

# Schlussbericht

der Forschungsstelle(n)

17263N, Technische Universität Clausthal, Institut für Metallurgie

zu dem über die



im Rahmen des Programms zur  
Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung und -entwicklung (IGF)

vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie  
aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

geförderten Vorhaben **IGF-Vorhaben-17263 N**

***Einfluss der Vorrohr- und Auslauführung auf die Exzentrizität und Eigenspannungen von  
Rohren beim Gleitziehen***

(Bevilligungszeitraum: 01.09.2011 - 31.12.2013)

der AiF-Forschungsvereinigung

Stiferverband Metalle e.V.

Clausthal-Zellerfeld, 11.04.2014

Ort, Datum

Prof. Dr.-Ing. Heinz Palkowski

Name und Unterschrift des/der Projektleiter(s)  
an der/den Forschungsstelle(n)

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Technologie

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

# Inhaltsverzeichnis

1	Zusammenfassung und Einführung .....	3
2	Ausrüstung .....	5
2.1	Geradeaus-Ziehmaschine am Institut für Metallurgie.....	5
2.1.1	Minimalmengenschmieranlage.....	5
2.1.2	Innenspannwerkzeug .....	6
2.1.3	Vorrichtungen zum Ziehen mit schrägem Einlauf .....	6
2.1.4	Vorrichtung zum Ziehen mit Versatz.....	6
2.2	Eigenspannungsmesssystem.....	7
2.3	Dienstleistungen von Partnern (Projektbegleitender Ausschuss).....	8
3	Durchführung der Untersuchungen.....	9
3.1	Vorbereitung der Industrierohre für die Versuche .....	9
3.2	Versuchsplan .....	10
3.3	Durchführung der Umformversuche .....	12
3.3.1	Ziehversuche an Industrierohren.....	12
3.3.1.1	Qualifizierung von Verfahren .....	12
3.3.1.2	Quantitative Ermittlung der Wirkungszusammenhänge .....	13
3.4	Untersuchung der Mikrostruktur .....	17
3.5	Untersuchung der Exzentrizität in Messingrohren .....	18
3.6	Eigenspannungsmessungen .....	20
3.6.1	Eigenspannungsmessungen mittels der Bohrlochmethode .....	20
3.6.1.1	Messmethodik.....	20
3.6.2	Eigenspannungsmessungen mit Neutronenstrahlen.....	22
3.6.2.1	Grundlagen .....	22
3.6.2.2	Ergebnisse der Eigenspannungsbestimmung mit Neutronen .....	25
3.6.3	FE-Modell.....	28
3.6.3.1	Modellbildung.....	28
3.6.3.2	Simulation von Eigenspannungen .....	30
3.7	Texturuntersuchungen .....	33
3.7.1	Versuchsaufbau .....	33
3.7.1.1	Zerstörungsfreie, ortsaufgelöste Texturanalyse.....	33
3.7.2	Ergebnisse der Texturmessungen.....	36
4	Zusammenfassung .....	37
5	Ausblick.....	38
6	Literatur .....	39
7	Veröffentlichungen.....	40
8	Abbildungsverzeichnis .....	41

# 1 Zusammenfassung und Einführung

Bei der Herstellung von Rohren erlaubt die Verringerung von Wanddickenschwankungen, die durch die Rohrexzentrizität beschrieben wird, Materialeinsparungen und damit – für materialkostenintensive Werkstoffe - interessante Kosteneinsparungen. Je höher man die Anforderungen an die Maßhaltigkeit und je weiter man in den Toleranzvorgaben eingeschränkt wird, desto stärker müssen korrigierende Mechanismen in Anspruch genommen werden, die sich direkt auf die Werkstoffeigenschaften und nicht zuletzt auf die lokale Eigenspannungsverteilung auswirken, desto stärker lokalisieren sich ihre Auswirkungen und umso wichtiger wird ihre Quantifizierung. Es ergibt sich somit die Notwendigkeit, den Materialfluss im Rohr zu analysieren, um ihn anschließend zielgerichtet beeinflussen zu können /1/.

Ziel des Vorhabens war deshalb, eine qualitative und quantitative Erfassung der Möglichkeiten zur lokalen Beeinflussung der Rohrwanddicke – in erster Linie mit dem Ziel, vorhandene Dickenabweichungen über den Rohrumfang zu reduzieren – vorzunehmen. Daraus leitet sich der zweite Schritt, die gesteuerte In-Line-Beeinflussung dieses Parameters in Hinblick auf engere Maßtoleranzen, hier gleichzusetzen mit der Wanddickenabweichung, ab. Dieser Schritt soll in einem Folgeantrag durchgeführt werden.

Vorgestellt werden die Forschungsergebnisse aus der Erprobung verschiedener Einflussgrößen zur gezielten Beeinflussung der Exzentrizität im Rohr; diese nicht nur hinsichtlich einer gleichmäßigen Rohrwanddicke („Präzisionsrohre“), sondern auch mit dem Ziel einer gesteuerten Ausbildung von Dickenänderungen über Umfang und Länge eines Rohres („tailored tubes“). Die Untersuchungen im Rahmen des Forschungsprojektes wurden an nahtlos gezogenen Kupferrohren durchgeführt.

Die Verringerung des Materialeinsatzes bei gleichem Nutzwert eines Produktes ist bei der Fertigung von Rohren in erster Linie mit der Erreichung geringerer Fertigungsschwankungen verbunden /2, 3/. Durch eine Verringerung der Streubreite des Prozesses beziehungsweise des zu erzeugenden Produktes wirkt sich das bei der Auslegung von Konstruktionen auf die Sicherheitsfaktoren aus. Dies führt zu einer verbesserten Materialeffizienz und mithin zu einer Einsparung von Rohstoffen. Des Weiteren ist es für bestimmte konstruktive Anwendungen wünschenswert, lokal Inhomogenitäten in Bauteilen zu erzeugen. Im konkreten Fall wären dies z.B. Rohre, die zielgerichtet lokal ausgeprägte Exzentrizitäten aufweisen, die veränderlich sein können. So kann ein richtungsabhängiges Flächenträgheitsmoment mit dem vorgeesehenen Lastfall in Übereinstimmung gebracht werden. Darüber hinaus können auch lokale Inhomogenitäten über die Länge eines Bauteils erwünscht sein, die sich in diesem quasi kontinuierlichen Fertigungsverfahren herstellen lassen. So stellt das Innenhochdruckumformen (IHU) ein Verfahren zur Darstellung komplexer Geometrien dar, welches beim Vorliegen einer zuvor optimierten Geometrie effizienter gestaltet werden könnte. Interessant ist darüber hinaus auch die positive Beeinflussung anderer Verarbeitungsschritte nach dem Ziehen. Als Beispiel hierfür sei eine angepasste Wanddickenverteilung zur Fertigung gebogener Rohrabschnitten genannt. Eine Variation der Beeinflussung von Wanddicke und Exzentrizität über die Länge kann hierbei ebenfalls wünschenswert sein.

In einem Vorprojekt (AiF 13939) /15/ wurde an einer Parameterfindung und Verfahrensauswahl zur Beeinflussung von Geometrie und Eigenspannungen gearbeitet. Es konnte gezeigt werden, dass und wie sich die Exzentrizitäten in Rohren aufgrund der

vorgenommenen Variationen der Einstellungen kontinuierlich beeinflussen lassen. Als Ergebnis des Forschungsvorhabens wurden Möglichkeiten einer Beeinflussung der Rohrführung aufgezeigt. Zudem wurde ein Beeinflussungsmechanismus untersucht, der die Möglichkeit einer Anwendung unter industrienahen Bedingungen ermöglichen könnte.

Maßtoleranzen für Rohre sind in einschlägigen Normen vorgegeben und teilweise mit weiteren Anforderungen in technischen Regeln zusammengefasst /16, 17/. Im Hinblick auf die Weiterverarbeitung sind insbesondere die Anforderungen an die Maßhaltigkeit bei Durchmesser und Ovalität sehr hoch – bei Kupferrohren sind im hier betrachteten Bereich von ca. 50 mm Abweichungen von  $\pm 0,07$  mm zulässig –, während die erlaubten Abweichungen der Wanddicke recht großzügig angelegt sind und bei 2 mm Nennmaß z.B.  $\pm 15\%$  betragen dürfen. Diese Vorgaben stellen die im Markt etablierten Größen dar, die im Rahmen einer wirtschaftlichen Fertigung auf den ersten Blick ohne nennenswerte Verschlechterung der Produkteigenschaften hergestellt und angeboten werden können. Eine Verringerung der Ungleichwandigkeit bedeutet nicht zuletzt aber auch eine Materialeinsparung, da die Auslegung einer Rohrkonstruktion nach der minimalen Rohrwanddicke erfolgt. In Zeiten hoher Rohstoffpreise kann die lokal beherrschte Einstellung und Reduzierung der Wanddickentoleranz im laufenden Prozess ein entscheidender Vorteil im globalen Wettbewerb sein. Die Einflussnahme über die aus der Literatur bekannten Fertigungsparameter ist hierfür nicht ausreichend, da sie im industriellen Prozess nicht die entscheidenden Parameter darstellen /18/.

Im aktuellen Projekt wurde die Auswirkung einer Einlaufführung auf die Exzentrizität sowie weiterer Eigenschaften nahtlos gezogener Rohre untersucht. Dabei standen die Qualifizierung spezifischer Verfahren und die Untersuchung quantitativer Zusammenhänge im Fokus der Untersuchungen. Weiterhin sollte der Einfluss auf den Eigenspannungszustand untersucht werden.

Bei der Auswahl zur Beeinflussung der Exzentrizität beim Ziehen kristallisierten sich zwei Varianten als besonders aussichtsreich heraus. Dies ist zunächst das schon in vorhergehenden Untersuchungen im Ansatz betrachtete Verfahren des Schrägeinlaufes des Rohres bzw. das hier umgesetzte Kippens der Matrize. Als weiteres Verfahren konnte sich das Ziehen mit versetzten Düsen als aussichtsreich qualifizieren. Hierbei wird ein weiteres Führungswerkzeug einlaufseitig nahe der formgebenden Düse eingesetzt. Dieses Werkzeug kann eine reine Führungsaufgabe übernehmen, aber auch bereits zur Vorumformung ausgelegt sein. Zur Versatzeinstellung muss das Führungswerkzeug in mindestens einer Richtung verstellbar sein.

Als Ergebnis der Untersuchungen konnten für beide Varianten verschiedene eindeutige Effekte ausgemacht werden: Im Bereich der Verschiebung oder Kippung der Werkzeuge lassen sich reproduzierbar abgrenzbare Bereiche definieren, in denen sich die Exzentrizität verbessern oder auch verschlechtern lässt. Diese Zusammenhänge sind in entsprechenden Kurven hinterlegt, die sich für eine erste, geplante Umsetzung für die In-Line-Regelung nutzen lassen.

Als besonders aussichtsreich - weil effizient - hat sich dabei das Ziehen mit Versatz herausgestellt, das mit einem einfachen, mechanisch verstellbaren Werkzeug realisiert wurde. Die Ergebnisse wiesen eine geringe Streubreite und gute Reproduzierbarkeit auf. Hier besteht hinsichtlich der Gestaltung des Vor- und Auslaufwerkzeuges wie auch der Gestaltung des Innenwerkzeuges noch weiterer Entwicklungsbedarf.

Für das Ziehen mit fliegendem Dorn scheint das Verfahren mit versetztem Einlauf das größte Potenzial zu bieten.

## 2 Ausrüstung

### 2.1 Geradeaus-Ziehmaschine am Institut für Metallurgie

Die Versuche wurden an der institutseigenen hydraulischen 250 kN-Rohrziehmaschine durchgeführt, die auch schon im genannten Vorprojekt zum Einsatz kam. Ergänzt wurde sie durch eine Minimalmengenschmieranlage, die einen reproduzierbaren Schmiermittelauftrag gewährleistet sowie einer Innenspannzange, die ein Anspitzen der Rohre überflüssig macht. Damit konnte erreicht werden, dass die Länge des verwertbaren gezogenen Rohres (stationärer Zustand) deutlich erhöht wurde und aus einem Zug genügend Material für zwei Proben eines Folgezugs zur Verfügung stand, da auf die Ziehangel (ca. 200 mm) verzichtet werden konnte.

#### 2.1.1 Minimalmengenschmieranlage

Zur Sicherstellung einer gleichmäßigen Schmierung bei den Versuchen wurde an der Ziehmaschine eine pneumatische Minimalmengenschmieranlage eingesetzt. Diese garantiert bei voreingestellten Prozessparametern eine reproduzierbar gleichmäßige Schmierung der Oberflächen des Ziehgutes. Verwendet wurden Ziehöle, die für das Ziehen von Buntmetallrohren ausgelegt sind. Für die Benutzung in der Minimalmengenschmieranlage kommen dabei speziell dünnflüssige Schmierstoffe mit einer kinematischen Viskosität bis 400 mm<sup>2</sup>/s zum Einsatz, z. B. Bechem, Kubitrac 4098 und überwiegend WISURA ZO 3373.

In der Anlage wird das Schmiermittel als Aerosol über speziell angefertigte Düsenanordnungen innen und außen auf die Rohroberflächen aufgesprüht. Die Außenschmierung erfolgt durch einen Düsenring, die Innenschmierung durch ein Koaxialrohr, welches auf die Dornstange geschoben wird (Abb. 2-1).



**Abb. 2-1:** Düsenanordnungen für die Schmierung der Rohre für die Außen- (links) und Innenfläche. Innendüse zur Abdeckung eines weiten Bereiches an Innendurchmessern (v. l. n. r.)

Für die Benutzung des Innenschmierwerkzeuges wurde die Innenlanze angepasst, so dass nur noch ein kleiner Düsenring, der von einem Hydraulikschlauch mit Schmiermittel versorgt wird, hinter dem Innendorn sitzt (Abb. 2-1 rechts). Damit ließ

sich in einfacher Weise die Abhängigkeit von der Koaxialrohrlänge beseitigen. Diese Variante lässt sich auch für kleinere Rohre verwenden, solange der Durchmesser des Düsenringes kleiner als der Durchmesser des Dornes ist.

### 2.1.2 Innenspannwerkzeug

Im vorhergehenden Projekt zeigte sich, dass eine nicht zentrisch gefertigte Ziehangel einen negativen Einfluss auf die Reproduzierbarkeit des Untersuchungsergebnisses besitzt. Das war problematisch, da die Ziehlänge der Versuchsanlage auf ca. 2,5 m begrenzt ist. Abhilfe wurde über ein geeignetes Innenspannwerkzeug geschaffen (Abb. 2-2), das zudem den Vorteil besitzt, dass der instationäre Bereich deutlich kürzer ausfällt. Im Rahmen des Projektes wurden dazu zwei Innenspannzangen angeschafft, mit denen der zu untersuchende Durchmesserbereich zwischen 65 mm und 50 mm abgedeckt werden kann. Auf das Anformen einer Ziehangel kann somit verzichtet werden.



Abb. 2-2: Innenspannwerkzeug

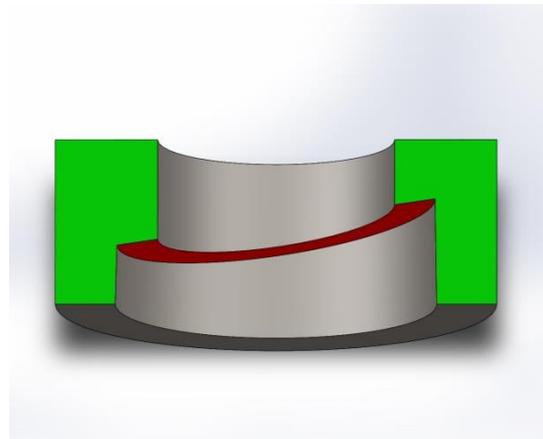


Abb. 2-3: Gekippter Matrizenhalter für das Ziehen mit definiertem Kippwinkel

### 2.1.3 Vorrichtungen zum Ziehen mit schrägem Einlauf

Um ein schrägen Einlauf zu realisieren, wurde das Rohr im Vorprojekt einlaufseitig durch Ablauf auf einer Schräge ausgelenkt. Dies ist aber als technisches Verfahren, insbesondere für größere Rohrlängen, nicht anwendbar. Aus diesem Grunde wurde in diesem Projekt der Schrägeinlauf durch Schrägstellung der Ziehmatrize realisiert. Dazu wurden Adapter mit unterschiedlichen Kippwinkeln normal zur Ziehachse ( $0 - 10^\circ$ ) gefertigt, in die die Matrize eingelegt wurde (Abb. 2-3). Die Änderung des Stoffflusses durch eine schräg gestellte Düse führt in der Regel zu einer Krümmung des gezogenen Rohres. Durch Einsatz von Führungsmatrizen auslaufseitig konnte eine für die Weiterverarbeitung ausreichende Geradheit gewährleistet werden. Winkel über  $5^\circ$  führten bei diesem Verfahren und dem eingesetzten Werkstoff zum Versagen durch Rohrbriss.

### 2.1.4 Vorrichtung zum Ziehen mit Versatz

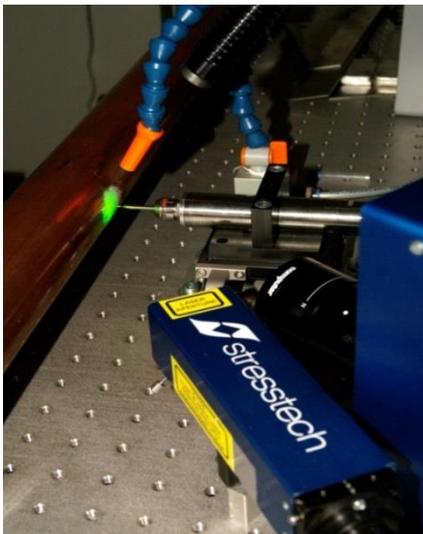
Bei dieser zweiten untersuchten Verfahrensvariante werden grundsätzlich zwei Matrizen eingesetzt (Abb. 2-4). Dabei wird die vordere normal zur Ziehrichtung gegenüber der Ziehmatrize verschoben. Die mechanische Umsetzung für eine stufenlose Verstellung lässt sich in einfacher Weise realisieren. Probleme mit der Geradheit traten bei dieser Verfahrensweise nicht auf.



**Abb. 2-4:** Verstellbare Vorrichtung zum Ziehen mit definiertem Versatz und doppelt ausgelegtem Werkzeug. Links: Führungsmatrize, rechts: Ansicht auslaufseitig

## 2.2 Eigenspannungsmesssystem

Für die Untersuchungen von Eigenspannungen an den Rohren wurde ein Eigenspannungsmesssystem der Firma Stresstech GmbH erworben. Das ursprünglich vorgesehene Gerät der Fa. HBM, das ebenfalls nach der Bohrlochmethode arbeitet, wurde entgegen der Antragstellung nicht beschafft, da HBM den Support für diese Systeme eingestellt hat. Das in der Anschaffung deutlich teurere Gerät besitzt den Vorteil, dass die Dehnungen nach dem Bohrvorgang nicht mehr per Dehnungsmessstreifen, sondern mittels kohärenten Laserlichts („electronic speckle pattern interferometry“) aufgenommen werden (Abb. 2-5).



**Abb. 2-5:** Versuchsanordnung mit einem Kupferrohr

Auf Grund der gekrümmten Rohroberflächen waren eine aufwändige Adaption der Anlage und die Fertigung spezieller Aufnahmen vorzunehmen. Hier wurde besonderes Augenmerk auf die Einspannung der Rohrkörper gelegt. Einerseits muss eine sichere Fixierung der Untersuchungsobjekte gewährleistet sein (Sicherung gegen Verschiebung, Durchbiegung Vibration), die Fehlmessungen zu vermeiden hilft, andererseits dürfen die Klemmkräfte nicht zu Verfälschungen der Messwerte führen.

Auf Grund der gekrümmten Rohroberflächen waren eine Adaption der Anlage und die Fertigung spezieller Aufnahmen vorzunehmen. Hier wurde besonderes Augenmerk auf die Einspannung der Rohrkörper gelegt. Einerseits muss eine sichere Fixierung der Untersuchungsobjekte gewährleistet sein (Sicherung gegen Verschiebung, Durchbiegung, Vibration), die Fehlmessungen zu vermeiden hilft, andererseits dürfen die Klemmkraften nicht zu Verfälschungen der Messwerte führen.

Bei der Verwendung dieses Systems entfällt der Einsatz von DMS-Rosetten und aller damit verbundenen Aufwendungen. Das führt zu einer deutlichen Reduzierung möglicher Fehler, die bei der Applikation auftreten können. Als Verbrauchsmaterial ist aber weiterhin der Bohrer anzusehen.

Das Verfahren ist hinsichtlich seiner Untersuchungstiefe begrenzt durch das Verhältnis Bauteildicke zu Bohrlochdurchmesser. Somit sind bei einer im Projekt typischen Wandstärke von 2,5 mm Messtiefen von bis 0,6 mm bei Verwendung eines Bohrers mit einem Durchmesser von 0,8 mm<sup>∅</sup> zuverlässig analysierbar. Größere Durchmesser ermöglichen die Analyse größerer Bohrtiefen, dies jedoch auf Kosten der Auflösung.

Die Genauigkeit des Verfahrens wird von verschiedenen Einflussfaktoren bestimmt. Hierzu gehören u.a. mechanische Einflüsse aus Ungenauigkeiten des Vorschubs, der E-Modul des zu untersuchenden Werkstoffes, der Durchmesser – wie zuvor erwähnt - sowie systematische Fehler, die sich aus der ESPI-Analyse ergeben. Dazu zählt u. a. die Kameraauflösung, der Betrachtungswinkel sowie die verwendete Laserwellenlänge. Vom Hersteller wird als Fehler bei der Einhaltung der Vorgaben ein maximaler Messfehler von ±10 % angegeben.

### **2.3 Dienstleistungen von Partnern (Projektbegleitender Ausschuss)**

Innerhalb des Projektes haben die im Antrag aufgeführten Mitglieder des Projektbegleitenden Ausschusses an den Untersuchungen mitgewirkt. Dies betrifft neben der regelmäßigen Diskussion der Zwischenergebnisse und Abstimmung der weiteren Vorgehensweise die Unterstützung durch Bereitstellung der Rohrmaterialien und Ziehwerkzeuge sowie Schmierstoffe.

Beim Partner Institut Laue-Langevin (ILL) konnten Eigenspannungsmessungen auf Neutronenbasis durchgeführt werden. Dieses zeitaufwändige und kostspielige Verfahren ermöglicht es, ein komplettes Rohr zerstörungsfrei auf seinen Eigenspannungszustand sowohl über die Rohrwanddicke wie auch an charakteristischen Stellen zu untersuchen. Die Ergebnisse dienen als Basisinformation zur Analyse typischer Eigenspannungszustände in gezogenen Rohren wie auch der Verifizierung der Daten aus der Eigenspannungsmessung per Bohrlochmethode. Die Methode der Neutronenbeugung stellt sich im Gegensatz zu anderen Verfahren technisch sehr aufwändig dar. Zudem sind verfügbare Messzeiten stark limitiert. Durch Forschungsaufenthalte am ILL konnte der Umgang mit den Gerätschaften und den vorhandenen Analysemethoden erlernt werden und dient der weiteren Modellbildung zur Simulation von Eigenspannung und Textur in gezogenen Rohren.

Darüber hinaus wurde im Rahmen der Zusammenarbeit aus Mitteln des Projektes ein Kollimator für die ortsaufgelöste Messung von Texturen teilfinanziert, um die erforderlichen Texturuntersuchungen an den Rohren durchführen zu können.

### 3 Durchführung der Untersuchungen

#### 3.1 Vorbereitung der Industrierohre für die Versuche

Für die komplette Versuchsreihe wurden SF-Cu-Industrierohre der Abmessungen 65x5.5 mm (Außendurchmesser x Wanddicke) und 64x3,1 mm eingesetzt. Die erste Abmessung war für das Endmaß 50x4 mm vorgesehen, die kleinere für die Abmessung 50x2 mm. Messingrohre wurden zur Validierung der Ergebnisse von 50x4 mm an 45x3,5 mm gezogen. Die Rohre wurden von der KME Deutschland GmbH, Mitglied des projektbegleitenden Ausschusses, zur Verfügung gestellt. Ausgehend vom Pressrohr wurden sie auf das angelieferte Maß vorgezogen. Um für die Versuchskampagne am Institut für Metallurgie ein in seinen Eigenschaften möglichst gleiches Rohr einzusetzen und um die vorgesehene Umformung zu garantieren, wurden diese anschließend rekristallisierend gegläht. Die chemische Analyse der Ausgangsrohre ist in Tabelle 3-1 dargestellt.

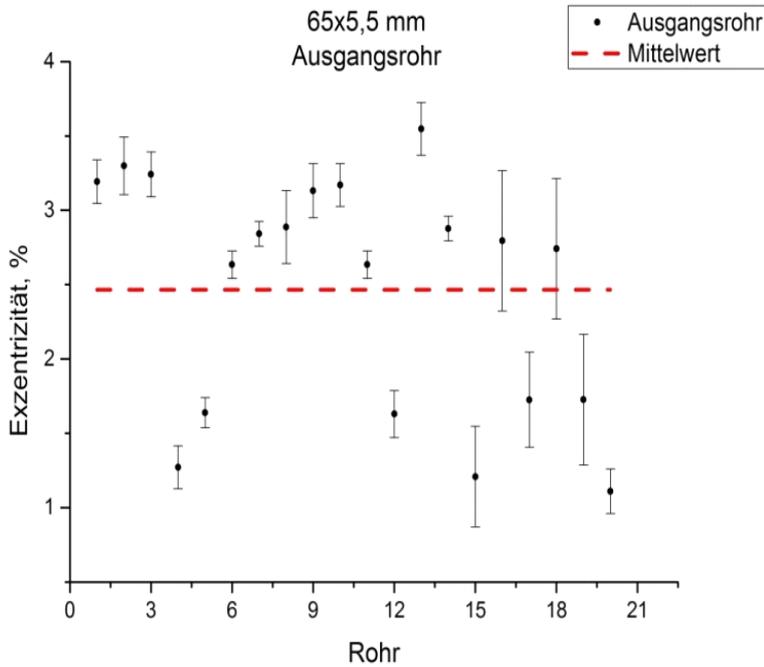
**Tabelle 3-1:** Chemische Zusammensetzung der verwendeten Rohre

Gew.-%	Zn	Fe	Si	Mg	Te	As	Sb	Al	C	Cu
<b>SF-Cu</b>	0,047	0,018	0,017	0,012	0,018	0,0019	0,012	0,013	0,0063	99,88
<b>CuZn36</b>	<b>Zn</b>	<b>Fe</b>	<b>Ni</b>	<b>Al</b>	<b>Cu</b>	<b>Pb</b>	<b>Sn</b>	<b>Übrige</b>		
	Rest	0.04	0,3	0,02	63,5	0,05	0,1	0,1		

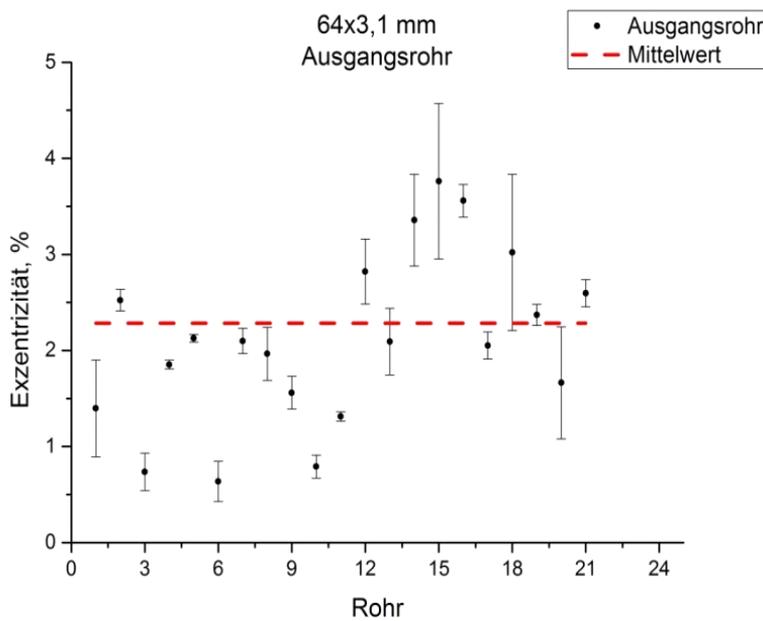
Vor den Zug wurden die lokalen Dicken der Rohre über Umfang und Länge per Ultraschall ermittelt. Hierzu wurde entweder ein Raster manuell abgefahren oder die automatische Rohvermessungsanlage des Instituts genutzt. Aus diesen Messungen ergeben sich die (örtlichen) Ausgangswerte für Durchmesser und Wanddickenverteilung. Um die Vielzahl der Varianten mit möglichst geringem Materialaufwand und stationären Verhältnissen herstellen zu können, wurden Rohrausgangslängen von ca. 750 mm eingesetzt.

Die Ergebnisse der Exzentrizitätsmessung an den Ausgangsrohren sind in Abb. 3-1 und Abb. 3-2 dargestellt. Wie aus den Bildern ersichtlich ist, schwanken die Exzentrizitäten der Ausgangsrohre zwischen ca. 1-5 %. Der Mittelwert (der hier keine besondere Bedeutung hat, da die Ergebnisse auf den jeweiligen Ausgangswert des zu untersuchenden Rohres bezogen wurde) liegt für die Abmessung 65x5,5 mm bei 2,5 %, für die Rohre 64x3,1 mm bei 2,25 %. Dies entspricht in der Größenordnung auch den Messwerten der Ausgangsrohre aus dem vorhergehenden Projektes 13939N. Hier wurde eine Schwankungsbreite von 0,3 % bis 5 % ermittelt. Was die Unterschiede in Längsrichtung betrifft, betragen die gemessenen Wanddickenabweichungen zwischen (0,25 - 0,70) %. Das ist im Verhältnis zu den Schwankungen nach dem Folgeprozess sowie im Verhältnis zur Größenordnung der Wanddickenabweichung über den Umfang vernachlässigbar gering. Des Weiteren ließ sich kein helixförmiger Verlauf des Maximums über die Länge der gelieferten Rohre feststellen. Dieser Effekt ist auch eher bei im Walzenverfahren erzeugten Nahtlosvorrohren zu erwarten.

Die manuelle Vermessung wurde an jeweils acht Stellen über den Umfang vorgenommen (alle 45°). Im Vorprojekt konnte bereits festgestellt werden, dass dieser Abstand für das Detektieren der Extrema der Wanddicke mehr als ausreichend und zielführend ist. Zwischen den jeweiligen Messpunkten verläuft die Wanddickenänderung stets monoton, die Unterschiede zwischen zwei Messpunkten liegen nur knapp über der angegebenen Messgenauigkeit des verwendeten Gerätes. Die manuelle Vermessung wurde zudem dort überwiegend vorgenommen, wo es um die Nachverfolgung einzelner Messstellen ging. Die Messpunkte ließen sich mit einem geeigneten Markierungsstift kennzeichnen, so dass sie nach dem Zug wieder auffindbar waren und ein Vergleich zwischen dem Ausgangs- und Endzustand möglich war.



**Abb. 3-1:** Exzentrizitäten der Rohre 65x5,5 mm im Anlieferungszustand



**Abb. 3-2:** Exzentrizitäten der Rohre 64x3,1 mm im Anlieferungszustand

### 3.2 Versuchsplan

Das Ziel der Untersuchung war die Quantifizierung geeigneter Faktoren für die Beeinflussung der Exzentrizität. Im vorangegangenen Projekt AiF 13939N wurden bereits verschiedene Standardparameter untersucht, die üblicherweise in der Industrie als Einflussparameter variiert werden. Hierzu gehören die Länge der zylindrischen Führung in der Matrize sowie Übergangsradien und Ziehholöffnungswinkel. Im aktuellen Projekt lagen der bestimmende Fokus auf der Variation der Einlaufgeometrie und darüber hinaus auf der Ermittlung quantitativer Zusammenhänge zwischen den gewählten Einflussparametern und ihre Wirkung auf die Exzentrizität.

Die Ziehfolge wurde in Anlehnung an den industriellen Fertigungsprozess ausgelegt und ist für die verwendeten Ausgangsrohre der SF-Cu-Sorte in den Tabellen 3-2 und 3-3 niedergelegt.

**Tabelle 3-2:** Zugfolge und Werkzeuge für die Endabmessung 50 X 2

Zug	Einlaufmaß mm	Arbeits- matrize mm	Zyl. Füh- rungs- länge mm	Arbeits- winkel °	Dorndurch- messer mm	Wanddicken- Formänderung $\varphi_s$	Formänderung Durchmesser $\varphi_{dm}$	Gesamt Q-Wert -	Endmaß, $\varnothing$ x Dicke mm
1	64 x 3,1	60	4	12	55,0	0,21	0,07	3	60 x 2,5
2	60 x 2,5	50	4	12	46,0	0,22	0,18	1,2	50 x 2,0

**Tabelle 3-3:** Zugfolge und Werkzeuge für die Endabmessung 50 X 4

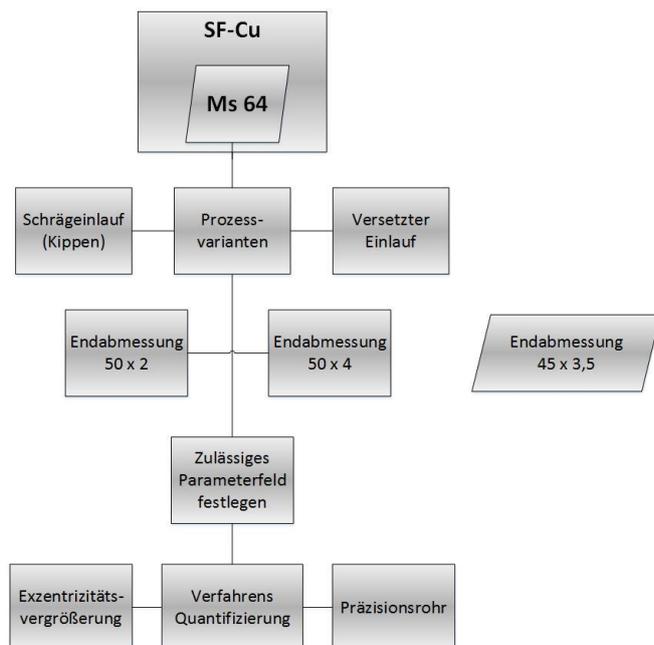
Zug	Einlauf- maß mm	Arbeits- matrize mm	Zyl. Füh- rungs- länge mm	Arbeits- winkel °	Dorndurch- messer mm	Wanddicken- Formänderung $\varphi_s$	Formänderung Durchmesser $\varphi_{dm}$	Gesamt Q-Wert -	Endmaß $\varnothing$ x Dicke mm
1	65 x 5,5	60	4	12	51,0	0,20	0,08	4	60 x 4,5
2	60 x 4,5	50	4	12	44,0	0,22	0,11	2	50 x 4,0

Zwischenzüge ohne Innenwerkzeug, welche in der Vergangenheit zur Beseitigung der Unge-  
radtheit durchgeführt wurden, konnten mit den zuvor beschriebenen Maßnahmen vermieden  
werden. Im Rahmen der Verfahrensqualifizierung sollte die Beeinflussung derart gestaltet  
sein, dass ein einfacher Durchlauf zu einem technisch befriedigenden Ergebnis führt. Der  
ursprüngliche Versuchsplan wurde dazu in Absprache mit dem Projektbegleitenden Aus-  
schuss entsprechend angepasst.

Mit Blick auf die oben genannten, im Vorprojekt analysierten Parameter waren somit vor-  
nehmlich die Einflussgrößen Verfahren, Verstellwert und Endabmessung hinsichtlich ihrer  
Effektivität auf die Exzentrizität unter Berücksichtigung technologischer Randbedingungen zu  
untersuchen. Für den konkreten Versuchsplan resultierten daraus folgende Eckpunkte:

- Qualifizierung technisch durchführbarer Verfahren mit asymmetrischem Rohrlauf,
- Abgrenzung der technisch anwendbaren Verstellwerte,
- Konzentration auf die Abmessung 50x2 mm, stichprobenartige Untersuchungen unter aus  
gewählten Randbedingungen für die Abmessung 50x4 mm,
- Ermittlung eines funktionalen Zusammenhangs, der die Wirkung der Verstellparameter auf  
die Exzentrizität in Abhängigkeit vom eingestellten Verstellwert beschreibt; dies im tech-  
nisch relevanten Bereich.

Der sich daraus ergebende Versuchsplan ist in Abb. 3-3 dargestellt.



**Abb. 3-3:** Versuchsplan für die Ziehversuche

### 3.3 Durchführung der Umformversuche

#### 3.3.1 Ziehversuche an Industrierohren

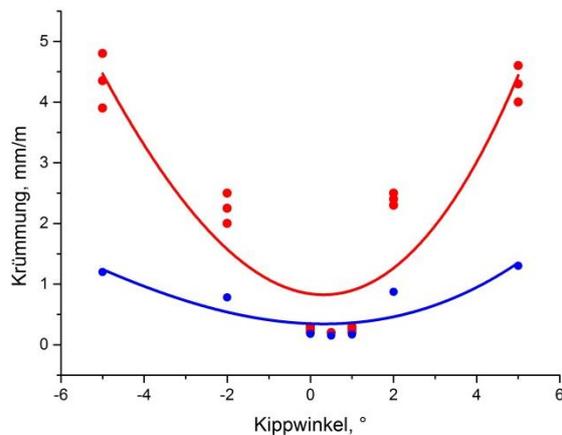
##### 3.3.1.1 Qualifizierung von Verfahren

Auf Grund der Ergebnisse aus Voruntersuchungen wurden für eine erfolversprechende Anwendung die Methoden des Schrägeinlaufs und Düsenversatzes favorisiert. Beeinflussungen im Bereich des Rohrauslaufs, auch in Kombination mit anderen Maßnahmen, sind aus technischen Gründen nur bedingt darstellbar. Das liegt im Wesentlichen am Ziehwagen der Rohrziehbank.

Zunächst wurde die Methode des Schrägeinlaufs untersucht, deren prinzipielle Wirksamkeit in Ansätzen bereits im Vorprojekt AiF 13939N aufgezeigt werden konnte. Bevor im Rahmen des aktuellen Projektes jedoch eine reproduzierbare Anwendung erfolgen konnte, musste die Anlage konstruktiv so umgestaltet werden, dass ein technologisch problemloses Ziehen der Rohre unter reproduzierbaren Bedingungen möglich war. Dazu musste zuerst ein manuelles Auslenken der Rohre auf der Einlaufseite, wie es im Vorprojekt erfolgte und das zu relativ hohen Streuungen der Ergebnisse führte, vermieden werden. Auch die Verwendung eines in der Vergangenheit benutzten Einlaufschlittens erwies sich als nicht optimal. Weiterhin musste das Ausschlagen („Schwänzeln“) der Rohre vermieden werden, das bei den kurzen Versuchsrohrängen unkritisch, in der Rohrfertigung jedoch inakzeptabel ist. Schließlich war die Randbedingung zu erfüllen, dass die Rohre eine für die Weiterverarbeitung akzeptable Geradheit aufweisen.

Als Lösung wurde die Ziehmatrize mittels angepasster Adapter schräg gestellt, wobei diese für die Versuchsdurchführung in feinen Abstufungen hergestellt wurden. So waren konstante Einlaufbedingungen realisierbar. In Vorversuchen zeigte sich, dass Kippwinkel von etwa 5° für die hier verwendeten Rohre und Abmessungen einen Grenzzustand darstellen. Bei größeren Winkeln kam es regelmäßig zu Rohrbrüchen. Das Problem der mangelhaften Geradheit konnte durch eine einlaufseitig angebrachte Führungsmatrize beseitigt werden, welche eine marginale Vorumformung auf das Rohr aufbringt. Dazu wurde bei einem Ausgangsdurchmesser des Rohres von 64,3

mm<sup>∅</sup> (Nennmaß) eine Matrize mit einem Durchmesser von 64,0 mm<sup>∅</sup> eingesetzt. Die ohne diese Vordüse inakzeptablen Geradheitswerte ließen sich so auf ein Geradheitsmaß von < 1 mm/m reduzieren. Die Ergebnisse von Versuchen mit und ohne Einsatz einer Vordüse sind beispielhaft in Abb. 3-4 dargestellt.



**Abb. 3-4:**  
Geradheitsabweichung bei Schräg-  
einlauf mit unterschiedlichen Kipp-  
winkeln

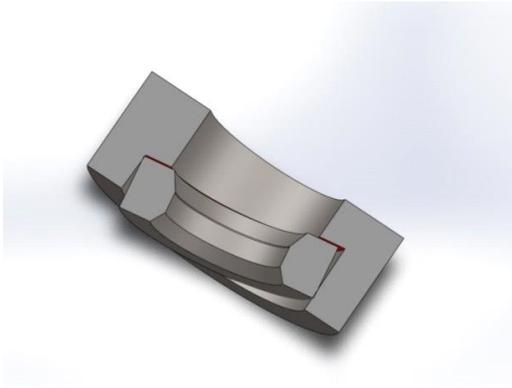
Als zweites Verfahren zur Beeinflussung der Exzentrizität wurde das Ziehen mit Versatz untersucht. Zur Gewährleistung eines stabilen Rohrlaufes und einer akzeptablen Geradheit wurde von Anfang an mit einer Vormatrize geplant, welche auch den Versatz beim Einlaufen erzeugen sollte. Eine robuste Ausführung des Verstellmechanismus' zur kontrollierten Versatzeinstellung ist zur Erzielung reproduzierbarer Werte erforderlich. Analog zum Kippen wurde hier die Einlaufmatrize ebenfalls auf „Presung“ ausgelegt, so dass hier bereits eine marginale Umformung stattfindet. Als maximale Verschiebung der Matrizen gegeneinander konnte unter unseren Versuchsbedingungen ein Grenzmaß von 5 mm ermittelt werden.

Dieser Teilabschnitt des Projektes, der Auswahl und Qualifizierung unterschiedlicher Methoden, konnte mit dem Ergebnis abgeschlossen werden, zwei aussichtsreiche Methoden für die Quantifizierung zur Verfügung zu haben.

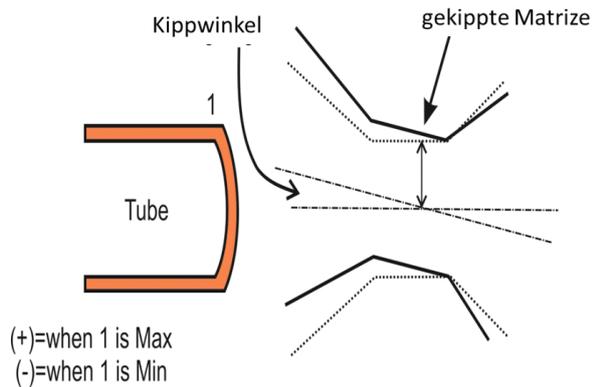
### 3.3.1.2 Quantitative Ermittlung der Wirkungszusammenhänge

Aus den Vorprojekt und den durchgeführten Vorversuchen war bekannt, dass die hier untersuchten Parameter Kippung und Versatz einen größeren Einfluss auf die Exzentrizität haben als die klassisch untersuchten Parameter wie Abstufung, Zylinderlänge oder Übergangsradien.

Um den Einfluss des Kippwinkels und des Versatzes auf die Exzentrizität und die Eigenspannungen der gezogenen Rohre untersuchen zu können, wurden zwei unterschiedliche Vorrichtungen gebaut. In Abb. 3-5 ist eine solche Halterung für das Anwinkeln der Matrize dargestellt, bei der die Auflagefläche der Matrize als Schräge mit dem gewünschten Winkel ausgeführt ist. Dadurch lässt sich die Hauptzugrichtung um einen definierten Winkel ändern. Zur Einstellung unterschiedlicher Winkel wurden entsprechende Matrizenhalter hergestellt.

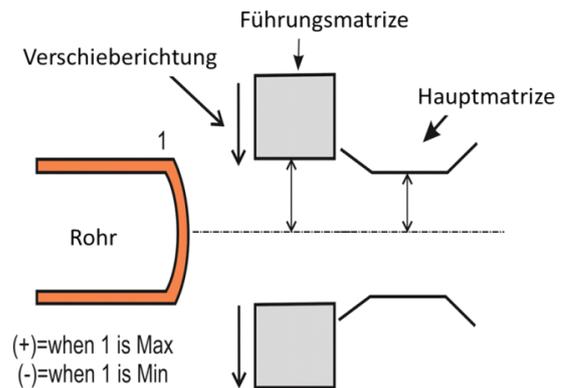
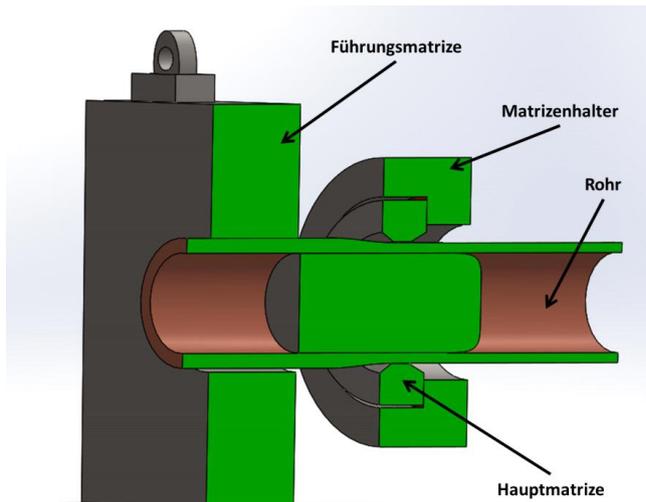


**Abb. 3-5:**  
Versuchsaufbau „Schrägeinlauf“



**Abb. 3-6:**  
Verkipfung der Matrize und die Definition einer positiven (+) und negativen (-) Ausrichtung der Rohre.  
Bei Ausrichtung Maximum der Wandstärke oben: positiv (+), Minimum der Wandstärke oben: negativ (-)

Ein wichtiger Parameter mit signifikantem Einfluss auf die Exzentrizität ist die Position des Minimums/Maximums der Rohrwanddicke zur Kipprichtung/Schrägstellung. Deshalb wurden zwei Ausrichtungen definiert (Maximum/Minimum im Scheitelpunkt des Rohres), die im Folgenden als positive und negative Ausrichtung bezeichnet werden. Die Definition der positiven (+) und negativen Ausrichtung (-) ist Abb. 3-6 zu entnehmen. Die Kippung erfolgt immer in einer Richtung!



**Abb. 3-7:** Rohrziehen mit versetzter Matrize

**Abb. 3-8:** Verschiebung der Matrize

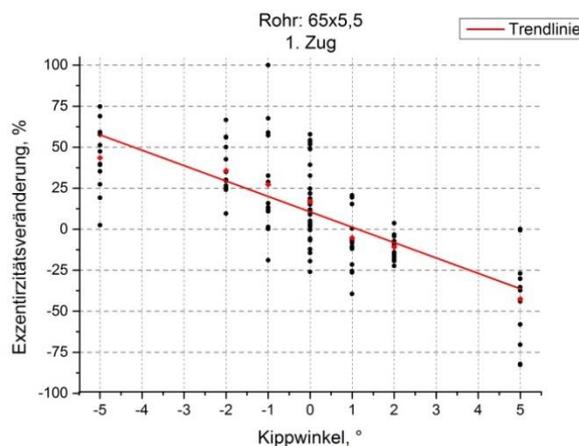
Zur Realisierung der zweiten Variante „Verschiebung“ wurde eine Führungsmatrize vor die Hauptmatrize platziert. Durch den Versatz beider Matrizen zueinander wird das Rohr während des Ziehvorganges vor dem Eintritt in die Hauptmatrize aus der Mitte der Ziehrichtung verschoben, so dass der Stofffluss nicht mehr axialsymmetrisch ist.

risch verläuft. Eine schematische Darstellung dieser Vorrichtung findet sich in den Abbildungen 3-7 und 3-8. Mit dieser Vorrichtung wurden ebenfalls Versuche mit unterschiedlichen Ausrichtungen des Rohres (positiv und negativ) mit den in der Tabelle 3-4 aufgeführten Parametern durchgeführt.

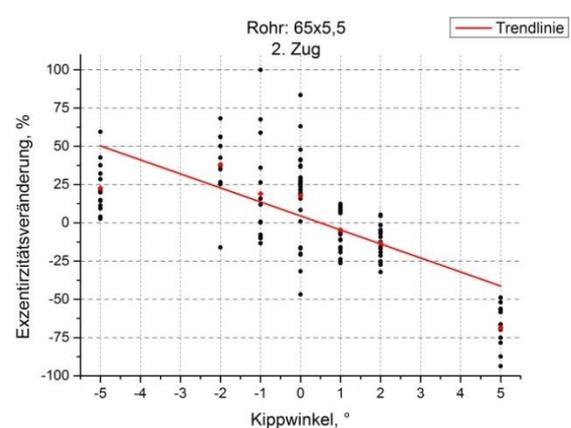
**Tabelle 3-4:** Parameter für den Kippwinkel und die Verschiebung

Kippwinkel (°)	Versatz (mm)
0	0
±1	+ 1,5
± 2	± 3
± 5	+4

Die relativen Änderungen der Exzentrizität sind für unterschiedliche Rohre mit unterschiedlichen Kippwinkeln für die ersten beiden Ziehstufen in den Abb. 3-9 und 3-10 dargestellt. Eine Änderung der relativen Exzentrizität mit positiven Vorzeichen bedeutet hier eine Verbesserung des absoluten Wertes der Exzentrizität nach dem Ziehen, während Änderungen mit negativen Vorzeichen zu einer Erhöhung der Exzentrizität führen. In den Darstellungen für beide Ziehschritte lässt sich ein ähnlicher Trend erkennen.



**Abb. 3-9:** Exzentrizitätsveränderung bei Schrägeinlauf im 1. Zug.



**Abb. 3-10:** Exzentrizitätsveränderung bei Schrägeinlauf im 2. Zug.

Aus den graphischen Darstellungen der Ergebnisse ist erkennbar, dass sich bei positiver Ausrichtung der Rohre eine Erhöhung der Exzentrizität erzielen lässt, während diese bei negativer Positionierung mit zunehmendem Kippwinkel abnimmt. Das heißt, kippt man die Düse in Richtung Minimum, so reduziert sich die Exzentrizität stärker mit zunehmendem Kippwinkel. Dabei sei noch einmal darauf hingewiesen, dass für die hier ausgewählten Versuchsbedingungen der Kippwinkel von 5 ° ein Grenzwert darstellte, bei dem es verstärkt zu Abrissen des Rohres kam.

Die starken Streuungen in den Messwerten lassen als erstes Ergebnis nur einen in etwa linearen Zusammenhang zwischen Kippwinkel und Exzentrizitätsänderung zu, der jedoch durchaus ausreichend ist für eine semi-quantitative Auslegung einer In-Line-Regelung:

Erster Zug  
Folgezug

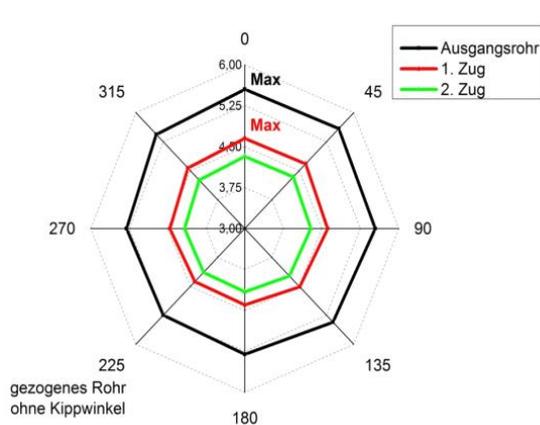
$$E = 0,106 - 0,093 \times \theta$$

$$E = 0,045 - 0,0915 \times \theta$$

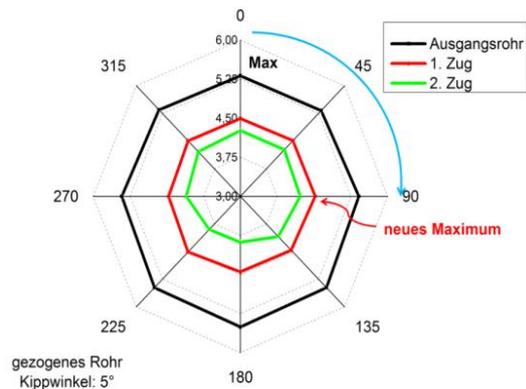
mit E (%) als Exzentrizität und  $\theta$  (°) als Kippwinkel. Ein Vergleich beider Züge zeigt

einen nur geringen Unterschied in den Steigungen der Geraden. Ein werkstoffbedingter Einfluss lässt sich daraus nicht ableiten. Hier sind weitere Untersuchungen erforderlich.

Ein anderer Effekt, der beobachtet werden konnte, ist die Verschiebung der Lage der Maxima und Minima der Wandstärke aus ihrer ursprünglichen Position bei großen Kippwinkeln. In den Abbildungen 3-11 und 3-12 ist die Wandstärke an acht Stellen über den Umfang für gezogene Rohre ohne Verkippung und mit einer Verkippung von  $-5^\circ$  dargestellt. Wie sich in diesen Darstellungen erkennen lässt, bleibt die Lage von Maximum und Minimum ohne Kippung in ihrer ursprünglichen Position. Mit Kippung lässt sich dagegen eine deutliche Verschiebung des neuen, aus dem lokalen Stofffluss resultierenden Maximums und Minimums – in diesem Fall um ca.  $90^\circ$  – erkennen.

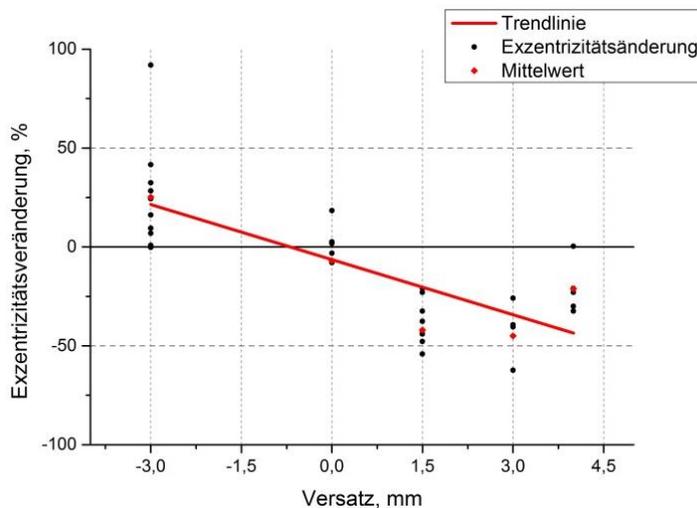


**Abb. 3-11:** Lage des Maximums bleibt erhalten bei Zug ohne Kippung



**Abb. 3-12:** Verschiebung von Maximum und Minimum bei Kippung um  $-5^\circ$

Abb. 3-13 zeigt die Auswirkung eines Matrizenversatzes auf die Exzentrizität. Auch hier lässt sich – wie bei den Versuchen mit Schrägstellung des Rohres – durch geeignete Kombination zwischen Versatz und Lage des Maximums die Exzentrizität gezielt reduzieren oder auch erhöhen. Im Bereich höherer positiver Verschiebungen muss der Verlauf der Exzentrizitätsänderung für einen geeigneten Regelalgorithmus noch verifiziert werden. Gegenüber der Verfahrensvariante „Schrägeinlauf“ weist diese Variante eine hohe Sensibilität und deutlich geringere Streubreite in den Ergebnissen auf.



**Abb. 3-13:** Exzentrizitätsänderung bei versetztem Einlauf in Abhängigkeit vom Versatz („Verschiebung“)

Eine Verschiebung der Lage des neuen Maximums über den Umfang konnte beim Ziehen mit versetzter Matrize nicht festgestellt werden. Die Wanddickenminima beziehungsweise – maxima lagen stets an - im Rahmen der Messgenauigkeit – an gleicher Stelle wie vor dem Zug! Beim Ziehen mit Versatz wird das Rohr auf einer verhältnismäßig kurzen Strecke plastisch beansprucht, während es beim Verfahren „Ziehen mit Schrägeinlauf“ relativ frei geführt wird und sich die Momentenausbildung über einen größeren Bereich erstrecken kann. Die in diesem Zusammenhang ermittelten Abhängigkeiten sind von fundamentaler Bedeutung für die weiteren Untersuchungen mit dem Ziel der In-Line Beeinflussung der Exzentrizität. Die Versuchsergebnisse qualifizieren dieses Verfahren besonders für weiter gehende Versuche zur Herstellung von Präzisionsrohren.

### 3.4 Untersuchung der Mikrostruktur

Auf Grund der lokal unterschiedlichen Umformungen sind bei den Untersuchungen auch Analysen der Metallographie und Messungen der Mikrohärtigkeit gefordert. Dazu wurden die Härtewerte an unter unterschiedlichen Bedingungen gezogenen Rohren ermittelt. Von Rohren mit Kippwinkeln zwischen  $0^\circ$  und  $5^\circ$  wurde für Härteuntersuchungen über die Rohrwanddicke Schliffe angefertigt. Die Härteverläufe wurden im Minimum und Maximum der Wanddicke von innen nach außen aufgenommen.

Abb. 3-14 bis 3-17: Härteverlauf über die Rohrwand im Minimum und Maximum der Wandstärke

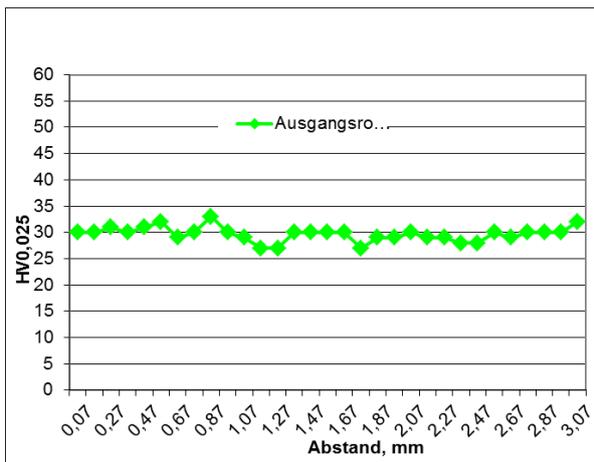


Abb. 3-14: Ausgangsrohr

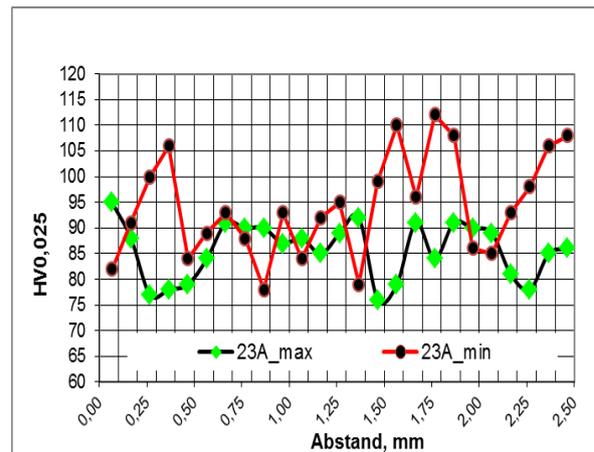


Abb. 3-15: 1 Zug, Kippwinkel +5°

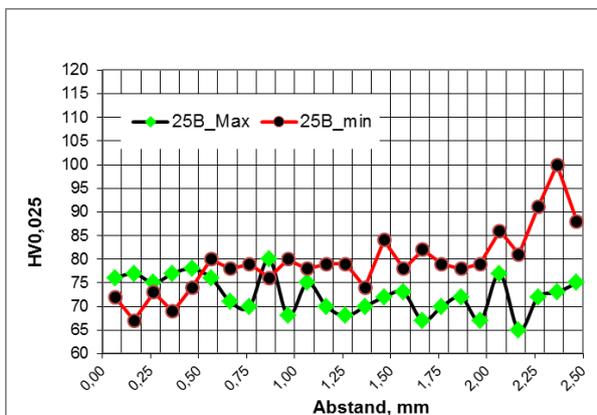


Abb. 3-16: 1 Zug, Kippwinkel +1°

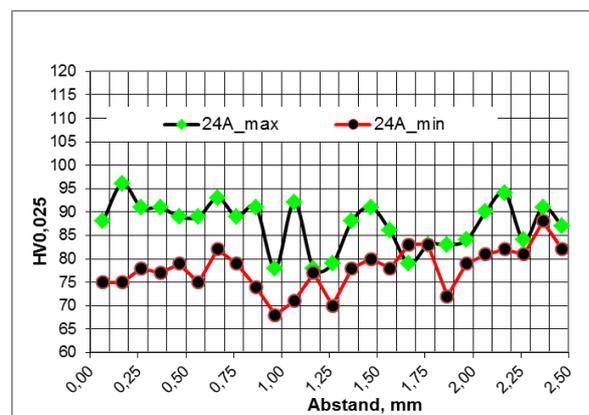


Abb. 3-17: 1 Zug, Kippwinkel 0°

Die Ergebnisse der Härteverläufe spiegeln die unter 3.3.1.2 dargestellten Ergebnisse der lokalen Umformgrade wider. So liegt die durchschnittliche Härte der Proben bei den mit größerem Kippwinkel gezogenen Rohren im Niveau um ca. 20 HV 0,025 hö-

her, resultierend aus den höheren lokalen Umformgraden. Eine Unterscheidung der lokalen Umformung zwischen Minimum und Maximum der jeweiligen verschiedenen gezogenen Rohre kann allerdings mit Blick auf die Unterschiede der Kurven und der Messungengenauigkeit nicht getroffen werden. Vergleicht man Abb. 3-11 mit dem Härteverlauf in Abb. 3-17, so spiegelt das höhere Niveau der Härtekurve für das Maximum die stärkere Umformung an dieser Stelle wider. Für das unter einem Kippwinkel von 5° gezogene Rohr lässt sich diese Abhängigkeit in der Deutlichkeit jedoch nicht aufzeigen. Hier zeigen sich im Mittel stärkere Schwankungen.

Metallografisch zeigen sich an den gezogenen Rohren erwartungsgemäß keine Unterschiede über den Umfang. Im Vergleich zum Anlieferungszustand (weichgeglüht, Abb. 3-18) ist für das gezogene Rohr (Abb. 3-19, nach dem ersten Zug) die übliche leichte Streckung des Gefüges im Längsschliff gegenüber dem Anlieferungszustand erkennbar. Die Ätzung erfolgte in wässriger Lösung aus Diammoniumtetrachlorcuprat (II) und Ammoniak.

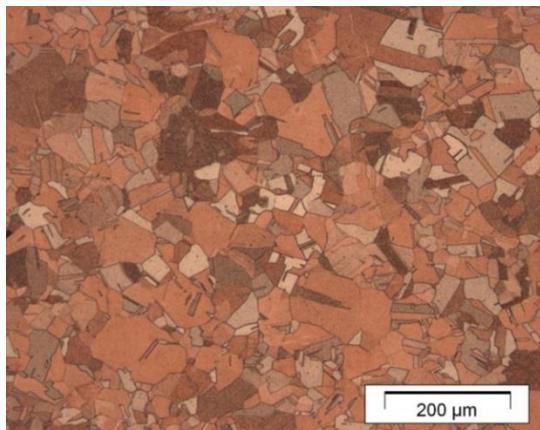


Abb. 3-18: Anlieferungszustand

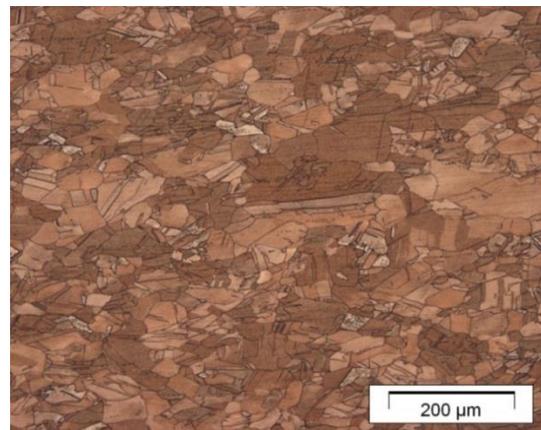


Abb. 3-19: Gezogenes Rohr

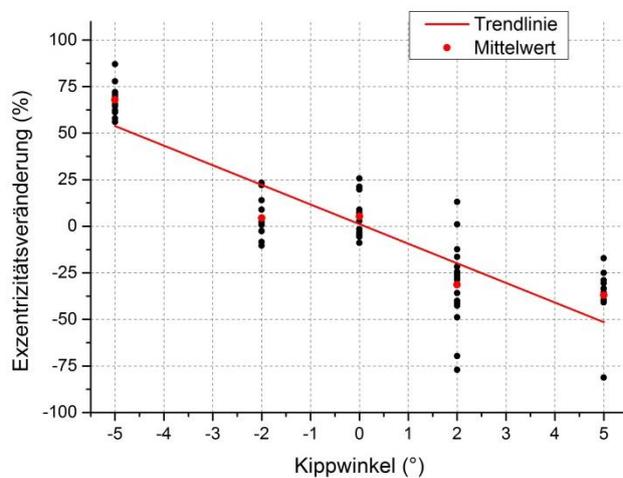
### 3.5 Untersuchung der Exzentrizität in Messingrohren

Um die Ergebnisse der Experimente mit gekippter Matrize, die mit Kupferrohren durchgeführt wurden, zu validieren und auf ihre Übertragbarkeit hin zu überprüfen, wurden in der vorliegenden Untersuchung als Werkstoff Ms 64 mit geänderten Ausgangs- und Endabmessungen verwendet. Die Ausgangsabmessung betrug 50 mm Außendurchmesser bei einer Wandstärke von 4 mm und einer Stücklänge von 750 mm. Die Untersuchungen wurden zunächst mit einer gekippten Matrize unter Variation des Kippwinkels durchgeführt. Die verwendeten Zugfolgen und Werkzeuge sind in Tabelle 3-5 zusammengefasst. Der Aufbau war der gleiche wie in den Untersuchungen der Kupferrohre. Da dort die besten Ergebnisse unter einem Kippwinkel von -5° erreicht wurden und um eine Tendenz aufzeigen zu können, wurden in den hier vorgestellten Untersuchungen Kippwinkel von 0°, ±2° und ±5° gewählt.

Tabelle 3-5: Zugfolge und Werkzeuge für die Messingrohre

Einlaufmaß [mm]	Arbeits- matrize [mm]	Arbeits- winkel [°]	Dorndurch- messer [mm]	Wanddicken- Formänderung $\varphi_s$	Durchmesser- Formänderung $\varphi_{dm}$	Gesamt Q-Wert -	Endmaß, $\varnothing$ x Dicke [mm]
50 x 4	45,17	12	38,17	0,14	0,10	1,4	45,17 x 3,5

Die relative Exzentrizitätsveränderung für verschiedene Messingrohre bei unterschiedlichen Kippwinkeln ist in Abb. 3-20 dargestellt. Wie bereits bei den Kupferrohren bedeuten positive Werte eine Verbesserung der Exzentrizität, negative eine Verschlechterung.



**Abb. 3-20:** Exzentrizitätsveränderung bei Schrägeinlauf, MS 64

Es zeigt sich hier der gleiche Trend wie bei den Kupferrohren: Bei einem Kippwinkel von  $-5^\circ$  steigt die Exzentrizität um durchschnittlich 67,9 %, was eine deutliche Abnahme bedeutet. Im Gegensatz dazu steigt die Exzentrizität bei einem Winkel von  $+5^\circ$  um durchschnittlich 37 %. Mit anderen Worten, wenn der aufgedickte Teil (Maximum) des Rohres in Richtung des Kippwinkels befindet (positive Aufbau), so ist eine Dickenzunahme im Bereich des Maximums (Verschlechterung der Exzentrizität) zu erwarten. Befindet sich dagegen bei gleichem Kippwinkel das Minimum in dieser Position, verhält es sich umgekehrt.

Ausgehend von diesen Ergebnissen ist festzustellen, dass eine Abnahme der Exzentrizität sich am besten unter einem Kippwinkel von  $-5^\circ$  erreichen lässt. Diese Grenze war gegeben bei SF-Cu-Rohren. Höhere Werte führten zu einem Rohrabriss. Inwieweit hier eine Werkstoffabhängigkeit gegeben ist, müssen weitere Versuche zeigen.

Wird eine Zunahme der Exzentrizität gewünscht, so sind positive Kippwinkel zu wählen. Um diesen Trend zu beschreiben lässt sich der Zusammenhang

$$E = 0,012 - 0,105 \times \theta$$

aufstellen, wobei E die Exzentrizität in % und  $\theta$  den Kippwinkel in Grad darstellen. Ein Vergleich dieser Formel mit dem bei den Kupferrohren gewonnenen Zusammenhang zeigt, dass die Steigung der beiden Geraden für Messing und Kupfer im Rahmen des hier durchgeführten Untersuchungsprogramms die gleiche ist. Ob der Einfluss des Kippwinkels unabhängig von der Auswahl der Materialien und Zugfolgen ist, muss in der zweiten Phase (neu zu beantragendes Projekt) ermittelt werden.

## 3.6 Eigenspannungsmessungen

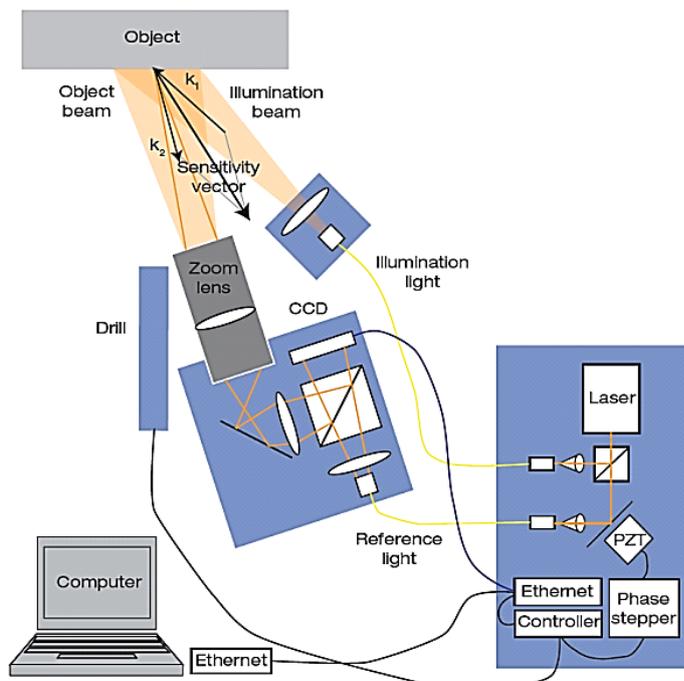
### 3.6.1 Eigenspannungsmessungen mittels der Bohrlochmethode

#### 3.6.1.1 Messmethodik

Auf Grund der eingeschränkten Verfügbarkeit der Messplätze an Neutronenanlagen und der hohen Kosten wurden für die Statistik und zur Verifizierung der Simulation zerstörende Eigenspannungsuntersuchungen im oberflächennahen Bereich (Außenschale der Rohre) am Institut mit dem dafür angeschafften Messgerät der Fa. Stress-tech durchgeführt. Die Untersuchungen am ILL dienten der Validierung des FEM-Programms (Abaqus) zur Simulation der Eigenspannungsausbildung in gezogenen Rohren.

Das Prinzip der verwandten Bohrlochmethode ist schematisch in Abb. 3-21 dargestellt. Die angewandte Methode ermöglicht eine schnelle Messung der Eigenspannungen. Wie bei konventioneller Messung mit DMS findet eine Betrachtung der Oberflächenverschiebung in der Lochumgebung statt. Die zeitraubende Applikation von DMS-Rosetten entfällt. Die Veränderung auf der Oberfläche wird mittels Speckle-Interferometrie detektiert, was nur wenig bis keine Probenvorbereitung erfordert. Bei der Bohrlochmethode wird in mehreren Schritten ein Sackloch in die zu untersuchende Stelle gebohrt. Das umgebende Material stellt sich spontan auf ein neues Eigenspannungsgleichgewicht ein. Dies führt zu einer geringfügigen Oberflächenverschiebung. Die Bohrlochmethode wird als semi-zerstörungsfrei bezeichnet, da das gebohrte Loch die Probe nur minimal beeinflusst.

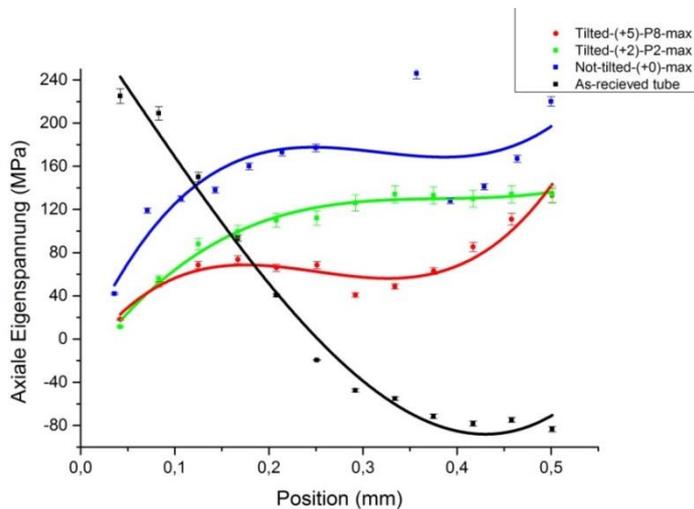
Die maximale Bohrtiefe beträgt ca. 80% des Bohrerdurchmessers. Bei dem verwendeten Bohrerdurchmesser von 0,8mm ließen sich Eigenspannungen bis in einer Tiefe von ca. 0,6 mm analysieren. Größere Bohrerdurchmesser lassen größere Bohrtiefen zu, jedoch reduziert sich die Empfindlichkeit.



**Abb. 3-21:** Prinzip der Bohrlochmethode mit der Speckle-Interferometrie

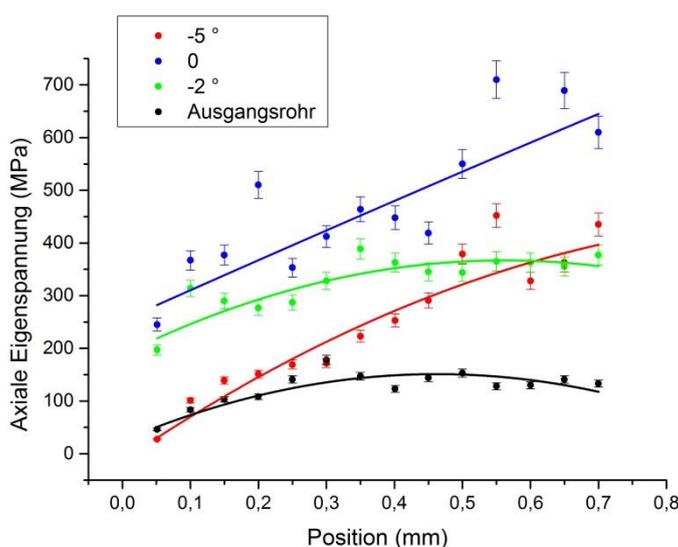
Die Eigenspannungen in den Ausgangsrohren wurden ebenfalls ermittelt und den Ergebnissen der Messungen nach dem Ziehen gegenübergestellt. Wie Abb. 3-22 zeigt, sind Zugspannungen auf der Oberfläche der Ausgangsrohre vorhanden, die

sich in Richtung Rohrwand rasch in Druckspannungen ändern. Zusätzlich sind in Abb. 3-22 die charakteristischen Verläufe der axialen Eigenspannungen für Rohre unterschiedlicher Kippung nach dem ersten Zug im Bereich des Wanddickenmaximums dargestellt. Mit zunehmendem Kippwinkel wird das Eigenspannungsprofil tendenziell abgesenkt. Dieser wünschenswerte Effekt ist auch bei gekippter Matrize zu erkennen.



**Abb. 3-22:** Axiale Eigenspannungen für die Ausgangs- und gezogenen Rohre (1.Zug) im Rohrwandmaximum, SF-Cu-Rohre.

Wie schon aus Voruntersuchungen bekannt, bildet sich auf der Rohraußenseite oberflächennah ein Zugeigenspannungszustand bei der Rohrfertigung ohne Kippung aus (s. Vorprojekt), der sich bei Einsatz der Kippung in Richtung Druckbereich verschiebt, sowohl im Bereich des Wanddickenminimums als auch des Maximums. Berücksichtigt man die herstellerseitigen und sich aus theoretischen Überlegungen ergebenden Toleranzbereiche von ca. 10 %, so lässt sich kein signifikanter Unterschied zwischen den untersuchten Rohrwanddicken (Min und Max) feststellen. Generell müssen die Ergebnisse dieser Messungen daher eher tendenziell denn quantitativ betrachtet werden. Hinzu kommt, dass die gekrümmte Form der Oberfläche zu Fehlern in der Messung führen kann.



**Abb. 3-23:** Axiale Eigenspannungen für die Ausgangs- und gezogenen Ms 64-Rohre im Rohrwandmaximum.

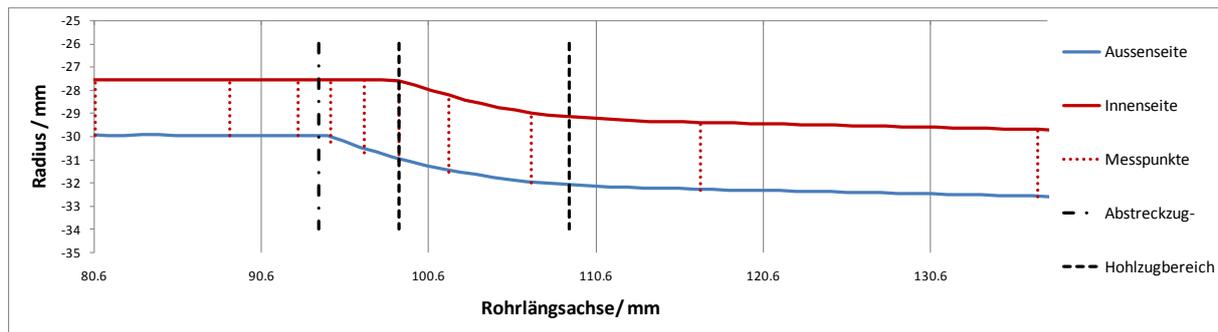
Die axialen Eigenspannungen wurden mit der Bohrlochmethode für Rohre im Anlieferungs- und gezogenen Zustand (Kippwinkel 0 °, -2 °, -5 °) auch für Ms 64-Rohre bestimmt. Die Ergebnisse sind beispielhaft in Abb. 3-23 dargestellt. Auch hier zeigen

sich Zugeigenspannungen auf den Rohraußenflächen im Anlieferungszustand, jedoch ist der Abfall in den Druckspannungsbereich wie bei den SF-Cu-Rohren nicht erkennbar. Nach dem ersten Zug reduziert sich die Zugspannung auf der Oberfläche mit zunehmendem negativen Kippwinkel. Diese Niveauverschiebung setzt sich in die Rohrwand fort. Die Ergebnisse für positive Kippwinkel zeigen dieselbe Tendenz bei gleichem Niveau.

## 3.6.2 Eigenspannungsmessungen mit Neutronenstrahlen

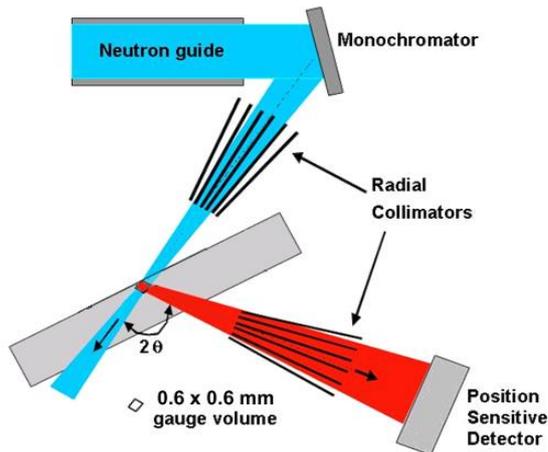
### 3.6.2.1 Grundlagen

Ziel der Eigenspannungsbestimmung mit Neutronen war es, das Spannungsprofil in der Umformzone beim Gleitziehen zu bestimmen. Zu diesem Zweck wurde ein „Stecker“ hergestellt. Das bedeutet, der Zugvorgang wurde abgebrochen und das Rohr aus dem Werkzeug entnommen. Für die Neutronenmessungen wurde ein 170 mm langes Stück präpariert und das Dickenprofil mit Hilfe einer 3D-Koordinatenmessmaschine (Mitutoyo EURO 776, im Materials Science Support Laboratory (MSSL) des ILL) ausgemessen. Dies dient dazu die um die präzise Positionierung auf dem Spannungsdiffraktometer zu ermöglichen, sowie die Lage der Messpunkte zu definieren und die Scans vorzubereiten (Abb. 3.24). Dazu ist es unter anderem wichtig, die Wandstärken zu kennen. Diese wurden zu 2,87 mm am unverformten Teil des Rohres und 2,4 mm am verformten Teil bestimmt. Der Winkel zwischen Ausgangsrohr und gezogenem Rohr beträgt 0,9°.



**Abb. 3-24:** Dickenprofil des Rohres und Position der Scans (schwarze Streifen) für Neutronenmessungen. Rechts: Ausgangsrohr.

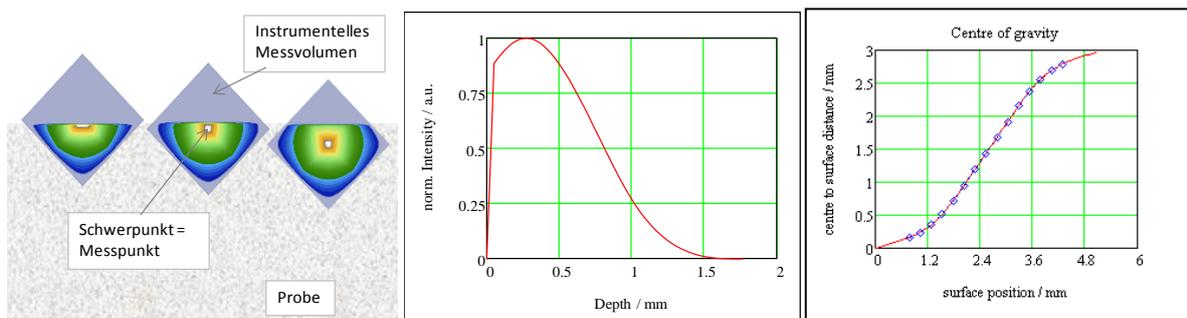
Die Neutronenmessungen wurden am Spannungsdiffraktometer SALSA (Stress Analyzer for Large Scale Applications) am Hochfluss Forschungsreaktor des Instituts Max von Laue – Paul Langevin (ILL) in Grenoble, Frankreich, durchgeführt. Abb. 3-25 zeigt schematisch den Aufbau des Instrumentes und das Zustandekommen des Messvolumens. Das Instrument befindet sich an einem Neutronenleiter und verwendet einen monochromatischen Neutronenstrahl, erzeugt durch einen doppelfokussierenden Monochromator. Zur präzisen Definition des Messvolumens werden Radialkollimatoren eingesetzt. Sie definieren ein Messvolumen (Bezeichnung: Instrumentmessvolumen) von  $0,6 \times 0,6 \times 2 \text{ mm}^3$  (Halbwertsbreite).



**Abb. 3-25:** Schematischer Aufbau des Neutronen-Spannungsdiffraktometers SALSA

Das Prinzip der Eigenspannungsbestimmung mittels Neutronen ist identisch mit dem des Röntgenverfahrens. Jedoch können größere Eindringtiefen erreicht werden (mehrere Zentimeter verglichen mit 1/100 mm) oder die Messgeometrie unterscheidet sich, wie im Falle von hochenergetischer Synchrotronstrahlung. Mit Hilfe von Neutronenbeugung wird der mittlere Netzebenenabstand der Kristallite innerhalb des Messvolumens bestimmt und in Relation zu einem Referenzwert gesetzt. Daraus ergeben sich Dehnungswerte, aus denen unter Anwendung des Hooke'schen Gesetzes Spannungen berechnet werden.

Eine Besonderheit der Methode soll hier erwähnt werden, da sie für die hier durchgeführten Messungen angewandt wurde. Es ist möglich, an Oberflächen oder Grenzflächen mit höherer lateraler Auflösung zu messen als es das Instrumentmessvolumen standardmäßig zulässt, indem man das Messvolumen nur partiell in die Probe eindringen lässt. Der Teil des Instrumentmessvolumens, der sich innerhalb der Probe befindet wird „abgetastetes Messvolumen“ genannt. Abb. 3-26 demonstriert die Vorgehensweise bei dieser Art Eindringenscan.



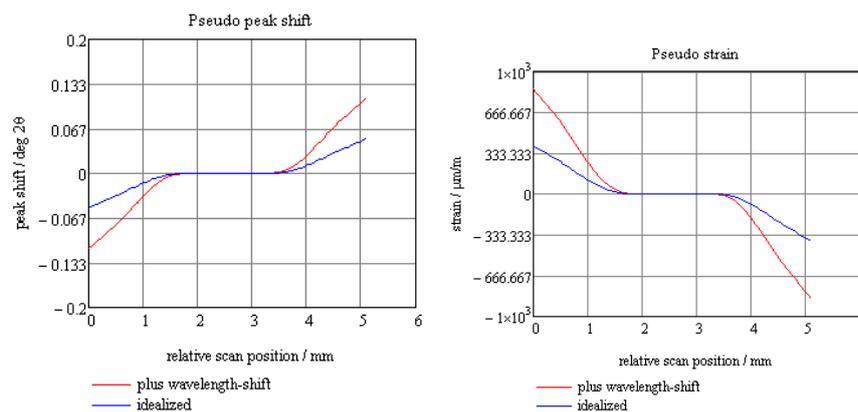
**Abb. 3-26:** Eindringenscan durch Probenoberfläche. Links: Intensitätsverteilung im Messvolumen. Mitte: Dieselbe Intensitätsverteilung, integriert und aufgetragen über dem Abstand von der Probenoberfläche. Rechts: Die Koordinate des Schwerpunktes der Intensitätsverteilung für jede Messposition wird als Messpunkt verwendet.

Die Abbildungen zeigen die Intensitätsverteilung innerhalb des Messvolumens in dreidimensionaler farblicher Darstellung (links) und als Tiefenprofil (Mitte). Die Information über den Spannungszustand erhält man aus dem Mittelwert über das abgetastete Messvolumen, gewichtet mit der Intensität. Es ist daher sinnvoll (und gerechtfertigt), den Schwerpunkt der Intensitätsverteilung als eigentlichen Messpunkt zu verwenden. Da Primär- und Sekundärstrahl ein dreieckförmiges Intensitätsprofil aufweisen, zeigt das Tiefenprofil keinen linearen Intensitätsabfall, sondern eine Verschiebung zur Probenoberfläche hin. Dies wirkt sich günstig auf die laterale Auflö-

sung aus. Am Instrument SALSA ist es auf diese Weise möglich Messwerte schon in 40  $\mu\text{m}$  Abstand zur Probenoberfläche zu erhalten. Abb. 3-29, rechts zeigt die Position des Messpunktes (Schwerpunktes) in Abhängigkeit von der Eindringtiefe des Messvolumens. (Position 0 = das Messvolumen berührt die Oberfläche)

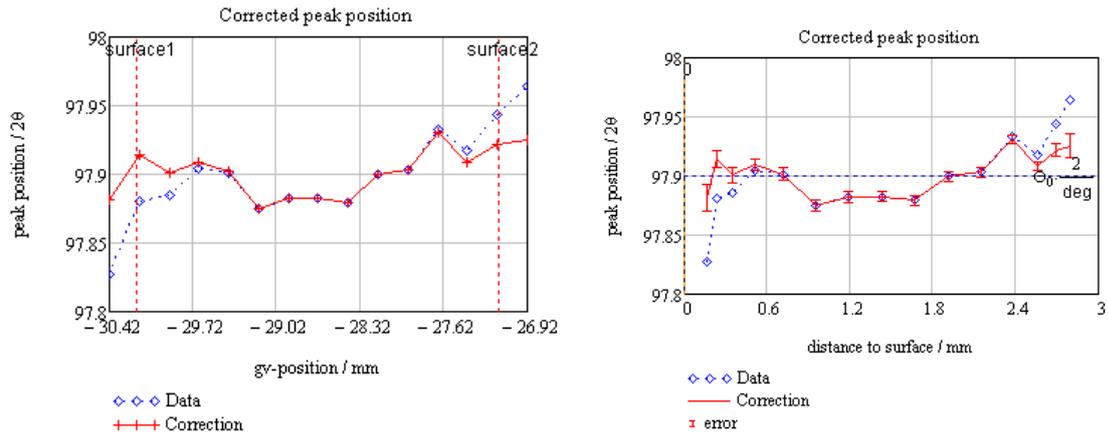
Eine Schwierigkeit dieses Verfahrens ist, dass es für diese Messpunkte zu einer messtechnisch bedingten Verschiebung der Beugungsreflexe („pseudo peak shift“) kommt. Die daraus resultierenden Dehnungswerte werden allgemein „pseudo strain“ genannt und bedürfen einer Korrektur.

Wie bereits oben beschrieben, verschiebt sich der Schwerpunkt des streuenden Volumens mit unterschiedlicher Eindringtiefe. Da die Bestimmung der Beugungswinkel auf das geometrische Zentrum des instrumentellen Messvolumens bezogen wird, kommt es zu einer Fehlinterpretation der Winkel. Dieser Fehler wird geometrischer Fehler genannt. Zusätzlich erzeugt der Monochromator einen Wellenlängengradienten im Primärstrahl. Liegt nun der Schwerpunkt des abgetasteten Volumens nicht im Zentrum des instrumentellen Messvolumens, so weicht die Wellenlänge von der mittleren Wellenlänge, auf die das Instrument kalibriert ist, ab. Dies führt zu einer zusätzlichen Verschiebung der Beugungsreflexe. Abb. 3-27 zeigt die relative Reflexverschiebung (den Messfehler), hervorgerufen durch die hier beschriebenen Effekte.



**Abb. 3-27:** Relative Reflexverschiebung (pseudo peak shift) links, und korrespondierende Dehnungswerte rechts. Die blaue Kurve zeigt den geometrischen Fehler und die rote die Summe aus geometrischem und wellenlängenabhängigem Fehler.

Für SALSA wurde ein Verfahren entwickelt, mit dem diese Fehler routinemäßig korrigiert werden. Das Instrumentmessvolumen wird dabei mit Hilfe einer Referenzprobe ausgemessen und die geometrische und wellenlängenbedingte Reflexverschiebung bestimmt. Die dabei erhaltenen Parameter werden verwendet, um mit Hilfe eines analytischen Modells der Instrumentkonfiguration die entsprechenden Korrekturen an den Messdaten vorzunehmen. Das Programm fittet dazu zunächst das Intensitätsprofil, um daraus die Koordinate des Messpunktes relativ zum Referenzpunkt des Instrumentes und des Probenkoordinatensystems zu ermitteln. Die zu korrigierende Reflexverschiebung wird berechnet und von den Messdaten subtrahiert. Gleichzeitig werden die Instrumentkoordinaten (= Motorpositionen) in Probenkoordinaten umgerechnet. Das heißt, es wird der Abstand der Messpunkte von der Oberfläche berechnet. Abb. 3-28 zeigt als Beispiel die Korrektur der Beugungsreflexpositionen für die Tangentialkomponente an Scanposition 102 mm.



**Abb. 3-28:** Korrektur der Beugungsreflexpositionen nahe der Oberflächen. Links: aufgetragen über Messkoordinaten. Rechts: aufgetragen über Probenkoordinaten. „0“ ist die Lage der äußeren Oberfläche.

### 3.6.2.2 Ergebnisse der Eigenspannungsbestimmung mit Neutronen

Messungen (Scans) wurden an 10 Messpositionen (Abb. 3-22) entlang des Rohres über den Umformungsbereich durchgeführt. Dabei wurden jeweils Scans mit einer Schrittweite von 0,25 mm von der Außen- zur Innenseite der Rohrwand durchgeführt. Das Messvolumen hatte eine Querschnittsfläche von  $0,64 \times 0,9 \text{ mm}^2$  (gemessen) in der Streuebene. Dies entspricht einer lateralen Auflösung von 1,02 mm. Die Auswertung der Beugungsreflexe und die Korrektur der oberflächennahen Messwerte geschah mit der oben beschriebenen Methode. Die jeweils oberflächennächsten Punkte liegen bei einer Tiefe von 200 bis 250  $\mu\text{m}$ .

Zur Eigenspannungsbestimmung werden Messungen in drei Hauptachsenrichtungen benötigt: radial, tangential und axial. Daher wurden die Scans dreimal in der entsprechenden Orientierung der Probe durchgeführt. Dies bedeutet, das Rohr wurde jeweils mit seiner axialen, radialen und tangentialen Achse in Richtung des Streuvektors orientiert.

Die Dehnungswerte  $\varepsilon$  lassen sich direkt aus den Positionen der Beugungsreflexe  $\theta$  bestimmen. Dies folgt aus der Bragg-Gleichung:  $n\lambda = 2d \sin \theta$  (mit  $\lambda$ =Wellenlänge,  $d$ =Netzebenenabstand), eingesetzt in die Definition für die Dehnung  $\varepsilon$ :

$$\varepsilon = \frac{d-d_0}{d_0}$$

$$\varepsilon = \frac{\sin \theta_0}{\sin \theta} - 1$$

wobei  $d_0$  und  $\theta_0$  der Referenzwert einer spannungsfreien Probe ist. Darauf wird das Hooke'sche Gesetz angewandt:

$$\sigma_x = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} [(1-\nu)\varepsilon_x + \nu(\varepsilon_y + \varepsilon_z)]$$

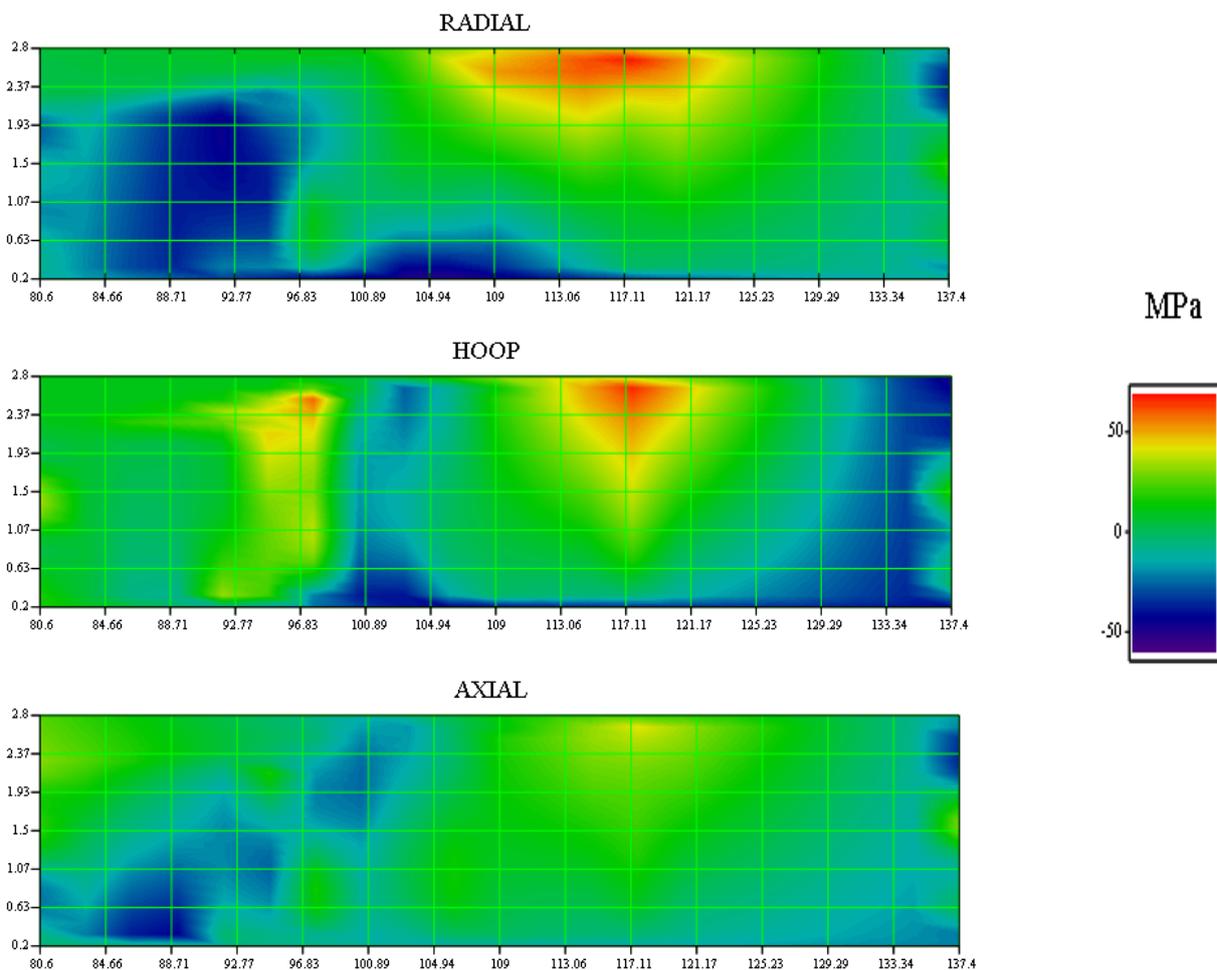
$$\sigma_y = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} [(1-\nu)\varepsilon_y + \nu(\varepsilon_x + \varepsilon_z)]$$

$$\sigma_z = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} [(1-\nu)\varepsilon_z + \nu(\varepsilon_x + \varepsilon_y)]$$

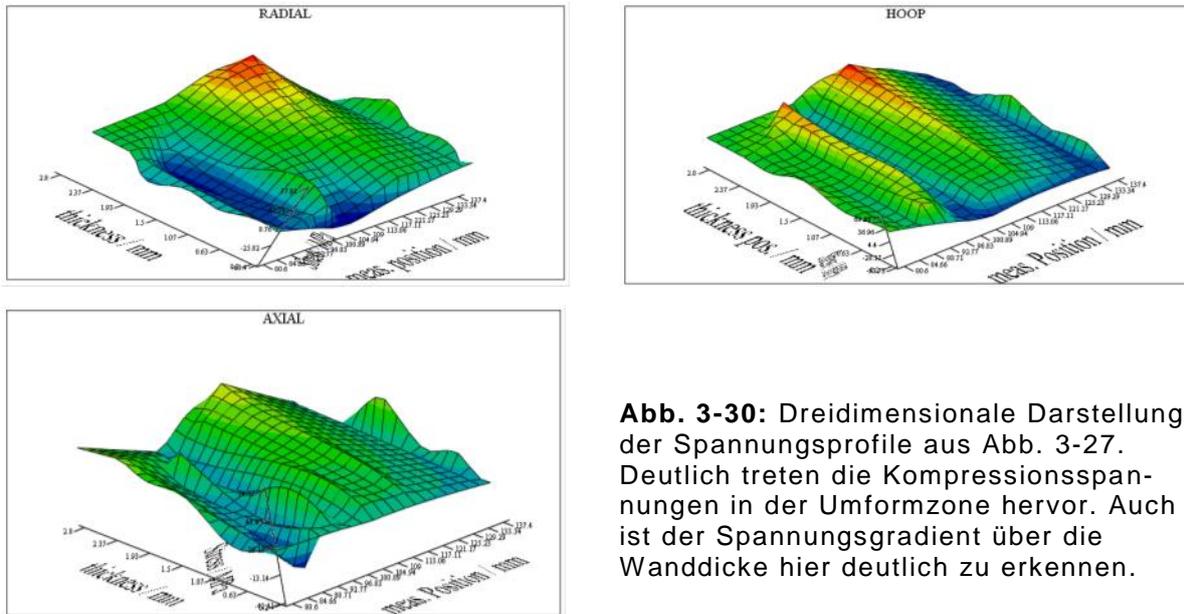
mit Elastizitätsmodul  $E$ , Querkontraktionszahl  $\nu$  und den Dehnungswerten  $\varepsilon$  sowie Spannungen  $\sigma$  in den Probenrichtungen  $x, y$  und  $z$  (entsprechend radial, tangential und axial)

Die verwendeten elastischen Konstanten waren  $E=134$  GPa für den Elastizitätsmodul und  $\nu=0.34$  für die Querkontraktionszahl. Verwendet wurde der Beugungsreflex Cu(311) mit einem Netzebenenabstand von  $0,109$  nm, gemessen bei einem Beugungswinkel  $2\theta$  von  $97.878^\circ$ . An jeder der in Abb. 3-23 eingezeichneten Positionen wurde ein Dickenscan von der Außen- (Ordinatenwert „0“) zur Innenseite durchgeführt.

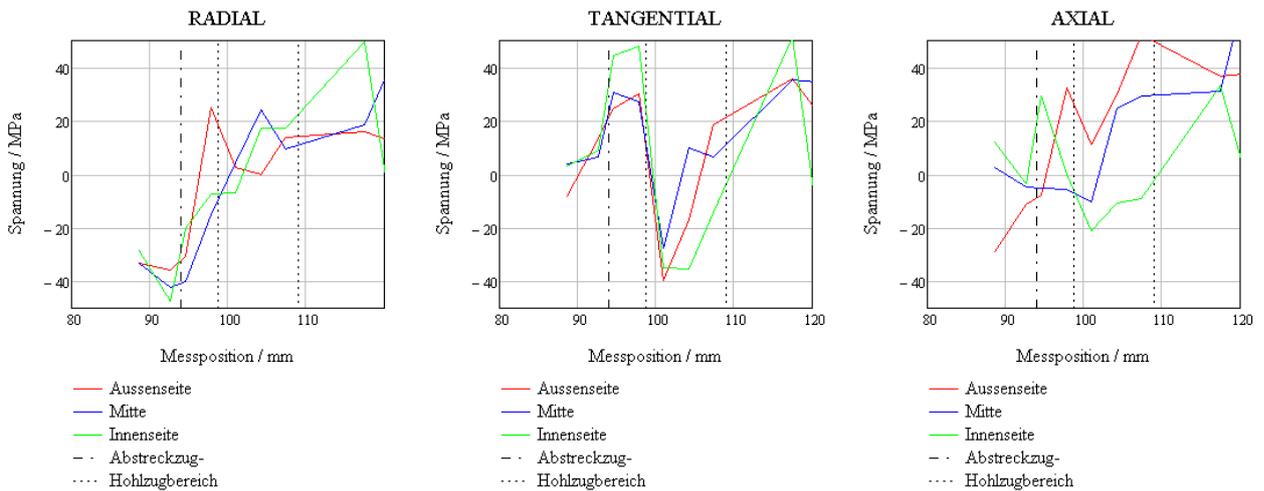
Abb. 3-29 und 3-30 zeigen die Spannungsprofile der einzelnen Komponenten als Konturdiagramme und in dreidimensionaler Darstellung. Obwohl die Spannungswerte insgesamt relativ klein sind, zwischen  $-50$  MPa und  $50$  MPa, sind im Umformbereich deutliche Minima und Maxima zu erkennen. Zur besseren, quantitativen Auswertung, sind in Abb. 3-31 Schnitte der Spannungskomponenten entlang der Rohrachse dargestellt. Während die Axialkomponente einem flachen Gradienten über die gesamte Umformungszone folgt, zeigt die Radialkomponente ein Minimum direkt hinter dem Abstreckzugbereich und die Tangentialkomponente ein Minimum im Hohlzugbereich sowie ein Maximum im Abstreckbereich.



**Abb. 3-29:** Relative Eigenspannungen über die Umformungszone. Ordinate „0“: Äußere Rohrwand. Abszisse: Position über die Umformzone.



**Abb. 3-30:** Dreidimensionale Darstellung der Spannungsprofile aus Abb. 3-27. Deutlich treten die Kompressionsspannungen in der Umformzone hervor. Auch ist der Spannungsgradient über die Wanddicke hier deutlich zu erkennen.



**Abb. 3-31:** Schnitt der Spannungsprofile der Radial-, Tangential- und Axialkomponenten entlang der Rohrachse. Der Umformbereich zwischen 94.75 und 113 mm ist eingezeichnet. Die Werte sind gemittelt über einen Bereich von jeweils ca. 0.7 mm über die Wanddicke. (Genauigkeit der Messungen besser als  $\pm 10$  MPa)

Unklar und noch nicht analysiert ist, inwieweit die Eigenspannungen im Stecker die Vorgänge beim Gleitziehen genügend genau darstellen. Denn nach Entnahme des Steckers aus dem Werkzeug ist mit einer Relaxation der Spannungen zu rechnen. Durch entsprechend lange Einlauf- und Auslaufenden wurde allerdings gewährleistet, dass es zu keiner Störung des Eigenspannungszustandes auf Grund zu kurzer Proben kam.

### 3.6.3 FE-Modell

#### 3.6.3.1 Modellbildung

Um die Vorgänge beim Gleitziehen simulativ zu beschreiben, wurde ein bestehendes Finite-Elemente Modell (FEM) (aus Projekt AiF-13939N) erweitert. Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens sollte ein FEM-Modell entwickelt werden, das die Entwicklung von Geometrie und Eigenspannungen simuliert. Als Parameter sollen die im Abschnitt 3.3.1.1 abgesteckten Verfahren und Arbeitsbereiche in das Modell eingehen wie auch zahlreiche Einflüsse auf der Basis von Körperkontakt und Deformation, welche bei der Vernetzung berücksichtigt werden müssen. Aus diesem Grunde fiel die Wahl auf das Programm Abaqus, mit dem man in der Arbeitsgruppe schon einige Modelle erfolgreich entwickelt hat.

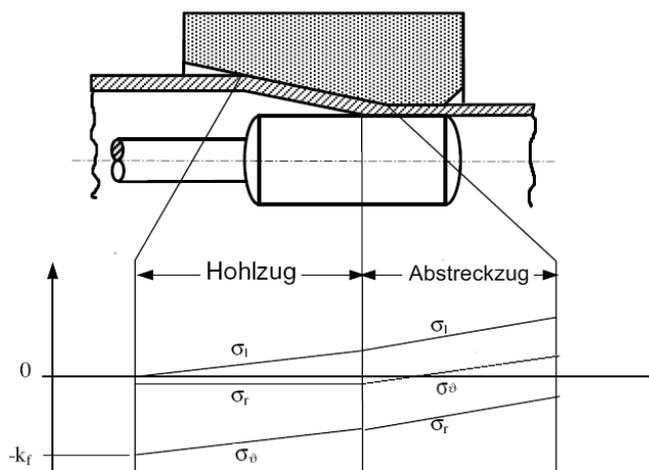
Hierbei wird das mechanische Verhalten des Materials auf der Grundlage der klassischen Plastizitätstheorie, die die von Mises-Spannungen mit dem entsprechenden plastischen Fließverhalten beschreibt, berücksichtigt. Als erster Schritt der Simulation wurde die von Mises-Fließbedingung gewählt und damit Isotropie im plastischen Verhalten angenommen. Diese ist definiert als der Wert der uniaxialen Fließbedingung als Funktion der uniaxialen plastischen Dehnung PEEQ (uniaxial equivalent plastic strain). PEEQ ist definiert als:

$$PEEQ = \bar{\varepsilon}^{pl}|_0 + \int_0^t \bar{\dot{\varepsilon}}^{pl} dt$$

wobei  $\bar{\varepsilon}^{pl}|_0$  den Anfangswert der plastischen Deformation darstellt.  $\bar{\dot{\varepsilon}}^{pl}$  ist vom Werkstoffmodell abhängig. Für metallische Werkstoffe, wie Stahl oder Kupfer, ist die Plastizität unter der von Mises-Fließbedingung gemäß folgender Gleichung definiert:

$$\bar{\dot{\varepsilon}}^{pl} = \sqrt{\frac{2}{3} \dot{\varepsilon}^{pl} : \dot{\varepsilon}^{pl}}$$

Für Umformwerkzeuge, wie die Ziehmatrize oder der Stopfen, wurde das Modell des starren Körpers gewählt (rigid body), um Rechenzeit bei geringen Einbußen in der Genauigkeit des Ergebnisses einzusparen. Die Ziehmatrize ist in all ihren Freiheitsgraden fixiert, der Stopfen (inneres Werkzeug) kann sich ausschließlich in radialer Richtung bewegen. Diese Gestaltung der Freiheitsgrade ist notwendig für die Erfassung des unbekanntes, über den Umfang inhomogenen Materialflusses in der Umformzone ohne Kontakt mit dem Innenwerkzeug (s. Abb. 3-32, Hohlzugbereich).



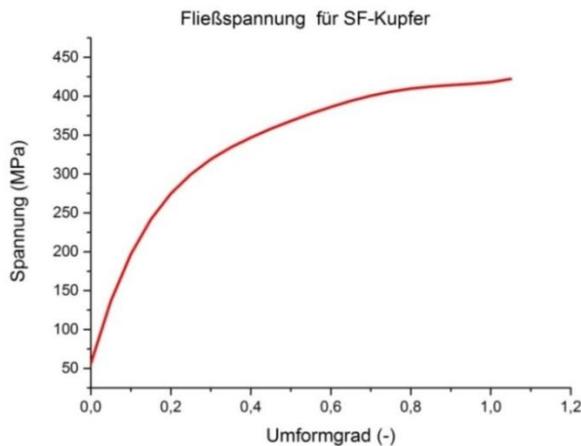
**Abb. 3-32:** Charakteristische Bereiche beim Ziehen mit Innenwerkzeug

Zur Gewährleistung eines stationären Umformprozesses (konstante Randbedingungen in der Umformzone) wurde eine Rohrlänge von 600 mm simuliert, obwohl die eigentliche Umformzone deutlich kürzer ist. Aufgrund der in erster Näherung vorliegenden spiegelsymmetrischen Wanddickenabweichung wurde die Berechnung nur mit einem halben Rohr durchgeführt. Beim Start des Rohres wurde dieses nur in Ziehrichtung bewegt und in keiner weiteren Richtung fixiert. Der expliziten Analyse ging ein impliziter Berechnungsschritt voraus. Die Vorteile des expliziten Verfahrens gegenüber dem impliziten Verfahren bei der Lösung komplizierter Kontaktprobleme liegt in der Effizienz, wie zum Beispiel Bewegungen des Stopfens oder des Rohres in radialer Richtung. Darüber hinaus, insbesondere bei großen Umformungen, benötigt das explizite Verfahren weniger Systemressourcen als das implizite.

Im experimentellen Teil wurden verschiedene geometrische Parameter in der Modellbildung durch Simulation untersucht. Nachdem Festlegung der grundlegenden Parameter war es nötig, die physikalischen und mechanischen Eigenschaften des Werkstoffes, welches bei den Untersuchungen benutzt wurde, in das Modell einzupflegen. Als Materialeigenschaften der verwendeten Kupferlegierung, die unter anderem aus dem Zugversuch gewonnen wurden, wurde ein Elastizitätsmodul von  $E = 130 \text{ GPa}$  und eine Querkontraktionszahl von  $\nu = 0,34$  angesetzt. Die ermittelte Fließkurve genügt folgender Gleichung:

$$f(\varphi) = 56.1 + 1847.8 \cdot \varphi - 5178.2 \cdot \varphi^2 + 8262.3 \cdot \varphi^3 - 6632 \cdot \varphi^4 + 2061.8 \cdot \varphi^5$$

Diese Gleichung ergibt sich aus einer Polynominterpolation von experimentellen Daten, die an dem uns zur Verfügung stehenden Werkstoff ermittelt wurde (Abb. 3-33). Weitere Eingangsdaten für die Simulation sind in Tabelle 3-6 aufgeführt. Die Werte, welche zunächst untersucht werden sollten, waren die Eigenspannungen in den drei verschiedenen Richtungen radial, axial und in Umfangsrichtung. Wanddickenabweichung, Ziehkräfte, plastische Verformungen wurden in der Folge aus den Simulationen gewonnen.



**Abb. 3-33:** Fließkurve für das verwendete SF-Kupfer

**Tabelle 3-6:** Parameter für die Simulation

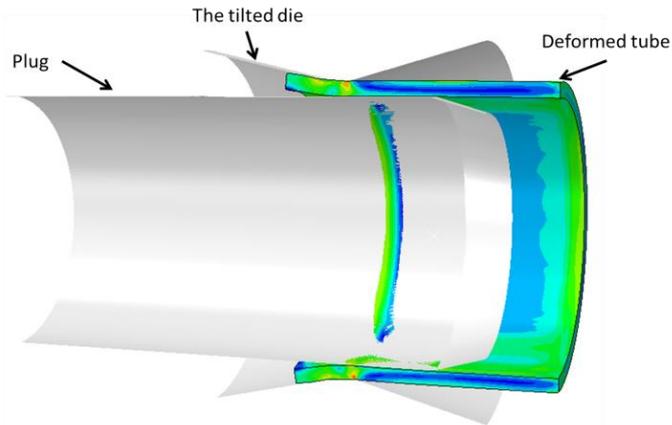
Eigenschaften Kupferrohr	Dichte	8960 kg/m <sup>3</sup>
	E-Modul	134 GPa
	Poissonzahl	0,34
	Plastischer Körper	
Werkzeuge	Starrer Körper	

### 3.6.3.2 Simulation von Eigenspannungen

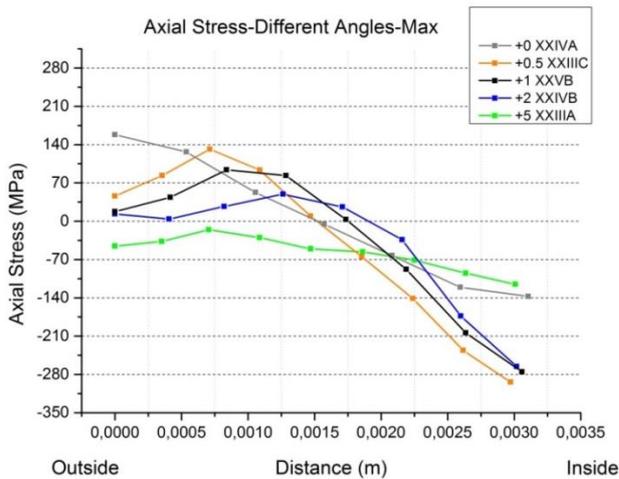
Analog zu den praktischen Versuchen unter 3.3.1.2 wurden unterschiedliche Parameter zur Beeinflussung der Rohreigenschaften im Modell simuliert.

Die Spannungssimulation für das Rohrziehen mit einem Kippwinkel ist in Abb. 3-34 dargestellt, die berechneten Eigenspannungen für gezogene Rohre mit unterschiedlichem Kippwinkel sind in Abb. 3-35 zu sehen. Wie sich in dieser Darstellung der Eigenspannungen in axialer Richtung erkennen lässt, fällt die Spannung für einen Kippwinkel von 0,5 Grad an der Stelle mit der maximalen Wandstärke um ca. 200 MPa ab. Die Eigenspannungen an der Innenseite, bei der es sich um eine Druckspannung handelt, fällt um 70 MPa ab. Bei einem Anstieg des Kippwinkels auf bis zu 2° lässt sich kein signifikanter Unterschied in den Verläufen der Eigenspannungen erkennen. Ein interessanter Effekt tritt allerdings beim Anwinkeln der Matrix um 5° auf. Wie in Abb. 3-35 zu erkennen ist, tritt hierbei an der Oberfläche statt einer Zugspannung eine Druckspannung auf die unter 50 MPa liegt, während auch die Eigenspannung im Inneren des Rohres abfällt. Es lässt sich ein Einfluss der Wandstärke für unterschiedliche Kippwinkel auf die Exzentrizität erkennen.

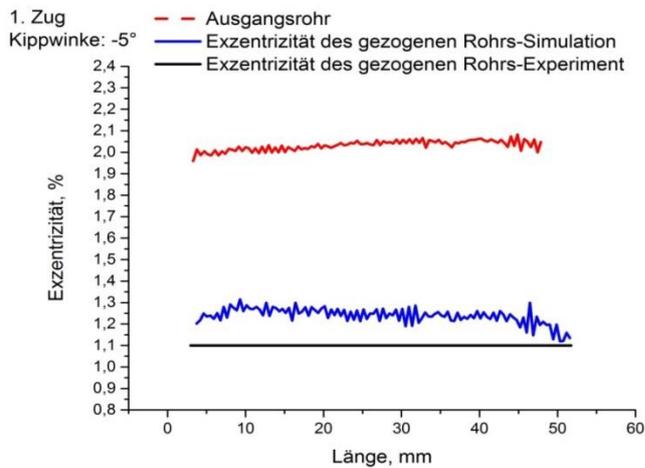
Wie aus Abb. 3-36 zu entnehmen ist, wurde die Exzentrizität des Ausgangsrohres ermittelt und diese (als Festwert) benutzt, die Exzentrizität eines unter einem Kippwinkel von -5° gezogenen Rohres zu berechnen. Parallel dazu wurde das Rohr unter diesen Randbedingungen gezogen. Gleiche Untersuchungen wurden für Rohre mit einer Kippung von +2° durchgeführt. Für diesen Fall ließ sich eine Zunahme der Exzentrizität zeigen (Abb. 3-37) Die Ergebnisse sind in guter Übereinstimmung mit Abb. 3-9.



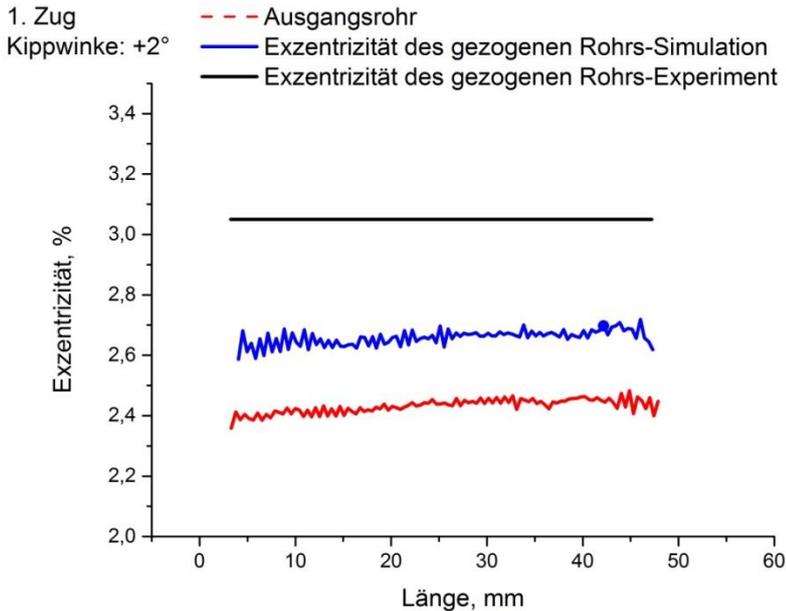
**Abb. 3-34:** Simulation der Eigenspannungen beim Rohr-zug mit Kippung



**Abb. 3-35:** FEM-Spannungskalkulation im Wanddickenmaximum über die Dicke in Abhängigkeit vom Kippwinkel



**Abb. 3-36:** Exzentrizitätsänderung bei Kippung um  $-5^\circ$  (FEM und Experiment).

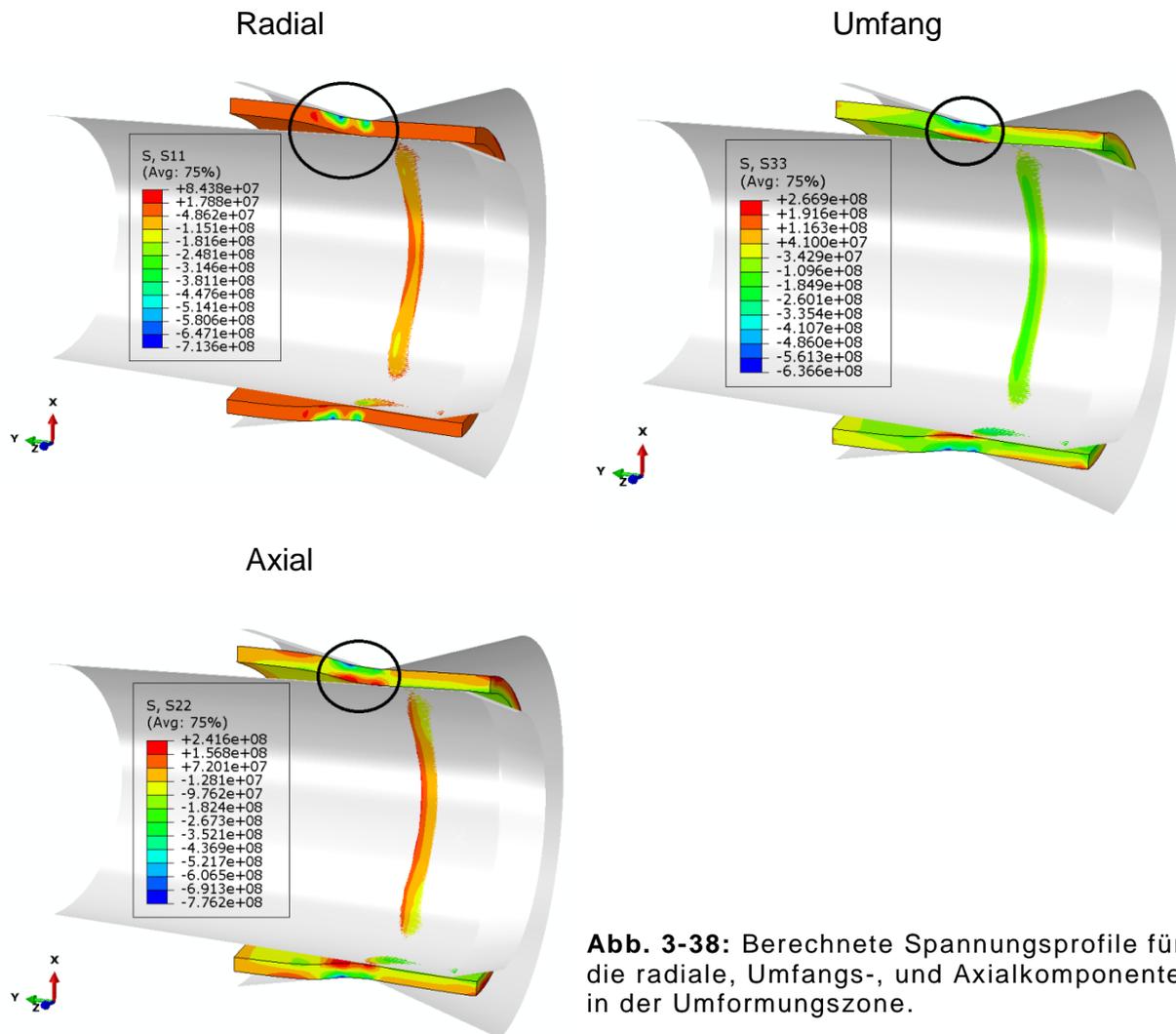


**Abb. 3-37:** Exzentrizitätsänderung bei Kippung um +2° (FEM und Experiment).

Qualitativ besteht eine sehr gute Übereinstimmung zwischen Modell und Messung, wie der Vergleich der FEM Bilder in Abb. 3-38 mit Abb. 3-29 und 3-30 zeigt. In der Umformzone herrschen an der Innenwand Zugspannungen, während die Außenwand des Rohres Druckspannungen erfährt. Dies kehrt sich im fertigen Rohr um.

Die Messungen zeigen dieselbe Tendenz (Abb. 3-30): einen Spannungsgradienten von Druck- zu Zugspannungen von der Außen- zur Innenwand innerhalb der Umformzone. Dieser Gradient wird zu Null 10 mm nach dem Abstreckzugbereich. Der umgekehrte Gradient, wie er im fertigen Rohr vorherrscht, konnte nicht beobachtet werden, da nicht weit genug vom Abstreckzugbereich entfernt gemessen wurde. Die FEM Ergebnisse decken sich aber mit unseren Ergebnissen von früheren Messungen.

Die Messungen zeigen, dass es möglich ist, mit Hilfe von Neutronenstreuung ein Abbild der Spannungszustände, die während des Gleitziehens auftreten zu erhalten. Wir haben bereits Messzeit für das Jahr 2014 am Forschungsreaktor des ILL für weitere Messungen erhalten. Es ist geplant Proben mit unterschiedlichen Kippwinkeln der Matrize herzustellen und auszumessen, um das FE-Modell weiter zu entwickeln.



**Abb. 3-38:** Berechnete Spannungsprofile für die radiale, Umfangs-, und Axialkomponente in der Umformungszone.

## 3.7 Texturuntersuchungen

### 3.7.1 Versuchsaufbau

#### 3.7.1.1 Zerstörungsfreie, orts aufgelöste Texturanalyse

Neutronen bieten gerade für die zerstörungsfreie Materialuntersuchung viele Vorteile, da ihre große Eindringtiefe verlässliche Messwerte aus dem Probeninneren liefert und auch komplexe Probengeometrien analysierbar sind. Das bedeutet, es können Messungen an Bauteilen durchgeführt werden ohne diese zu zerstören, so dass sie für weitere Untersuchungen zur Verfügung stehen können. Dies betrifft nicht nur Eigenspannungs-, sondern auch Texturanalyse.

Herkömmlicherweise wird zur Texturanalyse eine Probe auf einer Eulerwiege montiert, im Neutronenstrahl „durchflutet“ und um die Winkel  $\varphi$  und  $\chi$  gedreht, während gleichzeitig die Intensität der Bragg-Reflexe aufgezeichnet wird. Derartige Texturdiffraktometer bieten keine Ortsauflösung. Es wird also die mittlere kristallographische Textur der gesamten Probe bestimmt. Möchte man eine Texturänderung lokal verfol-

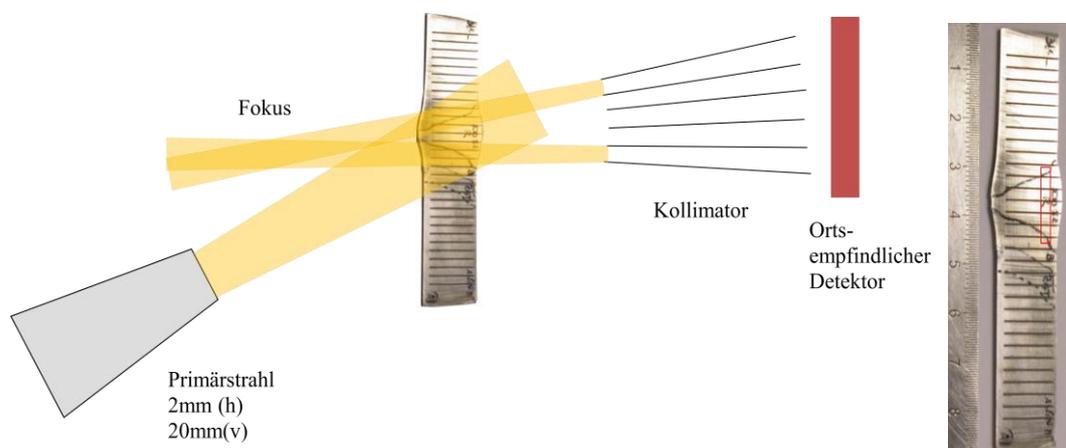
gen oder ist die Probe größer als der Neutronenstrahl (einige Millimeter), dann muss sie entsprechend präpariert (zugeschnitten) werden. Die Methode ist somit nur anzuwenden, wenn eine Zerstörung des zu untersuchenden Teils zulässig ist.

Ein zerstörungsfreies Verfahren bei Nutzung von Neutronen bietet die Möglichkeit, Proben im Urzustand wie auch in Zwischenstufen der Fertigung zu messen, z.B. vor und nach einer Umformung, Wärmebehandlung oder auch im Rahmen ihres betrieblichen Einsatzes, so dass die Entwicklung eines Eigenspannungs- oder auch Texturzustandes analysiert werden kann.

Zerstörungsfreie Methoden der Texturmessung sind für unsere Untersuchungen besonders deshalb von Interesse, weil wir zur Modellierung der spezifischen Eigenschaften die Entwicklung der Messgröße in einzelnen Produktionsschritten verfolgen wollen. Daher haben wir die Zusammenarbeit mit dem ILL gesucht, das durch Modifikation des monochromatischen Spannungsdiffraktometers SALSA ein Instrument zur Verfügung stellt, das eine zerstörungsfreie Texturanalyse ermöglicht.

### Texture imaging

Messungen zur Texturanalyse sind zeitaufwändig und damit kostenintensiv, da ein großer Winkelbereich in zwei Richtungen abgedeckt werden muss. Zusätzlicher Zeitaufwand wird durch die Ermittlung lokaler Eigenschaften verursacht. Ein Lösungsansatz zur Reduzierung des zeitlichen Aufwands ist es, einen Radialkollimator defokussiert einzusetzen (Abb. 3-39). Normalerweise wird mit Hilfe von drei Kollimatoren das Messvolumen, typischerweise 1 bis 20 mm<sup>3</sup>, definiert. Platziert man nun die Probe zwischen Fokus und Kollimator (defokussiert), so bildet jeder Kollimatorkanal einen anderen Bereich der Probe auf dem Detektor ab.



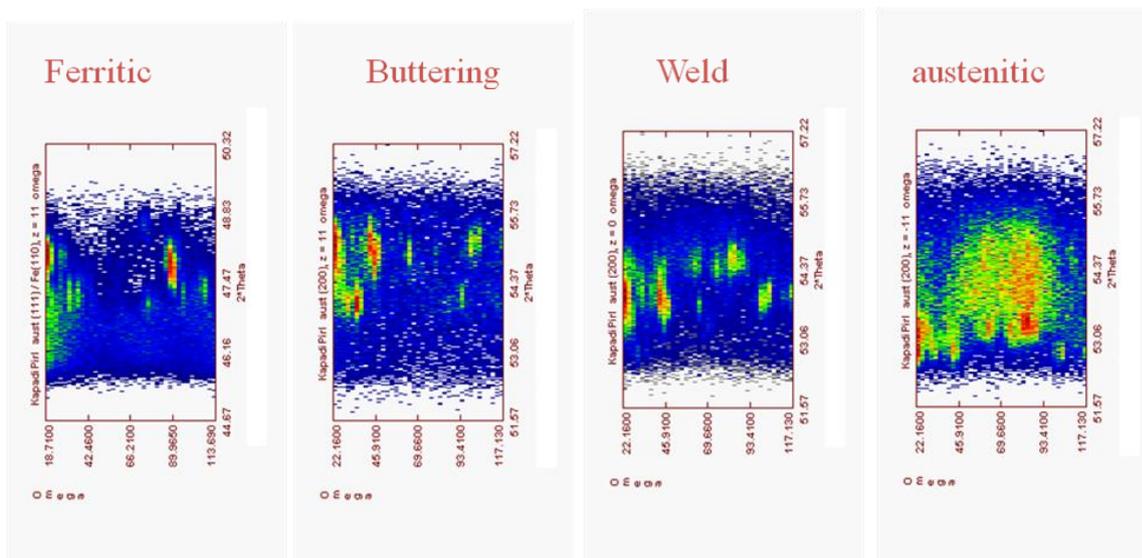
**Abb. 3-39:** Versuchsanordnung. Die Probe befindet sich zwischen Fokus und Sekundärkollimator, sodass die Kollimatorkanäle verschiedene vertikale Bereiche gleichzeitig auf den ortsempfindlichen Detektor abbilden. Horizontal wird der Streuwinkel abgebildet. **Rechts:** Abmessungen der Probe. Die Umriss der Schweißnaht, sowie die Größe des Messbereichs (rot), sind eingezeichnet. Die unteren Linien kennzeichnen Pufferzone - Wärmeeinflusszone.

Für erste Tests wurde ein 2 mm dickes Blech mit Schweißnaht verwendet, das die Messung vereinfacht, da die Messvolumina durch zwei Kollimatoren und die Probenstärke bereits definiert sind. Zu berücksichtigen sind bei entsprechendem Temperaturregime Rekristallisierungsvorgänge und Kornwachstum. Diesen Größen ist daher in

Hinblick auf die Textureffekte, die die Bestimmung von Eigenspannungen verfälschen können, besondere Aufmerksamkeit zu widmen.

Die Schweißnaht verbindet einen austenitischen mit einem ferritischen Stahl und beinhaltet eine Pufferzone (buttering). Abb. 3-40 zeigt Intensitätsprofile der austenitischen Phase, der Schweißnaht, der Pufferzone und den Übergang zur ferritischen Phase. Die vertikale Achse umfasst jeweils 12 mm. Die Messungen wurden mit Überlappung sowie an verschiedenen Beugungsreflexen durchgeführt. Dazu wurde die Probe um die vertikale Achse ( $\omega$ ) gedreht und die Beugungsreflexe aufgezeichnet. Die Intensitäten von den verschiedenen Kollimatorkanälen wurden aufsummiert und dann in Abhängigkeit von  $\omega$  aufgetragen.

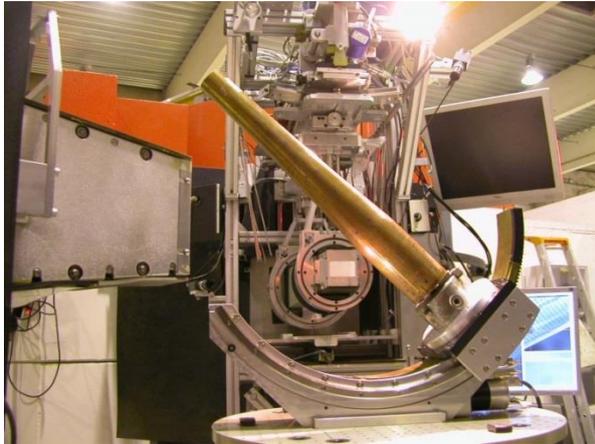
Die Messzeiten betragen 2 min pro  $\omega$ -Winkel, die Schrittweite  $2,5^\circ$ , damit ergeben sich 38 Einzelmessungen pro Scan für  $95^\circ$  bei einer Gesamtmesszeit von 1h15min. Damit lässt sich in relativ kurzer Zeit die kristalline Orientierung in einer Probe bestimmen. Dies ist eine wichtige Information zur Vorbereitung von Messungen zur Bestimmung von Eigenspannungen, da starke kristalline Texturen die Ergebnisse verfälschen kann, bzw. vor der Messung Vorkehrungen getroffen werden müssen (Auswahl der Probenorientierung, Mittelung über einen weiten  $\omega$ -Bereich), um einen korrekten, repräsentativen Wert für den makroskopischen Spannungszustand zu erhalten.



**Abb. 3-40:** Intensitätsprofile in Abhängigkeit vom Probenwinkel  $\omega$ . Vertikal: Ortsaufgelöstes Intensitätssignal. Der Bereich umfasst 15mm. Im austenitischen Material ist die (aufsummierte) Intensitätsverteilung recht homogen, während in der Schweißnaht, bis in die Ferritzone hinein deutlich getrennte Intensitätsmaxima auftreten. Dies deutet auf Kornwachstum rekristallisierter Kristalle hin.

Der oben beschriebene Aufbau eignet sich nur bedingt für eine vollständige Texturanalyse, da sich bei der Rotation der Probe um die Winkel  $\varphi$  und  $\chi$  die Position der Messvolumina ständig ändern. Dies ist jedoch nicht immer erforderlich. So reicht häufig die Texturbestimmung an ausgewählten Punkten. Hierfür eignet sich der vorgestellte Aufbau mit Radialkollimatoren hervorragend. Abb. 3-41 zeigt ihn mit zwei Primärkollimatoren (hinten im Bild, Bildmitte) und einem detektorseitig angeordneten Sekundärkollimator (links). Sie definieren ein Messvolumen von nur  $2 \times 2 \times 2 \text{ mm}^3$ . Die Probe ist auf einem Goniometer zur Einstellung des Winkels  $\chi$  montiert. Der Abstand zwischen Probe und Kollimatoren beträgt primärseitig 380 mm und 410 mm

sekundärseitig. Dies lässt genügend Raum zur Probenrotation bei gleichzeitiger Gewährleistung eines konstanten Messvolumens.



**Abb. 3-41:** Gepilgter Rohrstecker auf dem Goniometer zur zerstörungsfreien Texturanalyse. Vordergrund links: Sekundärkollimator, detektorseitig. Die zwei Kollimatoren in Serie zur Definition des Primärstrahls sind in der Bildmitte (unterhalb des Rohres) zu sehen.

Bei der Probe handelt es sich um einen im Pilgerverfahren hergestellten Kupferrohrstecker. Dieser ermöglicht die (lokale) Analyse des gesamten Umformvorganges. Er wurde ausgewählt, weil er neben der größeren Rohrwanddicke einen gegenüber den durch Gleitziehen hergestellten Rohren eine deutlich längere Umformzone aufweist und damit für diesen Test besser geeignet war als die von uns verwendeten Rohre.

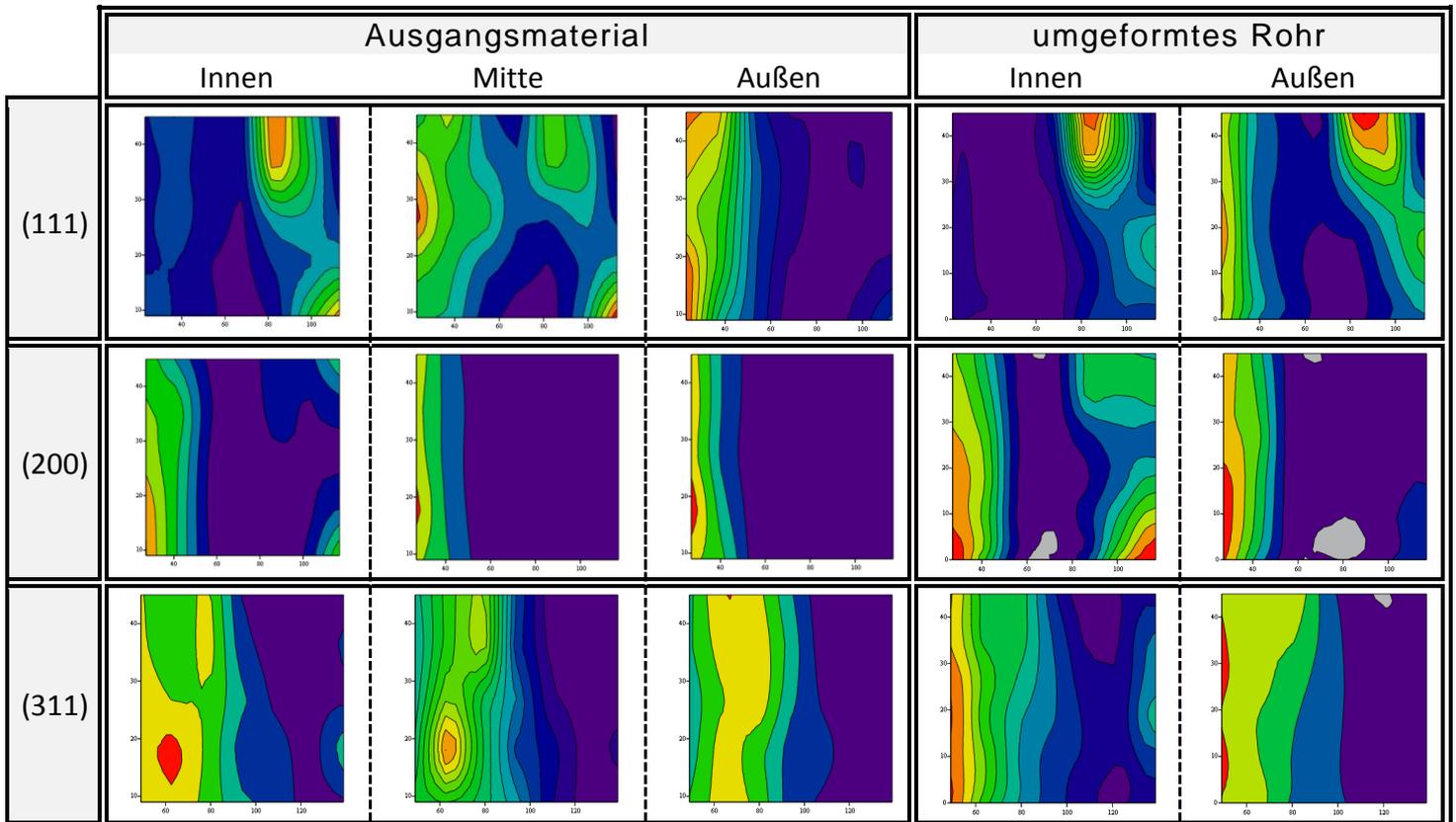
Auf einem monochromatischen Neutronendiffraktometer mit Ortsauflösung wie SALSA, lässt sich immer nur ein Beugungsreflex gleichzeitig messen. Trotzdem sind auf Grund der hohen Fluxleistung die Messzeiten kurz genug, um in angemessener Zeit eine ausreichende Zahl Reflexe zu generieren. In 12 h wurden 601 Reflexe gemessen: Cu(111), Cu(200) und Cu(311), jeweils 7  $\varphi$ - und 6  $\chi$ -Winkel. Für eine erste Texturbestimmung wurde je eine Messposition im Ausgangsrohr und im verformten Bereich ausgewählt. An diesen Positionen wurde je eine Messung an der Innen- und Außenwand vorgenommen, im dickeren Teil des Ausgangsrohres zusätzlich in der Wandmitte.

Die Intensitätsprofile der Bragg-Reflexe sind in Abb. 3-42 dargestellt. Man kann bereits qualitativ eine Texturänderung von der Innen- zur Außenseite erkennen, sowie Unterschiede zwischen dem verformten Teil und dem Ausgangsmaterial. Zu einer vollständigen Texturanalyse muss allerdings noch die Korrektur der Intensität der Reflexe in Abhängigkeit vom Strahlweg im Probenmaterial vorgenommen werden. Dazu wird ein genaues dreidimensionales Modell der Probengeometrie benötigt. Diese Messungen werden aktuell durchgeführt.

### 3.7.2 Ergebnisse der Texturmessungen

Im Rahmen dieses Projektes wurde an einer Entwicklung zur zerstörungsfreien, ortsaufgelösten Bestimmung der kristallographischen Textur beigetragen und teilfinanziert. Zu diesem Zwecke wurde das Spannungsdiffraktometer SALSA modifiziert und ein Kollimator, der zur Abb. von Beugungsreflexen aus verschiedenen Bereichen der Probe dient, dimensioniert und in Auftrag gegeben. Die ersten Ergebnisse dieser Entwicklung sind positiv, jedoch konnte das eigentliche Ziel, zerstörungsfrei lokal quantitative Texturmessungen vorzunehmen, bisher nicht erreicht werden. Dafür sind verschiedene Faktoren verantwortlich: Die Beschaffung der Finanzmittel am ILL verlief schleppend und verzögerte damit die Auftragsvergabe erheblich. Personalengpässe (Mitarbeiter ausgeschieden) führten anschließend zu verlängerten Bauzeiten.

Hinzu kommt, dass schließlich Engpässe in der Verfügbarkeit von Strahlzeit gegeben war, die mit dem Userprogramm des ILL abgestimmt werden muss. Wesentliche Ursachen lagen in den Erweiterungsprogramme (Millennium Programm, Fukushima Stress Test). So konnte ein erster Test erst Ende 2012 stattfinden und ein weiterer im August 2013. Der nächste Test mit Material aus unserem Projekt ist bis Mitte des Jahres 2014 vorgesehen.



**Abb. 3-42:** Intensitätsverteilung der Bragg-Reflexe, aufgetragen über die Probenwinkel  $\varphi$  (horizontal) und  $\chi$  (vertikal). Von oben nach unten: Cu (111), (200) und (311) Reflexe. Von links nach rechts: Ausgangsmaterial nahe der Innenwand, Mitte und Außenwand und umgeformtes Rohr innen und außen.

## 4 Zusammenfassung

In diesem Projekt wurde an nahtlos gezogenen Kupferrohren der Einfluss der Matrizenkipung und -verschiebung bei Einsatz einer Führungsmatrize im Einlauf auf die Exzentrizitätsbeeinflussung und Eigenspannungsbildung untersucht.

Die Rohrwanddickenmessung zur Exzentrizitätsermittlung wurde zerstörungsfrei mit Hilfe einer Ultraschallmessenrichtung ermittelt, die Eigenspannungen mit Hilfe des Bohrlochverfahrens und der Neutronen-Diffraktions-Methode am Institute Laue-Langevin, Grenoble. Das bestehende Simulationsmodell wurde um die Parameter Kippung und Versatz erweitert.

Die angelieferten Rohre besaßen im Mittel eine Exzentrizität von ca. 2,5%. Bei Kippung der Ziehmatrize ließ sich die Exzentrizität je nach Kippungswinkel und in Abhängigkeit von der Lage des Wanddickenmaximums/-minimums gegenüber dem ungekippten Normalzug (Winkel 0°) deutlich erhöhen/reduzieren. Die maximale Kip-

pung betrug 5°; höhere Winkel führten in unserem Fall zu erhöhten Abrissen der Rohre. Analog verhielten sich die Exzentrizitäten bei Verschiebung der Führungsmatrize: Ein Verschieben in Richtung des Maximums führte mit zunehmendem Versatz zu einer Verschlechterung der Exzentrizitätswerte, eine Verbesserung wurde reproduzierbar bei umgekehrter Verfahrensweise erzielt. Diese Ergebnisse fanden in der Simulation ihre Bestätigung.

Durch Einsatz einer Führungsdüse konnte die bei hoher Kippung resultierende auslaufseitige Rohrkrümmung deutlich reduziert und in einem produktionstechnisch akzeptablen Rahmen eingestellt werden. Unkritisch verhielt sich diese Krümmung auch bei der zweiten Variante, dem Matrizenversatz.

Die überwiegend mit Hilfe der Bohrlochmethode durchgeführten Eigenspannungsuntersuchungen zeigten, dass die bei Zug ohne Kippung an der Rohraußenseite im Maximum vorliegende Zugspannung mit zunehmendem Kippwinkel abfällt, was sich auch in der Simulation bestätigte.

Am Instrument SALSA des ILL konnte erfolgreich das Eigenspannungsfeld innerhalb des Umformbereiches eines Steckers zerstörungsfrei bestimmt und mit den Ergebnissen eines FEM-Modells verglichen werden. Für weitere Untersuchungen dieser Art ist uns bereits Strahlzeit am Forschungsreaktor des ILL zugeteilt worden. Ziel wird es sein, das Modell für verschiedene Kippwinkel der Matrize zu verifizieren.

Die Entwicklung der zerstörungsfreien Texturmessung am Instrument SALSA des Instituts Laue-Langevin konnte auf Grund der zeitlichen Verzögerung bei der Lieferung der Komponenten, im Bau und Testbetrieb sowie auf Grund von längeren Ausfallzeiten der Anlage innerhalb der Projektlaufzeit nicht abgeschlossen werden. Nach Aufbau von Radialkollimatoren, die – wie bei der Eigenspannungsanalyse – die Bereitstellung eines konstanten Messvolumens erlauben, wurden erste Versuche an geschweißten Proben sowie an dem Rohrstecker eines im Pilgerwalzverfahren hergestellten Rohres durchgeführt. Die Messdaten müssen vor einer weiteren Analyse absorptionskorrigiert werden, wozu ein 3-dimensionales Modell der Probengeometrie benötigt wird. Dieses ist in Vorbereitung. Die ermutigenden Ergebnisse zeigen, dass sich diese mit einer Auflösung im Millimeterbereich sehr zeiteffizient durchführen lässt. Nach unserem Wissensstand ist dies die erste Texturanalyse an einem kompletten Bauteil! Aktuell wird an der Entwicklung weiterer Auswertesoftware für diese Art Messungen gearbeitet. Auch für diese Arbeit stellt uns das ILL Messzeit in 2014 zur Verfügung.

## **5 Ausblick**

Die Ergebnisse weisen reproduzierbar das Potenzial zur Verbesserung der Präzision – bzw. der lokal gezielten Verschlechterung der Exzentrizität - von Rohren auf. Eine dynamische Verstellung der Ziehmatrize durch Kippen (Tilting) oder Versetzen (Shifting) – für den zweiten Fall ist eine Führungsmatrize erforderlich – ermöglicht eine Anpassung des Stoffflusses an die reale Rohrgeometrie. Dazu ist allerdings eine On-Line-Messung des Rohres erforderlich sowie die Entwicklung der erforderlichen Regelungstechnik.

Die für die Regelung erforderlichen Einstellungen/Algorithmen können aus den Ergebnissen des abgeschlossenen Projektes abgeleitet werden, bedürfen jedoch noch der statistischen Absicherung und ggfls. der Erweiterung um werkstoffspezifische Kenngrößen. Dazu sind weiterführende Untersuchungen an mindestens drei Werkstoffen (-zuständen) erforderlich.

Dieses Ziel soll in einem Folgeprojekt erreicht werden, um schließlich ein industrietaugliches Messsystem anbieten zu können.

## 6 Literatur

- 1 Krause, H., H. H. Jühe, R. Kopp und K. R. Baldner, Ziehverfahren beeinflusst Eigenspannungszustand, Drahtwelt 1978, H. 11, S. 428-432
- 2 Skolyszewski, Andrzej, Größe und Verteilung von Eigenspannungen in Rohren, Bänder Bleche Rohre 1986, H. 7, S. 137-140
- 3 Bühler, Hans und Peter-Jürgen Kreher, Eigenspannungen in kalt gezogenen Rohren, Archiv für das Eisenhüttenwesen 1968, H. 5, S. 353-359
- 4 Dahl, Winfried und Heinz Mühlenweg, Eigenspannungen und Verfestigungen beim Rohrziehen, Stahl u. Eisen 84 (1964), S. 1250-1260
- 5 Rasty, J. und D. Chapman, Effect of process variables on the tube drawing process and product integrity, PVP vol. 225 (1991), S. 81-94
- 6 Skolyszewski, Andrzej, Eigenspannungen vermindern in kaltgezogenen Stahlrohren, Bänder Bleche Rohre 1986, H. 5, S. 85-87
- 7 Gummert, Hans-Joachim, Ein Beitrag zur Untersuchung des Umformverhaltens von exzentrischen Rohren beim Kalt-Gleitziehen  
Dissertation TU Clausthal, 1991
- 8 Gebhardt, J., Werkstoffuntersuchungen zum Ziehen von Rohren mit und ohne Innenwerkzeug, Dissertation TU Clausthal, 1984
- 9 Funke, P. und J. Gebhardt, Untersuchung über den Zusammenhang zwischen verschiedenen Fertigungsbedingungen beim Ziehen von Rohren mit Innenwerkzeug und dem Eigenspannungszustand im gezogenen Rohr  
Bericht zum AIF-Forschungsvorhaben 4733, Clausthal
- 10 Ziegler, Wolfgang, Die Auswirkung der Schmierbedingungen und der Vorverfestigung auf die maximale Formänderung beim Rohrziehen über feststehenden Dorn, Metall (1988) H. 4, S. 364-366
- 11 Donnison, Mike, Schmierstoffe für das Ziehen von Kupferrohr, Umformtechnik 26(1992) 2, S. 134-136
- 12 Daves, W. und F. D. Fischer, Finite-Element-Simulation des Ziehens von gekrümmten Drähten, Berg- und Hüttenmännische Monatshefte, Band 141(1996) 5, S. 195-198
- 13 Schajer, G. S. and Steinzig, M. "Full-Field Calculation of Hole-Drilling Residual Stresses from Electronic Speckle Pattern Interferometry Data", Experimental Mechanics, vol.45, no.6, pp.526-532, 2005.
- 14 Schajer, G.S. and Prime, M.B. "Use of Inverse Solutions for Residual Stress Measurements", Journal of Engineering Materials and Technology, vol.128, no.3, pp.375-382, 2006.
- 15 H. Palkowski und S. Brück, "Eigenspannungen und Maßtoleranzen beim Rohrziehen", Abschlussbericht zum Forschungsprojekt AiF 13939, IMET, TU-Clausthal, 2008

- 16 DIN EN 1057, Kupfer und Kupferlegierungen – Nahtlose Rundrohre aus Kupfer für Wasser- und Gasleitungen für Sanitärinstallationen und Heizungsanlagen, Deutsche Fassung EN 1057:1996
- 17 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
- 18 Palkowski, H., S. Brück: Maßtoleranzen und Eigenspannungen beim Rohrziehen. Metall, 11/2007, S. 708-713

## 7 Veröffentlichungen

- 1 Adele Carradò, Heinz-Guenter Brokmeier, Thilo Pirling, Robert Charles Wimpory, Norbert Schell, Heinz Palkowski  
Development of Residual Stresses and Texture in Drawn Copper Tubes  
Adv. Eng. Mater. 2013, 15, 469-475,  
DOI: 10.1002/adem.201200161, 21 Feb 2013
- 2 Heinz Palkowski, Sebastian Brueck, Thilo Pirling, Adele Carradò  
Investigation on the residual stress state of drawn tubes by numerical simulation and neutron diffraction analysis  
Materials 2013, 6, 11, 5118-5130,  
DOI:10.3390/ma6115118; printed 08.Nov. 2013
- 3 Scheer, K., Palkowski, H.  
Einfluss der Vorrohr- und Auslaufführung auf die Exzentrizität und Eigenspannungen von Rohren beim Gleitziehen,  
Metall, 2013, 67, 11, 521-524

### ***In Vorbereitung***

- 4 Foadian, F. and Palkowski, H.  
*Precision Tube Production: Influencing the Eccentricity by Tilting and Shifting*
- 5 Foadian, F., Pirling, T., Carrado, A., H. Palkowski  
*Residual Stresses under Varied Tilting and Shifting Conditions for the Drawing Die*
- 6 Foadian, F., Pirling, T., Carrado, A., H. Palkowski  
*Simulation of Residual Stresses under Varied Tilting and Shifting Conditions for the Drawing Die*

## 8 Abbildungsverzeichnis

Abb. 2-1: Düsenanordnungen für die Schmierung der Rohre für die Außen- (links) und Innenfläche. Innendüse zur Abdeckung eines weiten Bereiches an Innendurchmessern (v. l. n. r.).....	5
Abb. 2-2: Innenspannwerkzeug.....	6
Abb. 2-3: Gekippter Matrizenhalter für das Ziehen mit definiertem Kippwinkel.....	6
Abb. 2-4: Verstellbare Vorrichtung zum Ziehen mit definiertem Versatz und doppelt ausgelegtem Werkzeug. Links: Führungsmatrize, rechts: Ansicht auslaufseitig.....	7
Abb. 2-5: Versuchsanordnung mit einem Kupferrohr.....	7
Abb. 3-1: Exzentrizitäten der Rohre 65x5,5 mm im Anlieferungszustand.....	10
Abb. 3-2: Exzentrizitäten der Rohre 64x3,1 mm im Anlieferungszustand.....	10
Abb. 3-3: Versuchsplan für die Ziehversuche.....	12
Abb. 3-4: Geradheitsabweichung bei Schräg-einlauf mit unterschiedlichen Kippwinkeln.....	13
Abb. 3-5: Versuchsaufbau „Schrägeinlauf“.....	14
Abb. 3-6: Verkippung der Matrize und die Definition einer positiven (+) und negativen (-) Ausrichtung der Rohre. Bei Ausrichtung Maximum der Wandstärke oben: positiv (+), Minimum der Wandstärke oben: negativ (-).....	14
Abb. 3-7: Rohrziehen mit versetzter Matrize.....	14
Abb. 3-8: Verschiebung der Matrize.....	14
Abb. 3-9: Exzentrizitätsveränderung bei Schrägeinlauf im 1. Zug.....	15
Abb. 3-10: Exzentrizitätsveränderung bei Schrägeinlauf im 2. Zug.....	15
Abb. 3-11: Lage des Maximums bleibt erhalten bei Zug ohne Kippung.....	16
Abb. 3-12: Verschiebung von Maximum und Minimum bei Kippung um $-5^\circ$ .....	16
Abb. 3-13: Exzentrizitätsänderung bei versetztem Einlauf in Abhängigkeit vom Versatz („Verschiebung“)......	16
Abb. 3-14: Ausgangsrohr.....	17
Abb. 3-15: 1 Zug, Kippwinkel $+5^\circ$ .....	17
Abb. 3-16: 1 Zug, Kippwinkel $+1^\circ$ .....	17
Abb. 3-17: 1 Zug, Kippwinkel $0$ .....	17
Abb. 3-18: Anlieferungszustand.....	18
Abb. 3-19: Gezogenes Rohr.....	18
Abb. 3-20: Exzentrizitätsveränderung bei Schrägeinlauf.....	19
Abb. 3-21: Prinzip der Bohrlochmethode mit der Speckle-Interferometrie.....	20
Abb. 3-22: Axiale Eigenspannungen für die Ausgangs- und gezogenen Rohre (1.Zug) im Rohrwandmaximum, SF-Cu-Rohre.....	21

Abb. 3-23: Axiale Eigenspannungen für die Ausgangs- und gezogenen Ms 64-Rohre im Rohrwandmaximum.....	21
Abb. 3-24: Dickenprofil des Rohres und Position der Scans (schwarze Streifen) für Neutronenmessungen. Rechts: Ausgangsrohr.....	22
Abb. 3-25: Schematischer Aufbau des Neutronen-Spannungsdiffraktometers SALSA .....	23
Abb. 3-26: Eindringscan durch Probenoberfläche. Links: Intensitätsverteilung im Messvolumen. Mitte: Dieselbe Intensitätsverteilung, integriert und aufgetragen über dem Abstand von der Probenoberfläche. Rechts: Die Koordinate des Schwerpunktes der Intensitätsverteilung für jede Messposition wird als Messpunkt verwendet. ....	23
Abb. 3-27: Relative Reflexverschiebung (pseudo peak shift) links, und korrespondierende Dehnungswerte rechts. Die blaue Kurve zeigt den geometrischen Fehler und die rote die Summe aus geometrischem und wellenlängenabhängigem Fehler. ....	24
Abb. 3-28: Korrektur der Beugungsreflexpositionen nahe der Oberflächen. Links: aufgetragen über Messkoordinaten. Rechts: aufgetragen über Probenkoordinaten. „0“ ist die Lage der äußeren Oberfläche.....	25
Abb. 3-29: Relative Eigenspannungen über die Umformungszone. Ordinate „0“: Äußere Rohrwand. Abszisse: Position über die Umformzone. ....	26
Abb. 3-30: Dreidimensionale Darstellung der Spannungsprofile aus Abb. 3-27. Deutlich treten die Kompressionsspannungen in der Umformzone hervor. Auch ist der Spannungsgradient über die Wanddicke hier deutlich zu erkennen.....	27
Abb. 3-31: Schnitt der Spannungsprofile der Radial-, Tangential- und Axialkomponenten entlang der Rohrachse. Der Umformbereich zwischen 94.75 und 113 mm ist eingezeichnet. Die Werte sind gemittelt über einen Bereich von jeweils ca. 0.7 mm über die Wanddicke. (Genauigkeit der Messungen besser als $\pm 10$ MPa) .....	27
Abb. 3-32: Charakteristische Bereiche beim Ziehen mit Innenwerkzeug.....	29
Abb. 3-33: Fließkurve für das verwendete SF-Kupfer.....	30
Abb. 3-34: Simulation der Eigenspannungen beim Rohrzug mit Kippung .....	31
Abb. 3 35: FEM-Spannungskalkulation im Wanddickenmaximum über die Dicke in Abhängigkeit vom Kippwinkel .....	31
Abb. 3-36: Exzentrizitätsänderung bei Kippung um $-5^\circ$ (FEM und Experiment). ....	31
Abb. 3-37: Exzentrizitätsänderung bei Kippung um $+2^\circ$ (FEM und Experiment). ....	32
Abb. 3-38: Berechnete Spannungsprofile für die radiale, Umfangs-, und Axialkomponente in der Umformungszone.....	33
Abb. 3-39: Versuchsanordnung. Die Probe befindet sich zwischen Fokus und Sekundärkollimator, sodass die Kollimatorkanäle verschiedene vertikale Bereiche gleichzeitig auf den ortsempfindlichen Detektor abbilden. Horizontal wird der Streuwinkel abgebildet. Rechts: Abmessungen der Probe. Die Umriss der Schweißnaht, sowie die Größe des Messbereichs (rot), sind eingezeichnet. Die unteren Linien kennzeichnen Pufferzone - Wärmeeinflusszone.....	34
Abb. 3-41: Gepilgter Rohrstecker auf dem Goniometer zur zerstörungsfreien Texturanalyse. Vordergrund links: Sekundärkollimator, detektorseitig. Die zwei	

Kollimatoren in Serie zur Definition des Primärstrahls sind in der Bildmitte (unterhalb des Rohres) zu sehen..... 36

Abb. 3-42: Intensitätsverteilung der Bragg-Reflexe, aufgetragen über die Probenwinkel  $\varphi$ (horizontal) und  $\chi$ (vertikal). Von oben nach unten: Cu (111), (200) und (311) Reflexe. Von links nach rechts: Ausgangsmaterial nahe der Innenwand, Mitte und Außenwand und umgeformtes Rohr innen und außen. .... 37