

# ABSCHLUSSBERICHT

## 1 Allgemeine Angaben

DFG-Geschäftszeichen:	STO 1011/18-1
Projektnummer:	413630938
Titel des Projekts:	Untersuchung der Herstellung von mehreren exzentrischen, unrunder Querschnitten mittels Querkeilwalzen
Name(n) des/r Antragstellenden:	Dr.-Ing. Malte Stonis (1. Antragssteller), Koordinierender Geschäftsführer IPH Prof. Dr.-Ing. Bernd-Arno Behrens (2. Antragssteller), Geschäftsführender Gesellschafter IPH
Dienstanschrift/en:	IPH – Institut für Integrierte Produktion Hannover gGmbH, Hollerithallee 6, 30419 Hannover Institut für Umformtechnik und Umformmaschinen (IFUM), Produktionstechnisches Zentrum der Leibniz Universität Hannover / PZH, An der Universität 2, 30823 Garbsen
Name(n) der Mitverantwortlichen:	Keine
Name(n) der Kooperationspartnerinnen und -partner:	Keine
Berichtszeitraum (gesamte Förderdauer):	01.04.2020-31.03.2023

## 2 Zusammenfassung / Summary

Im genannten Berichtszeitraum wurden die Grundlagen zum Walzen unrunder Querschnitte untersucht. Die Untersuchung der Machbarkeit erfolgte zunächst theoretisch mithilfe von FEM-Simulationen (Arbeitspaket (AP) 1-3) und wurde anschließend experimentell (AP 5) evaluiert. Ziel war es, mithilfe eines Querwalzprozesses unter Verwendung von Flachbackenwalzwerkzeugen die Zielformen Ellipse (AP 1), Exzenter (AP 2) und elliptische Exzenter (AP 3) mehrfach lokal in ein sonst zylindrisch bleibendes Halbzeug einzubringen. Die Machbarkeit wurde für das Walzen von Ellipsen und Exzenter bestätigt. Das Walzstück beinhaltet drei zylindrische und zwei auf die Zielform gebrachte Abschnitte. Das Werkzeug wurde modular entwickelt (AP 4). Verschiedene Ansätze zur Berechnung der Werkzeuggravuren wurden bei gleichbleibendem Halbzeugdurchmesser von 45 mm und steigender Ausprägung der Elliptizität und/oder Exzentrizität auf Eignung geprüft. Nach der simulativen Voruntersuchung wurde der jeweilige Lösungsansatz mit der besten Zielformerreicherung gewählt. Für die Zielformen wurden simulative Parameterstudien erstellt. Als Bewertungsgrößen wurden die Zielformerreicherung und Umformkraft definiert. Auf Grundlage der Ergebnisse wurden Parameterkombinationen und Prozessfenster zur Gutteilherstellung identifiziert [Roe22a, Roe22b]. Basierend auf den Ergebnissen der FEM-Simulationen wurde Werkzeuge konstruiert und gefertigt. Es wurden experimentelle Walzversuche durchgeführt. Die Ergebnisse der theoretischen Untersuchung wurden experimentell bestätigt.

During the reporting period, the fundamentals of rolling non-circular cross sections were investigated. This was initially done theoretically with the aid of FEM simulations (work package (WP) 1 - 3) and then evaluated experimentally (WP 5). The aim was to use a transverse rolling process with flat dies to locally introduce the target shapes ellipse (WP 1), eccentric (WP 2) and elliptical eccentric (WP 3) multiple times into an otherwise cylindrical semi-finished product. The Feasibility was confirmed for ellipse and eccentric rolling. The rolled piece includes three cylindrical sections and two sections brought to the target shape. The tool was developed in a modular fashion (WP 4). Various approaches for calculating the tool engravings were tested for suitability with a constant semi-finished product diameter of 45 mm and increasing ellipticity and eccentricity. After a simulative investigation, the approach with the best target shape achievement for each case was selected. Simulative parameter studies were carried out for each target shape. The target shape achievement and forming force were defined as evaluation variables. Based on the results, parameter combinations and process windows for good part production were identified [Roe22a, Roe22b]. Based on the results of the FEM simulations, tools were designed and manufactured. Experimental rolling tests were performed. The results of the theoretical investigation were confirmed experimentally.

### 3 Wissenschaftlicher Arbeits- und Ergebnisbericht

#### 3.1 Ausgangsfragen und Zielsetzung des Projekts

Das Ziel des Forschungsprojekts war die Untersuchung der Möglichkeiten des Querwalzens zur gleichzeitigen Einbringung von mehreren unrunder, exzentrischen Querschnitten in einen zylindrischen Rohteilabschnitt. Folgende Teilziele wurden definiert:

- Als erstes Teilziel soll ein Querwalzprozess zum Walzen von elliptischen Abschnitten entwickelt werden. Unter Beibehaltung des Flächeninhalts soll der Werkstoff lokal so verschoben werden, dass aus dem anfänglich runden ein unrunder Querschnitt wird.
- Als zweites Teilziel soll ein Querwalzprozess zum Walzen von exzentrischen Abschnitten entwickelt werden. Dieser soll unter Beibehaltung des Flächeninhalts den Werkstoff vom Zylinder zum Exzenter radial verschieben.
- Das dritte Teilziel ist die Untersuchung der Kombination von elliptischen und exzentrischen Abschnitten. Unter Zuhilfenahme der vorherigen Untersuchungen soll abschließend untersucht werden, ob und wie sich die beiden untersuchten Querwalzprozesse kombinieren lassen.

#### 3.2 Beschreibung der projektspezifischen Ergebnisse und Erkenntnisse

##### Berechnungskonzepte zur Erzeugung der Werkzeuggravuren für das Unrundwalzen

Die jeweiligen Teilziele zu erreichen, erforderte unterschiedliche Konzepte zur Berechnung der Gravurenverläufe [Roe21]. Ein Gravurenverlauf umschreibt das Profil im Werkzeug, um bei einer translatorischen Bewegung die gewünschte Form in das rotierende Halbzeug einzubringen. Die Gravurenverläufe wie auch Charakteristika für das Walzen von Ellipsen und Exzenter unterscheiden sich (Bild 1).

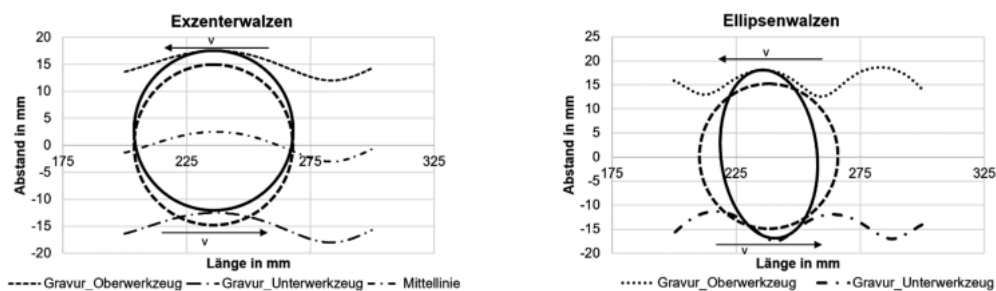


Bild 1: Prinzipielle Darstellung der berechneten, aufeinander angepassten Werkzeuggravuren beim Walzen unrunder Geometrien mit Exzentern (links) und Ellipsen (rechts) und Abrollzylinder (schwarz gestrichelt) nach [Roe21]

Während des Walzens von Ellipsen trifft das lokale Maximum des Oberwerkzeugs auf das lokale Minimum des Unterwerkzeugs. Bei Exzentern hingegen trifft das lokale Maximum des Ober- auf das lokale Maximum des Unterwerkzeugs. Formunabhängig rollt der Grundzylinder

(schwarz gestrichelter Kreis) auf den Abrollstegen ab. Alle Gravurenverläufe sind abhängig vom Abrollwinkel  $\varphi$  (Rotationswinkel zum Start) des Zylinders.

Berechnungskonzepte für das Flachbackenwalzen von Ellipsen

Zur Definition des umformenden Bereichs wurden für das Walzen von Ellipsen drei unterschiedliche Berechnungsansätze erprobt und sind bei ROE ET AL. nachzulesen [Roe22b]. Zwei Ansätze ergeben sich aus der Abrollkinematik der Ellipse. Der letzte (Fall 3) ergibt sich aus dem Berechnungskonzept von PATER ET AL. für das Querwalzen eines Ovals [Pat10]. Eine Zusammenfassung der Berechnungskonzepte aus [Roe22b] ist in Tabelle 1 dargestellt. Fall 1 nutzt die Abrollkinematik der Ellipse mit fixierter Mitte. Fall 2 berechnet die Ellipsenform durch die Abrollkinematik der Ellipse frei auf dem Boden. Fall 3 berechnet die Ellipsenform mithilfe eines Differenzenverfahrens zum Kreisquerschnitt. Simulative Voruntersuchungen haben ergeben, dass Fall 1 die für das Vorhaben besten Ergebnisse erzeugt, sodass hiermit eine Parameterstudie aufgebaut wurde.

Tabelle 1: Zusammenfassung der Berechnungskonzepte für das Walzen von Ellipsen nach [Roe22b]

Fall 1		$x(\varphi) = \varphi \cdot r_0 \tag{1.1}$ $y(\varphi) = \frac{a}{\sqrt{1 - \left(1 - \frac{a^2}{b^2}\right) \cos^2 \varphi}} \tag{1.2}$	
Fall 2		$x_g = \int_{-\frac{\pi}{2}}^{t_0} \sqrt{\left(\frac{d}{dt} a \cos(t)\right)^2 + \left(\frac{d}{dt} b \sin(t)\right)^2} dt \tag{1.3}$ <p>mit:</p> $t_0 = \arctan\left(-\frac{b}{a} \cot(\varphi)\right) + \{\text{mod}(\varphi, 2\pi > \pi: \pi, 0)\} + 2\pi \cdot \text{floor}\left(\frac{\varphi}{2\pi}\right)$ $y_g = y_{roll}(t_0) + b + \frac{a-b}{2} \tag{1.4}$	
Fall 3		$\Delta x_i = \Delta \varphi \cdot r_t \tag{1.5}$ $\Delta r_i = \sqrt{(a \cos(\varphi))^2 + (b \sin(\varphi))^2} \tag{1.6}$	

Parameterstudie zum Flachbackenwalzen von Ellipsen

Es wurde eine Parameterstudie nach dem Stil der statistischen Versuchsplanung durchgeführt. Die Parameter sind in Tabelle 2 gelistet [Roe22a]. Der grundlegende Aufbau der FE-Simulation blieb für alle Kombinationen identisch. Aus diesen wurde ein teilfaktorieller Versuchsplan mit 16 Parameterkombinationen und hoher Auflösung (d. h. Wechselwirkungen unter den Parametern werden vollständig erfasst) erstellt.

Tabelle 2: Auflistung der Parameter des Versuchsplans für das Walzen von Ellipsen (variierende Parameter kursiv dargestellt) nach [Roe22a]

Parameter	Parameterausprägung	
Halbzeugdiameter in mm	45	
Halbzeuglänge in mm	150	
Halbzeugwerkstoff	42CrMo4	
Halbzeugtemperatur in °C	1250	
Werkzeugtemperatur in °C	250	
Verfahrgeschwindigkeit in mm/s	120	
	<i>Minimum</i>	<i>Maximum</i>
<i>Gravurlänge in mm</i>	800	1150
<i>Breite Mittelsteg in mm</i>	0	20
<i>Verschiebungswinkel <math>\alpha</math> in °</i>	45	135
<i>Ausprägung a zu b der Ellipse</i>	1,75	2,5
<i>Breite der Ellipse in mm</i>	15	40

Es wurden zwei Ellipsen in das Halbzeug eingebracht. Als Ergebnisgrößen wurden die Zielformerreichung der ersten (A1) und zweiten Ellipse (A2) in %, der eingebrachte Verschiebungswinkel ( $\alpha$ ) zwischen den Ellipsen in % und die mittlere Temperatur des Walzteils bei Entnahme in °C definiert [Roe22a]. Während die ersten drei Größen auf das geometrische Ergebnis abzielen, hat die Temperatur das Ziel, Torsionseffekte beim Walzen zu mindern, indem der obere Bereich der Halbwarmumformung nicht unterschritten wird. Bild 2 links zeigt das Ergebnis der Parameterstudie als überlagertes Konturdiagramm.

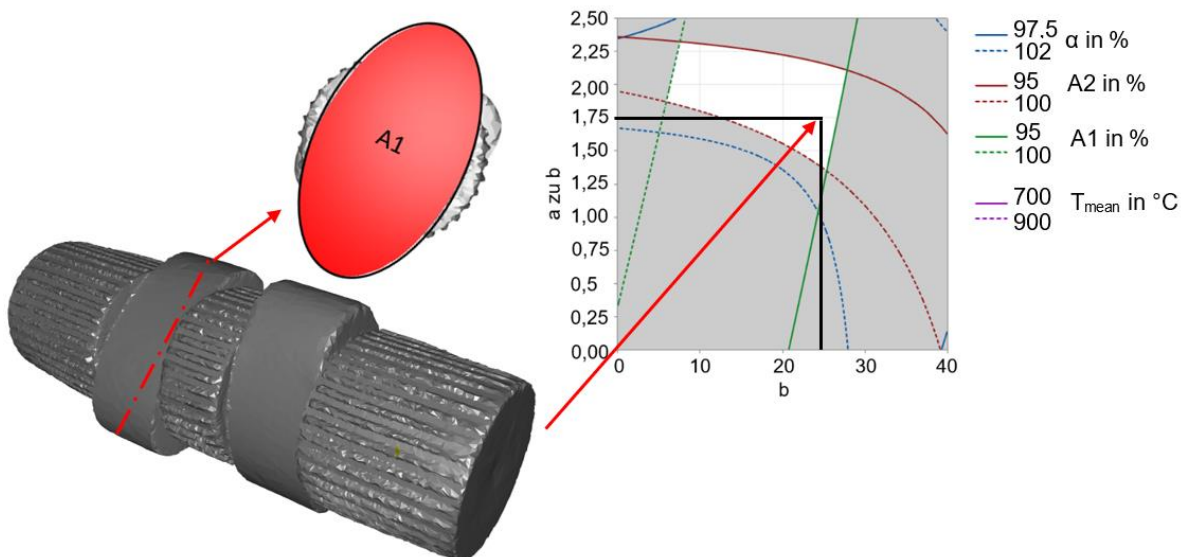


Bild 2: Überlagertes Konturdiagramm für die Formerreichung der ersten Ellipse (A1); Formerreichung der zweiten Ellipse (A2); Verschiebungswinkel  $\alpha$ ; Mittlerer Halbzeugtemperatur ( $T_{\text{mean}}$ ) mit den Haltewerten einer Mittelstegbreite von 20 mm, einer Gravurlänge von 800 mm (rechts) und FEM-Simulationsergebnis (links) nach [Roe22b]

Der weiße Bereich in Bild 2 stellt das Prozessfenster dar, in welchem statistisch bestimmt Gutteile unter Berücksichtigung der jeweiligen oberen und unteren Grenzen hergestellt werden können. Rechts in Bild 2 ist das Ergebnis der FEM-Simulation nach Fall 1 zu erkennen, dessen Parameterkombination sich im Prozessfenster befindet.

### Flachbackenwalzen von Exzentern

Zur Definition des umformenden Bereichs wurden für das Walzen von Exzentern drei unterschiedliche Berechnungsansätze erprobt [Roe22b]. Wie beim Walzen von Ellipsen wird auch hier die Abrollkinematik eines Exzentrers mit hinzugezogen. Beim Abrollprozess wird prinzipiell zwischen einer gestreckten, gespitzten und geschlungenen Zyklode unterschieden (Bild 3).

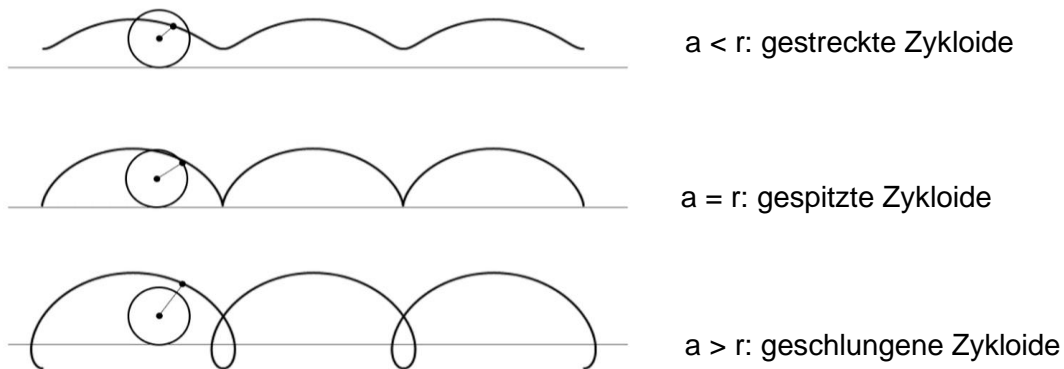


Bild 3: Abrollkurve einer gestreckten (oben), gespitzten (Mitte) und geschlungenen Zyklode (unten) nach [Erv11]


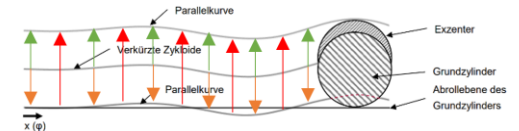
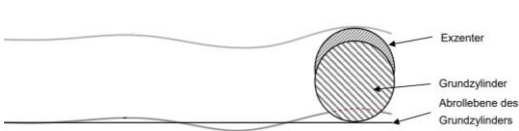
Die Funktion der Zyklode nimmt hierbei Bezug zum Mittelpunkt des Exzentrers. Hierbei wird der Abstand  $a$  des Mittelpunkts der Zyklode zum Grundzylinder mit dem Radius  $r$  des Grundzylinders in Zusammenhang gebracht [Erv11]. Eine Abrollkinematik mit einer Schlaufe (geschlungene Zyklode) ist für das Flachbackenwalzen unzulässig, da diese im Werkzeug zum Loch führen. Die Position des Halbzeugs variiert während des Walzens geringfügig, sodass diese Löcher zu Defekten am Walzteil aber auch am Werkzeug selbst führen können.

### Berechnungskonzepte für das Flachbackenwalzen von Exzentern

Zur Definition des umformenden Bereichs wurden für das Walzen von Exzentrer ebenfalls mehrere unterschiedliche Berechnungsansätze erprobt und sind [Roe22a] zu entnehmen (vgl. Tabelle 3). Im ersten Fall wird die Gravur mithilfe einer Parallelkurve mit dem Abstand des Radius ( $r$ ) zur Zyklode berechnet. Der Radius  $r$  entspricht dem Grundzylinderradius (Abrollzylinder),  $\varphi$  dem Abrollwinkel und  $l$  der Steigerungsrate des Exzentrers pro Umdrehung [Roe21]. Im zweiten Fall (grün und orange) wird ein winkelabhängiger Offset mit Abstand  $r$  nach oben und unten berechnet. Im dritten Fall (orange und rot) wird ein winkelabhängiger Offset zur Mittellinie der Zyklode mit Abstand  $r$  nach unten und anschließend ein weiterer Offset mit

Abstand des Durchmessers ( $d$ ) zum ersten Offset nach oben bestimmt. Im vierten Fall wird der Ansatz nach PATER ET AL. erprobt [Pat10]. Hierbei ist der  $x$ -Wert eine Laufvariable, der  $y$ -Wert ergibt sich aus den Gleichungen (1.12) für das Ober-, (1.13) für das Unterwerkzeug. Die Variable  $e$  ist dem Steigungsterm  $l$  aus Fall 1 gleichzusetzen.

Tabelle 3: Zusammenfassung der Berechnungskonzepte für das Walzen von Exzentern nach [Roe22a]

Fall 1		$x(\varphi) = r \cdot \varphi - l \cdot \varphi \cdot \sin(\varphi) \quad (1.7)$	
Fall 2+3		$x(\varphi) = r \cdot \varphi - l \cdot \varphi \cdot \cos(\varphi) \quad (1.9)$	
Fall 4		$x \in N \quad (1.11)$	
		$y_O = r_0 + e \cdot \sin\left(\frac{x}{r_0}\right) \quad (1.12)$	
		$y_U = -r_0 + e \cdot \sin\left(\frac{-x}{r_0}\right) \quad (1.13)$	

Simulative Voruntersuchung zeigten, dass die Fälle 1 bis 3 stark zu geschlungenen Zykloiden neigen und dadurch geringere Exzentrizitäten zulassen als Fall 4. Weitere Schwierigkeiten waren stellenweiser Kontaktverlust und Quetschungen im Formgebungsbereich, insbesondere bei Fall 2 und 3. Die Ergebnisse von Fall 4 wiesen für die Parameterstudie die besten Eigenschaften auf, sodass dieses Rechenkonzept weiterverfolgt wurde.

### Parameterstudie zum Flachbackenwalzen von Exzentern

Es wurde eine Parameterstudie nach dem Stil der statistischen Versuchsplanung durchgeführt. Die Parameter sind in Tabelle 4 links gelistet. Die Parameter wurden an die des Ellipsenwalzens angeglichen, um eine modulare Bauweise des Werkzeugs zu ermöglichen. Der teilfaktorielle Versuchsplan umfasst 16 Parameterkombination und weist eine hohe Auflösung zur Erfassung von Wechselwirkungen auf. Nach Abschluss der ersten Parameterstudie hat sich gezeigt, dass aufgrund vermeidbaren Auftretens von Defekten eine zweite, modifizierte Studie notwendig ist. Die Ergebnisse für Walzungen mehrerer unmittelbar aufeinanderfolgenden Exzenter mit Winkelverschiebung haben nicht den Anforderungen entsprochen. Die Walzteile wiesen unzulässige Deformationen und andere Defekte auf. Die in der modifizierten Studie verwendeten Parameter sind in Tabelle 4 rechts gelistet. Anders als beim Ellipsenwalzen hat sich für das Exzenterwalzen gezeigt, dass ein gefaster Einlauf in die Gravurenbereiche vorteilhaft ist (Bild 4), um Defekte zu vermeiden, das Walzteil im Werkzeug zu zentrieren und die Formgebung zu verbessern. Die Breite  $b$  dieser Fase wurde als neuer Parameter der 2. Studie ergänzt.

Tabelle 4: Auflistung aller Parameter des ersten und zweiten Versuchsplans für das Walzen von Exzentrern (variierte Parameter kursiv dargestellt) nach [Roe22b]

Parameter	Versuchsplan 1	Versuchsplan 2
Halbzeugdurchmesser in mm	45	45
Halbzeuglänge in mm	150	150
Halbzeugwerkstoff	42CrMo4	42CrMo4
Halbzeugtemperatur in °C	1250	1250
Werkzeugtemperatur in °C	250	250
Verfahrgeschwindigkeit in mm/s	120	120
<i>Gravurlänge in mm</i>	<i>850; 1150</i>	1150
<i>Breite Mittelsteg in mm</i>	<i>0; 20</i>	20
<i>Verschiebungswinkel <math>\alpha</math> in °</i>	<i>45; 135</i>	45; 135
<i>Exzenterbreite in mm</i>	<i>15; 40</i>	15; 40
<i>Exzentrizität <math>dy</math> in mm</i>	<i>11,25; 14,625</i>	11,25; 14,625
<i>Fasenausprägung in mm</i>	0	2,5; 5



Bild 4: Walzteil ohne Fase (links) und mit Fase (rechts)

Als Ergebnisgrößen wurden die Abweichung zur idealen Rundheit des ersten ( $ru_1$ ) und zweiten Exzentrers ( $ru_2$ ) in mm, die Exzentrizität des ersten ( $dy_1$ ) und zweiten ( $dy_2$ ) in % wie auch der eingebrachte Verschiebungswinkel ( $\alpha$ ) in % definiert [Roe22a]. Alle Ergebnisgrößen zielten somit auf geometrische Aspekte. Bild 5 links zeigt das Ergebnis als überlagertes Konturdiagramm. Die unteren und oberen Grenzen der Ergebnisgrößen wurden hierbei berücksichtigt. Rechts ist das Ergebnis der FEM-Simulation für den vierten Fall dargestellt, welcher ebenfalls für die experimentelle Evaluierung gewählt wurde.

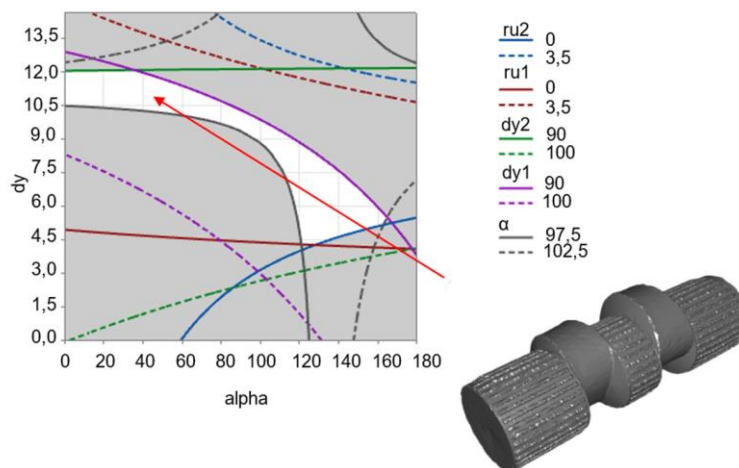


Bild 5: Konturdiagramm für die Rundheit des zweiten Exzentrers ( $ru_2$ ); Rundheit des ersten Exzentrers ( $ru_1$ ); Exzentrizität am zweiten Exzenter ( $dy_2$  in %); Exzentrizität am ersten Exzenter ( $dy_1$  in %); Verschiebungswinkel  $\alpha$  mit den Haltewerten Fasenausprägung 2,5 mm nach [Roe22a]



### Werkzeugaufbau für das Walzen unrunder Formelemente

Jedes Werkzeug des Werkzeugpaars verfügt unabhängig von der zu erreichenden Zielform über zwei Gravuren, drei Stege und zwei Begrenzungswände [Roe22]. Die Gravuren beschreiben hierbei den aktiv umformenden Bereich des Walzwerkzeugs. Jeder Steg verfügt über gleich dimensionierte Nuten, um während der Rotation des Halbzeugs auf dem Steg einen Kraft- und Formschluss zu realisieren und somit Rutschen zu unterbinden. Die Oberfläche wird somit geringfügig mit einem verzahnungsähnlichen Muster geprägt. Die Werkzeugwände arbeiten dem axialen Stofffluss des Materials entgegen und stellen somit einen überwiegend radialen Stofffluss sicher. Über einen Rahmen wird das modulare Werkzeug am Querwalzmodul angebracht (Bild 6). Das Querwalzmodul wird über horizontale Hydraulikzylinder und einen Schlitten angetrieben. Der Aufbau setzt sich zusammen aus einer Isolierplatte, einer Heizplatte und dem Werkzeug. Horizontale Kräfte werden durch einen Block abgefangen. Über verbaute Messtechnik wurden verschiedene Daten des Prozesses erfasst (z. B. Kraft, Weg, Temperatur). Die Heizplatte aus Aluminium verfügt über Bohrungen für Heizpatronen (630 W). Die Werkzeugtemperatur während der Versuchsdurchführung betrug 200 °C.

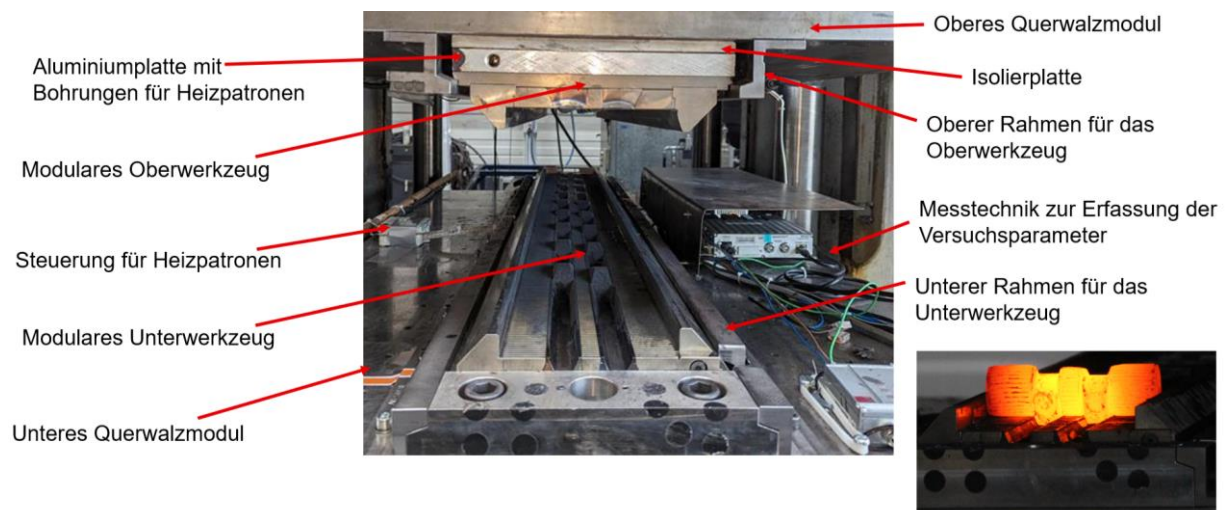


Bild 6: Aufbau des Werkzeugsystems in der realen Umgebung (links), beispielhaftes Versuchsergebnis (rechts)

### Experimentelle Evaluierung des Walzens unrunder Querschnitte

Für die experimentellen Versuche wurden Halbzeuge mit einer Länge von 148 mm (150 mm in Simulation), und einem Durchmesser von 44 mm (45 mm in Simulation). Die realen Halbzeuge sind im kalten Zustand kleiner, da die Expansion des Halbzeugs durch den Einfluss der Temperatur (1250 °C) hinzugerechnet werden muss. Erwärmt wurden die Halbzeuge aus 42CrMo4 in einem Kammerofen. Bild 7 zeigt das Walzergebnis für das Einbringen von Ellipsen (oben), Exzenter (unten) und es bestätigt somit die simulativen Untersuchungen in der realen Versuchsumgebung.



Bild 7: Walzergebnis für das Ellipsen (oben) und Exzenter (unten)

Der Umformprozess setzte sich aus einem Anstauchen (Schließen der hydraulischen Presse) und horizontalem Flachbackenwalzen zusammen. Das Anstauchen von 1 mm galt dem Entfernen von Zunder durch die Erwärmung im Kammerofen, das Walzen diente der Formgebung. Die horizontale Maximalkraft laut Simulation betrug für das Ellipsenwalzen 7 t und für das Exzenterwalzen 5,85 t. Für dieselbe Parameterkombination betrugen diese in der realen Umgebung 6,1 t für das Walzen von Ellipsen und 5,15 t für Exzenter. Bild 8 zeigt exemplarisch je ein Ergebnis des Einwalzens von Exzentern und von Ellipsen. Das Verzahnungsmuster auf den Abrollzylindern stammt von den Nuten am Steg. Die Unebenheiten in der Oberflächentopologie lassen sich durch abgeplatzten Zunder auf den Gravuren erklären.

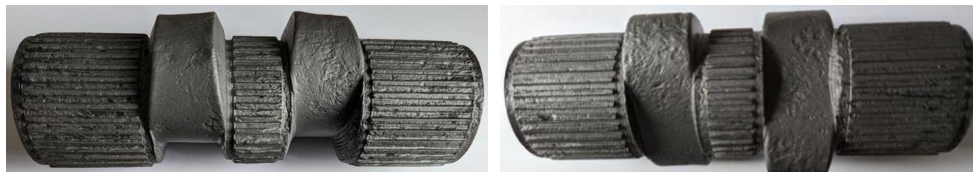


Bild 8: Ergebnis der experimentellen Versuche mit Exzentern (links) und Ellipsen (rechts)

## 4 Veröffentlichte Projektergebnisse

### 4.1 Publikationen mit wissenschaftlicher Qualitätssicherung

- Roe22a Roe, C.; Hedicke-Claus, Y.; Meer, H.; Stonis, M.; Behrens, B.-A.: Unrundwalzen – FEM-Parameterstudie zum Walzen von Exzenter. In: Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb (ZWF), o. Jg. (2022), H. 7/8, DOI 10.1515/zwf-2022-1097.
- Roe22b Roe, C.; Kriwall, M.; Stonis, M.; Behrens, B.-A.: Parameterstudie zum Walzen von Ellipsen. In: Werkstattstechnik online (wt online), Bd. 112 (2022), H. 10/11, S. 677-682, DOI 10.37544/1436-4980-2022-10-47.

### 4.2 Weitere Publikationen und öffentlich gemachte Ergebnisse

- Roe21 Roe, C.; Kriwall, M.; Stonis, M.; Behrens, B.-A.: Unrundwalzen – Walzen unrunder Querschnitte. In: Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb (ZWF): Bd. 116 (2021), H. 7-8, S. 456-459, DOI 10.1515/zwf-2021-0113
- Roe22 Roe, C.; Selmi, K.: Walzwerkzeuge für unrunde Formen automatisiert konstruieren. In: phi – Produktionstechnik Hannover informiert, Newsletter Nr. 34 / März 2022, ISSN: 2198-1922. DOI: 10.48811/phi-22-003

### 4.3 Patente (angemeldete und erteilte)

- entfällt -

## Literaturverzeichnis

- [Erv11] Erven, J; Schwägerl, D.; Mathematik für Ingenieure. In: Oldenbourg Wissenschaftsverlag GmbH, 4. korrigierte Auflage, Oldenbourg Verlag München, 2011, S. 211, ISBN 978-3-486-59746-2
- [Pat10] Pater, Zbigniew: Development of Cross-Wedge Rolling Theory and Technology. In: Steel Research International, Vol. 81(9), 2010, S. 25-32.
- [Roe21] Roe, C.; Kriwall, M.; Stonis, M.; Behrens, B.-A.: Unrundwalzen – Walzen unrunder Querschnitte. In: Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb (ZWF): Bd. 116 (2021), H. 7-8 , S. 456-459, DOI 10.1515/zwf-2021-0113
- [Roe22] Roe, C.; Selmi, K.: Walzwerkzeuge für unrunde Formen automatisiert konstruieren. In: phi – Produktionstechnik Hannover informiert, Newsletter Nr. 34 / März 2022, ISSN: 2198-1922. DOI 10.48811/phi-22-003
- [Roe22a] Roe, C.; Hedicke-Claus, Y.; Meer, H.; Stonis, M.; Behrens, B.-A.: Unrundwalzen – FEM-Parameterstudie zum Walzen von Exzenter. In: Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb (ZWF), o. Jg. (2022), H. 7/8, DOI 10.1515/zwf-2022-1097.
- [Roe22b] Roe, C.; Kriwall, M.; Stonis, M.; Behrens, B.-A.: Parameterstudie zum Walzen von Ellipsen. In: Werkstattstechnik online (wt online), Bd. 112 (2022), H. 10/11, S. 677-682, DOI 10.37544/1436-4980-2022-10-47.