

Formänderungsanalyse hydroumgeformter Rohre mittels optischer Messsysteme

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. M. Liewald, M.Sc. T.-K. Nguyen

Institut für Umformtechnik (IFU), Universität Stuttgart, Holzgartenstr. 17, 70174 Stuttgart, Germany

Kurzfassung: Dieser Artikel beschreibt die Formänderungsanalyse hydroumgeformter Rohre mittels optischer Messsysteme zur Bewertung der Bauteilqualität. Bei einer Formänderungsanalyse erfolgt die messtechnische Erfassung der Dehnungsverteilung und der Wanddickenreduktion. Hierfür werden speziell entwickelte optische Messmethoden eingesetzt. Der Einsatz optischer Messsysteme führt zu höchster Genauigkeit bei gleichzeitig kurzer Messzeit. Optische Messsysteme erfordern jedoch die Applikation kontrastreicher Gitter oder stochastischer Raster auf dem Blech bzw. dem Rohr vor der Umformung. Dies ist bei ebenen Platinen problemlos möglich, aufgrund der gewölbten Oberflächen jedoch nicht bei Rohrproben. Dieser Artikel beschreibt eine neu entwickelte Vorrichtung zur Aufbringung von Gittern oder wahlweise stochastischen Mustern auf Rohrabschnitten zur optischen Formänderungsanalyse.

Schlagwörter: Innenhochdruck-Umformung (IHU), Formänderungsanalyse, Berasterung

1. Einleitung

Unter Innenhochdruck-Umformung (IHU) versteht man das Aufweiten metallischer Rohre durch hydraulischen Druck von innen in einem geschlossenen Werkzeug. Mit der Innenhochdruck-Umformung lassen sich komplex geformte rohrförmige Hohlkörper aus einem Stück fertigen, die mit anderen Fertigungsverfahren nicht oder nur mehrteilig herstellbar wären. IHU-Bauteile zeichnen sich durch hohe, gleichmäßige Festigkeit und Steifigkeit, optimiertes Gewicht und geometrische Genauigkeit aus.

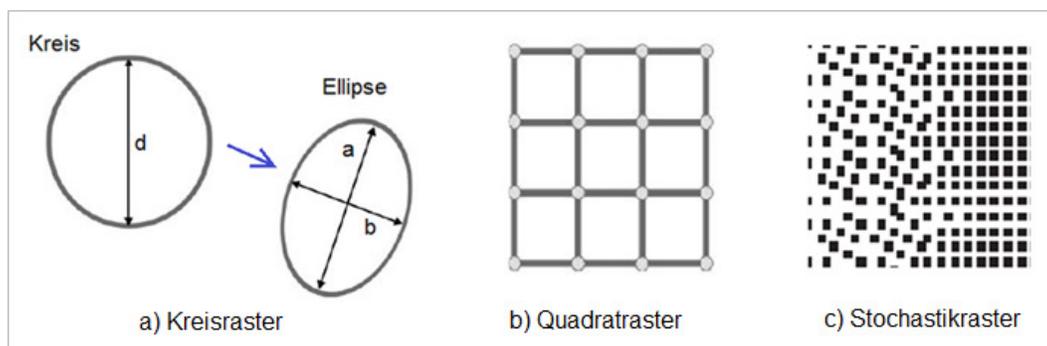


Abb. 1. Praxisübliche Rasterformen zur Dehnungsanalyse auf Bauteiloberflächen.

Zur Formänderungsanalyse umgeformter Blechformteile wurden in der Vergangenheit beispielsweise Kreise auf das Ausgangsmaterial von Hand aufgebracht. Während der Umformung verzerren sich diese Kreise dann zu Ellipsen. Aus der Länge der beiden Hauptachsen der entstehenden Ellipsen lassen sich die Hauptformänderungen bezogen auf den Anfangszustand vor der Umformung berechnen (Abb. 1a). Das verzerrte Raster wurde dazu mit 3D-CCD Kamerasystemen aufgenommen, die Auswertesoftware berechnet daraus die örtlichen Dehnungen der Hauptformänderungsrichtungen der einzelnen Kreiselemente bzw. Ellipsen.

Heutzutage werden spezielle Muster, wie z.B. quadratische Raster oder stochastische Muster ohne großen Zeitaufwand mittels elektrochemischen Verfahren oder Laser aufgebracht, die nach der Umformung mit optischen Messsystemen ausgewertet werden. Abb. 1b und 1c zeigt Beispiele derartiger Quadratraster (für das Messsystem AutoGrid®, Hersteller Vialux) und stochastischer Muster (für das Messsystem ARAMIS®, Hersteller GOM). Bei der Blechumformung werden meistens diese beiden Messverfahren eingesetzt, wobei die Raster elektrochemisch oder per Laser auf das Ausgangsmaterial aufgebracht werden. Eine weitere Möglichkeit bietet das Aufsprühen eines stochastischen Musters durch Graphitpartikel. Da diese Partikel jedoch nur auf der Oberfläche haften und nicht in diese eingebrannt sind, ist hierbei ein Werkzeugkontakt ausgeschlossen, da die Partikel abgerieben werden. Eine detaillierte technische Beschreibung dieser Messverfahren wird in [1-3] gegeben.

Die experimentelle Formänderungsanalyse besteht aus vier Schritten (Abb. 2). Es werden meistens flache Proben bei der Berasterung verwendet. Für die Anwendung bei Rohrabschnitten dagegen muss die Berasterungsmethode modifiziert werden.

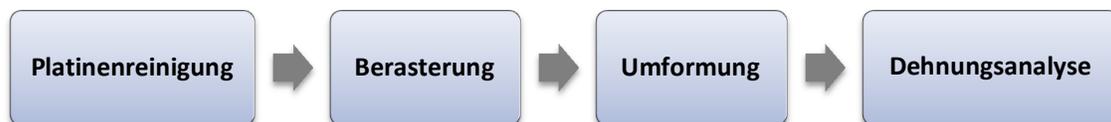


Abb. 2. Einzelschritte der Formänderungsanalyse mit optischen Messsystemen

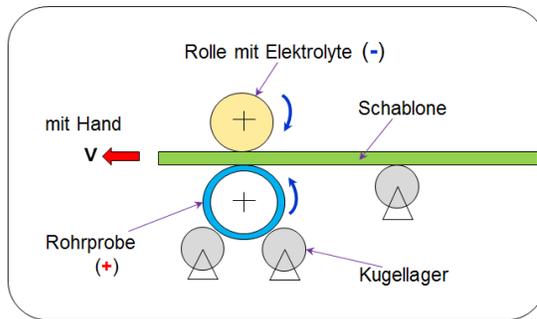
In diesem Artikel wird zuerst eine neu entwickelte Vorrichtung zur Berasterung von Rohrabschnitten vorgestellt und anschließend der Einsatz anhand einer Fallstudie präsentiert.

2. Aufbau einer Vorrichtung für die Rohrberasterung

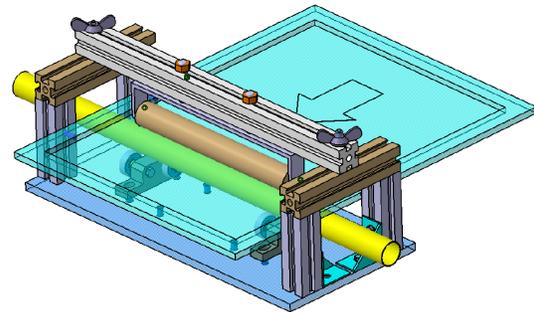
Dieser Abschnitt beschreibt eine am Institut für Umformtechnik (IFU) der Universität Stuttgart neu entwickelte Vorrichtung zur Berasterung von Rohrabschnitten auf Basis der elektrochemischen Applikation. Hiermit können nicht nur Linearraster, sondern auch stochastische Muster auf die Rohrproben aufgebracht werden.

2.1. Verfahrensprinzip

Zunächst wird das Rohr auf Kugellager aufgelegt (Abb. 3a). Die Schablone wird von Hand oder mit einem Motor zwischen die Rolle (negativer Pol) und das Rohrstück (positiver Pol) geschoben.



a) Schematische Darstellung der Vorrichtung



b) Konstruktion der Vorrichtung

Abb. 3. Vorrichtung für die elektrochemische Berasterung (Quelle: IFU/Nguyen)

Bei der elektrochemischen Berasterung ist ein Strom für die Markierung erforderlich. Eine Spannungsquelle (Gleich- oder Wechselstrom, Spannung 24V) wird an die beiden Pole angelegt. Der Strom, der zwischen den beiden Polen durch die leitfähige elektrochemische Flüssigkeit (Elektrolyt) fließt, erzeugt das Raster auf dem Rohrabschnitt. Die aufgebaute Vorrichtung zeigt Abb. 4.

Technische Daten:

Das Rohrraster eignet sich für runde metallische Werkstücke:

- Durchmesser : $d=20\text{mm}..80\text{mm}$
- Rohrlänge: keine Einschränkung
- Rasterbereich: $L < 320\text{mm}$
- Rasterumfang: $\alpha < 355\text{deg.}$
- Geschwindigkeit: $v=2..4 \text{ mm/s}$



Abb. 4. Vorrichtung zur Berasterung von Rohrabschnitten, technische Daten (Quelle: IFU/Nguyen)

Die Rasterqualität hängt erheblich vom Abstand zwischen den beiden Polen sowie von der Bewegung der Schablone bzw. deren Geschwindigkeit ab. Je größer der Abstand, desto dünner bzw. undeutlicher ist das aufgebraute Raster. Die Rasterlinien werden dicker bzw. tiefer, wenn die Schablone langsamer verschoben wird. Die Messgenauigkeit der Dehnung nach [4] ist ca. 0,2% bei einem Rastermaß von 2,0 mm.

2.2. Berasterung mit unterschiedlichen Schablonen

Basierend auf diesem Prinzip sind unterschiedliche Rohrraster mit entsprechenden Schablonen realisierbar. Abb. 5 zeigt beispielhaft mit dieser Vorrichtung aufgebraute Quadratraster und stochastischer Raster, die für das optische Messsystem AutoGrid bzw. ARAMIS geeignet sind.

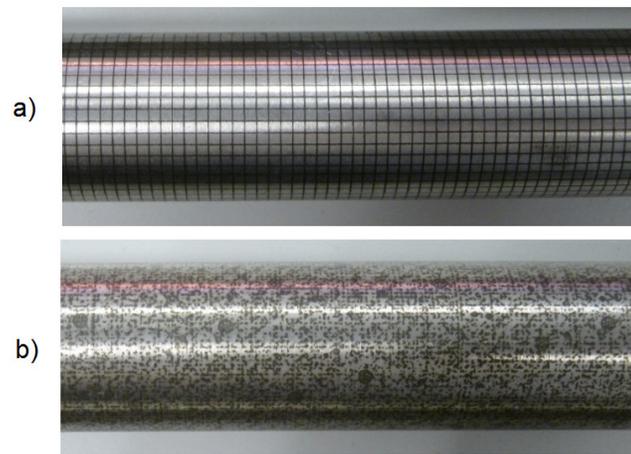


Abb. 5. Quadratraster (a) und stochastischer Raster (b) auf Ausgangrohrstücken

Bei den vorliegenden Experimenten wurden 2 Stahlrohre mit einem Außendurchmesser von 30 mm und einer Wanddicke von 1,0 mm eingesetzt. Die aufgebrachten Raster haben einen kurzen Abstand der Rasterlinien, auch nach der Hydroumformung sind die Raster noch kontrastreich genug, um eine Formänderungsanalyse mit VIALUX vornehmen zu können (Abb. 6).

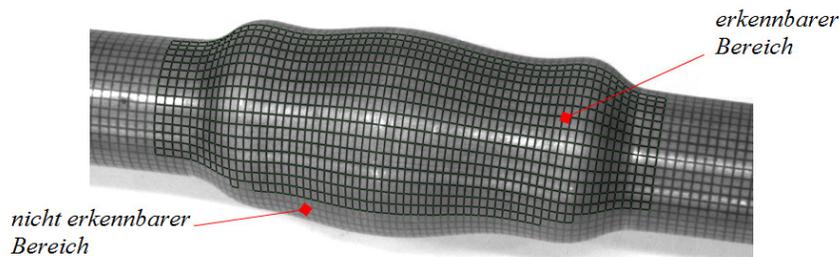


Abb. 6. Quadratraster nach der Hydroumformung

Wegen des Kontrasts der Raster und aufgrund des Kamerawinkels kann nur ein Teil des umgeformten Rohrs optisch erfasst werden. Da nur der umgeformte Zustand von Proben beim System AutoGrid erforderlich ist, wird die Formänderungsanalyse dieser Fallstudie mit diesem System durchgeführt. Beim System ARAMIS dagegen ist sowohl die Vermessung des Anfangs- als auch der Endzustands der Probe erforderlich.

3. Formänderungsanalyse

Im Rahmen der Fallstudie wurden die Ergebnisse der FE-Simulation mit experimentellen Ergebnissen der Hydroumformung von Rohren verglichen. Zur besseren Vergleichbarkeit wurde bei der FEM-Simulation ein Netzabstand mit der gleichen Elementlänge von 2,0 mm wie bei der experimentellen Berasterung gewählt. Das Rohr wurde am IFU durch das Verfahren der Innenhochdruck-Umformung aufgeweitet und anschließend eine Formänderungsanalyse der Umformzone mit dem optischen Messsystem AutoGrid durchgeführt.

Die Rohrmaterial und die Parametereinstellungen sind in der Tabelle 3.1 zusammengefasst.

Tabelle 3.1. Simulationsdaten

Materialmodell:	Isotropie $\sigma=640\epsilon^{0.24}$ (vergl. DC01)
Elementlänge:	2 mm x 2 mm
Wanddicke:	1,0 mm
Reibungszahl:	0,05
Innendruck p_i :	zeitabhängig
Nachschiebeweg:	zeitabhängig

Der Zeitpunkt unmittelbar vor Riss wird der Simulation entnommen. In Abb. 7a ist die maximale Hauptdehnung der jeweiligen Elemente dargestellt. Abb. 7b zeigt die Hauptdehnungsverteilung gemessen mit dem optischen Messsystem VIALUX. Beide Ergebnisse zeigen maximale Dehnungen bei ca. 0,45 und werden in 3 Hauptbereiche geteilt: Umformzone (Führungszone), mittlere Umformung (ϕ bis 0,26) und hohe Umformung (ϕ größerer als 0,26).

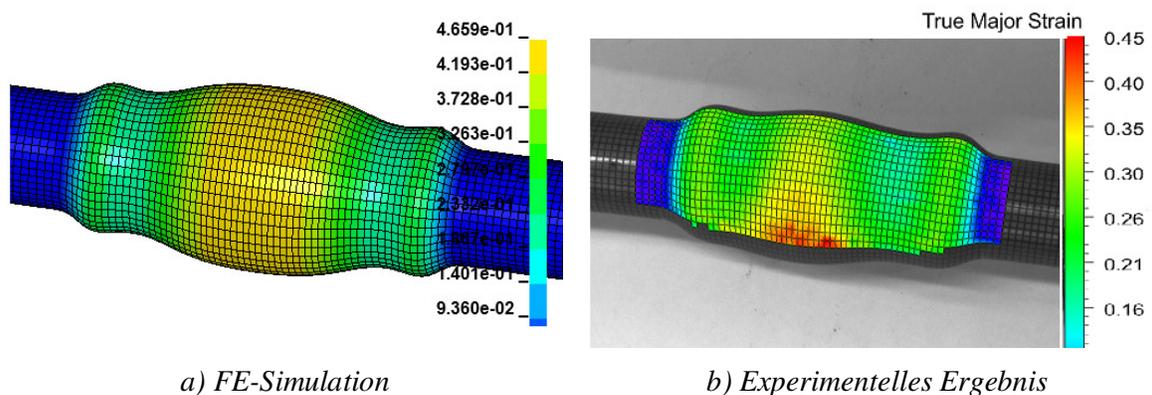


Abb. 7. Hauptdehnungsverteilung (log.)

Durch die Bewertung der per FEM berechneten Wanddickenreduktion (Abb. 8) sieht man deutlich, dass die maximale Ausdünnung ca. 20% beträgt. Weiterhin zeigt sich, dass die FEM-Simulation eine gleichmäßigere Verteilung der Dehnungen und auch der Wanddickenreduktion ergibt im Vergleich zu dem mit VIALUX vermessenen Realteil. Beim Realteil ergeben sich auch kritische Bereiche mit einer Ausdünnung von ca. 20%, was die FEM-Simulation nicht bestätigt.

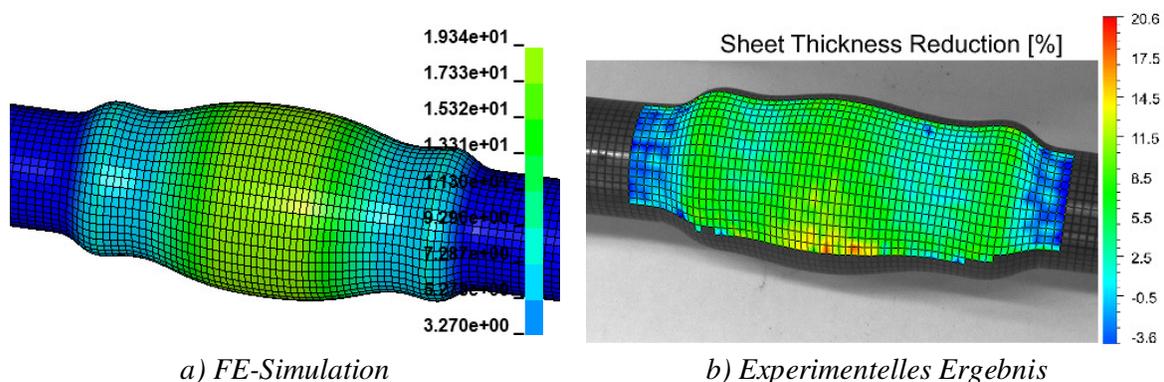


Abb. 8. Wanddickenreduktion in Prozent

Die Abweichung der Ausdünnung der Wanddicke für die höchsten Werte wird quasi wie folgt berechnet:

$$\Delta\% = \text{Ausdünnung (Experiment- Simulation)/Experiment} = 20,6-19,3/20,6 = 6\%$$

Dabei ist zu beachten, dass nur vereinzelte Punkte eine solch große Abweichung besitzen.

4. Zusammenfassung und Ausblick

Dieser Artikel beschreibt die Formänderungsanalyse von per IHU umgeformten Rohren und den dazu erforderlichen Aufbau einer neu entwickelten Vorrichtung zur Aufbringung von Rastern auf Rohrabschnitte. Eine derartige Vorrichtung, mit der unterschiedliche Rasterformen realisierbar sind, ermöglicht somit Formänderungsanalysen sowohl in der Hydroumformung von Rohren als auch im Bereich des Rohrbiegens.

5. Literaturverzeichnis

- [1] R. Höfling, P. Feldmann: Automatische Auswertung von Messrastern zur Dehnungsanalyse, 09. August 2002.
- [2] P. Aswendt, M. Lau: Automatisierte Messung von Umformgraden, Blech Rohre Profile 3 (1999), 26–27.
- [3] W. Voelkner, P. Feldmann, L. Lachmann, K. Andresen: Formänderungen und Spannungen visioplastisch ermitteln. Maschinenmarkt (1997), 114–118.
- [4] VIALUX-AutoGrid: <http://www.vialux.de/HTML/in-process.htm>
- [5] P. Feldmann, M. Schatz: Effective evaluation of FLC-Tests with the optical in-process strain analysis system Autogrid®, Proceedings of the FLC Zurich 2006, 15th – 16th March 2006, IVP, ETH Zurich, Switzerland.
- [6] M. Liewald, S. Wagner, J. Kappes: In-Prozess-Messung der Formänderungen beim pneumatischen Tiefungsversuch, AutoGrid®-Anwenderbericht des Instituts für Umformtechnik (IFU) 2010.