

# Knickbauchen eines axialsymmetrischen Rohres: Numerische und experimentelle Untersuchung

Bernd-Arno Behrens, Bernd Viehweger, Matthias Kammler, Alexander Sviridov, Philip Grützner,  
\*Amer Almohallami

Institut für Umformtechnik und Umformmaschinen  
Leibniz Universität Hannover  
30823 Garbsen, Deutschland  
\*Email: [almohallami@ifum.uni-hannover.de](mailto:almohallami@ifum.uni-hannover.de)

**Kurzfassung** – Diese Arbeit befasst sich mit der numerischen und experimentellen Untersuchung des Knickbauchens. Dies erfolgt vor dem Hintergrund, dass das Fügen durch Knickbauchen gegenüber thermischen Fügeverfahren bisher kaum genutzte, große Potenziale bietet. Untersucht wurden hierzu dünnwandige Rohre unterschiedlicher Abmessungen aus dem Stahl E235+N. Begleitend zu den experimentellen Untersuchungen wurde ein vollparametrisches Finite-Elemente-Modell entwickelt und validiert. Mit diesem Modell konnten auf Basis von Parameterstudien die Auswirkungen einzelner Prozesseingangsgrößen systematisch erfasst werden. Die Ergebnisse zeigen, dass die benötigte Umformkraft als ein Maß für die Wirtschaftlichkeit des Prozesses u.a. stark von geometrischen Eingangsgrößen, wie dem Rohrradius, der Rohrwanddicke und der Knicklänge abhängig ist.

**Schlüsselwörter:** Knickbauchen, Finite-Elemente-Methode, Fügeverfahren, Rohrumformung

## 1 Einleitung

Der Einsatz höherfester Werkstoffe und die Verwendung verschiedener Materialien stellt die Fügeverfahren in der Automobilindustrie und anderen Industriezweigen vor große Herausforderungen. So ist das Fügen von Stählen mittels konventioneller Schmelzschweißverfahren z.B. nur unter Inkaufnahme von Festigkeitsverlusten in der Wärmeeinflusszone möglich. Eine Kombination verschiedener Materialien ist dabei im Extremfall nicht realisierbar. Der zunehmende Einsatz anwendungsangepasster Materialien beispielsweise im Automobilbau erfordert jedoch die Verfügbarkeit alternativer Fügeverfahren.

Das Fügen durch Knickbauchen bietet sich hierzu als eine innovative Verbindungstechnologie an. Bei diesem Verfahren wird ein Rohrabschnitt zunächst in das Loch eines Bleches gesteckt und durch zwei anschließende Knickbauchschritte radial derart geweitet, dass zwischen zwei gebildeten Knicken eine unlösbare, formschlüssige Verbindung entsteht [1]. Diese Fügeverfahren hat u.a. die Vorteile, dass sowohl die guten mechanischen und strukturellen Eigenschaften der gefügten Bauteile erhalten bleiben, als auch das die verschiedenen Materialien miteinander verbunden werden können [2].

Das Knickbauchen eines Rohres kann allgemein in zwei Verfahrensvarianten unterschieden werden: „Knickbauchen nach innen“ und „Knickbauchen

nach außen“. In der vorliegenden Arbeit wird die Variante „Knickbauchen nach außen“ untersucht. Hierbei wird ein Rohrabschnitt axial gestaucht, wobei durch die auftretenden Spannungen eine Ausbauchung am Rohrumfang entsteht. Der Werkstoff wird an der Ausbauchstelle tangential gedehnt und bildet einen Flansch bzw. Bund [3].

Der Knickumformprozess eines Rohres wurde 1908 von R. Lorenz [4] und S. Timoschenko [5] anhand eines Differentialgleichungsansatzes analytisch beschrieben. Geckeler hat 1928 die Randbedingung dieser Differentialgleichungen angepasst, um weitere ähnliche Umformprozesse zu beschreiben [6].

Eine der ersten Studien, die sich mit dem Knickprozessparameter beschäftigt haben, wurde 1974 von Al-Qureshi et. al. an einem Rohr aus Aluminium durchgeführt [7]. In seiner Arbeit hat er eine Theorie zur Berechnung der Umformkraft dargestellt. Andere Studien zur Untersuchung der unterschiedlichen Prozessparameter wurden von Alves et. al. [8] Gouveia et. al [9] und Reid et. al. [10] ausgearbeitet.

Systematische Untersuchungen zu dem in dieser Arbeit betrachteten Fügeverfahren sind in der Literatur kaum zu finden. Des Weiteren reichen die vorhandenen Arbeiten nicht aus, um Prozessrichtlinien bzw. eine Wissensbasis oder Hilfestellung zur Abschätzung des Potentials dieses innovativen Verfahrens abzuleiten.

Aus diesen Gründen erfolgten im Rahmen dieser Arbeit grundlegende numerische und experimentelle Untersuchungen zum Knickbauchen an dünnwandigen Rohren verschiedener Abmessungen bei unterschiedlichen Prozessbedingungen, um geeignete Verfahrensparameter zur wirtschaftlichen Realisierung von Knickbauchverbindungen zu identifizieren. Aufgrund der starken Verbreitung von Baustählen in weiten Teilen der metallverarbeitenden Industrie, wurden die Grundlagenversuche zunächst mit dem Werkstoff E235+N durchgeführt. Numerische Voruntersuchungen zeigten, als ein Charakteristikum des Prozesses das Auftreten vergleichsweise hoher plastischer Formänderungen insbesondere im Bereich der Flansche. Daher wurden die eingesetzten Rohrabschnitte aus kaltgezogenen Präzisionsrohren nach EN 10305-1 vor der Umformung zunächst normal gegläht, um so ein ausreichendes Formänderungsvermögen bereit zu stellen [11].

## 2 Untersuchungen zum plastischen Verhalten der eingesetzten Rohre

Die Aufnahme der für die weitergehende Betrachtung des Knickbauchens benötigten Fließkurven zur Charakterisierung des plastischen Werkstoffverhaltens des Stahls E235 + N wurden an einer Universalprüfmaschine ZWICK 1486 quasistatisch bei einer Prüfgeschwindigkeit von 4 mm/min durchgeführt. Die Proben wurden in Anlehnung an DIN EN 10002-1 (Zugversuch) aus Rohrabschnitten unterschiedlicher Durchmesser und Wanddicken gefräst und weisen dementsprechend im Gegensatz zu konventionellen Flachzugproben eine Krümmung auf. Diese Krümmung blieb bei der Aufnahme der Fließkurven erhalten, sodass ein verfälschender Einfluss auf den einachsigen Spannungszustand auszuschließen ist. Die Prüfung dieser Probekörper wurde durch die Verwendung spezieller Aufnahmen ermöglicht (Bild 1, a). Die Fließkurven wurden bis zur Gleichmaßdehnung von ca.  $\varphi \approx 0,24$  aufgenommen und nach Gosh bis  $\varphi = 5$  extrapoliert (Bild 1, b).

Die Validierung dieser Extrapolation erfolgte zum einen durch den Abgleich numerisch und experimentell ermittelter Kraft-Weg-Verläufe während des Knickbauchens und zum anderen

durch den Vergleich numerisch und messtechnisch bestimmter Bauteilkonturen.

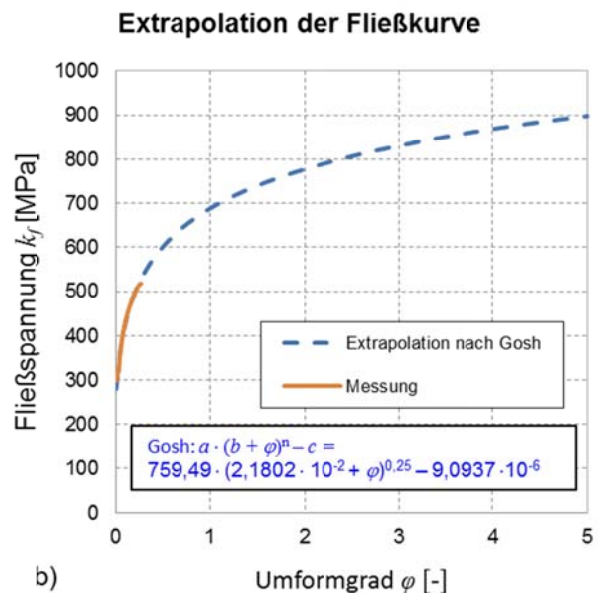
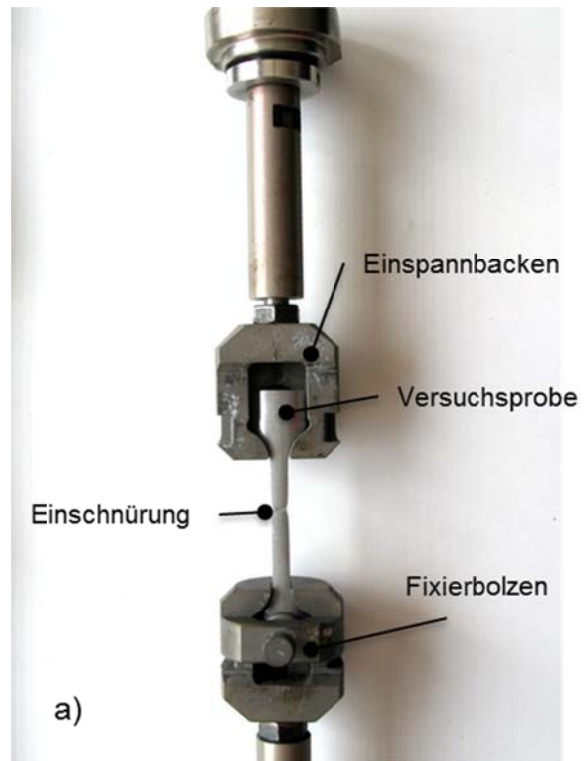


Bild 1: a) Fixierungssystem der Zugproben und b) Extrapolationsergebnisse für Zugprobe aus E235+N, gefräst aus einem Rohr mit einem Durchmesser von 45 mm und einer Wanddicke von 2 mm (45x2)

### 3 Vollparametrisches FE-Modell zur Untersuchung des Knickbauchens

Zur Betrachtung einer möglichst großen Anzahl von Einflussparametern auf das Knickbauchergebnis bietet es sich an, zunächst numerische Untersuchungen unter Verwendung eines vollparametrisierten FE-Modells durchzuführen. Dieses erlaubt unter Minimierung des Arbeitsaufwandes und der Fehleranfälligkeit eine schnelle und umfangreiche Betrachtung maßgeblicher Geometrie- und Prozessparameter. Beispielfhaft ist in Bild 2 eine Auswahl der einstellbaren geometrischen Größen dargestellt. Auf Grund der Ergebnisse aus Vorversuchen konnte ermittelt werden, dass sich für das Verhältnis von Werkzeugradius zur Wanddicke des Rohres  $r_{wk} / w_d = 1$  hinsichtlich des Umformgrades, der Rohrendgeometrie und der benötigten Umformkraft günstige Resultate ergeben. Zudem wurde der Stempelweg so gewählt, dass der Abstand der Werkzeuge zum Ende des Knickbauchens das Zweifache der Wanddicke des Rohres  $w_d$  entspricht. Ferner wurde die Einspannlänge  $l_w$  mit 10 mm konstant gehalten.

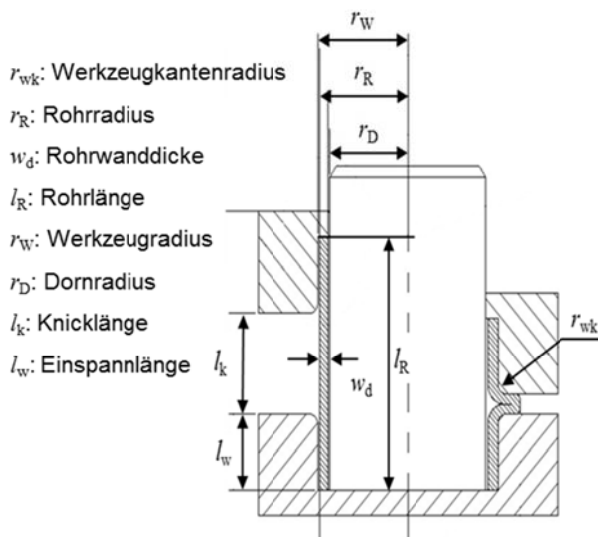


Bild 2: FE-Modellparameter

Für die im Zuge dieses Vorhabens durchgeführten numerischen Untersuchungen kam das kommerzielle FE-System Abaqus-Standard zur Anwendung. Zur Vermeidung unerwünschter numerische Effekte, wie z.B. eines Shear-Lockings oder Hourglassings, wurden die umzuformenden Rohrschnitte mit mindestens 8 vollintegrierte Volumenelemente über die Rohrdicke modelliert. Die Abbildung der formgebenden Werkzeuge erfolgte als analytische, ideal starre Körper (Bild 3). Für den kommerziellen FE-Solver Abaqus-Standard wurde hierzu eine entsprechende Eingabedatei

erstellt, welche alle zu variierenden Größen als Variablen enthält, wobei gezielt die Abhängigkeit einzelner Größen, wie z.B. des Rohrradius und des Werkzeugradius unter Berücksichtigung des Spaltmaßes genutzt wurden. Das Ziel dieser numerischen Untersuchungen bestand in der grundlegenden Analyse des Prozesses sowie zu dessen Auslegung. Von besonderem Interesse sind hierbei der zu erwartende Kraftbedarf, die örtlich auftretenden Formänderungen im Bereich der Flansche/Bünde sowie erste Informationen über eine zu erwartende lokale Vorschädigung im Rohrmaterial.

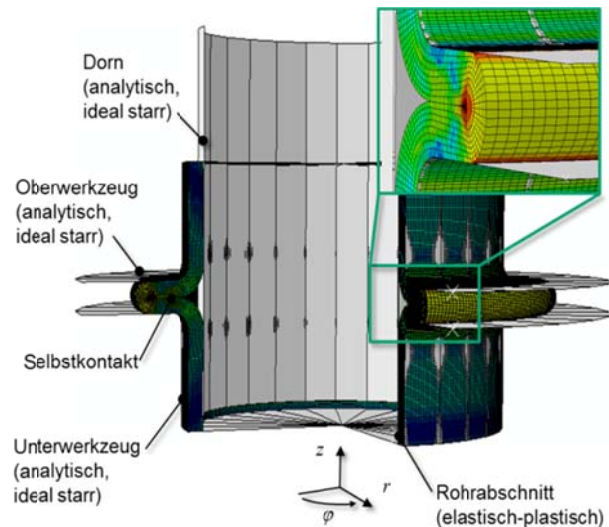


Bild 3: FE-Modell zum Knickbauchen

### 4 Versuchsaufbau zur experimentellen Untersuchung des Knickbauchens

Zur experimentellen Betrachtung und zur Gewinnung von Daten zur Validierung des FE-Modells erfolgten Versuche an einer Servospindelpresse UFM 300 der Firma Promess mit einer Nennpresskraft von 300 kN und einer maximalen Stoßelgeschwindigkeit von 150 mm/s. Zusätzlich zum internen Wegmesssystem verfügt die Anlage über einen inkrementellen Messtaster Heidenhain ST 3078 mit einer Systemgenauigkeit von  $\pm 1 \mu\text{m}$  [2]. Zur Prüfung eines möglichst breiten Spektrums verschiedener Rohrabmessungen wurde ein modular aufgebautes Wechselwerkzeug für das Knickbauchen konstruiert und gefertigt (Bild 4). Dieses verfügt über eine manuell zu betätigenden, hydraulischen Auswerfer, welcher ein einfaches und schnelles Entfernen der Bauteile aus dem Werkzeug ermöglicht.

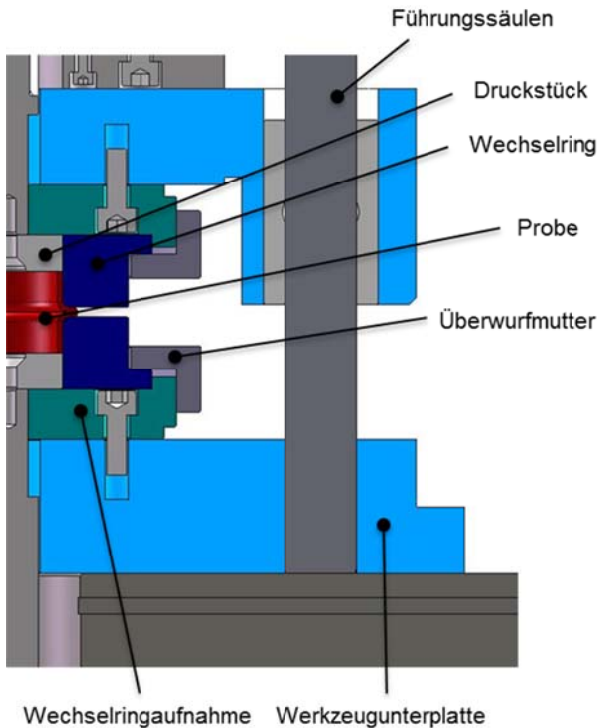


Bild 4: Konstruktion der Werkzeuge zum Knickbauchen

## 5 Ergebnisse

Für einen Abgleich experimentell ermittelter und numerisch bestimmter Werte wurde ein Rohr mit den Abmessungen von 45x2 mm ausgewählt, für welches zuvor nach der beschriebenen Vorgehensweise eine Fließkurve ermittelt wurde. Als Vergleichsgrößen zur Validierung des FE-Modells wurden die numerisch ermittelten und die experimentell gemessenen Kraft-Weg-Verläufe, sowie die jeweiligen Bauteilkonturen nach dem Knickbauchen herangezogen. Die Gegenüberstellung der Kraft-Weg-Verläufe (Bild 5) zeigt, dass die Abweichung im Bereich von  $\pm 5\%$  liegt. Hierbei sind bei der Ausbildung der Flansche die jeweils drei charakteristischen Phasedurchläufe sehr gut zu erkennen. Diese sind die Phase des Ausknickens (1), des Anlegens des Flansches bzw. des Bundes (2) und die Quetschphase (3).

Zur Bewertung der berechneten Bauteilkontur nach dem Umformprozess erfolgte die Bestimmung der realen Bauteilkontur mit dem optischen Messsystem GOM. Hierbei ergaben sich keine nennenswerten Abweichungen, was als weiteres Indiz für die Validität der Fließkurvenextrapolation zu werten ist (Bild 6).

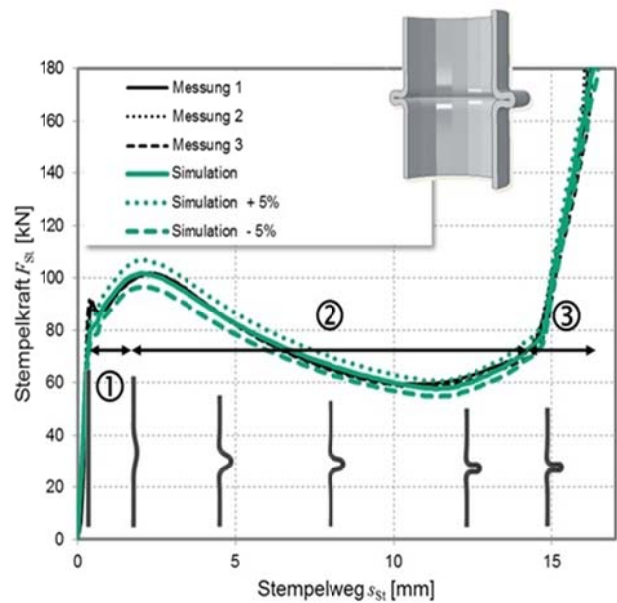


Bild 5: Abgleich experimentelle und numerisch bestimmte Kraft-Weg-Verläufe des Prozesses Knickbauchen eines Rohres (45x2)

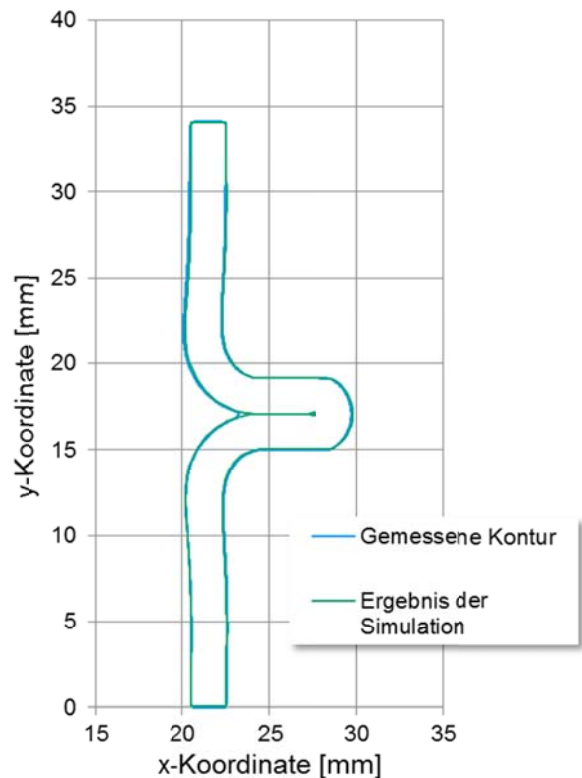


Bild 6: Abgleich der vermessenen und numerisch bestimmten Bauteilkontur

Ergänzend erfolgten weitere Untersuchungen sowohl mit dickwandigeren, als auch mit dünnwandigeren Rohren. Es zeigt sich insgesamt eine sehr gute Übereinstimmung und somit eine Eignung des Modells für weiterführende Untersuchungen in einem breiten Abmessungsbereich (Bild 7).

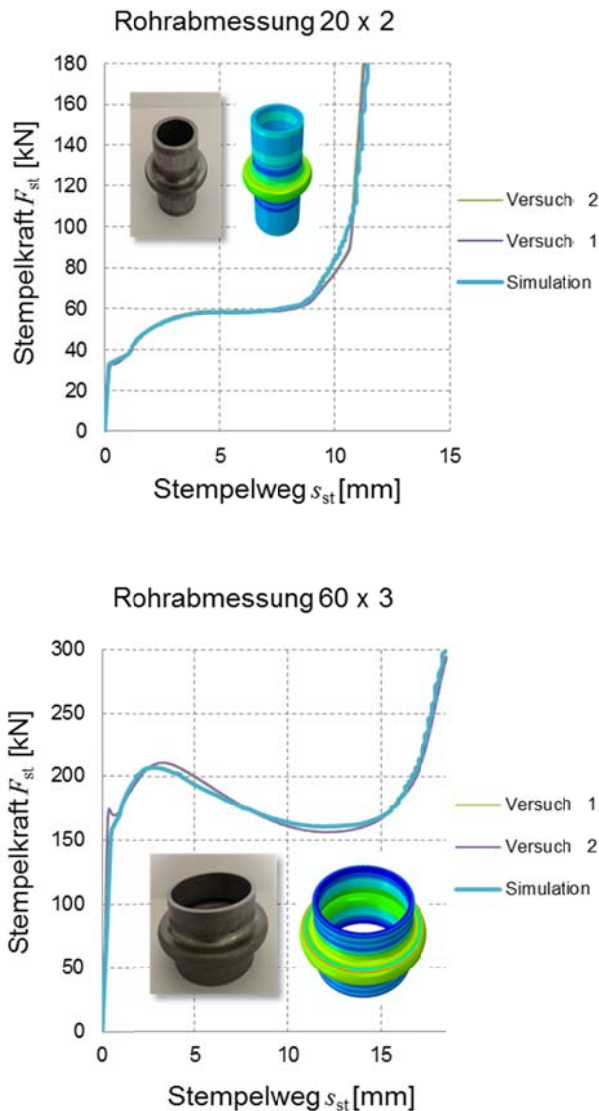


Bild 7: Experimentelle und numerisch ermittelte Kraft-Weg-Verläufe

Zunächst wurden die geometrischen Haupteinflussparameter untersucht (Bild 8). Diese sind der Rohrradius  $r_R$ , die Rohrwandstärke  $w_d$  und die Knicklänge  $l_k$ .

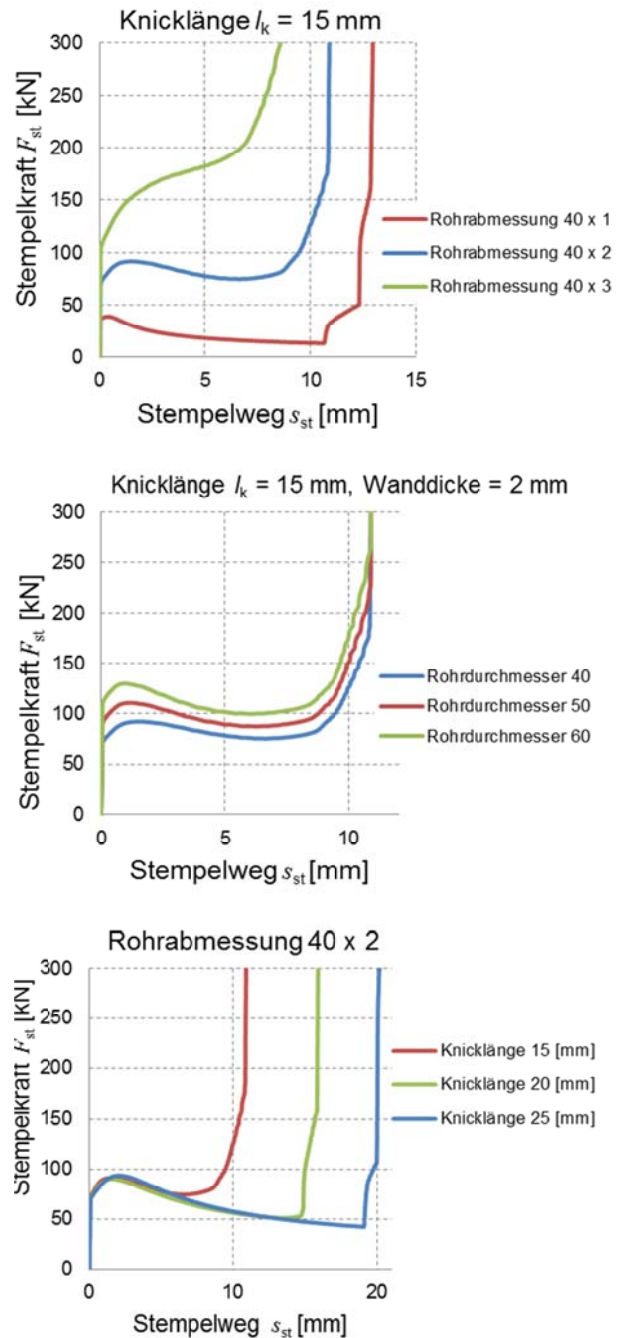


Bild 8: Gegenüberstellung der unterschiedlichen Effekte der untersuchten Parameter auf die Stempelkraft.

Die Einflüsse dieser Parameter auf die Stempelkraft können analytisch nachvollzogen werden. Vergrößerung der Wanddicke führt zu einer quadratischen Vergrößerung der gesamten Rohrquerschnittfläche. Dies bewirkt eine Erhöhung des Kraftbedarfs, um die Fließspannung des Materials zu erreichen. Weiterhin ist es zu beobachten, dass bei Wanddicke von 3 mm ein

Abfall der Stempelkraft in der Anlegephase nicht auftritt.

Das zweite Diagramm in dem Bild deutet darauf hin, dass die Umformkraft proportional zur Rohrquerschnittfläche zunimmt.

Das dritte Diagramm zeigt, dass im Fall einer Knicklängenvergrößerung die Stempelarbeit auf Grund der Vergrößerung des Stempelwegs ansteigt. Ferner fällt das Minimum der Stempelkraft in der Anlegephase kleiner aus als bei größeren Knicklängen.

Der Kraft-Weg-Verlauf ist ein wichtiges Prozessmerkmal. Dazu gehört auch die Formänderung des Rohres, die zunächst in Abhängigkeit mit der Rohrabmessung und Knicklänge untersucht wurde. Diesbezüglich werden die Rohrabmessungen als Durchmesser-Wandstärken-Verhältnis  $r_R / w_d$  in den weiteren Untersuchungsschritten betrachtet.

## 6 Ausblick

Hinsichtlich charakteristischer Kraft-Weg-Verläufe, Formänderungen und Bestimmung von minimalen und maximalen Knicklängen ist das Verhältnis von Rohrradius zur Wanddicke  $r_R / w_d$  von besonderer Bedeutung, da eine Variation der Rohrabmessung zu einer erheblichen Änderung der benötigten Umformkraft und der Umformgrade führt.

Um die Effekte des Verhältnis  $r_R / w_d$  auf die genannten Prozessgrößen genauer zu betrachten, werden weitere Parameterkombinationen mittels des vollparametrisierten Modells untersucht.

Zur Betrachtung des Fügens durch Knickbauchen erfolgt eine Erweiterung des axialsymmetrischen FE-Modells, sodass der gesamte Fügeprozess abgebildet werden kann. Zudem sind Erweiterungen geplant, die zukünftig auch eine numerische Abschätzung der Verbindungsfestigkeit erlauben. Hierzu erfolgt ebenfalls ein konsequenter Abgleich mit Ergebnissen experimenteller Untersuchungen zur Bestimmung der Zug-, Druck- und Biegefestigkeit.

## Danksagung

Das IGF-Vorhaben 17312 BG „Fügen durch Knickbauchen“ der Forschungsvereinigung Europäische Forschungsgesellschaft für Blechbearbeitung e. V. – EFB, wird über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

## Literatur

- [1] Lange K.: Umformtechnik Handbuch für Industrie und Wissenschaft, 4, 280, 1993
- [2] Viehweger B, Sviridov A., Behrens B.-A., Kammler M., Almohallami A., Grützner P.: Knickbauchen – ein Fügeverfahren mit großen Perspektiven, bbr 1/2013
- [3] Lange K.: Umformtechnik: Grundlagen, 1, 22, 2002
- [4] Lorenz R.: Achsensymmetrische Verzerrungen in dünnwandigen Hohlzylindern, VDI-Zeitschrift, 52/43, 1706–1713, 1908
- [5] Timoschenko S.: Einige Stabilitätsprobleme der Elastizitätstheorie, Zeitschrift für Mathematik und Physik, 337, 1910
- [6] Geckeler J. W.: Plastisches Knicken der Wandung von Hohlzylindern und einige andere Faltungserscheinungen an Schalen und Blechen. Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Mechanik, 8/5, 341
- [7] Al-Qureshi H. A., Das M. K.: Thin-walled tube cropping using elastomer, Int. J. Mach. Tool Design, Res. 16, 77-85, 1974
- [8] Alves M.L., Almeida B.P.P, Rosa P.A.R, Martins P.A.F: End forming of thin-walled tubes, Journal of Materials Processing Technology 177, 183-187, 2006
- [9] Gouveia B.P.P., Alves M.L., Rosa P.A.R.: Compression beading and nosing of thin-walled tubes using a die: experimental and theoretical investigation, Int J Mech Mater Des 3:7–16, 2006
- [10] Reid S. R.: Plastic deformation mechanisms in axially compressed metal tubes used as impact energy absorbers, Int. J. Mech. Sci. Vol. 35 (12), 1035-1052, 1993
- [11] Neugebauer, R.: EFB-Forschungsbericht Nr. 107. Ermittlung von Verfahrensgrenzen für das Kragenziehen an Tiefziehteilen mit Hilfe der FEM-Simulation, ISBN 978-3-86776-239-7, 1998