,01	-0,01	-0,01	-0,03	-0,01	0,01
	+0,2	15 / 10	0,02	0,03	0,03	-0,02	-0,01	-0,03	0,04	-0,04	-0,10
	0,0	30 / 5	0,00	0,02	0,03	0,01	-0,01	-0,02	-0,03	0,00	0,01
		30 / 10	0,01	0,06	0,05	-0,01	-0,05	-0,05	0,00	-0,01	-0,01
	0,0	15 / 5	-0,01	-0,04	-0,06	-0,01	-0,01	-0,01	0,00	0,02	0,00
	+0,2	15 / 10	-0,01	-0,04	-0,03	-0,03	-0,10	-0,06	-0,01	0,08	0,07
	30 / 5	0,00	-0,04	-0,06	-0,01	-0,02	-0,02	0,00	0,01	-0,01	
	30 / 10	0,00	-0,06	-0,08	-0,03	-0,10	-0,08	0,00	0,03	0,04	

Veröffentlichungen, Proceedings, Vorträge, Posterbeiträge und Patente

A Veröffentlichungen & Proceedings

1. R. Derr, A. Jung, S. Diebels [2019]
"Development of a simulation model for the automatic optimization of tools for tube embossing"
CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology
2. R. Derr, A. Jung, S. Diebels [2019]
"Development of a simulation model for the automatic optimization of tools for multi-dimensional tube forming"
Proceedings in Applied Mathematics and Mechanics
3. B.J. Braun, T. Pohlemann, S.C. Herath, M. Klein, M.F. Rollmann, R. Derr, S. Diebels, M. Roland [2019]
"An individualized simulation model based on continuous, independent, ground force measurements after intramedullary stabilization of a tibia fracture"
Archive Applied Mechanics

B Vorträge

1. R. Derr, A. Jung, S. Diebels
"Entwicklung eines Simulationsmodells zum Biegen dünnwandiger Rohre"
Workshop Kontinuumsmechanik 2016, 14.09.2016-16.09.2016, Sankt Andreasberg
2. R. Derr, A. Jung, S. Diebels
"Development of a simulation model for the automatic optimization of tools for multi-dimensional tube forming"
Workshop Kontinuumsmechanik 2018, 12.09.2018-14.09.2018, Kleinwalsertal
3. B. Braun, T. Pohlemann, S. Herath, M. Klein, M. Rollmann, R. Derr, S. Diebels, M. Roland
"In vivo "Mikrobiomechanik" nach Marknagelosteosynthese einer Tibiaschaftfraktur - Vorstellung eines individualisierten Simulationsalgorithmus basierend auf kontinuierlicher Ganganalyse unter klinisch realisierbaren Bedingungen"
Deutscher Kongress für Orthopädie und Unfallchirurgie - DKOU, 23.10.2018-26.10.2018, Berlin

4. R. Derr, A. Jung, S. Diebels
"Development of a simulation model for the automatic optimization of tools for multi-dimensional tube forming"
90th Annual Meeting of the International Association of Applied Mathematics and Mechanics, 18.02.2019-22.02.2019, Vienna (Austria)

C Posterbeiträge

1. R. Derr
"Entwicklung eines FE-Modells zur numerischen Simulation und Effizienzsteigerung mehraxialer Rohrumformungen"
Petersberger Industriedialog 2016, 23.06.2016, Königswinter
2. R. Derr, A. Jung, S. Diebels
"Entwicklung eines FE-Modells zur numerischen Simulation und Effizienzsteigerung mehraxialer Rohrumformungen"
Doktorandentag der UdS (Universität des Saarlandes) 2016, 09.11.2016, Saarbrücken
3. R. Derr, A. Jung, S. Diebels
"Numerical Modelling of Tube Forming Processes"
9. DGM(Deutsche Gesellschaft für Materialkunde e.V.)-Regionalforum Saar, 29.01.2019, Saarbrücken
4. R. Derr, A. Jung, S. Diebels
"Numerische Modellierung von Rohrumformprozessen"
Innovationstag Mittelstand des BMWi (Bundesministerium für Wirtschaft und Energie) 2019, 09.05.2019, Berlin