

Maßtoleranzen und Eigenspannungen beim Rohrziehen

Palkowski, H.; Brück, S. (1)

Einsatzgebiete für Kupferrohre sind Kondensatorrohre, Wärmetauscher und Sanitärbereich bzw. Heizungsbau. Neben den Vorteilen wie Recycelbarkeit, Umweltfreundlichkeit und gute Umformbarkeit, die Kupfer in diesen Bereichen bietet, gibt es auch Nachteile wie die große Dichte und hohe Rohstoffpreise. Ein Ansatz, die Kosten des Endproduktes Kupferrohr durch eine bessere Materialausnutzung zu verringern, wird in diesem Artikel vorgestellt.

Bei den vielfältigen Anwendungen von Rohrkonstruktionen erlaubt die Verringerung der Wanddicken Materialeinsparungen und damit Kostenersparnisse. Dies ist im ersten Schritt gleichbedeutend mit der Forderung nach engeren Maßtoleranzen bei der Wanddicke und der Exzentrizität, also der Verteilung der Wanddicken über den Rohrumfang, denn nur so ist gewährleistet, dass sich bei der Wanddicke allenfalls ein geringes Übermaß einstellt. In der Bundesrepublik Deutschland werden jährlich etwa 180.000 t Kupferrohre produziert. Eine Verringerung des Übermaßes bedeutet für den Produzenten bei der durch die Normen vorgegebene Mindestwandstärke eine Möglichkeit zur Kostenersparnis. Auf der anderen Seite fordert die Prä-

zisionsrohrfertigung besonders enge geometrische Toleranzen; hier vor allem bezüglich des Durchmessers und der Ovalität. Selbstverständlich müssen diese Toleranzen auch bei der Weiterverarbeitung eingehalten werden.

Es existiert bereits eine Vielzahl Untersuchungen, die sich mit den Phänomenen zum Ausgleich der Ungängen und der genutzten Mechanismen beschäftigen. Die Auswirkung der Änderung einzelner Parameter sind qualitativ in Bild 1 dargestellt (div. Autoren). Oft wurden diese aber nicht quantifiziert. Da die vorhandenen Normen gerade bei den Grenzen für die Wandstärke i.d.R. sehr weiten Spielraum geben, bestand möglicherweise auch kein Anlass dazu. Exzentrische, unrunde Vorrohre stellen aber den Normalfall in der industriellen Fertigung dar. Je höher man die Anforderungen an die Maßhaltigkeit und je enger man die Toleranzen legen möchte, desto stärker werden die ausgleichenden Mechanismen in Anspruch genommen, desto stärker werden ihre

Auswirkungen lokalisiert, und umso wichtiger wird es, sie zu quantifizieren, da sie sich auch auf die Werkstoffeigenschaften auswirken und besonders auch die Eigenspannungen beeinflussen.

Eigenspannungen entstehen bei Umformprozessen zwangsläufig und stellen, ebenso wie weitere Veränderungen der Werkstoffeigenschaften, die Antwort des Werkstoffs auf die plastische Deformation dar [1]. Während sie in dieser Form auch bei einem ideal rotationsymmetrischen Körper vorliegen, kommt bei realen Rohren aus der Vorstufe noch eine inhomogene Umformung hinzu, die zu Inhomogenitäten sowohl bezüglich der Werkstoffeigenschaften als auch der Eigenspannungen führen. Generell können Eigenspannungen einen negativen Einfluss auf die Rohreigenschaften haben, bei einer gezielten Einstellung können sie aber auch zu einer Produktverbesserung beitragen. Gerade auch im Hinblick auf die Einhaltung engerer Maßtoleranzen ist es nun erforderlich, nicht mehr einfach nur von einer homogenen Verteilung der Eigenspannungen auszugehen, sondern auch ihre lokale Verteilung zu berücksichtigen. Ein ausschließlich auf enge Maßtoleranzen hin optimierter Prozess führt z.B. bei einem exzentrischen Vorrohr zu lokalen Inhomogenitäten im Werkstofffluss und somit zu lokal unterschiedlichen Verfestigungen, Gefüge- und Texturbefindungen sowie zu unsymmetrischen Spannungsverteilungen. Hier muss also eine Abwägung zwischen den Einflüssen auf die Geometrie und auf die sonstigen Rohreigenschaften erfolgen, die wiederum vom vorgesehenen Einsatzzweck abhängen. Oberflächennahe Eigenspannungen können beispielsweise eine wesentliche Rolle bei der Rissanfälligkeit und der Korrosion spielen. Auch hier sind nicht die umfangsgemittelten

Parameter	Eigen- spannungen	Veränderung Exzentrizität	Härte	Zugfestigkeit/ Streckgrenze	Bruch- dehnung	Textur
Ziehdielenwinkel						
Ziehdielenübergangsradius						
Zugfolge						
Formänderung						Querschnitt?
Q-Wert						Richtungs- änderung
Schmierung				?	?	nur Rand?

Bild 1: Einfluss unterschiedlicher Fertigungsparameter auf die Rohreigenschaften

Spannungsverteilungen entscheidend, sondern die lokalen Extrema. Eine Auswahl an Untersuchungen zu diesem Thema findet man unter [2-7].

Ein aktuelles AiF-Forschungsprojekt am Institut für Metallurgie der TU Clausthal untersucht nun den Einfluss unterschiedlicher Fertigungsparameter auf die Eigenspannungen und Maßtoleranzen beim Rohrziehen exzentrischer Rohre. Unterstützt wird dieses Projekt durch die Mitglieder des Arbeitskreises „Rohre und Profile“ des DGM Fachausschusses „Ziehen“. Dabei wird der Materialfluss im Rohr zunächst genau analysiert, um ihn anschließend gezielt beeinflussen zu können. So kann auch eine Erweiterung des Arbeitsbereichs moderner Ziehmaschinen gelingen und ihre Flexibilität verbessert werden.

Während es bereits im Vorfeld eine Vielzahl von Aktivitäten in dieser Richtung gab, sind die Ungängen aus den oben genannten Gründen eher stiefmütterlich behandelt worden. Die meisten Ansätze und Analysen gehen implizit von ideal runden Rohren aus, Simulationsmodelle setzen eine vollkommene Rotations-symmetrie meist sogar explizit voraus. So beschränken sich die bisherigen Erkenntnisse zu dieser Thematik auf angepasste Fertigungsparameter zur Verbesserung der Geometrie, auf die lokale Werkstoffreaktion wird dabei nicht eingegangen. Das im Rahmen dieses Projektes entworfene Simulationsmodell – unterstützt durch praktische Versuche an einer industriellen Ziehmaschine – versucht nun diese Abweichungen zu berücksichtigen.

Unter der Exzentrizität oder auch der Ungleichwandigkeit eines Rohres versteht man die Abweichung der Wandstärke von einem Mittelwert.

$$U = \frac{s_{\max} - s_{\min}}{s_{\max} + s_{\min}} * 100 [\%]$$

(U = Exzentrizität, s_{\min} = minimale Wandstärke, s_{\max} = maximale Wandstärke)

Während nahezu alle Untersuchungen vom idealen, rotations-symmetrischen Fall ausgehen, finden sich

nur sehr wenige, die die Exzentrizität von Rohren berücksichtigen. Diese stellen aber i.d.R. den Normalfall dar. Die Exzentrizitäten entstehen bereits beim Loch der Lupe, beim Bohren des Vorproduktes oder auch beim Strangpressen des Vorrohres und bleiben bis zum Fertigrohr in der Tendenz erhalten. Für Stahlrohre liegen sie in Abhängigkeit vom Produktionsverfahren üblicher Weise bei +/- 5 bis 10 %, für Al-Rohre werden - je nach Umformverfahren - bis zu +/- 5 % angegeben, bei indirektem Strangpressen mit feststehendem Dorn können aber auch noch bessere Werte erreicht werden.

Die Frage nach dem Einfluss der Fertigungsparameter und der Entwicklung der Exzentrizität während der einzelnen Arbeitsschritte wurde für Rohre aus Al 99.5 und AlMg 1 sowohl experimentell (visioplastisch) als auch numerisch untersucht [8]. Für die Exzentrizität wurde von einer sinusförmigen Verteilung der Wand-dickenvariation ausgegangen. Der Schwerpunkt der Arbeiten lag hierbei auf dem Hohlrohrzug, einzelne Versuche wurden auch mit feststehendem Stopfen durchgeführt. Es konnte gezeigt werden, dass eine Reduktion der Exzentrizität stattfindet, wenn die dünnwandigen Rohrabschnitte in tangentialer Richtung gestaucht werden. Bei ungeführten Rohren war der Ausgleich bedeutend größer, allerdings führte dies auch zum Ausknicken der Rohre. Insgesamt ließ sich die Exzentrizität nur bis zu einem gewissen Grad reduzieren, wobei sich für den Hohlzug folgende Zusammenhänge ergaben:

- der Düsenwinkel hat den stärksten Einfluss, allerdings deckten die Untersuchungen auch technisch nicht verwendete Bereiche ab;
- mit steigender logarithmischer Querschnittsformänderung ist ein schwacher Anstieg der Exzentrizitätsverbesserung zu verzeichnen;
- der Übergangsradius hat nur einen indirekten Einfluss;
- ein Zug über mehrere Stufen kann bei Werkstoffen mit hoher Festigkeit auch in den Folge-

stufen noch Verbesserungen der Exzentrizität bewirken;

- der Verzicht auf eine Vorrohrführung übertrifft alle anderen Maßnahmen zur Verbesserung der Exzentrizität, führt aber zum Ausknicken des Rohres;
- beim Stopfzug hatte der Q-Wert einen starken Einfluss auf die erzielbaren Exzentrizitätsverbesserungen.

Die Auswirkungen auf die Eigenspannungen wurden nicht weiter untersucht, es wurde aber darauf hingewiesen, dass diese lokal variieren.

Aktuelle Untersuchungen am IMET

Im Rahmen des aktuellen Projektes wurde für die Herstellung der Vorprodukte aus Kupfer, Messing und Aluminium eine für alle Ziehversuche einheitliche Vorgehensweise mit normierten Ausgangsbedingungen gewählt: Alle Rohre des jeweiligen Werkstoffs sind aus einer Charge, wobei nur die Kupferrohre das volle Versuchsprogramm durchlaufen. Der Gleitziehvorgang wurde mit feststehendem Dorn durchgeführt. Zur Überprüfung der Übertragbarkeit der Ergebnisse auf andere Werkstoffe wurden ausgewählte Versuche mit den beiden anderen Werkstoffen durchgeführt. Neben der Variation der Wandstärke wurde die Werkzeuggeometrie variiert und ihr Einfluss untersucht. Der Versuchsplan mit seinen Variationen ist in Bild 2 dargestellt.

Ursprünglich war vorgesehen, die Untersuchungen in Form eines Screeningplans durchzuführen. Nicht berücksichtigt würden dabei Interdependenzen zwischen den einzel-

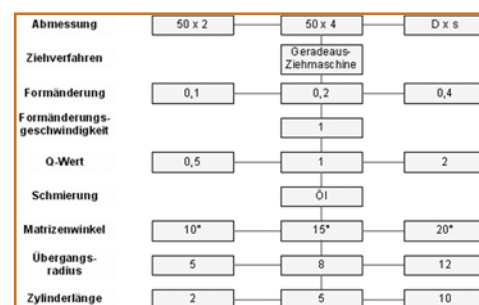


Bild 2: Versuchsplan

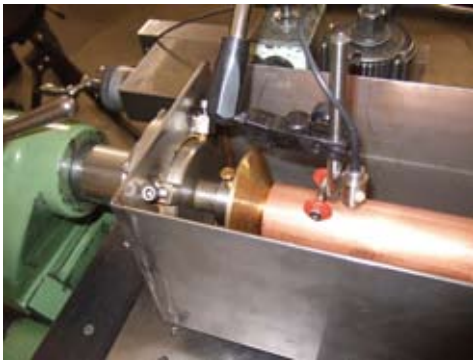


Bild 3: Wanddickenmessung

nen Parametern. Mit der Methode „One factor at a time“ könnten alle Interdependenzen ermittelt werden. Aufgrund der hohen Anzahl von Versuchen war das im vorgegebenen Zeitraum und Versuchsumfang nicht zu leisten. Mit der nun eingesetzten statistischen Versuchsplanung wurde es möglich, das komplette Versuchsfeld unter Berücksichtigung der Interdependenzen abzarbeiten. Die hierfür aus der statischen Versuchsplanung errechneten Werkzeuggeometrien sind allerdings größtenteils keine Standardgeometrien, konnten folglich nicht von den Industriepartnern bereitgestellt werden und mussten deshalb speziell gefertigt werden.

Nach Bereitstellung der Versuchsrohre in den Abmessungen 50 x 2 und 50 x 4, die jeweils aus derselben Charge stammen sollten, wurden diese laut statistischem Versuchsplan in 35 verschiedenen Einstellungen gezogen. Vor jedem Ziehversuch wur-

den zur Überprüfung des Ausgangsrohres ca. 300 mm Probenmaterial am Rohrende abgesägt.

Erste Ergebnisse

Bei der nachfolgenden, zuerst stichprobenartigen Auswertung der Exzentrizitäten wurden bei den Kupferrohren stark schwankende Werte festgestellt. Das erforderte eine genauere Untersuchung des Exzentrizitätsverlaufs in Ziehrichtung. Eine manuelle und genügend genaue Vermessung ist für diesen Zweck zu aufwändig. Deshalb wurde eine Messapparatur zur automatischen Wanddickenmessung mittels Ultraschall mit folgenden Kenndaten entwickelt:

- Spiralförmige Wanddickenmessung
- Messgrößen: Wanddicke, Winkelposition,
- z-Position (Position in Längsrichtung)
- 8 Messpunkte s^{-1}
- 16 Messpunkte in Umfangsrichtung
- Messabstand: 7 mm in Ziehrichtung
- Rohrlänge: max. 400 mm
- Messlänge: max. ca. 350 mm
- Rohrdurchmesser: max. 100 mm
- Messdauer: 2 min pro Rohrprobe

Die Messungen ergaben unterschiedliche Ungleichwandigkeiten bei den Ausgangsrohren, die zwischen 0,3 bis 6 % schwankten. Zusätzlich konnte

festgestellt werden, dass die Exzentrizitäten auch über die gemessene Rohrlänge unterschiedlich ausfielen. Bild 4 zeigt die Wanddickenabweichung des gleichen Rohres vor und nach dem Ziehen, allerdings an unterschiedlichen Stellen. Verglichen wurde ein Teil des Ausgangsrohres, das - wie zuvor beschrieben - vor dem Versuch am Rohrende abgesägt wurde mit einem ca. 400 mm langen Rohrstück aus der Mitte des gezogenen Rohres. Hier wird die Problematik des Toleranzverlaufes in Zugrichtung sehr deutlich: Es lässt sich nicht eindeutig sagen, ob die Toleranz durch das Ziehen des Rohres verbessert wurde oder nicht, da die örtlichen Toleranzen bereits in dem Bereich von 300 bis 400 mm bis zu einem Prozent schwanken. Hinzu konnte bei einigen Proben eine Verschiebung der minimalen bzw. maximalen Wanddicke um mehrere Grad festgestellt werden.

Für die Auswertung des Versuchsplanes wurde daher zuerst einmal mit gemittelten Toleranzen über die Messlänge gerechnet. Bild 6 zeigt die Wanddickenabweichung vor und nach dem Ziehen. Auffällig ist hier, dass die Rohre 24, 23 und 37, die mit den gleichen Ziehparametern gezogen wurden, allerdings unterschiedliche Toleranzen aufweisen, ungleiche Toleranzveränderungen hervorrufen.

Ergebnisdiskussion

Dies belegt, dass die Eingangstoleranz einen entscheidenden Einfluss auf die Ausgangstoleranz hat und somit einen weiteren Einflussfaktor im eigentlichen Versuchsplan darstellen müsste. Zur Unterstützung dieser These wurden weitere Untersuchungen in der Produktionslinie eines Herstellers durchgeführt, die zu den gleichen Ergebnissen führten. Mehrere zufällig ausgewählte Rohre mit teilweise unterschiedlichen Ausgangstoleranzen führten zu unterschiedlichen Exzentrizitätsabnahmeverläufen (Bild 5). Gründe hierfür sind die unterschiedliche Vorgeschichte in Form von Pressrohrungleichwandigkeit und Zugfolge sowie der Einlaufposition des Rohres. Zuvor

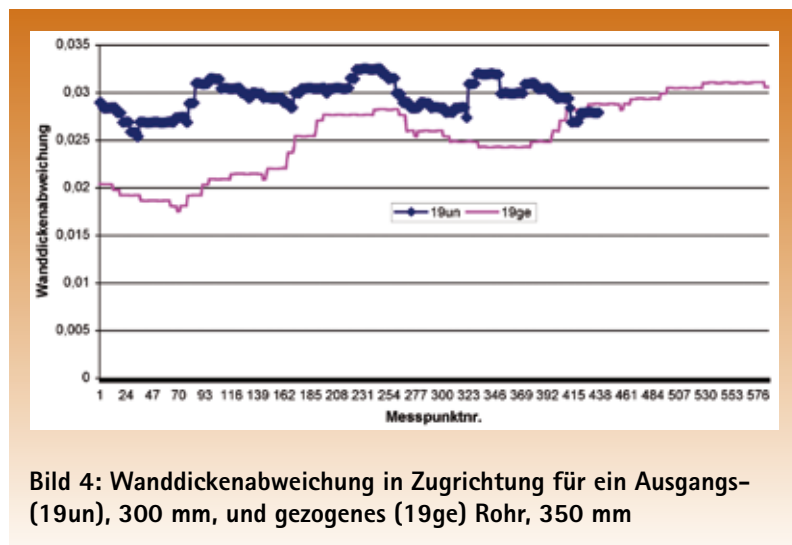


Bild 4: Wanddickenabweichung in Zugrichtung für ein Ausgangs- (19un), 300 mm, und gezogenes (19ge) Rohr, 350 mm

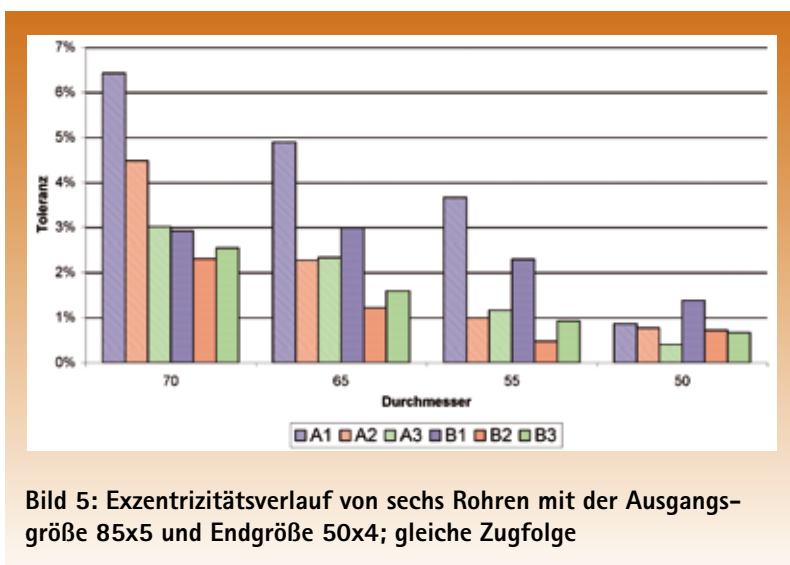


Bild 5: Exzentrizitätsverlauf von sechs Rohren mit der Ausgangsgröße 85x5 und Endgröße 50x4; gleiche Zugfolge

untersuchte Pressrohre hatten sowohl untereinander als auch über ihre Länge hin unterschiedliche Ungleichwandigkeiten aufgewiesen, die Position der extremsten Wandstärken über die Rohrlänge war allerdings konstant. Weitere Ursachen für den ungleichmäßigen Wanddickenverlauf bei den Versuchsröhren können zum einen eine ungenaue Ausrichtung der Matrize in Ziehrichtung, die für einen Winkel ungleich 90° sowohl im Einlauf als auch Auslauf sorgt, zum anderen die „Schwänzelbewegungen“ des Rohres beim Einlauf sein, da das Rohr durch die relativ instabile Dornstange in seiner Bewegungsfreiheit nur gering behindert ist. Dieses Schwänzeln des Rohres wiederum beeinflusst die Dornbewegung. Verstärkt wird dieser rotationsunsymmetrische Materialfluss durch undefinierte Matrizengeometrien, wie sie oft in der Industrie anzutreffen sind, die statt über einen definierten Ziehwinkel über einen trompetenförmigen Einlauf verfügen. Diese Konstellation aus nicht geführtem Rohreinlauf und trompetenförmigen Matrizengeometrien kann sogar zu verfrühtem Materialversagen beim Ziehvorgang führen, da lokal zu hohe Umformgrade auftreten können. Der mögliche Gesamtumformgrad ist folglich niedriger als unter definierten Randbedingungen.

Die unterschiedlichen Exzentrizitätsverläufe in Ziehrichtung schon auf relativ kurzen Rohrstücken (300 mm)

und die unterschiedlichen gemittelten Ausgangstoleranzen stellen eine unzulässig große Fehlerquelle bei der Auswertung der Ergebnisse dar. Die Versuche wurden deshalb unter folgenden zusätzlichen Randbedingungen wiederholt:

1. Komplette Wanddickenvermessung der Ausgangsrohre in Zugrichtung,
2. Gleiche und gleichmäßige Ausgangstoleranz für alle Rohre

Punkt 1 erfordert die Vermessung kurzer Rohrstücke (400 mm), Punkt 2 zudem eine Herstellung unter reproduzierbaren Laborbedingungen. Die Herstellung der Vorrohre unter Laborbedingungen erfolgte auf einer hydraulischen Geradeausziehanlage

(Fa. Bültmann). Ausgangsrohre waren wieder Pressrohre in der Dimension 85x5. Diese sollten auf 50x4 bzw. 50x2 bei gleicher Ungleichwandigkeit (ca. 5 %) gezogen werden. Als wichtige Unterschiede zur allgemeinen industriellen Praxis, mit der auch die zuvor beschriebenen Ausgangsrohre hergestellt wurden, sind zu nennen:

1. Führung mit Führungsbuchse in Einlaufrohrgröße vor der Matrize,
2. Schrägeinlauf beim zweiten Ziehschritt,
3. Gleiche Position der minimalen bzw. maximalen Wanddicke bei jedem Zug.

Punkt 1 führt zu einem gleichmäßigen Materialfluss über den Umfang in Ziehrichtung und somit für gleichbleibende Wandstärken in Ziehrichtung. Punkt 2 sorgt für eine gewünschte Exzentrizitätsvergrößerung. Die Abhängigkeit der Exzentrizität vom Einlaufwinkel wurde bereits von [9] untersucht und hier aktuell zur gezielten Erhöhung der Ungleichwandigkeit angewendet. Der Schrägeinlauf hat allerdings den Nachteil, dass krumme Rohre erzeugt werden, die in einem nachfolgenden Ziehvorgang weder den Einsatz eines Dorns zur weiteren Wanddickenreduktion ermöglichen, noch den Einsatz der langen Führungshülse erlauben. Zur Begradigung des gebogenen Rohres wurde daher im nachfolgenden Schritt mit zwei hin-

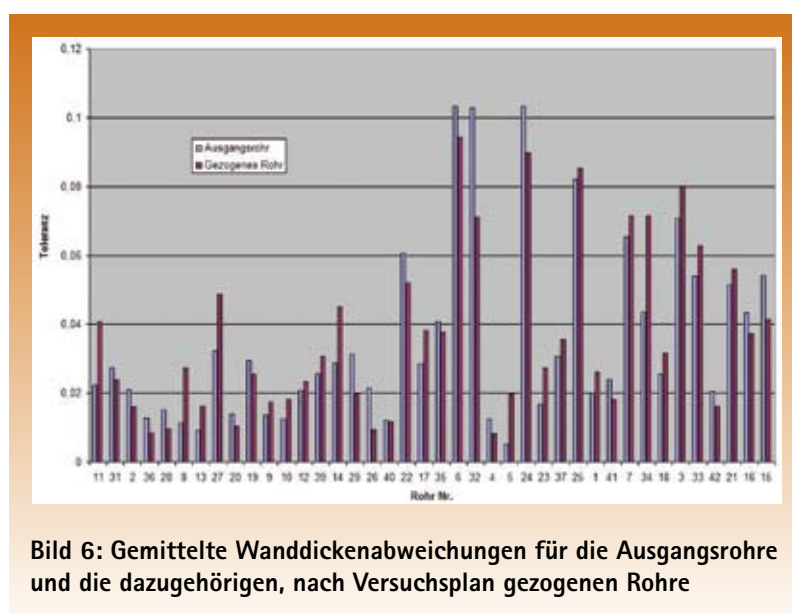


Bild 6: Gemittelte Wanddickenabweichungen für die Ausgangsrohre und die dazugehörigen, nach Versuchsplan gezogenen Rohre

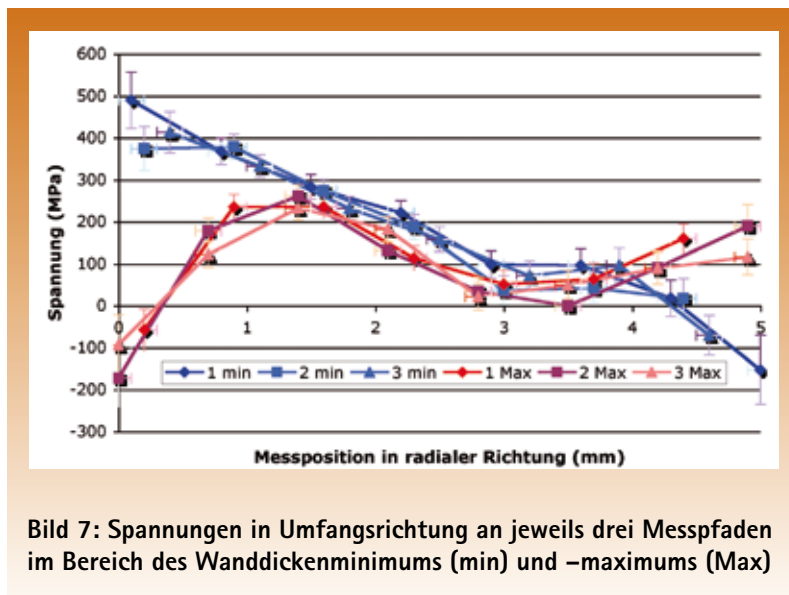


Bild 7: Spannungen in Umfangsrichtung an jeweils drei Messpfaden im Bereich des Wanddickenminimums (min) und -maximums (Max)

tereinander positionierten Matrizen gearbeitet. Hierbei dient die erste Matrize, die nur eine kleine Außendurchmesserreduktion hervorruft, als Führung für die zweite. Damit werden gleich bleibende Randbedingungen für alle Ausgangsrohre eingestellt, diese sind in Bezug auf Wanddickenschwankungen sowohl über die Rohrlänge als auch untereinander deutlich homogener. Die Aussagefähigkeit bzgl. der Eigenspannungsbildung wurde deutlich verbessert. Die Ergebnisse zur Beeinflussung der Maßtoleranzen sind noch nicht vollständig ausgewertet.

Eigenspannungen

Die Messungen von Eigenspannungen wurden sowohl zerstörungsfrei als auch zerstörend durchgeführt. Bei der zerstörenden Messung mittels Bohrlochmethode wird lokal die elastische Rückfederung aufgrund des gestörten Gleichgewichts erfasst und ausgewertet [10]. Nachteil dieses Verfahrens ist neben dem erhöhten Platzbedarf der applizierten DMS-Rosetten, die geringe Messtiefe, so dass nur oberflächennahe Spannungen an der äußeren Rohraußenfläche ermittelt werden können. Bei der zerstörungsfreien Methode mittels Neutronendiffraktion wird die Verspannung des Metallgitters infolge der herrschenden Spannung ermittelt. Vorteile dieser Methode sind die

hohe Eindringtiefe; Messungen von Spannungsprofilen über die ganze Wanddicke sind möglich. Nachteile sind die im Vergleich sehr hohen Kosten und die geringe Verfügbarkeit. Auf die zerstörungsfreie Prüfung mittels Röntgenstrahlung wurde wegen der geringen Eindringtiefen ebenfalls verzichtet.

Bereits in Vorversuchen konnte neben einem in etwa spiralförmigen Wandickenverlauf in Längsrichtung eine starke Inhomogenität bei den Eigenspannungsmessungen mit dem Schlitzverfahren, das allerdings nur Mittelwerte über die Wandstärke liefert, für die tangential und longitudinale Richtung festgestellt werden. Mit Hilfe des am Institut entwickelten FEM-Modells kann nun auch die örtliche Verteilung der Eigenspannungen über den gesamten Rohrquerschnitt abgebildet werden. Im Gegensatz zu den Modellen, die bisher immer von einem rotationssymmetrischen Rohr ausgegangen sind, lassen sich Differenzen in Umfangsrichtung eindeutig aufzeigen.

Bei den Messungen gab es bei beiden Messmethoden allerdings deutliche Schwankungen bei den Ergebnissen, die auf die starken Toleranzschwankungen bei den Ausgangsrohren zurückzuführen sind. Durch die lokal unterschiedlichen Wanddicken über die Rohrlänge sind die Umformbedingungen und in erster Linie natürlich auch der Umformgrad nicht konstant.

Zudem ist der ursprüngliche, lokale Wanddickenverlauf an diesen Stellen unbekannt. Beide Tatsachen erschweren eine Beurteilung der Ungleichwandigkeit auf die Eigenspannungen zu sehr. Hinzu kommt noch eine schwierige Positionierung der Messpunkte aufgrund der leichten Krümmung und Ovalität der Rohre, wenn man in Umfangsrichtung auf einer definierten Linie innerhalb des Versuchskörpers messen möchte. Hauptursache hier ist der hohe Gradient der Eigenspannungen in radialer Richtung. Messungen mit der Bohrlochmethode ergaben bei diesem Versuchsmaterial ebenfalls sehr starke Schwankungen in Ziehrichtung, so dass sich ein Trend für den Einfluss der Exzentrizität nicht eindeutig ermitteln ließ.

Mit den neuen, unter Laborbedingungen hergestellten hohlgezogenen Rohren, konnte eine sehr gute Übereinstimmung der Eigenspannungen an unterschiedlichen Messpunkten in Ziehrichtung ermittelt werden (Bild 7). Für Rohre mit gleichen Ziehparametern wurden ebenfalls nahezu identische Spannungen gemessen.

Ausblick

Mit den neuen Ausgangsrohren, die unter Laborbedingungen gezogen wurden, wird der Versuchsplan noch einmal durchgeführt. Erste Ergebnisse zeigen eine deutliche Verbesserung. Weitere Eigenspannungsuntersuchungen für Rohre, die mit anderen Prozessparametern aus dem Versuchsplan gezogen wurden, sollen folgen und zur Verifizierung der bisherigen Annahmen bzw. Simulationsergebnisse dienen. Das vorhandene FEM-Modell, das zurzeit nur mit einer über die Rohrlänge konstanten Wandstärke arbeitet, soll in einer modifizierten Version auch reale Rohrgeometrien verarbeiten können, wie sie in der Industrie vorkommen.

Danksagung

Die Autoren bedanken sich an dieser Stelle bei der Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen (AiF) für die finanzielle

Unterstützung und bei den beteiligten Unternehmen des DGM-Arbeitskreises „Rohrziehen“ für die geleistete praktische Unterstützung bei der Bearbeitung dieses Projektes.

Literatur

[1] Krause, H. et al.: Ziehverfahren beeinflusst Eigenspannungszustand, Drahtwelt 1978, H. 11, S. 428-432
 [2] Swiatkowski, K.: Restspannungen beim Ziehen von Rohren auf Trommelziehmaschinen. Bänder Bleche Rohre, B. 30 (1989) H. 9, S. 22-24
 [3] Skolyszewski, A.: Größe und Verteilung

von Eigenspannungen in Rohren, Bänder Bleche Rohre, H. 7 (1986), S. 137-140
 [4] Bühler, H., P. Kreher: Eigenspannungen in kalt gezogenen Rohren, Archiv für das Eisenhüttenwesen H. 5 (1968), S. 353-359
 [5] Dahl, W., H. Mühlenweg: Eigenspannungen und Verfestigungen beim Rohrziehen. Stahl u. Eisen 84 (1964), S. 1250-1260
 [6] Rasty, J., D. Chapman: Effect of process variables on the tube drawing process and product integrity. PVP vol. 225 (1991), S. 81-94
 [7] Skolyszewski, A.: Eigenspannungen vermindern in kaltgezogenen Stahlrohren. Bänder Bleche Rohre H. 5, (1986), S. 85-87

[8] Gummert, H-J.: Ein Beitrag zur Untersuchung des Umformverhaltens von exzentrischen Rohren beim Kalt-Gleitziehen. Dr.-Ing.-Diss (1991) TU Clausthal
 [9] Moik, M.: Veränderung der Exzentrizität der Rohre beim Gleitziehen mittels Variation der Einlaufrichtung, Vortrag DGM FA Ziehen, 2007
 [10] Peiter, A.: Handbuch Spannungsmesspraxis : experimentelle Ermittlung mechanischer Spannungen. Verlag Vieweg, 1992

(1) *Institut für Metallurgie, Abt. Werkstoffumformung, TU Clausthal, Clausthal-Zellerfeld*

Rückgewinnung von Kupfer aus Rostaschen aus der thermischen Abfallbehandlung

Simon, F. G.; Berger, W.; Mantyk, M. (1)

Auf Grund ständig steigender Rohstoffpreise und der ähnlichen Zusammensetzung von Rostaschen aus der thermischen Abfallbehandlung kann zukünftig die Rückgewinnung von Wertstoffkomponenten aus diesem Abfallstoff von wirtschaftlichem Interesse sein. Die Nutzung der Wertstoffkomponenten als Sekundärrohstoffe schont natürliche Ressourcen und ist daher auch ökologisch sinnvoll.

In der Fachgruppe Abfallbehandlung und Altlastensanierung der BAM wurden erste systematische Untersuchungen zur Rückgewinnung von Kupfer aus Rostaschen durchgeführt. Eingesetzt wurde ein an der BAM her-

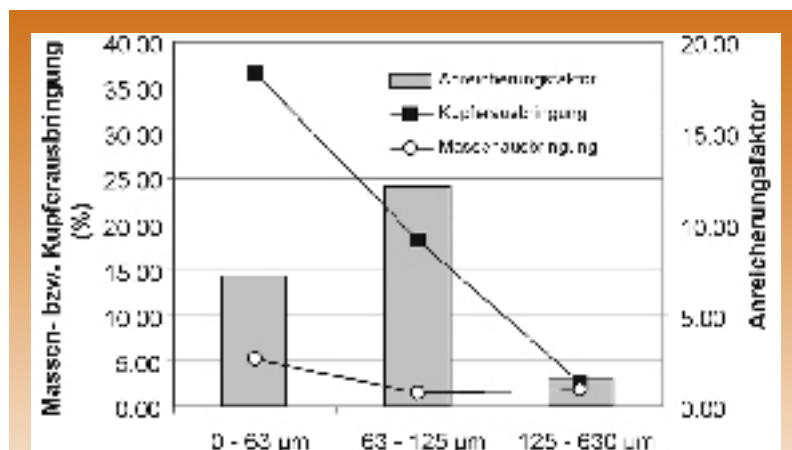
gestelltes Referenzmaterial aus Hausmüllverbrennungsasche (HMVA). Der Kupfergehalt betrug 1,657 g/kg und liegt damit unterhalb der heutigen wirtschaftlichen Bauwürdigkeitsgrenze (economic cut-off) von Kupfer aus Großlagerstätten.

Die Asche wurde zerkleinert (Großteil der Partikel < 125 µm), homogenisiert und im Labormaßstab einer nassmechanischen Aufbereitung (Flotation) unterzogen. Die Kupferkonzentrationen in den Flotaten wurden nasschemisch (ICP-OES) ermittelt. Es wurden unterschiedliche Flotationsmittel getestet, von denen sich Natriumsulfid, Kaliumamylxanthat und Flotanol als die effektivsten erwiesen.

Im Bild ist exemplarisch der Trennerfolg der Flotation in Abhängigkeit von den eingesetzten Korngrößenfraktionen der HMVA dargestellt. Während die prozentuale Kupferausbringung in der Fraktion < 63 µm am größten war, wurde der höchste Anreicherungsfaktor bei der Fraktion 63 - 125 µm erreicht. Die Kupferkonzentration in der HMVA konnte um den Faktor 10,63 auf 17,61 g/kg im Flotat angereichert werden.

Aus den Ergebnissen lässt sich schlussfolgern, dass durch eine Erhöhung der Selektivität beispielsweise durch den Einsatz oder die Kombination weiterer Flotationsmittel oder durch eine mehrstufige Flotation die Ausbringung von Kupfer weiter erhöht werden kann.

(1) *Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) Berlin*



Massen- und Kupferausbringung sowie Kupfer-Anreicherungsfaktor in Abhängigkeit der Korngrößenfraktionen

**Innovationen
 Metall-Forschung:
 Ergebnisse und Trends**
METALL-Mini-Abos für
 Einsteiger!
 Abo-Hotline: 05 11/73 04-122