

Schlussbericht

zu IGF-Vorhaben Nr. 18261N

Thema

Gezielte Beeinflussung der Exzentrizität und Eigenspannungen beim Gleitziehen von Rohren –
Entwicklung einer In-Line-Messung und Steuerung

Berichtszeitraum

Bewilligungszeitraum: 01.12.2016-31.03.2019

Forschungsvereinigung

Stifterverband Metalle e.v.

Forschungseinrichtung(en)

TU Clausthal, Institut für Metallurgie

Clausthal-Zellerfeld, 13.09.2019

Ort, Datum



Prof. Dr.-Ing. Heinz Palkowski

Name und Unterschrift aller Projektleiterinnen und Projektleiter der
Forschungseinrichtung(en)

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Inhaltsverzeichnis

Einführung und Ziele des Projekts.....	3
Durchführung der Untersuchungen, Ergebnisse und Diskussion.....	5
Statische Versuche, Parameter	5
Festigkeiten, Härtemessung:.....	11
Eigenspannungsmessungen	13
Einfluss der Kippung; fliegender Dorn.....	18
Entwicklung einer dynamisch verstellbaren Matrize	19
Konstruktion und Fertigung der verstellbaren Matrize, Implementierung und Einfahren einer Wanddickenmess-einrichtung.....	19
Steuertechnische Verknüpfung der Wanddickenmesseinrichtung und der Verstellmatrize.....	20
Entwicklung der Regelalgorithmen, Bau der Regelung	21
Durchführung der Untersuchungen mit verstellbarer Matrize	21
Zusammenfassung.....	24
Ausblick	25
Verwendung der Zuwendung	25
Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit.....	25
Plan zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft.....	26
Realisierbarkeit des vorgeschlagenen und aktualisierten Transferkonzepts	27
Wissenschaftlich-technischer und wirtschaftlicher Nutzen.....	28
Veröffentlichungen	28
Literatur	29
Abbildungsverzeichnis.....	30

Einführung und Ziele des Projekts

Die Verringerung der Querschnittsfläche und der Form einer Stange, eines Stabes, eines Rohres oder eines Drahtes mittels Zug durch eine Matrize ist eine der ältesten Methoden in der Umformtechnik. Dieser Umformprozess kann kalt, warm oder halbwarm durchgeführt werden. Als Vorteile des Kaltziehens können eine hervorragende Oberflächenausbildung, gut zu kontrollierende Abmessungen und das Erreichen und Einstellen gewünschter mechanischer Eigenschaften genannt werden [1]. Beim Ziehen durch eine Matrize wird eine Materialumformung durch die Kombination aus Zug- und Druckspannungen erreicht. In einem Rohr können unterschiedliche Faktoren - wie Schwingungen des Dorns, Positionierung der Werkzeuge, verwendetes Material sowie Temperaturunterschiede im Material - während des Ziehens durch Unterschiede im Materialfluss Dickenschwankungen in Längs- und Umfangsrichtung des Rohres verursachen. Diese werden durch die Exzentrizität beschrieben [2]. Dabei kommt es u.a. zu komplexen Eigenspannungsverteilungen im Rohr, die die mechanischen Eigenschaften und das Ermüdungsverhalten des Endproduktes negativ beeinflussen können [3].

Bei der Fertigung eines Produktes ist es erstrebenswert, den Materialverbrauch zu reduzieren, während der Nutzwert des Produktes erhalten bleiben soll. Dies kann in erster Linie durch eine Reduzierung der Fertigungsschwankungen erreicht werden. Die geringere Streubreite im Endprodukt kann sich außerdem günstig auf die Auslegung von Konstruktionen auswirken, was zu einer weiteren Material- und Kosteneinsparung führen kann. Eine Reduktion der Wanddickenschwankungen – somit ein auf die Dicke bezogenes präziseres Rohr - ermöglicht Material- und damit Kosteneinsparungen, die insbesondere bei der Verarbeitung kostenintensiver Werkstoffe von Interesse sind, jedoch auch bei Massenwerkstoffen aus Stahl auf Grund der Mengen bedeutsame Einsparungspotenziale bieten. Je enger die vorgegebenen Toleranzgrenzen in der Fertigung bezüglich der Wanddickenschwankung sind, desto wichtiger sind korrigierende Mechanismen. Diese Mechanismen haben direkten Einfluss auf die Werkstoffeigenschaften im Werkstück [4].

Andererseits können für bestimmte konstruktive Anwendungsfällen lokale Inhomogenitäten im Bauteil erwünscht sein, beispielsweise kann eine lokal ausgeprägte Exzentrizität in Rohren dazu genutzt werden, ein richtungsabhängiges, auf den jeweiligen Lastfall zugeschnittenes Flächenträgheitsmoment zu erzeugen. Weiterhin können beim Rohrziehen als einem quasi-kontinuierlichen Fertigungsverfahren lokale Inhomogenitäten gezielt längs ins Bauteil eingebracht werden. Das kann beispielsweise bei der Weiterverarbeitung der Rohre durch Innenhochdruckumformen (IHU), von Vorteil sein. Auch beim Rohrbiegen kann der in Längsrichtung lokal aufgedünte Bereich genutzt werden, das Ausdünnen im Zugbereich zu reduzieren und das Rohr bei gleicher Beanspruchung gewichtsmäßig zu reduzieren [4].

Die Vorprojekte (AiF 13939) [5] und (AiF 17263N) [4] befassten sich mit der Auswahl von Verfahren und der Optimierung von Parametern zur gezielten Einflussnahme auf die Rohrgeometrie und die Eigenspannungen sowie Beeinflussung der Exzentrizität durch Prozesseinstellung. Die Ergebnisse wurden als Basisdaten für dieses Projekt verwendet. Im Rahmen dieser Forschungsprojekte wurden ein Mechanismus untersucht, der einen Einsatz unter industrienahen Bedingungen ermöglichen sollte.

Einschlägige Normen und technische Regelwerke definieren die Maßtoleranzen für Rohre und enthalten gegebenenfalls weitere Anforderungen [6, 7]. Bei der Weiterverarbeitung unterliegen insbesondere die Maßhaltigkeit des Durchmessers und der Ovalität hohen Anforderungen. So sind die für Kupferrohre zulässigen Durchmesserabweichungen und der Ovalität gering und betragen $\pm 0,07$ mm, wobei sich diese Angabe auf einen Messabschnitt von ca. 50 mm bezieht. Die Toleranzvorgaben für die Wanddicke sind hingegen vergleichsweise großzügig und betragen ± 15 % bezogen auf ein Nennmaß von 2 mm. Die genannten Werte haben sich in der Fertigung etabliert und eine Abweichung, die innerhalb dieses Toleranzspektrums liegt, führt zu keiner nennenswerten Verschlechterung des Produktes. Rohrkonstruktionen werden auf Grundlage der minimalen Wandstärke der verwendeten Rohre ausgelegt, weshalb durch eine Verringerung der Exzentrizität die minimale Wandstärke erhöht und schließlich Material eingespart werden kann. Dieses Vorgehen, einer lokalen Beeinflussung der Wandstärke und einer strengeren Definition der Toleranzen, kann in Zeiten hoher Rohstoffpreise zu einem entscheidenden Vorteil im globalen Wettbewerb werden. Die in der Literatur aufgeführten gängigen Parameter sind unzureichend, da sie im industriellen Fertigungsprozess nicht entscheidend sind [8].

Ziel des Vorhabens war es, die Ergebnisse der ehemaligen AiF-Projekte dazu zu nutzen, eine dynamische, verstellbare Matrize mit einer In-Line-Messung und einer Steuerung für das Rohrziehen mit einer gezielten Beeinflussung der Exzentrizitäten zu entwickeln.

Die Forschungsergebnisse der ehemaligen AiF-Projekte wurden dazu verwendet, die verschiedenen Einflussgrößen zur gezielten Beeinflussung der Exzentrizität im Rohr zu bestimmen und daraus einen Algorithmus zur optimalen Verstellung der Matrize zu entwickeln. Im letzten AiF-Projekt wurde die Beeinflussung der Exzentrizität beim Ziehen mit festem Dorn mit den Varianten „Kippung der Ziehmatrize“ und „Verschiebung der Führungsmatrize“ untersucht. Durch ein Regressionsmodell können nun die Zusammenhänge zwischen den unterschiedlich effektiven Parametern des Prozesses beschrieben werden [9]. Dieses umfasst dabei einen abhängigen oder mehrere unabhängige Parameter. Die Hauptaufgabe des Projektes bestand in der Beschreibung der Beziehungen und Abhängigkeiten zwischen den Exzentrizitäten und den Materialeigenschaften und den Ziehparameter zur Entwicklung eines dynamischen Ziehprozesses. Dazu wurden die Einflüsse der Exzentrizität durch das oben beschriebene Vorgehen für das Ziehen mit fliegendem Dorn untersucht. Die Anlage sowie die Steuerung wurden im Labor an Kupferrohren erfolgreich getestet. Ein Multiregressionsmodell, das eine Vielzahl unabhängiger Parameter beinhaltet, liefert bessere und realistischere Ergebnisse, so dass dieses für die Steuerung entwickelt wurde und eingesetzt wird.

Durchführung der Untersuchungen, Ergebnisse und Diskussion

Statische Versuche, Parameter

Da Entwicklung eine verstellbare Matrize und einer Steuerung für Rohrziehverfahren auf Ergebnissen der Vorläuferprojekte aufgebaut werden sollte, wurden zuerst die Ergebnisse des letzten AiF-Projektes in statischen Versuchen mit Kippung und Matrizenversatz bei Einsatz eines festen Dorns an vier Werkstoffsorten auf die Exzentrizitäts- und Eigenspannungsbildung überprüft, die daraus entwickelten Algorithmen werkstoffabhängig validiert und statistisch abgesichert. Tabelle 1 zeigt die Werkstoffdaten sowie Versuchsparameter wie Kippwinkel und Umformgrad, beschrieben mit Hilfe des Q-Wertes ($Q_{wert} = \frac{\varphi_s}{\varphi_{dm}}$) für gezogene Rohre in statischen Versuche.

TABELLE 1: PARAMETER UND DATEN DER WERKSTOFFE UND STATISCHEN VERSUCHDURCHFÜHRUNG.

Werkstoff	Abmessungen [mm]	Zustand	Ausgangsexzentrizität [%]	Kippwinkel [°]	Q-Wert
Cu-DHP	65x5,5 60x5	vorgezogen und gegläht	2 - 8	-5,-2,-1, 0,+1,+2,+5	2,6 1,0
St (E355)	60x5,2	normalgeglüht	0,5 - 5	-5,-2,-1, 0,+1,+2,+5	0,5
CuZn37	50x5 48x4	geglüht	0,8 – 3,5	-5,-2,- 1,0,+1,+2,+5	4,6 0,5
AlMg3	60x5	nicht aushärtbar	2,5 – 3,5	-5,-2,- 1,0,+1,+2,+5	1,2

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Untersuchungen für die Geometrieänderungen an den vier Werkstoffen Kupfer, Messing, Aluminium und Stahl beispielhaft zusammengefasst. Die Exzentrizitätsmessungen an den Ausgangskupferrohren variieren zwischen ca. 2 und 8 %. Abb. 1 und 2 zeigen die relativen Exzentrizitätsänderungen der Kupferrohre – bezogen auf die Ausgangsexzentrizität – für die ersten beiden Ziehstufen. Eine Änderung der relativen exzentrizität mit positiven Vorzeichen bedeutet hier eine Verbesserung des absoluten Wertes der Exzentrizität nach dem Ziehen, während eine Änderung mit negativem Vorzeichen eine Erhöhung der Exzentrizität kennzeichnet. Für beide Zieh Schritte lässt sich die gleiche Abhängigkeit der Exzentrizitätsänderung vom Kippwinkel erkennen.

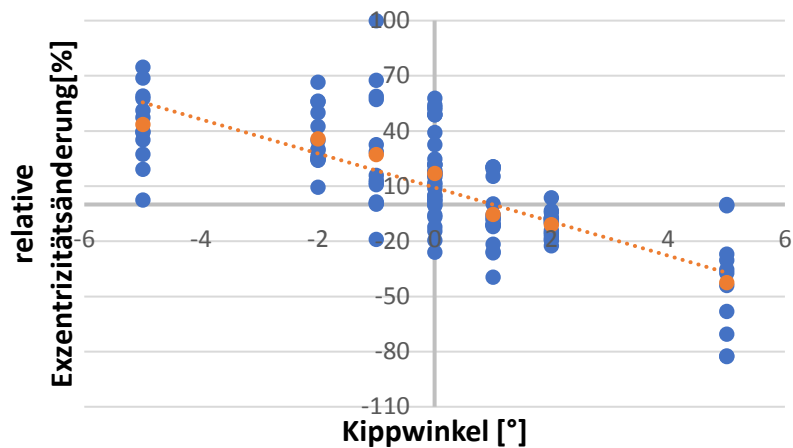


ABBILDUNG 1: EXZENTRIZITÄTSÄNDERUNG IN DEN KUPFERROHREN NACH DEM 1. ZUG.

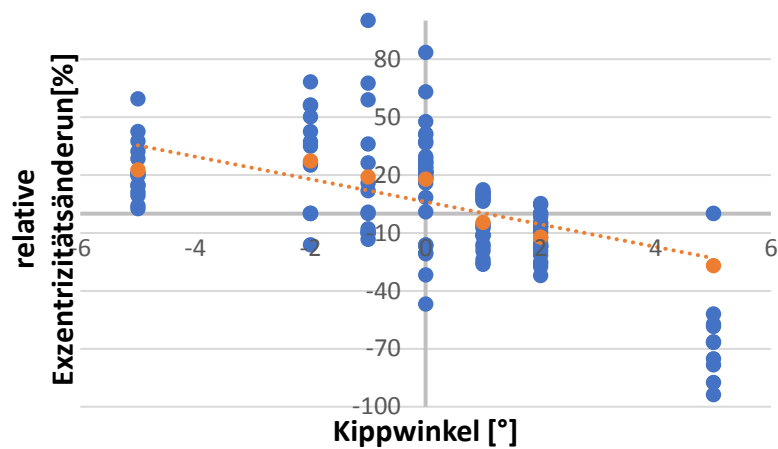


ABBILDUNG 2: EXZENTRIZITÄTSVERÄNDERUNG IN DEN KUPFERROHREN NACH DEM 2. ZUG.

Abb. 3 zeigt die relativen Exzentrizitätsänderungen der Messingsrohre nach dem ersten Zug unter variierenden Kippwinkeln. Hier lässt sich der gleiche Trend wie bei den Kupferrohren erkennen, wobei die Reduzierung der Exzentrizität bei einem Kippwinkel von -5° 34 % beträgt (Kupfer 43%). Die Exzentrizität der meisten Ms-Ausgangsrohre, die unter -5° Kippung gezogen wurden, lag unter 2 %. Diese führte zu einer nur geringfügigen Verbesserung der Exzentrizität im Vergleich zu einer Änderung bei -2° Kippung mit Rohren höherer Exzentrizität. An dieser Stelle sei bereits darauf hingewiesen, dass das Verfahren umso bessere Ergebnisse liefert, je größer die Exzentrizität des Ausgangsrohres ist. Wie schon im Vorprojekt gezeigt, kommt es bei zu geringen Exzentrizitäten schon im „statischen“ Versuch zu einer fiktiven Exzentrizitätsverlagerung (um 90°). Das Verfahren eignet sich in der hier vorliegenden Ausführung damit besonders für die ersten Züge des Vorrohres, sofern hier nicht unzulässig hohe Ovalitäten einen Einsatz im Erstzug verhindern.

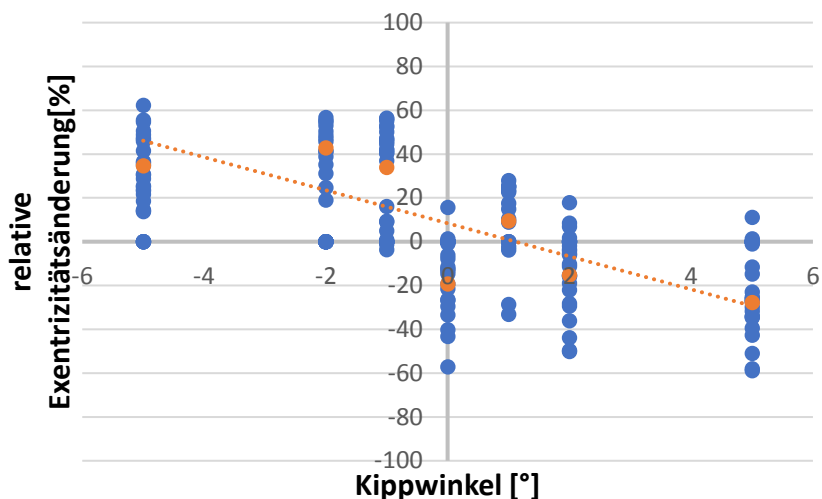


ABBILDUNG 3: EXZENTRIZITÄTSÄNDERUNG IN DEN MESSINGROHREN NACH DEM 1. ZUG BEI UNTERSCHIEDLICHEN KIPPWINKELN.

Abb. 4 zeigt die relative Exzentrizitätsänderung nach dem ersten Zug mit Kippung für Al-Rohre mit Exzentrizitätswerten von 2,3 – 3,5 % für den Ausgangszustand. Auch hier bestätigt sich der Trend: Bei einem Kippwinkel von -5° steigt die Exzentrizitätsänderung auf ca. 30 % an. Bei einem Winkel von $+5^\circ$ verändert sich die Exzentrizität um ca. 90 % an (Aufdickung)!

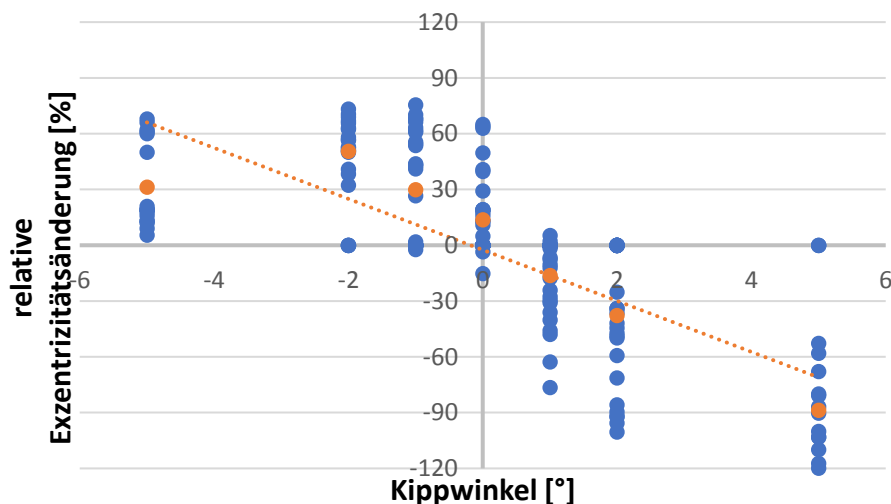


ABBILDUNG 4: RELATIVE EXZENTRIZITÄTSÄNDERUNG IN DEN AL-ROHREN NACH DEM 1. ZUG BEI UNTERSCHIEDLICHEN KIPPWINKELN.

Die Ausgangsexzentrizitäten der Stahlrohre schwankten zwischen 0,5 und 5,0 %. Sie reduzierten sich nach dem Ziehen mit einem Kippwinkel von -5° um durchschnittlich 22 %. Dabei zeigte sich erneut, dass dieses System bei geringen Exzentrizitäten an seine Grenzen stößt: So zeigte z.B. ein mit einem Kippwinkel von -2° gezogenes Stahlrohr mit einer Ausgangsexzentrizität von nur ca. 0,5% eine Verschlechterung in der Exzentrizitätsänderung. Lässt man derartige Rohre außer Betracht, erhöhen sich die Exzentrizitätssänderungen bei -2° bis 7%. (Abb.5)

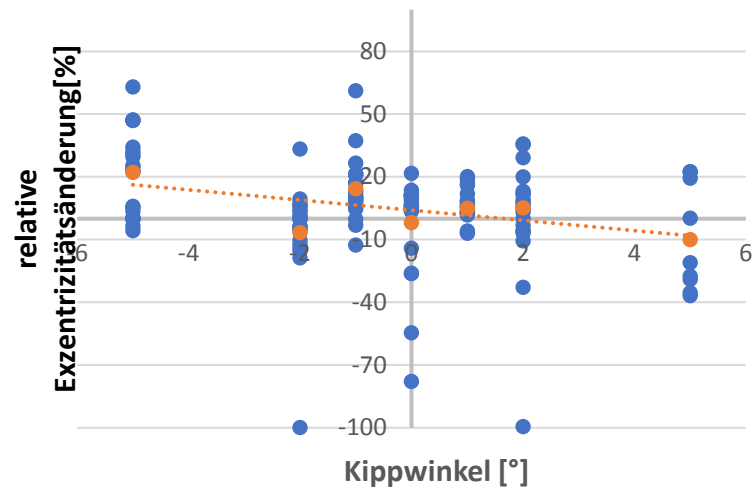


ABBILDUNG 5: EXZENTRIZITÄTSÄNDERUNG DER STAHLROHRE NACH DEM 1. ZUG.

Abb. 6 zeigt das Prinzip des Kippens und Rohrversatzes. Die Führungsmatrize (Guiding die) liegt vor der Hauptmatrize, der Führungsmatrizenhalter kann vertikal verschoben werden. Zum Kippen der Rohre (statisch) wurden speziell vorbereitete Matrizenhalter mit entsprechenden Winkeln (-5 ° bis +5 °) in der Ebene Vertikale/Längsrichtung verwendet (Abb. 6b). Durch die Positionierung der maximalen bzw. minimalen Rohrwanddicke auf der oberen Rohrposition ließ sich der Effekt bei positiver und negativer Kippung mit Rohrwandaufdickung bzw. Exzentrizitätsverringering einstellen. Liegt die max. Wandstärke des Rohres oben (bei 1), wird das Verschieben / Kippen als positiv (+) gesehen. Falls die min. Wandstärke des Rohrs oben (bei 1) liegt, wird das Verschieben / Kippen mit einem negativen (-) Zeichen versehen. In diesem Fall liegt die max. Wandstärke unten, diese Seite trifft zuerst auf die gekippte Matrize.

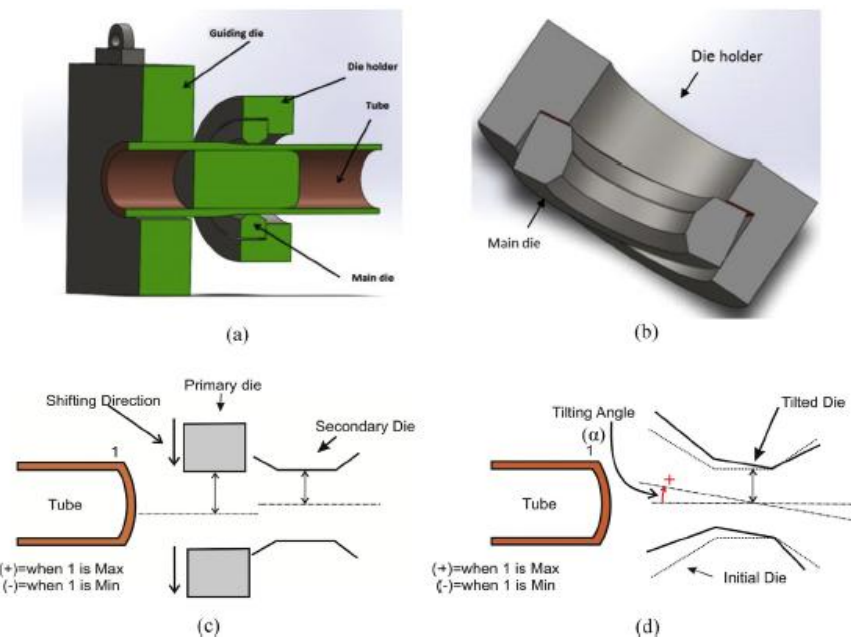


ABBILDUNG 6: SCHEMATISCHE DARSTELLUNG DER KIPP- UND VERSATZMATRIZE. [10]

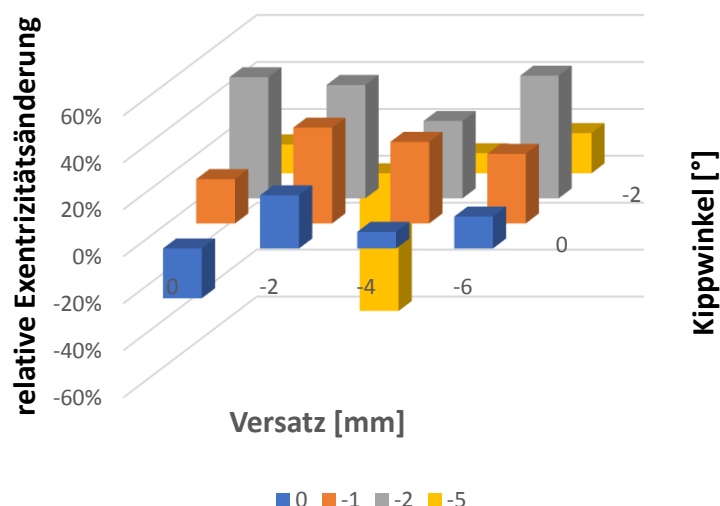


ABBILDUNG 7: EXZENTRIZITÄTSÄNDERUNG DER KUPFERROHRE NACH DEM 2. ZUG; KIPPUNG UND VERSATZ.

Abb. 7 zeigt die Auswirkung der Kombination eines Matrizenversatzes mit einer Kippmatrize auf der Exzentrizität für Kupferrohre. Die maximale Verbesserung der Exzentrizität um durchschnittlich 52 % tritt bei einer Kombination des Kippwinkels von -2° und einem Versatz von -6 mm und -2° und 0 mm auf. Gegenüber der reinen „Kippung“ zeigt diese Variante eine hohe Sensibilität, ohne aber einen klaren Trend ableiten zu können.

Es wurde ein FEM-Modell für den Rohrziehprozess mit verschiedenen Kippwinkeln entwickelt und mit den experimentellen Ergebnissen validiert. Tabelle 2 listet einige Parameter des Simulationsmodells. Als Beispiel ist in Abb. 8 die Exzentrizitätsveränderung der gezogenen Kupferrohre nach dem ersten Zug mit Kippwinkeln -2° , 0° und 2° dargestellt. Abb. 9 vergleicht die Exzentrizitätsänderung der experimentellen Versuche mit denen des berechneten FEM-Modells bei $+5^\circ$ Kippung für Kupferrohre nach dem ersten Zug. Die Erhöhung der Exzentrizität (Aufdickung) wurde dabei sowohl im Experiment wie auch in FEM-Berechnungen bestimmt. Die unterschiedlichen prozentualen Exzentrizitätsänderungen zwischen Rechnung und Messung kann auf den Größeneffekt zurückgeführt werden. bei Berechnung Ergebnisse und experimentelle Ergebnisse kann wegen Messgröße der Elemente sein. Eine Kombination von Kippung und Verschiebung der Matrize wurde mittels FEM untersucht. Die Ergebnisse sind in Abb. 10 dargestellt.

Auffällig ist, dass sowohl die Ergebnisse des FEM-Modells für die Kombination aus Kippungs- und Verschiebungseffekten als auch die Ergebnisse der experimentellen Versuche (Abb. 7) keinen klaren Trend aufweisen. Der Vergleich der Exzentrizitätsverbesserung bei -2 mm bzw. $+2$ mm Versatz bei einem Kippwinkel von -2° zeigt keinen bemerkenswerten Unterschied. Das gleiche gilt für den Versatz bei einem Kippwinkel von 0° .

TABELLE 2: FEM-SIMULATIONSPARAMETER

Werkstoff	Cu
Dichte	8960 kg/m ³
E-Modl	134 GPa
Poissonzahl	0,34
Rohr	Plastischer Körper
Dorn und Matrize	Starrer Körper

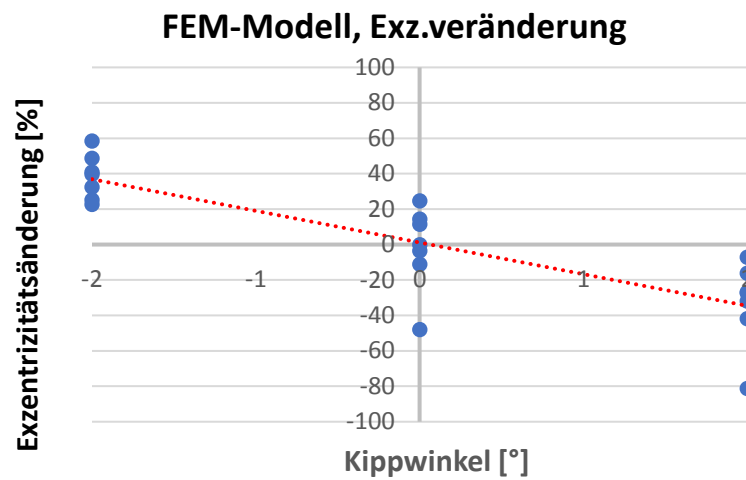


ABBILDUNG 8: BERECHNETE EXZENTRIZITÄTSÄNDERUNG DES KUPFERROHRS NACH 1. ZUG BEI KIPPWINKELN 0°, -2°, +2°.

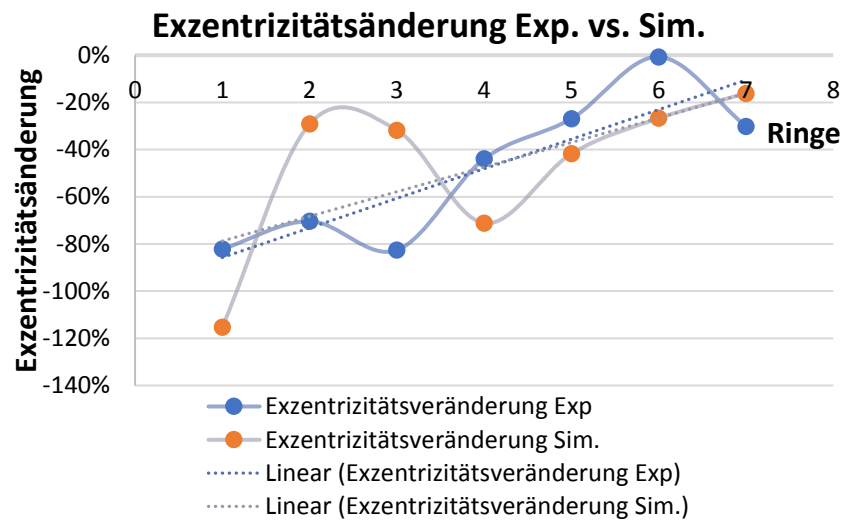


ABBILDUNG 9: VERGLEICH DER BERECHNETEN SOWIE GEMESSENEN EXZENTRIZITÄTSÄNDERUNGEN DES KUPFERROHRES NACH DEM 1.ZUG BEI EINEM KIPPWINKEL +5°.

Verlauf der Änderung der Exzentrizität bei positiver Kippung und negativem Versatz: FEM-Modell

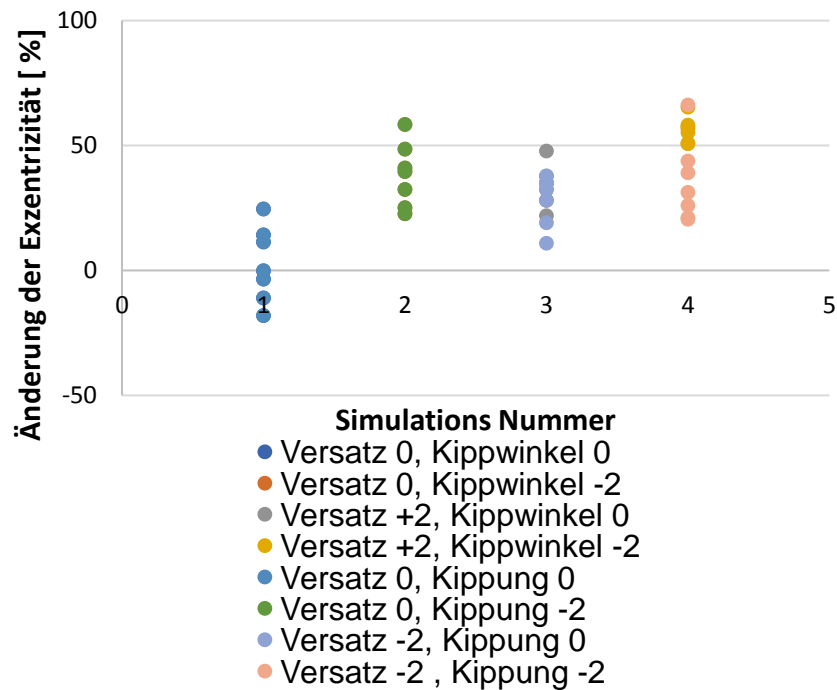


ABBILDUNG 10: BERECHNETE EXZENTRIZITÄTSÄNDERUNG BEI KOMBINATION KIPPUNG (0, +2, -2°) UND VERSATZ 2 MM FÜR EIN KUPFERROHR NACH DEM 1. ZUG.

Festigkeiten, Härtemessung:

Es wurden u.a. Härtemessungen (HV5) zur qualitativen Ermittlung der lokalen Auswirkung auf die mechanischen Eigenschaften durchgeführt. Abb. 11 bis 13 zeigen die Mittelwerte der Härte von Kupfer, Messing und Aluminium. Sie wurden auf je vier Positionen (max. min. und 90 °) in jedem Ring gemessen. Vor dem Zug besitzt das Kupferrohr im Bereich maximaler Wanddicke eine höhere Härte ((58,5 ± 2,3) HV) als an seiner minimalen mit (56,4 ± 3,4) HV. Nach dem ersten Zug liegt die maximale Härte zwischen der maximalen und minimalen Wandstärke (Mittelwerte 69,3 HV mit 2,1 standardabweichung). Bei Messing und Aluminium sind keine erkennbaren Beziehungen zwischen unterschiedlicher Wandstärke und Härte festzustellen.

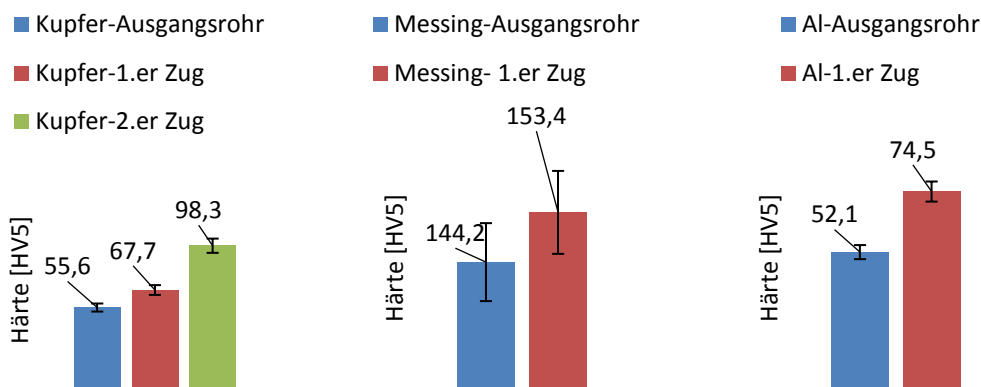


ABBILDUNG 11: HÄRTE VON KUPFER VOR UND NACH DEM 1. ZUG ($\epsilon=16,1\%$) UND 2. ZUG ($\epsilon=24,7\%$).

ABBILDUNG 12: HÄRTE VON MESSING VOR UND NACH DEM 1. ZUG ($\epsilon=43,4\%$).

ABBILDUNG 13: HÄRTE VON ALUMINIUM VOR UND NACH DEM 1. ZUG ($\epsilon=20,4\%$).

Die mechanischen Kennwerte der Werkstoffe wurden im Zugversuch (ASTM E8M) ermittelt. Die Ergebnisse für Aluminium und Kupfer sind in Tabelle 3 aufgelistet.

TABELLE 3: ZUGVERSUCHE FÜR ZWEI WERKSTOFFE (KUPFER, ALUMINIUM).

Werkstoff	Zustand	R _{p0,2} [MPa]	R _m [MPa]	A [%]	R _{p0,2} /R _m [-]
Cu	Ausgangsrohr/Mittelwert	48,0	226,0	42,1	0,21
Cu	Ausgangsrohr/Std-abw.	0,2	1,4	19,0	0,002
Cu	1. Zug/Mittelwert	306,3	314,0	11,2	0,98
Cu	1. Zug/Std-abw.	3,8	2,0	1,4	0,007
Cu	2. Zug/Mittelwert	321,5	344,5	9,7	0,93
Cu	2. Zug/Std-abw.	3,5	0,7	0,1	0,012
Cu	3. Zug/Mittelwert	328,7	352,0	8,9	0,93
Cu	3. Zug/Std-abw.	2,9	1,7	0,3	0,007
Alu	Ausgangsrohr/Mittelwert	74,1	207,7	33,5	0,36
Alu	Ausgangsrohr/Std-abw.	2,6	6,3	1,4	0,01
Alu	1. Zug/Mittelwert	215,0	244,7	12,3	0,88
Alu	1. Zug/Std-abw.	3,6	2,1	0,2	0,022

Abb. 14 zeigt eine nahezu homogene Verteilung der Zugfestigkeit über den Umfang eines Kupferrohres nach dem zweiten Zug (-5°-Kippung), gemessen an den Positionen Minimum, Maximum, 90°. Abb. 15 stellt die Zugfestigkeit für Aluminiumrohre im Ausgangszustand, nach dem Ziehen ohne Kippung sowie dem Ziehen mit einem Kippwinkel von -5° dar. Die Zugfestigkeiten wurden bei der maximalen, minimalen und Wandstärke unter 90 ° bestimmt. Diese sind nach dem Ziehen mit einem Kippwinkel von -5° auf Seite der minimalen Wanddicke deutlich größer als auf der maximalen. Die größere Umformung im Bereich des Minimums ist Ursache für diese Differenz. Nach dem Ziehen ohne Kippen liegt die Zugfestigkeit über dem Umfang des Rohres auf gleichem Niveau.

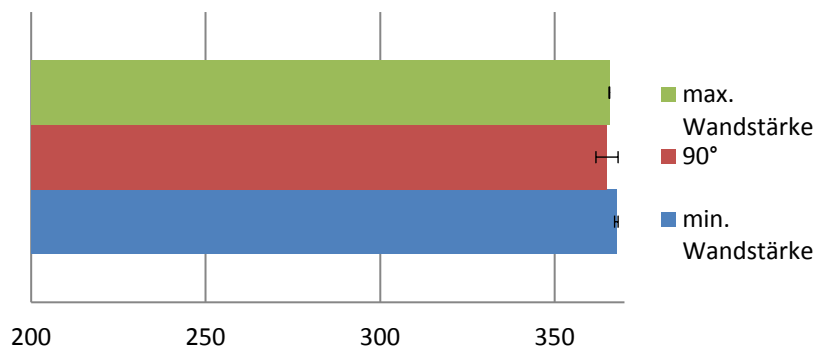


ABBILDUNG 14 : LOKALE ZUGFESTIGKEIT IN KUPFERROHREN NACH DEM 2. ZUG (KIPPWINKEL -5°).

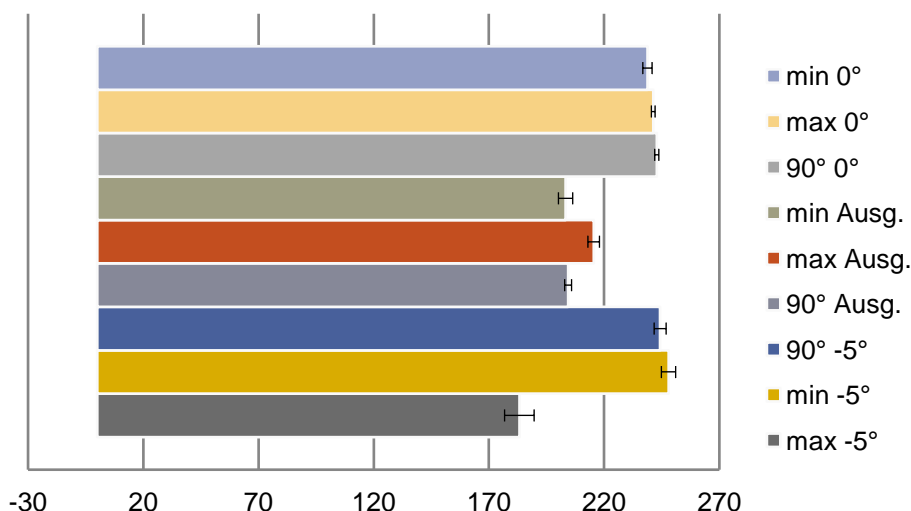


ABBILDUNG 15: ZUGFESTIGKEITEN IN ALUMINIUMROHREN FÜR AUSGANGSROHRE (AUSG.), 1. ZUG OHNE (0°) UND MIT -5°-KIPPUNG IN DEN POSITIONEN: MAX, MIN UND 90°.

Eigenspannungsmessungen

Die Eigenspannungen wurden nach der Bohrlochmethode in Axial- und Umfangsrichtung an drei verschiedenen Positionen der Rohre - Max, Min und 90 °- vor und nach dem Ziehen, mit und ohne Kippung für die vier Werkstoffe Kupfer, Messing, Stahl und Aluminium ermittelt, um den Effekt der Kippung auf die lokale Eigenspannungsbildung zu erfassen. In den Vorprojekten konnten schon die charakteristischen Verläufe und Änderungen ermittelt werden.

Zusammenfassung der Ergebnisse der Untersuchungen an Kupferrohren: Die Mittellinien der gemessenen axialen Eigenspannungen an der Max-Seite der unter den Kippwinkeln 0 ° und ±5 ° gezogenen Rohre sind in Abb 16 dargestellt. Die ohne Kippung gezogenen Rohre zeigen charakteristisch und reproduzierbar höhere Eigenspannungswerte gegenüber den mit -5 ° Kippung gezogenen Rohren; die mit +5 ° Kippung gezogenen Rohre haben die niedrigsten Eigenspannungswerte in Max-Position.

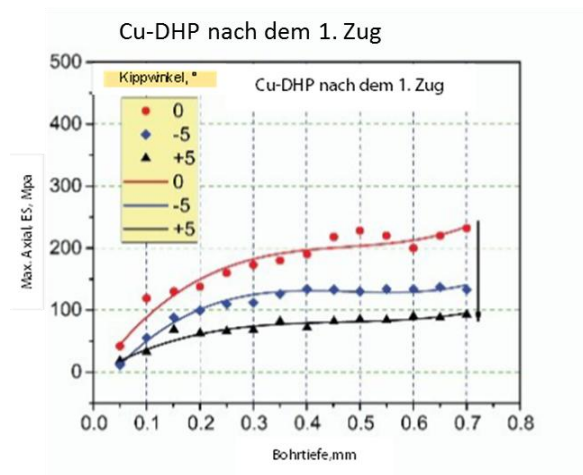


ABBILDUNG 16: Mittelwerte der auf der Max-Seite gemessenen axialen Eigenspannungen bei 0° und ± 5° Kippung [11].

Der Einfluss der Kippung auf die Eigenspannungsbildung für die Werkstoffe Messing, Stahl, Aluminium zeigt tendenziell das gleiche Verhalten.

Die axialen Eigenspannungen in Max-Position der Al-, Ms- und Stahlrohre sind in Abb 17 dargestellt. Im Allgemeinen zeigen sich bei allen untersuchten Werkstoffen die höchsten (positiven) Eigenspannungen für die mit 0 ° Kippung gezogenen Rohre und die niedrigsten Werte für die mit +5 ° Kippung gezogenen Rohre, wobei die mit -5° gezogenen Rohre in der Regel sehr nahe (oberhalb) der unter +5° Kippung gezogenen liegen.

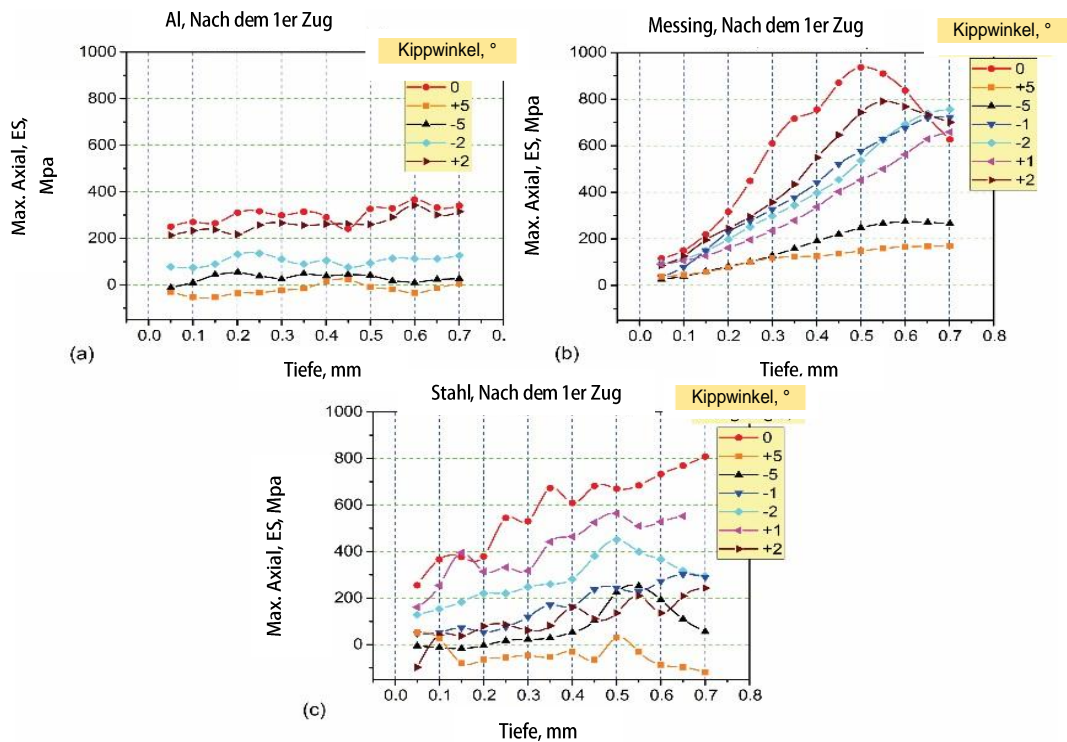


ABBILDUNG 17: AXIALE EIGENSINNUNGEN IM MAXIMUM VERSCHIEDENER ROHRE UNTER VARIATION DES KIPPWINKELS; (A) ALUMINIUM, (B) MESSING UND (C) STAHL [11].

Die Ergebnisse der axialen Eigenspannungen auf der Min-Seite zeigen dieselbe Tendenz wie auf der Max-Seite. Wie bei den Kupferrohren werden die niedrigsten Eigenspannungswerte bei einem Kippwinkel von -5° erreicht. Das entwickelte FEM-Modell für Kupferrohre berechnet die Eigenspannung bei unterschiedlichen Kippungswinkeln. Abb. 18 und 19 zeigen die Ergebnisse der berechneten sowie der gemessenen Eigenspannungen bei einem Kippwinkel von $\pm 5^\circ$. Beim Vergleich von Abb. 18 und Abb. 19 kann bei positiven Kippwinkeln eine niedrigere Eigenspannung (Hoop) als bei negativen Kippwinkeln festgestellt werden.

Abb. 20 und 21 zeigen die Eigenspannungen in Kupferrohren vor und nach dem Ziehen mit fliegendem Dorn in Position in minimaler und maximaler Wandstärke für -2° Kippwinkel.

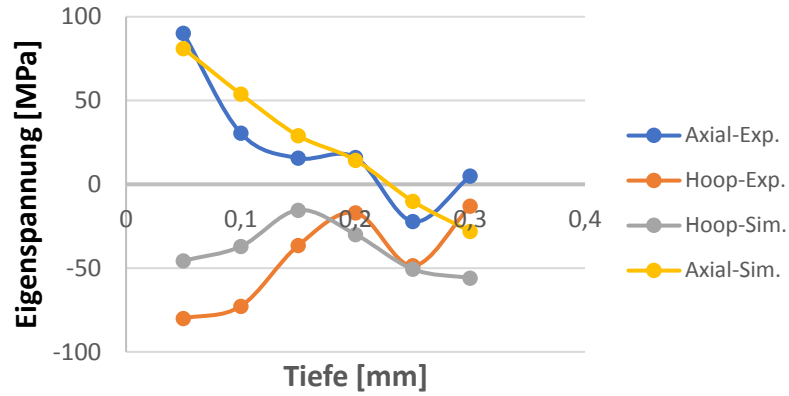


ABBILDUNG 18: VERGLEICH DER BERECHNETEN UND GEMESSENEN EIGENSpannung DES KUPFERROHRES NACH 1. ZUG BEI KIPPUNG +5°.

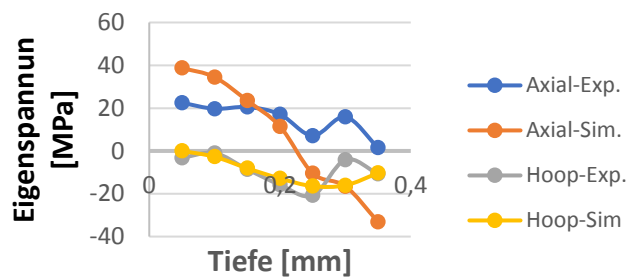


ABBILDUNG 19: VERGLEICH DER BERECHNETEN UND GEMESSENEN EIGENSpannungen DES KUPFERROHRES NACH DEM 1. ZUG BEI EINEM KIPPWINKEL VON -5°.

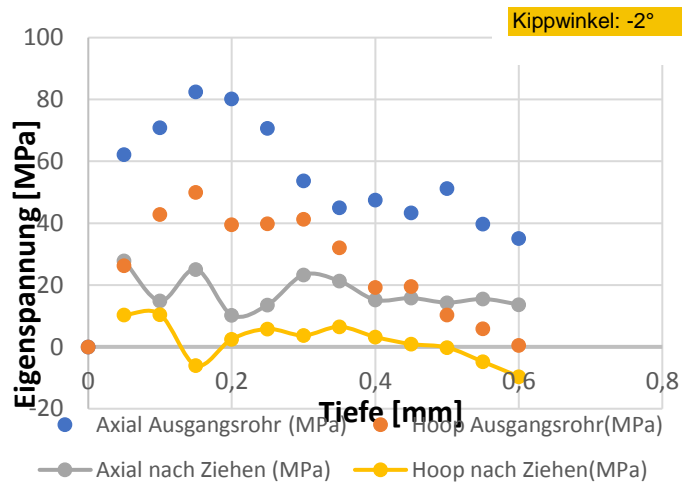


ABBILDUNG 20: Eigenspannungen (Bohrlochmethode) in Cu-Rohren im Bereich maximaler Wandstärke nach dem 1. Zug mit fliegenden Dorn.

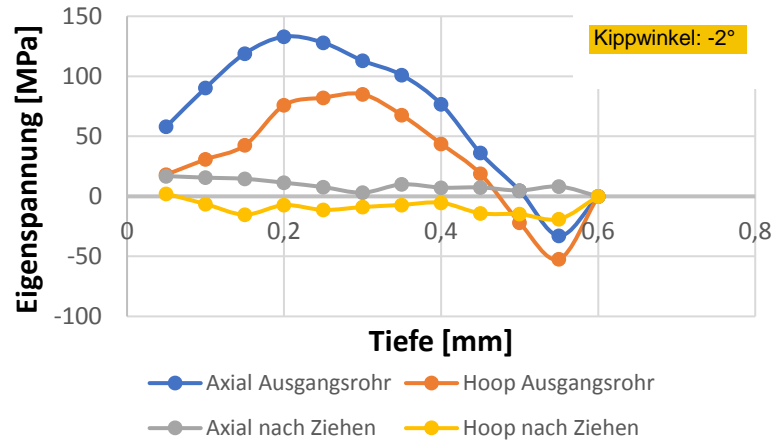


ABBILDUNG 21: Eigenspannungen (Bohrlochmethode) in Cu-Rohren im Bereich minimaler Wandstärke nach dem 1. Zug mit fliegendem Dorn.

Das Simulationsmodell für das Ziehen der Cu-Rohre mit fliegendem Dorn bestätigt die Begrenzung des Kippwinkels auf 2° für einen abrissfreien Zug unter den gewählten, gleichen Versuchsbedingungen. Das in diesem Modell gezogene Rohr besaß eine Wandstärke von 0,83 mm. Die geringe Wandstärke der Rohre führt bei höheren Kippwinkeln ($> 3^\circ$) zum Abriss während des Ziehens (Abb. 22). Die berechneten Eigenspannungen am Wandstärkenmaximum sowie am -minimum und im Zwischenbereich sind für das Ziehen mit fliegendem Dorn bei einer Kippung von -2° in Abb. 24 dargestellt. Die berechneten Spannungen sind mit den gemessenen Eigenspannungen vergleichbar (Abb. 20, 21 und 23).

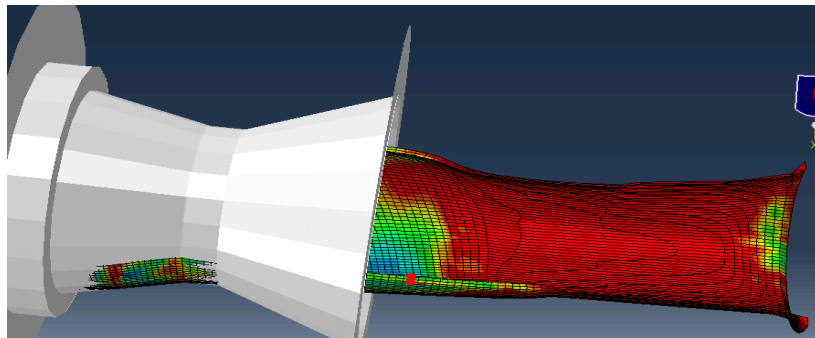


ABBILDUNG 22: SIMULATION DES ROHRZIEHENS MIT FLIEGEMDEM DORN MIT EINEM KIPPWINKEL VON -3° .

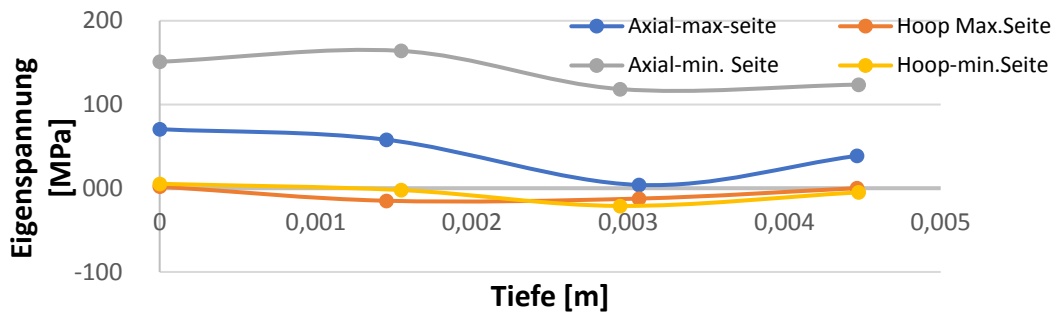


Abbildung 23: BERECHNETE EIGENSPANNUNGEN AN MAX- UND MIN-POSITION FÜR KUPFERROHRE NACH DEM 1. ZUG MIT FLIEGENDEM DORN.

Einfluss der Kippung; fliegender Dorn

Die Cu-Rohre (CU-DHP) wurden in drei Zügen vom Pressrohr 85 x 5 mm Ø an 46 x 2,20 mmØ mit fliegenderm Dorn und Kippung der Matrize gezogen. Die Rohrabmessungen sowie die der Werkzeuge sind in Tabelle 4 aufgeführt. Auch mit fliegenderm Dorn lässt sich der Effekt der Kippung eindeutig und reproduzierbar nachweisen. Allerdings kam es bei -5° schon zu Abrissen. Das kann auf die Geometrie des Dorns zurückgeführt werden. (Abb. 24).

TABELLE 4: ROHR- UND WERKZEUGABMESSUNGEN BEI ZIEHEN MIT FLIEGENDEM DORN.

Zustand	Rohrabmessungen [mm]	Matrize [mm]	Dorn [mm]
Vorrohr	46 x 2,2	40	36,6
Nach 1 Zug	40 x 1,7		
Umformgrad ϵ	0,39		

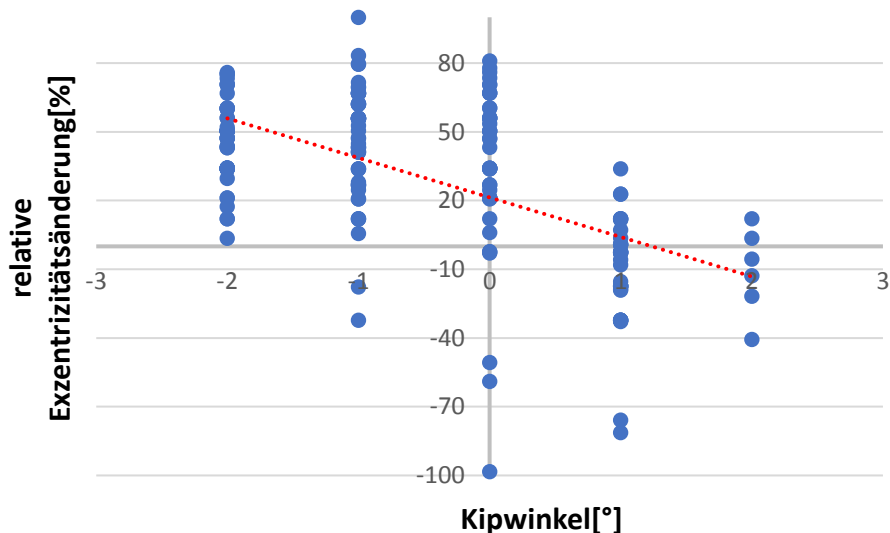


Abbildung 24: EXZENTRIZITÄTSÄNDERUNG DER KUPFERROHRE (46x2,2) NACH DEM 1. ZUG; ZIEHEN MIT FLIEGENDEM DORN.

Entwicklung einer dynamisch verstellbaren Matrize

Konstruktion und Fertigung der verstellbaren Matrize, Implementierung und Einfahren einer Wanddickenmess- einrichtung

Die Konstruktion der verstellbaren Matrize – ein sowohl für die industrielle Fertigung als auch für eine Laborziehbank nutzbarer Ziehwerkzeughalter entsprechend der Forderungen der Forschungseinrichtung – wurde zusammen mit der Firma Bültmann GmbH entwickelt und von dieser gefertigt. Die Führungsmatrize wurde von der Kippungsmatrize entkoppelt, um die Untersuchung mit Versatz, Kippung sowie die Kombination beider Effekte ermöglichen zu können.

Die Kippung der Matrize wird durch hydraulische Zylinder über eine Kalotte realisiert. Die Umsetzung der linearen Hubzylinderbewegung in die erforderliche Kippung wird durch ein CAD-Modell simuliert.

Zur In-Line- Wanddickenmessung wurde ein auf Ultraschall basierendes Fünfkanal-Messsystem der Firma GE beschafft. Die fünf Sensoren sind in einem Messkörper, bestehend aus Dicht- und folgender Versatzdüse, integriert, der mit einem dem Werkstoff angepassten Ziehschmiermittel als Koppelmittel gefüllt wird. Der Messkörper ist vor die kippbare Umformmatrize positioniert. Abb. 25 (rechts) zeigt ihn mit den fünf integrierten Prüfköpfen. Die Prüfköpfe sind senkrecht zum Rohr unter einem Winkel zueinander von je 72° über den Umfang angeordnet. Die manuelle Messung der Rohrwandstärken wird bei statischer Versuchsdurchführung mit einem US-Messkopf (GE CL 400) durchgeführt, s. Abb. 25 (links). Üblicherweise werden die Rohre hier in Abständen von je 10 cm über die Länge mit je 8 Messungen über den Umfang (Ring) vermessen. Das für die In-Line-Messung verwendete Koppelmittel (Viskosität des Schmierstoffs: 600 cSt für Kupfer) wird durch eine Pumpe von unten in den Messkörper eingebracht und tritt im oberen Messkörperbereich wieder aus. Die mittels der Ultraschallköpfe gemessenen Wandstärken der Rohre werden für die Bestimmung der maximalen und minimalen Wandstärke und deren jeweiligen Positionen unter Annahme eines sinusförmigen Wanddickenverlaufs interpoliert. Die Regression durch diese Kurve ist für die nachfolgenden Berechnungen, beispielsweise der Exzentrizität vor und nach dem Ziehen, sowie der daraus abzuleitenden Verstellung der Kippmatrize, erforderlich.



ABBILDUNG 25: MANUELLE WANDSTÄRKEMESSUNG(LINKS),INTEGRIERTES ULTRASCHALL-MESSSYSTEM AUF DER VERSATZMATRIZE (RECHTS).

Zur Überprüfung der von den Ultraschallprüfköpfen empfangenen Messsignale wurden die Wandstärken der vorgemessenen Rohre beim Durchlauf durch die Ziehbank in einer prozessintegrierten Messung ein zweites Mal erfasst und gespeichert. Die gemessenen Wandstärken sind zum Vergleich in Tabelle 5 aufgelistet und grafisch in Abb. 26 dargestellt. Maximum und Minimum werden zuverlässig erkannt!

TABELLE 5: VERGLEICH DER MANUELL BESTIMMTEN UND DER DURCH DIE MESSDÜSE AUTOMATISCH GEMESSENEN WANDSTÄRKEN (WS) FÜR DIE FÜNF MESSPOSITIONEN (US) ÜBER DEN ROHRUMFANG.

Pos.	WS1 [mm]	WS2 [mm]	WS3 [mm]	WS4 [mm]	WS5 [mm]	Durchschnittliche Wandstärke [mm]	Std.-Abweichung Wandstärke
In-Line	4,83	4,93	5,13	5,07	4,92	4,97	0,11
Manuell	4,86	4,98	5,15	5,13	4,94	5,01	0,17

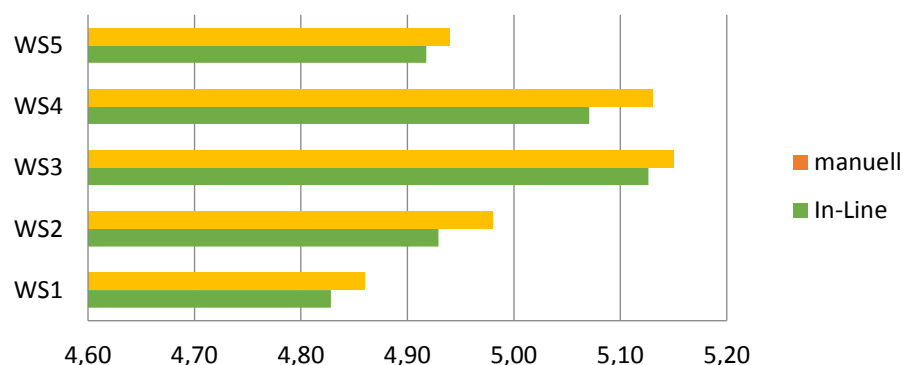


ABBILDUNG 26: VERGLEICH DER MANUELL UND IN-LINE GEMESSENEN WANDDICKENWERTE.

Steuertechnische Verknüpfung der Wanddickenmeseinrichtung und der Verstellmatrize

Die Gestaltung der signaltechnischen Ankopplung der Ultraschall-Messeinrichtung mit der Verstellmatrize wurde am Institut für Metallurgie entwickelt. Die

Softwareentwicklung fand parallel zur Konstruktion und zum Bau des variablen Matrizenhalters in Zusammenarbeit mit FEST AG statt. Für die Steuerung wurde eine Siemens SPS (S7-1500) mit TIA Portal gewählt. Profinet wurde als offener Industrial-Ethernet-Standard für den Signalaustausch zwischen Messrechner und der Ansteuerung der Ziehbank gewählt. Analog Ein- und Ausgänge für die Wanddickenmessung über die Ultraschallmessgräte und ein Ausgang für die Einstellung der Proportionalventile kommen zum Einsatz.

Entwicklung der Regelalgorithmen, Bau der Regelung

In der Phase der Projektierung der Kippmatrize und Messeinheit wurden die erforderlichen Algorithmen zur Steuerung der Matrize entwickelt und softwaremäßig vorbereitet. Mit folgendem Ansatz lassen sich die Exzentrizitäten für alle untersuchten Werkstoffe nach dem Ziehen mit genügender Genauigkeit berechnen und einstellen:

$$E_{neu} [\%] = C1 + C2 \cdot E_{alt} + C3 \cdot \omega + C4 \cdot \omega^2 + C5 \cdot E_{alt} \cdot \omega$$

$C_1 \dots C_5$ = Materialabhängige Konstanten

E_{neu} = Exzentrizität nach dem Ziehen [%]

E_{alt} = Exzentrizität vor dem Ziehen (Ausgangsexzentrizität) [%]

ω = Kippwinkel [°]

Je nach Werkstoff und Umformparameter ergeben sich materialabhängige Konstanten für die multiple Regression. Die R^2 -Werte liegen im Bereich von 0,4915 (n=21) und 0,9496 (n=88).

Durchführung der Untersuchungen mit verstellbarer Matrize

Die entwickelte, verstellbare Matrize sowie der Algorithmus für die automatische Kippung der Ziehmatrize wurden im Labor getestet. Die berechneten Parameter durch Programmierung zur Einstellung der Anlage entsprechend der Eingangsparameter sind in Tabelle 6 als Beispiel für einen Punkt eines Kupferrohres dargestellt. Die durch Ultraschallprüfköpfe gemessenen Wandstärken werden als „In-Line Input Data“ in das Programm übertragen, um die Position der Kippung und den erforderlichen Kippwinkel zur Exzentrizitätsänderung sowie die dazu erforderlichen Zylinderhübe zur Einstellung der Matrize zu berechnen.

Tabelle 6: Die Parameter zur Einstellung der dynamischen Matrize.

Weg	WS1 [mm]	WS2 [mm]	WS3 [mm]	WS4 [mm]	WS5 [mm]	Ealt [%]	Kippwinkel [°]	Position der Kippung [°]	Eneu [%]	Zy1 Hub	Zy2 Hub	Ziehkraft [kN]	Zeit [ms]
100,37	4,83	4,88	4,58	4,59	4,60	4,48	5	232,24	2,92	23,71	58,23	40,71	3870

Da die Ergebnisse aus der Kombination von Versatz und Kippung keinen klaren Trend geliefert haben, fokussierte man sich mit den Untersuchungen auf die Auswirkung der Kippung. Im Folgenden werden die Untersuchungsergebnisse für die Geometrieänderungen an den Kupferrohren - vorgezogen und gegläht, (60x5,3) und

Q = 2,1 - zusammengefasst, die mit der verstellbaren Matrize durchgeführt wurden. Die Ergebnisse der relativen Exzentrizitätsänderung sind in Abb. 27 dargestellt. Ein positives Vorzeichen bedeutet eine Reduzierung des absoluten Wertes der Exzentrizität nach dem Ziehen. Der Durchschnitt der Exzentrizität des Ausgangsrohres (Ealt) wurde neben dem Durchschnitt der Exzentrizitätsänderung des gezogenen Rohres dargestellt (rot). Der Vergleich der Ergebnisse der dynamischen verstellbaren Matrize mit den statischen Versuchen (Abb.1) im ersten Zug zeigt die Wirksamkeit der entwickelten Anlage. Eine Verschlechterung oder eine nur geringe Verbesserung der Exzentrizität bei einigen Rohren ist auf Fehler innerhalb des Messsystems zurückzuführen. Das Fehlen verwertbarer Messwerte während des Versuchs kann aufgrund von Ölleckagen oder bei übermäßiger Neigung des Rohres zum Ultraschallprüfkopf hin eintreten.

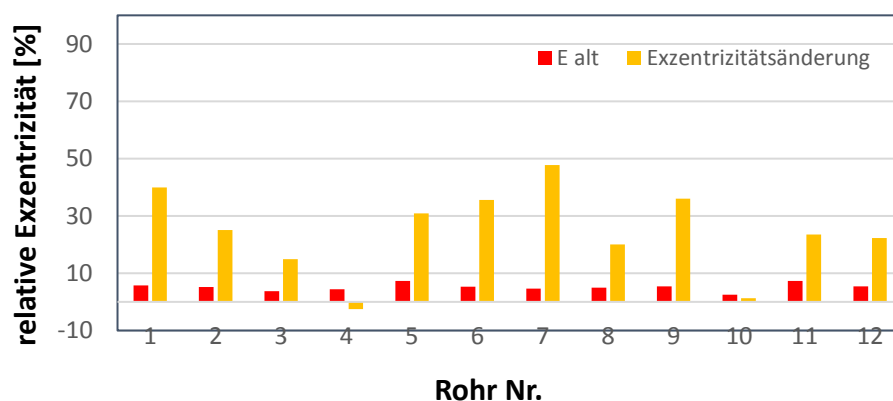


ABBILDUNG 27: EXZENTRIZITÄTSÄNDERUNG SOWIE ALTE EXZENTRIZITÄTEN DER KUPFERROHRE (IN-LINE MATRIZENVERSTELLUNG).

Zur qualitativen Ermittlung der lokalen Auswirkung auf die mechanischen Eigenschaften wurden auch hier wieder Härtemessungen sowie Mini-Zugversuche an den mit verstellbarer Matrize gezogenen Rohre durchgeführt. Die gemessenen Härten in Max., Min. und 90°-Position weisen vor und nach dem Ziehen nur Unterschiede im Rahmen der Messgenauigkeit auf, so dass mit diesen Werten keine eindeutige Aussage über den lokalen Werkstofffluss möglich ist. Tabelle 7 zeigt ein Beispiel für ein Kupferrohr vor und nach dem ersten Zug.

TABELLE 7: DIE HÄRTE VOR UND NACH DEM ZIEHEN MIT DYN. VERSTELBARER MATRIZE IN DREI POSITIONEN(MAX. MIN 90°)

Position	Härte vor Ziehen	Härte nach Ziehen
max	40,7±1,7	101,1±5,7
min	42,8±3,3	105,6±4,9
90°	41,5±2,1	107,2±3,8

Die mechanischen Kennwerte wurden im Zugversuch (ASTM E8M) vor und nach dem Ziehen ermittelt. Die Ergebnisse sind beispielhaft für drei Cu-Rohre in Tabelle 8 aufgelistet. Die Verteilung der Zugfestigkeit über den Umfang des Rohres nach dem Ziehen mit verstellbarer Matrize sind an den Positionen Max., Min. und 90° gemessen worden, s. Abbildung 28. Die Erhöhung von Zugfestigkeit und Streckgrenze ist auf

Grund unterschiedlicher Umformgrade zwischen statischem und dynamischem Versuch unterschiedlich. Jedoch liegen die Zugfestigkeiten für alle Versuche und Werkstoffe in Position Min immer über den Werten der Positionen Max und 90°!

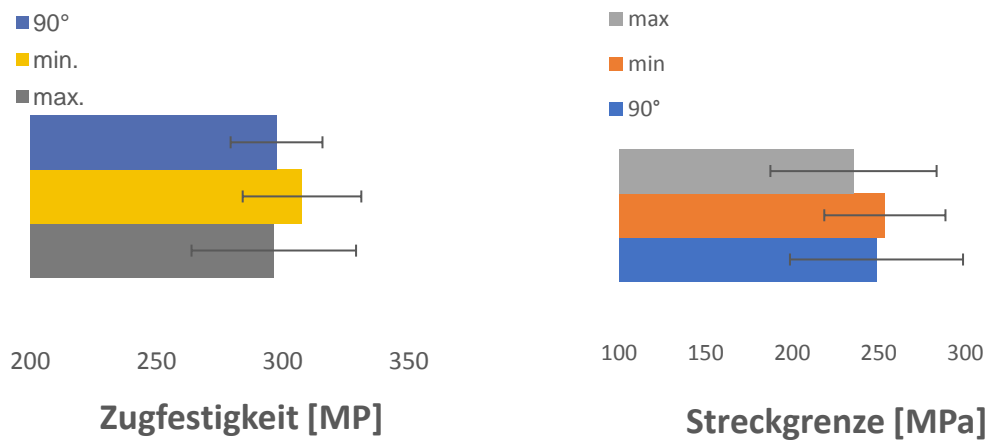


ABBILDUNG 28: ZUGFESTIGKEITEN (LINKS) UND STRECKGRENZEN (RECHTS) IN DEN POSITIONEN MIN, MAX UND 90° IN CU-ROHREN NACH DEM 1.ZUG MIT VERSTELLBARER MATRIZE.

TABELLE 8: ZUGVERSUCHE FÜR DIE KUPFERROHRE – DYN. VERSTELLBARE MATRIZE.

Werkstoff	Zustand	R _{p0,2} [MPa]	R _m [MPa]	A [%]
Cu	Ausgangsrohr/ Mittelwert	44,6	228,6	59,0
Cu	Ausgangsrohr/ Std-abw.	2,3	1,3	0,7
Cu	1. Zug/Mittelwert	246,6	299,8	18,8
Cu	1. Zug/Std-abw.	64,0	24,3	8,2

Das entwickelte FEM-Modell wurde als dynamischer Prozess für die verstellbare Matrize weiterentwickelt. Während des Rohrziehprozesses wird die Matrize auf drei unterschiedliche Positionen gekippt (-2°, -4° und -5°). Die berechneten Eigenspannungen über die Länge des Rohres sind in Abb. 29 dargestellt. Mit Erhöhung des Kippwinkels während des Ziehens wird die Eigenspannung gesenkt. Der Vergleich der gemessenen Eigenspannungen der mit den Kippwinkeln 0°, -5° und +5° gezogenen Kupferrohre (Abb. 16) zeigt den gleichen Trend.

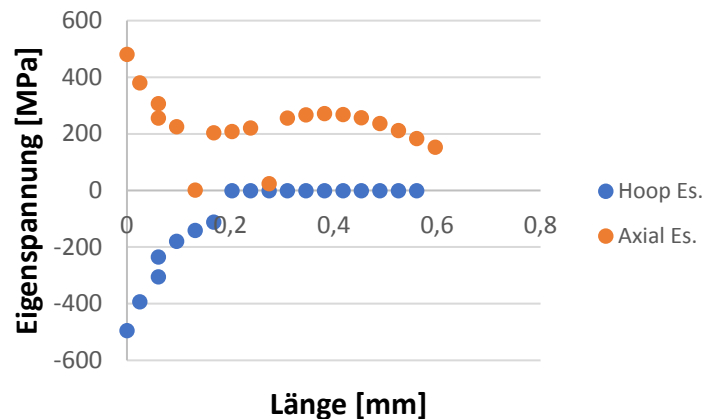


ABBILDUNG 29: BERECHNETE EIGENSPANNUNG DES GEZOGENEN KUPFEROHRES NACH 1 ZUG MIT VERSTELLBAREN MATRIZE.

Die verstellbare Matrize sollte unter industriellen Bedingungen getestet werden, um die Zuverlässigkeit der Anlage im Dauerbetrieb zu prüfen. Die Bemühungen um die Integration der Komponente in eine industrielle Ziehbank waren im Rahmen der Projektlaufzeit nicht von Erfolg gekrönt. Die bei Antragstellung gemachten Zusagen der Partner aus dem Projektbegleitenden Ausschuss wurden entweder auf Grund der bestehenden Auslastung der zur Verfügung stehenden Anlagen schließlich abgelehnt oder der erforderliche Umbau zum Anbau an die Anlagen wurde nicht genehmigt. Aktuell sind wir mit Fa. Wieland, Ulm, im Gespräch und scheinen hier einen Interessenten gefunden zu haben, mit dem sich der ausstehende Industrierversuch wird realisieren lassen. Dies wird jedoch nicht vor Ende des Jahres 2019 erfolgen.

Zusammenfassung

In diesem Projekt sind die Ergebnisse ehemaliger AiF-Projekte angewendet worden, um eine dynamische verstellbare Matrize mit einer vorgeschalteten In-Line-Messung und Steuerung für das Rohrziehen zu entwickeln. Diese Anlage ist in der Lage, die Wandstärke des Rohres mittels fünf Ultraschallprüfköpfen in fünf Positionen während des Ziehvorgangs zu messen und daraus über eine Sinuskurven-Regression die maximale sowie die minimale Rohrwandstärke zu bestimmen. Es wurde ein Regressionsmodell für die Vorausbestimmung der Exzentrizität des gezogenen Rohres erstellt und eine Steuerung für die verstellbare Matrize entwickelt. Die Anlage wurde im Labor getestet und die Exzentrizität wurde mit der verstellbaren Matrize in einem Zug bis ca. 48% verbessert.

Neben der Entwicklung der In-Line-Messung bei Rohren mit starrem Dorn wurden Rohre mit fliegendem Dorn unter Kippung gezogen. Der Kippwinkel für das Ziehen beschränkte sich auf $\pm 2^\circ$. Wurden Rohre mit einem größeren bzw. kleineren Kippwinkel gezogen kam es zum Rohrabriss. Auch hier ließ sich der positive Effekt der Kippung zur Exzentrizitätsbeeinflussung zeigen.

Der industrielle Test steht noch aus.

Ausblick

Die entwickelte Anlage erfüllt die Erwartung an eine gezielte Beeinflussung der Exzentrizität beim Gleitziehen von Rohren mittels einer In-Line-Messung und Steuerung über eine verstellbare Matrize, wie in Laborversuchen gezeigt werden konnte. Das Verfahren ist in der vorliegenden Form geeignet, die Exzentrizität in Vorrohren in den ersten Zügen deutlich auf ein Maß unter 2 % zu reduzieren, wobei die Sensibilität der gewählten Messtechnik einer weiteren sicheren Reduzierung hier Grenzen setzt. Dies ist erst möglich, wenn deutlich teurere Messsysteme zum Einsatz kommen. Ein weiteres Hemmnis könnte in der Ovalität des Pressrohres liegen, die zu Fehlmessungen der Ultraschallmessköpfe führen könnte. In diesem Fall ist der Einsatz nach dem ersten Zug angeraten.

Verwendung der Zuwendung

- Wissenschaftlich-technisches Personal (Einzelansatz A.1 des Finanzierungsplans)
 - wissenschaftliches Personal: 27 Monate
 - technisches Personal: --
- Geräte (Einzelansatz B des Finanzierungsplans): 80.080,00 €
 - Hydraulisch verstellbare Matrizenplatte mit Einbau(Bültmann GmbH): 24.514,00 €
 - US-Messeinrichtung (GE): 33.701,16 €
 - Steuerungstechnik, Schaltanlage (Fest AG): 33.903,10 €
 - Diffrenz wurde von Pauschal abgedeckt
- Leistungen Dritter (Einzelansatz C des Finanzierungsplans): ---

Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die entstandenen Kosten für das Projekt entsprechen im Wesentlichen dem im Antrag angegebenen Betrag.

In Ergänzung zu den im Antrag genannten Werkzeugen musste eine in der Versatzmatrize positionierte Messdüse entwickelt werden, um damit das Rohr zur Wandstärkenermittlung sauber zu führen und eine zuverlässige Messung zu ermöglichen. Es wurden fünf Prüfköpfe über den Umfang positioniert, um damit eine höhere Genauigkeit bei der Exzentrizitätsmessung zu erzielen.

Der festgelegte Zeitplan konnte aufgrund externer Lieferschwierigkeiten nicht eingehalten werden. Die verstellbare Matrize der Firma Bültmann GmbH, die im November 2017 geliefert werden sollte, war erst im August 2018 verfügbar. Diese Verzögerungen verursachten konsequenter Weise einen entsprechenden Zeitverzug bei der Fa. FEST AG, die die Steuerung und Anpassung an das Messsystem realisieren musste. Auch das Vorziehen von für einen späteren Zeitraum vorgesehenen Arbeiten konnte diesen Zeitverlust nicht ausgleichen. Das Projekt mit

den vorgesehenen industriellen Untersuchungen wird auf Grund der Zeitverzögerungen nicht zeitgerecht abgeschlossen. Es stehen die Untersuchungen im industriellen Maßstab aus. Dazu geeignete Produktionsanlagen werden uns auf Grund ihrer aktuellen Auslastung nicht zur Verfügung gestellt. Zudem lassen verfügbare Versuchsbänke aus Platzgründen eine Anbindung der Verstellmatrize und Messeinheit ohne erhebliche Umbauten – diese lehnen die Firmen natürlich ab - häufig nicht zu! Aktuell haben wir einen Partner (Fa. Wieland AG) gefunden, mit dem wir eine Testreihe an seinen Anlagen vorbereiten. Der Test ist für Herbst/Winter 2019 vorgesehen.

Plan zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft

Geplante spezifische Transfermaßnahmen während der Projektlaufzeit

Maßnahme	Ziel	Rahmen	Laut Antrag	Ist-Zustand
A: Weiterbildung/ Transfer der Ergebnisse in die Industrie über Fach- veranstaltungen	Weiterbildung von Mit- arbeitern und Führungskräften, insbesondere KMU	A1 Durchführung von Rohr- und Drahtziehseminaren	Ab Projektbeginn jährlich	Fachausschuss Frühjahr/ Sommer
B: Projektbegleitende Informationen	Vorstellung und kritische Diskussion der Forschungsergebnisse im AK Rohrziehen	B1 Vorstellung des Projektstandes B2 Vorstellung der Ergebnisse	Ab Projektbeginn halbjährlich	Dreizehn Treffen
C: Veröffentlichung	Ergebnistransfer in die Wirtschaft	C1 Zusammenfassender Forschungsbericht C2 Veröffentlichungen in Fachzeitschriften C3 Webseite der TU	Ab Projektbeginn in Fachzeitschrift en	C1 Ende 2018 / Anfang 2019 C2 Zwei in Vorbereitung Ende 2019/Anfang 2020 C3: erledigt
D: Gremienarbeit, Multiplikatoren	–	–	–	–
E: Akademische Lehre	Einbeziehung in die Vorlesung „Technische Formgebungsverfahren “.	–	Ab SS 2017	Seit SS 2017
F: Projektbegleitende r Ausschuss	Planung und Durchführung der Forschung wird mit den Industriepartnern abgestimmt und permanent überprüft/korrigiert	F1 Projektvorstellung und finale Abstimmung F2 Untersuchungsfortsch ritt ggf. Anpassung des Arbeitsplans	–	Start: Jan. 2017 Diverse (5) über die Projektlaufzeit
G: Demonstrationen/ Pilotanwendungen	–	–	Vor Abschluss	Herbst/Winter 2019

Geplante spezifische Transfermaßnahmen nach Abschluss des Vorhabens

Maßnahme	Ziel	Rahmen	Laut Antrag	Ist-Zustand
H: Weiterbildung / Transfer der Projektergebnisse in die Industrie bei FEachveranstaltungen	Weiterbildung von Mitarbeitern aus KMUs ohne eigene Forschungskapazitäten	H1 Fortbildungsseminar „Rohr-/Drahtziehen“ H2 Präsentation auf Fachkongressen	jährlich	H1 (Früh-)Sommer 2020 H2 Herbst 2020
I: Projektabschluss der Informationen	Publikation im Internet	I1 Bericht auf der Institutshomepage, I2 Newsletter	Nach 2 Jahren, ca. drei Monate nach Abschluss	Ende 2019
K: Veröffentlichung	Ergebnistransfer in die Wirtschaft	K1 Darstellung im Forschungsreport und Verbreitung durch die DGM (Homepage FA Ziehen) K2 Veröffentlichung in Fachzeitschriften (z.B. BRP, Kupfer, JMPT, PT)	Status nach einem Jahr, final nach zwei Jahren Innerhalb von sechs Monaten nach Abschluss	Kongress: 2019, FA: Anfang 2019 2. HJ 2019 Zwei Veröffentlichungen

Realisierbarkeit des vorgeschlagenen und aktualisierten Transferkonzepts

Der Transfer in die Wirtschaft wird nach positivem Abschluss der Industrierversuche verstärkt vorangetrieben. Die Sensibilität der Messung mit US bei geometrisch stark schwankenden Vorrohren (Ovalität) stellt hier ggfls. eine begrenzende Größe dar. Alternative Messverfahren (optischer Laser) sind vorhanden, aber deutlich teurer. Die Wirtschaftlichkeit und Akzeptanz – auch bzgl. der Wartungshäufigkeit und -intensität – muss hier noch geprüft werden. Entsprechende Konzepte wurden bereits mit Fa. Bültmann andiskutiert.

Neben der finalen Vorstellung im Fachausschluss und den vorgesehenen Veröffentlichungen ist die Vorstellung dieses Konzepts auf zwei Fachtagungen vorgesehen.

Die noch erforderlichen Mittel für die Industrierversuche und Kongressteilnahmen werden aus dem Haushalt des Instituts bereitgestellt.

Wissenschaftlich-technischer und wirtschaftlicher Nutzen

Die entwickelte dynamische Matrize mit vorgeschalteter In-Line-Messung der Wanddicken über den Umfang des Rohres und implementierter Steuerung der Matrize wurde im Labormaßstab getestet. Die Exzentrizität konnte mit der verstellbaren Matrize in einem Zug um bis zu ca. 48% verbessert werden.

Diese – gegenüber dem Normalzug mit starrer Matrize – stark beeinflussbare Exzentrizität führt bei Reduktion derselben zu einer deutlich verbesserten Rohrpräzision, die sich positiv auf den Werkstoffeinsatz sowie die Qualität des Produktes (Homogenität) auswirkt. Andererseits lässt sich die Technologie auch nutzen, um – bei geeigneter Programmgestaltung – auch gezielt (lokal) Aufdickungen zu erzeugen. Damit ist z.B. bei Nutzung dieser Rohre in der IHU-Umformung die Möglichkeit gegeben, an den erforderlichen Stellen mehr Material zur Verfügung zu stellen und damit eine höhere Umformung zu ermöglichen.

Die Entwicklung entsprechender Simulationsmodelle ermöglicht eine Anpassung des Prozesses auf die Erfordernisse (gewünschte End Eigenschaften) und schafft damit die Möglichkeit einer angepassten, optimierten Prozessführung.

Veröffentlichungen

- 1 Carradò, A., Brokmeier, H. G., Pirling, T., Wimpory, R. C., Schell, N., & Palkowski, H. (2013). Development of residual stresses and texture in drawn copper tubes. *Advanced Engineering Materials*, 15(6), 469-475.
- 2 Palkowski, H., Brück, S., Pirling, T., & Carradò, A. (2013). Investigation on the residual stress state of drawn tubes by numerical simulation and neutron diffraction analysis. *Materials*, 6(11), 5118-5130.
- 3 Foadian F, Carradó A, et al. (2016) Residual stresses evolution in Cu tubes, cold drawn with tilted dies – Neutron diffraction measurements and finite element simulation. *Materials & Design* 107: 163–170.
- 4 Carradó A, Foadian F, Palkowski H (2015) Tube Drawing with Tilted and Shifted Die. In: Tekkaya A E, Homberg W, Brosius A (Hrsg.) 60 Excellent Inventions in Metal Forming. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, S. 433–438.
- 5 Foadian F, Carradó A, Palkowski H (2015) Precision tube production: Influencing the eccentricity and residual stresses by tilting and shifting. *Journal of Materials Processing Technology* 222: 155–162.

In Vorbereitung

Heidarian, F. and Palkowski, H.

Precision Tube Production: tube drawing with floating plug- Influencing the Eccentricity by Tilting.

Heidarian, F., H. Palkowski

Development a Regression model for tube drawing with tilted die process automation.

Literatur

- 1 Carradò, A., Foadian, F., & Palkowski, H. (2015). Tube drawing with tilted and shifted die. In *60 Excellent Inventions in Metal Forming* (pp. 433-438). Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg.
- 2 Carradò, A., Brokmeier, H. G., Pirling, T., Wimpory, R. C., Schell, N., & Palkowski, H. (2013). Development of residual stresses and texture in drawn copper tubes. *Advanced Engineering Materials*, 15(6), 469-475.
- 3 Pirling, T., Carradò, A., Brück, S., & Palkowski, H. (2008). Neutron stress imaging of drawn copper tube: comparison with finite-element model. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 39(13), 3149-3154.
- 4 Palkowski, H., „Einfluss der Vorrohr- und Auslaufführung auf die Exzentrizität und Eigenspannungen von Rohren beim Gleitziehen“ Abschlussbericht zum Forschungsprojekt AiF 17263 N, IMET, TU-Clausthal, 2014.
- 5 H. Palkowski und S. Brück, „Eigenspannungen und Maßtoleranzen beim Rohrziehen“, Abschlussbericht zum Forschungsprojekt AiF 13939, IMET, TU-Clausthal, 2008
- 6 DIN EN 1057, Kupfer und Kupferlegierungen – Nahtlose Rundrohre aus Kupfer für Wasser- und Gasleitungen für Sanitärinstallationen und Heizungsanlagen, Deutsche Fassung EN 1057:1996
- 7 Technische Regel Arbeitsblatt GW 392, Nahtlosgezogene Rohre aus Kupfer für Gas- und Trinkwasser-Installationen und nahtlosgezogene, innenverzinnte Rohre aus Kupfer für Trinkwasser-Installationen; Anforderungen und Prüfungen, DVGW-Arbeitsblatt GW 392, Juni 2002
- 8 Palkowski, H., & Brück, S. (2007). Maßtoleranzen und Eigenspannungen beim Rohrziehen. *Metall*, 11, 708-713.
- 9 Turóczy, Z., & Marian, L. (2012). Multiple regression analysis of performance indicators in the ceramic industry. *Procedia Economics and Finance*, 3, 509-514.
- 10 Foadian, F., Carradó, A., & Palkowski, H. (2015). Precision tube production: Influencing the eccentricity and residual stresses by tilting and shifting. *Journal of Materials Processing Technology*, 222, 155-162.
- 11 Foadian, F. (2018). Precision tube production: influencing the eccentricity, residual stresses and texture developments: experiments and multiscale simulation (Doctoral dissertation).

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Exzentrizitätsänderung in den Kupferrohren nach dem 1. Zug.....	6
Abbildung 2: Exzentrizitätsveränderung in den Kupferrohren nach dem 2. Zug.....	6
Abbildung 3: Exzentrizitätsänderung in den Messingrohren nach dem 1. Zug bei.....	7
Abbildung 4: Relative Exzentrizitätsänderung in den Al-Rohren nach dem 1. Zug bei unterschiedlichen Kippwinkeln.....	7
Abbildung 5: Exzentrizitätsänderung der Stahlrohre nach dem 1. Zug.....	8
Abbildung 6: Schematische Darstellung der Kipp- und Versatzmatrize.[10].....	8
Abbildung 7: Exzentrizitätsänderung der Kupferrohre nach dem 2. Zug; Kippung und Versatz.	9
Abbildung 8: Berechnete Exzentrizitätsänderung des Kupferrohres nach 1. Zug bei Kippwinkeln 0° , -2° , $+2^\circ$	10
Abbildung 9: Vergleich der berechneten sowie gemessenen Exzentrizitätsänderungen des Kupferrohres nach dem 1. Zug bei einem Kippwinkel $+5^\circ$	10
Abbildung 10: Berechnete Exzentrizitätsänderung bei Kombination Kippung (0 , $+2$, -2°) und Versatz 2 mm für ein Kupferrohr nach dem 1. Zug.....	11
Abbildung 11: Härte von Kupfer vor und nach dem 1. ($\epsilon=16,1\%$) und 2. Zug ($\epsilon=24,7\%$).....	12
Abbildung 12: Härte von Messing vor und nach dem 1. Zug ($\epsilon=43,4\%$).	12
Abbildung 13: Härte von Aluminium vor und nach dem 1. Zug ($\epsilon=20,4\%$).....	12
Abbildung 14 : LOKALE ZUGFESTIGKEIT IN KUPFERROHREN NACH DEM 2. ZUG (KIPPWINKEL -5°).....	13
Abbildung 15: Zugfestigkeiten in Aluminiumrohren für Ausgangsrohre (Ausg.), 1. Zug ohne (0°) und mit -5° -Kippung in den Positionen: Max, Min und 90°	13
Abbildung 16: Mittelwerte der auf der Max-Seite gemessenen axialen Eigenspannungen bei 0° und $\pm 5^\circ$ Kippung [11].	14
Abbildung 17: Axiale Eigenspannungen im Maximum verschiedener Rohre unter Variation des Kippwinkels; (a) Aluminium, (b) Messing und (c) Stahl [11].	15
Abbildung 18: Vergleich der berechneten und gemessenen Eigenspannung des Kupferrohres nach 1. Zug bei Kippung $+5^\circ$	16
Abbildung 19: VERGLEICH DER BERECHNETEN UND GEMESSENEN EIGENSPANNUNGEN DES KUPFERROHRES NACH DEM 1. ZUG BEI EINEM KIPPWINKEL VON -5°	16
Abbildung 20: Eigenspannungen (Bohrlochmethode) in Cu-Rohren im Bereich maximaler Wandstärke nach dem 1. Zug mit fliegenden Dorn.....	16
Abbildung 21: Eigenspannungen (Bohrlochmethode) in Cu-Rohren im Bereich minimaler Wandstärke nach dem 1. Zug mit fliegendem Dorn.....	17
Abbildung 22: Simulation des Rohrziehens mit fliegendem Dorn mit einem Kippwinkel von -3°	17
Abbildung 23: Berechnete Eigenspannungen an Max- und Min-Position für Kupferrohre nach dem 1. Zug mit fliegendem Dorn.	18
Abbildung 24: Exzentrizitätsänderung der Kupferrohre (46x2,2) nach dem 1. Zug; Ziehen mit fliegendem Dorn.....	18
Abbildung 25: manuelle Wandstärkemessung(links), Integriertes Ultraschall-Messsystem auf der Versatzmatrize (rechts).	20
Abbildung 26: Vergleich der manuell und In-Line gemessenen Wanddickenwerte.	20
Abbildung 27: Exzentrizitätsänderung sowie alte Exzentritäten der Kupferrohre (In-Line Matrizenverstellung).	22
Abbildung 28: Zugfestigkeiten (links) und Streckgrenzen (rechts) in den Positionen Min, Max und 90° in Cu-rohren nach dem 1. Zug mit verstellbarer Matrize.....	23
Abbildung 29: Berechnete Eigenspannung des gezogenen Kupferrohres nach 1 Zug mit verstellbaren Matrize.	24